第七届
国际泥石流会议：
灾难、风险、预测、防治
中国成都，2024年9月23日至27日

7th International Conference

DEBRIS FLOWS:
DISASTERS, RISK, FORECAST, PROTECTION

Chengdu, China
September 23-27, 2024

7-я
международная конференция
СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: КАТАСТРОФЫ,
РИСК, ПРОГНОЗ, ЗАЩИТА
Чэнду, Китай
23-27 сентября 2024 г.

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 7th International Conference

Chengdu, China, 23–27 September 2024

Edited by
S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
Moscow
2024

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
7-й Международной конференции

Чэнду, Китай, 23–27 сентября 2024 г.

Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2024

泥石流：
灾害、风险、预测、防治

會議記錄

第七届国际会议

中国成都, 2024年9月23日至27日

編輯者
S.S. Chernomorets, K. Hu, K. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
莫斯科
2024

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). – Ed. by S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC. 622 p.

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2024. 622 с.

泥石流：灾害、风险、预测、防治. 會議記錄 第七届国际会议. 中国成都. 編輯者 S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – 莫斯科: Geomarketing LLC. 622 p.

ISBN 978-5-6050369-6-8

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), К. Ху (Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (Lomonosov Moscow State University), K. Hu (Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS), K.S. Viskhadzhieva (Lomonosov Moscow State University).

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).

Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman's book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

© Селевая ассоциация

© Debris Flow Association

Conference organizers and partners

Debris Flow Association

Asian Network of Debris Flow

Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

Chongqing Institute of Green and Intelligent Technologies, Chinese Academy of Sciences

Far East Geological University, FEB RAS

State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University

Institute of Earth Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

Landslide and Engineering Slope Branch of Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering

State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University

Institute of Care-Life, ChengDu / Sichuan University

China National Meteorological Centre

China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences

Alliance of International Science Organizations on Disaster Risk Reduction

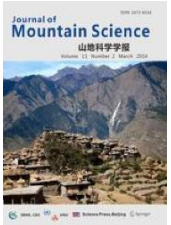
Landslide and Debris Flow Professional Committee of the China Association for Disaster Prevention

Financial support

Chinese Academy of Sciences

Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences

Information partners



Journal of Mountain Science

Hydrosphere. Hazard Processes and Phenomena

GeoRisk World

Организаторы и партнеры конференции

Селевая ассоциация

Азиатское селевое сообщество

Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет

Чунцинский институт зеленых и интеллектуальных технологий Китайской академии наук

Дальневосточный геологический университет Дальневосточного отделения РАН

Государственная ключевая лаборатория гидравлики и гидротехники горных рек Сычуаньского университета

Институт земной коры Сибирского отделения РАН

Отделение оползней и инжиниринга склонов Китайского общества горной механики и инжиниринга

Государственная ключевая лаборатория гидрологии и инжиниринга, Университет Цинхуа

Институт ухода за жизнью, Чэнду / Сычуаньский университет

Китайский национальный метеорологический центр

Китайско-Пакистанский совместный исследовательский центр по наукам о Земле

Альянс международных научных организаций по снижению риска стихийных бедствий

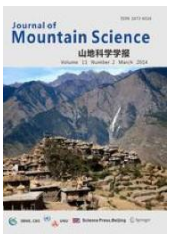
Профессиональный комитет по оползням и селям Китайской ассоциации по предотвращению стихийных бедствий

Финансовая поддержка

Китайская академия наук

Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук

Информационные партнеры



Journal of Mountain Science

Гидросфера. Опасные процессы и явления

ГеоРиск

Organizing Committee of the Conference

Co-Chairs

Kaiheng Hu (Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS)

Sergey Chernomorets (Debris Flow Association and Lomonosov Moscow State University, Russia)

Fangqiang Wei (Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, and Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, China)

Sven Fuchs (University of Natural Resources and Life Sciences BOKU, Austria)

Secretary General

Xiaojun Guo (Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, China)

Members

Mingtao Ding (School of Earth Science and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, China)

Givi Gavardashvili (Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of the Georgian Technical University, Georgia)

Yumei Li (China National Meteorological Centre, China)

Elena Savernyuk (Lomonosov Moscow State University, Russia)

Yongbo Tie (Department of Geological Safety Assessment, Chengdu Center of China Geological Survey, China)

Karina Viskhadzhieva (Lomonosov Moscow State University, Russia)

Wenpei Wang (China Institute of Geo-environment Monitoring, China)

Dongxia Yue (Resources and Environment College of Lanzhou University, China)

Gordon Zhou (Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, China)

Academic Advisory Committee

Chair

Peng Cui (Member of CAS, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, China)

Members

Mukhtar Bekkiev (High-Mountain Geophysical Institute, Russia)

Marco Borga (University of Padova, Italy)

Chaojun Ouyang (Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, China)

Ningsheng Chen (Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, China)

Tien-Chien Chen (Engineering College, National Pingtung University of Science and Technology, Taiwan, China)

Ali Fazylov (Institute of Water Problems, Hydropower Engineering and Ecology, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Tajikistan)

Xudong Fu (School of Civil Engineering, Tsinghua University, China)

James Smith Gardner (Department of Geography, University of Manitoba, Canada)

Pinggen Zhou (China Institute of Geo-environment Monitoring, China)

Rinaldo Genevois (formerly University of Padova, Italy)

Yuriy Gensiorovskiy (Far East Geological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Russia)

Xiewen Hu (School of Earth Science and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, China)

Murat Kasenov (State Institution "Kazselezashchita", Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, Kazakhstan)

Xingmin Meng (School of Earth Sciences, Lanzhou University, China)

Ko-Fei Liu (Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taiwan, China)

Akhmetkal Medeu (Institute of Geography and Water Security of Kazakhstan, Kazakhstan)

Bolot Moldobekov (Central-Asian Institute for Applied Geosciences, Kyrgyzstan)

Alessandro Pasuto (CNR-IRPI Italian National Research Council – Research Institute for Geo-Hydrological Protection, Italy)

Maxim Petrov (Abdullaev Institute of Geology and Geophysics, State Committee for Geology and Mineral Resources of the Republic of Uzbekistan, Uzbekistan)

Marina Pirulli (Politecnico di Torino, Italy, and representative of the DFHM Series IOC)

Artyom Rybchenko (Institute of Earth Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Russia)

Sergey Sokratov (Lomonosov Moscow State University, Russia)

Chuan Tang (Chengdu University of Technology, China)

Aleksandr Strom (Hydroproject Institute, Russia)

Stara Tarikhazer (Institute of Geography named after academician Hasan Aliyev, Azerbaijan)

Tun Wang (Institute of Care-Life, ChengDu/ Sichuan University, China)

Xiekang Wang (State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, China)

Roza Yafyazova (National Hydrometeorological Service of Kazakhstan, Kazakhstan)

Eduard Zaporozhchenko (Debris Flow Association, Russia)

Dimitry Znamensky (Brazilian Committee on Large Dams, Brazil)

Оргкомитет конференции

Сопредседатели Оргкомитета

Кайхэн Ху (Ключевая лаборатория горных опасностей и геоморфологических процессов, Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук, Китай)

Сергей Черноморец (Селевая ассоциация и Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия)

Фанцян Вэй (Чунцинский институт зеленых и интеллектуальных технологий Китайской академии наук и Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук, Китай)

Свен Фукс (Университет природных ресурсов и наук о жизни, Австрия)

Генеральный секретарь Оргкомитета

Сяоцзюнь Гуо (Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук, Китай)

Члены Оргкомитета

Вэньпэй Ван (Институт геоэкологического мониторинга Китая, Китай)

Карина Висхаджиева (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия)

Гиви Гавардашвили (Институт водного хозяйства имени Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета, Грузия)

Минтао Дин (Школа наук о Земле и экологической инженерии, Юго-Западный университет Цзяотун, Китай)

Юймэй Ли (Китайский национальный метеорологический центр, Китай)

Елена Савернюк (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия)

Юнбо Те (Департамент оценки геологической безопасности, Центр Китайской геологической службы в Чэнду, Китай)

Гордон Чжоу (Ключевая лаборатория горных опасностей и геоморфологических процессов, Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук, Китай)

Дунся Юэ (Колледж ресурсов и окружающей среды Университета Ланьчжоу, Китай)

Академический консультативный комитет

Председатель Академического консультативного комитета

Пэн Цуй (академик Китайской академии наук, Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук, Китай)

Члены Академического консультативного комитета

Мухтар Беккиев (Высокогорный геофизический институт, Россия)

Марко Борга (Падуанский университет, Италия)

Секан Ван (Государственная ключевая лаборатория гидравлики и инженерии горных рек, Сычуаньский университет, Китай)

Тунь Ван (Институт ухода за жизнью, Чэнду/Сычуаньский университет, Китай)

Джеймс Смит Гарднер (Факультет географии Университета Манитобы, Канада)

Юрий Генсиоровский (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия)

Эдуард Запорожченко (Селевая ассоциация, Россия)

Дмитрий Знаменский (Бразильский комитет по большим плотинам, Бразилия)

Ринальдо Женевуа (ранее – Падуанский университет, Италия)

Мурат Касенов (ГУ «Казселезащита», МЧС Республики Казахстан, Казахстан)

Ко-Фей Лю (Кафедра гражданского строительства, Национальный Тайваньский университет, Тайвань, Китай)

Ахметкал Медеу (Институт географии и водной безопасности Казахстана, Казахстан)

Болот Молдобеков (Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Кыргызстан)

Синминь Мэн (Школа наук о Земле, Университет Ланьчжоу, Китай)

Чаоцзюнь Оуян (Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук, Китай)

Алессандро Пасуто (CNR-IRPI Итальянский национальный исследовательский совет – Научно-исследовательский институт гидрогеологической защиты, Италия)

Максим Петров (Институт геологии и геофизики имени Абдуллаева Государственного комитета геологии и минеральных ресурсов, Узбекистан)

Марина Пирулли (Туринский политехнический институт, Италия, и представитель Международного оргкомитета серии конференций DFHM)

Артём Рыбченко (Институт земной коры СО РАН, Россия)

Сергей Сократов (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия)

Александр Стром (Институт Гидропроект, Россия)

Чуань Тан (Технологический университет Чэнду, Китай)

Стара Тарихазер (Институт географии имени академика Гасана Алиева, Азербайджан)

Али Фазылов (Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Академии наук Республики Таджикистан, Таджикистан)

Сюдун Фу (Школа гражданского строительства Университета Цинхуа, Китай)

Севэнь Ху (Школа наук о Земле и экологической инженерии, Юго-Западный университет Цзяотун, Китай)

Дянь-Цзянь Чжэн (Инженерный колледж Национального Пиндунского университета науки и технологий, Тайвань, Китай)

Ниншэн Чэн (Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук, Китай)

Пингэн Чжоу (Китайский институт геоэкологического мониторинга, Китай)

Роза Яфязова (Национальная гидрометеорологическая служба Республики Казахстан, Казахстан)

Preface

This volume contains the Proceedings of the **7th conference "Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection" (Chengdu, China, September 23–27, 2024).**

Debris flows in mountainous regions cause significant damage to the economy, and often lead to casualties among the population. To solve the debris flow problem, the cooperation of experts from different countries is required. One of the forms of such cooperation is the holding of conferences on "Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection". The conference in China is the seventh and continues the series of conferences under the indicated name, held in Pyatigorsk (2008), Moscow (2012), Yuzhno-Sakhalinsk (2014), Irkutsk and Arshan (2016), Tbilisi (2018), Dushanbe and Khorog (2020, due to pandemic held in a reduced correspondence format).

The initiator of the conferences is the Debris Flow Association, founded in 2005 in Pyatigorsk, Russia. The Debris Flow Association continues the traditions established by the Commissions for the study of the Kazbek blockages in the 19th century and the Debris Flow Commission of the USSR Academy of Sciences, which worked from 1948 to the end of the 1980s. At present, the Debris Flow Association is the world's largest association of specialists in Debris Flow protection and protection, which now includes 189 experts from 24 countries.

The conference in China was organized by the Debris Flow Association, Asian Network of Debris Flow, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences with the participation of Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography; Chongqing Institute of Green and Intelligent Technologies, Chinese Academy of Sciences; Far East Geological University, FEB RAS; Landslide and Engineering Slope Branch of Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering; State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University; Institute of Earth Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University; Institute of Care-Life, ChengDu / Sichuan University; China National Meteorological Centre; Landslide and Debris Flow Professional Committee of the China Association for Disaster Prevention; China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences; Alliance of International Science Organizations on Disaster Risk Reduction.

Conference website: **www.debrisflow.ru/en/df24**.

Here we publish the Proceedings of the conference. It includes 62 articles, the authors of which are experts from Austria, Azerbaijan, China, Cuba, France, Georgia, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Morocco, Pakistan, Russia, Switzerland, Tajikistan, Türkiye, and Uzbekistan. Titles of articles, surnames of authors, abstracts and keywords are given in Russian and English, the main text is written in one of the indicated languages. The main information partner of the conference is Geomarketing LLC, which publishes part of the articles selected by the Organizing Committee in the Georisk World journal (No. 4 for 2023 and No. 1 for 2024) and in special issue of the Journal of Mountain Science.

Sergey Chernomorets (Debris Flow Association and Lomonosov Moscow State University, Russia)

Kaiheng Hu (Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, China)

Karina Viskhadzhieva (Debris Flow Association and Lomonosov Moscow State University, Russia)

Предисловие

В настоящем сборнике публикуются труды **7-й конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита» (Чэнду, Китай, 23–27 сентября 2024 г.).**

Селевые потоки в горных регионах наносят значительный ущерб хозяйству и нередко приводят к жертвам среди населения. Для решения селевой проблемы требуется сотрудничество экспертов из различных стран. Одной из форм такой кооперации является проведение конференций «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Конференция в Китае является седьмой и продолжает серию конференций под указанным названием, проводившихся в Пятигорске (2008), Москве (2012), Южно-Сахалинске (2014), Иркутске и Аршане (2016), Тбилиси (2018), Душанбе и Хороге (2020, из-а пандемии проведена в заочном формате).

Инициатором конференций является Селевая ассоциация, основанная в 2005 г. в Пятигорске. Селевая ассоциация продолжает традиции, заложенные Комиссиями по изучению Казбекского завала в XIX веке и Селевой комиссии Академии наук СССР, работавшей с 1948 г. до конца 1980-х годов. В настоящее время Селевая ассоциация является самым крупным в мире объединением специалистов по селям и защите от них, в котором на данный момент состоят 189 экспертов из 24 стран.

Конференция в Китае организована Селевой ассоциацией, Азиатским селевым сообществом, Институтом горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук при участии следующих организаций: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет; Чунцинский институт зеленых и интеллектуальных технологий Китайской академии наук; Дальневосточный геологический университет Дальневосточного отделения РАН; Отделение оползней и инжиниринга склонов Китайского общества горной механики и инжиниринга; Государственная ключевая лаборатория гидравлики и гидротехники горных рек Сычуаньского университета; Институт земной коры Сибирского отделения РАН; Государственная ключевая лаборатория гидрологии и инжиниринга, Университет Цинхуа; Институт ухода за жизнью, Чэнду / Сычуаньский университет; Китайский национальный метеорологический центр; Профессиональный комитет по оползням и селям Китайской ассоциации по предотвращению стихийных бедствий; Китайско-Пакистанский совместный исследовательский центр по наукам о Земле; Альянс международных научных организаций по снижению риска стихийных бедствий.

Сайт конференции: **www.debrisflow.ru/df24**.

В сборник трудов конференции вошли 62 статьи, авторами которых являются специалисты из Австрии, Азербайджана, Грузии, Казахстана, Китая, Кубы, Кыргызстана, Марокко, Пакистана, России, Таджикистана, Турции, Узбекистана, Франции и Швейцарии. Названия статей, фамилии авторов, резюме и ключевые слова приведены на русском и английском языках, основной текст – на одном из указанных языков. Часть статей, отобранных Оргкомитетом, публикуется в журналах «Геориск» (№4 за 2023 и №1 за 2024 годы) и выпуске Journal of Mountain Science.

Сергей Черноморец (Селевая ассоциация и Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия)

Кайхэн Ху (Ключевая лаборатория горных опасностей и геоморфологических процессов, Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук, Китай)

Карина Висхаджиева (Селевая ассоциация и Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия)

Влияние деградации горного оледенения горы Эльбрус на селевую активность

А.Х. Аджиев, Н.В. Кондратьева

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, adessa1@yandex.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования селевых процессов на южном склоне горы Эльбрус на высотах около 3000м над уровнем моря на водотоках рек Гарабаши, Азау и их притоках, стекающих с одноименных ледников. Выполнены оценки объемов селей. Показано, что селевые процессы на высотах более 3000 м н.у.м. обусловлены деградацией горного оледенения и отступлением ледников. Природные условия южного склона Эльбруса благоприятны для формирования селевых потоков по руслам водотоков. На крутых склонах морен отмечается формирование микроселей.

Ключевые слова: *селевые процессы, оледенение, деградация ледников, ледники, морены, Приэльбрусье*

Ссылка для цитирования: Аджиев А.Х., Кондратьева Н.В. Влияние деградации горного оледенения горы Эльбрус на селевую активность. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 10–16.

Influence of degradation of mountain glaciation of Mount Elbrus on debris flow activity

A.Kh. Adzhiev, N.V. Kondratyeva

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, adessa1@yandex.ru

Abstract. This paper presents the results of a study of debris flow processes on the southern slope of Mount Elbrus at altitudes of about 3000 m above sea level on the watercourses of the Garabashi, Azau rivers and their tributaries flowing from the glaciers of the same name. Estimates of debris flow volumes have been made. It has been shown that debris flow processes at altitudes of more than 3000 meters above sea level are caused by the degradation of mountain glaciation and the retreat of glaciers. The natural conditions of the southern slope of Elbrus are favorable for the formation of debris flows along the beds of watercourses. On the steep slopes of moraines, the formation of microdebris is observed.

Key words: *debris flow processes, glaciation, glacier degradation, glaciers, moraines, Elbrus region.*

Cite this article: Adzhiev A.Kh., Kondratyeva N.V. Influence of degradation of mountain glaciation of Mount Elbrus on debris flow activity. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 10–16.

Введение

Селевые процессы Приэльбрусья относится к числу наиболее изученных районов РФ. Первые научные работы по исследованию селевой деятельности были начаты 1960-е гг. Наблюдения за селевыми процессами с 1960-х гг. здесь ведут Высокогорный геофизический институт и Эльбрусская учебно-научная станция МГУ

имени М.В. Ломоносова. Детальная информация о причинах и последствиях схода селевых потоков в Приэльбрусье, датах схода, объеме селевых потоков систематизирована в работах [*Кадастр селевой опасности юга европейской части России, 2015, Сейнова И.Б., 1992, Аджиев и др. 2020]*.

На южном склоне Эльбруса селевая деятельность отмечаются в бассейнах рек Азау (верховья р. Баксан), М. Азау, Гарабаши и Терскол. В бассейне р. Азау селеносным является орографически правый ручей, текущий от ледника М. Азау. В предполье этого ледника обнаружены отложения мощного селя, сошедшего в 1940-е гг. [*Сейнова, 1992*]. 19 июля 1978 г. был зафиксирован сель, причиной которого был прорыв приледникового озера площадью около 5000 м^2. При прорыве воды в крутом эрозионном врезе длиной в 600 м сформировался грязекаменный поток. Затем сель прошел по языку ледника Б. Азау длиной в 1,8 км, покрыв грязью его поверхность. Ниже фронта ледника произошла трансформация грязекаменного селя в водокаменный сель. Последняя, типичная для водокаменного селя волна остановилась в створе у станции МГУ.

В данной работе представлены результаты исследования селевых процессов на южном склоне горы Эльбрус на высотах около 3000 м над уровнем моря на водотоках рек Гарабаши, Азау и их притоках, стекающих с одноименных ледников. Выполнены оценки объемов селей. Показано, что селевые процессы на высотах более 3000 м н.у.м. обусловлены деградацией горного оледенения и отступлением ледников. Природные условия южного склона Эльбруса благоприятны для формирования селевых потоков по руслам водотоков. На крутых склонах морен отмечается формирование микроселей.

Активность селевых процессов определяется на южном склоне горы Эльбрус, прежде всего, значительными масштабами перигляциальной зоны, которая увеличивается по мере отступания ледников. Авторами разработана карта селевых бассейнов и составлен кадастр параметров селевых очагов. Выполнен корреляционный анализ взаимосвязи изменения климата с активизацией селей и отступанием ледников. Показано изменение площади ледников Эльбруса (Малый Азау, Гарабаши, Терскол) за 1957–2022 гг. В 2022 г. площадь ледников Эльбруса составила около 105 км^2. Высокие темпы деградации ледников Эльбруса сохранились и составляют за последние годы 1,2 км^2/год.

Материалы и методы исследования

Оценка влияния деградации горного оледенения горы Эльбрус на селевую активность в водотоках Азау, Гарабаши и их притоках выполнена на основе следующих материалов:

- метеорологических данных на метеостанции Терскол за период наблюдений 1957–2023 гг. Метеостанция Терскол расположена у подножья г. Эльбрус на высоте 2144 м над уровнем моря. Для анализа отобраны многолетние значения среднегодовой температуры теплого периода и количество осадков за год;
- космические и аэрофотоснимки языковой части ледников Гарабаши, Малый Азау и Терскол в различные годы. По снимкам определялись границы ледников в различные годы;
- данные полевых обследований авторов приледниковой зоны в различные годы. Авторы ведут мониторинг гляциальных процессов на южном склоне горы Эльбрус более 30 лет;
- архивные данные о селепроявлениях, материалов изысканий и исследований прошлых лет об условиях развития опасных процессов на исследуемой и прилегающей территории.

В качестве основного временного репера для изучения динамики ледников нами выбран 1957 г., так как формирование архива данных для данной территории начато с этого года. Интенсивное развитие в последние годы спутникового дистанционного зондирования позволило получить адекватную информацию о границах ледников. Для

оценки современного состояния ледников и выявления тенденции их изменения было использовано более 20 аэро- и космоснимков.

На рис. 1 показана схема выше указанных ледников на территории исследований с контурами границ ледников в 1957 и 2023 гг.

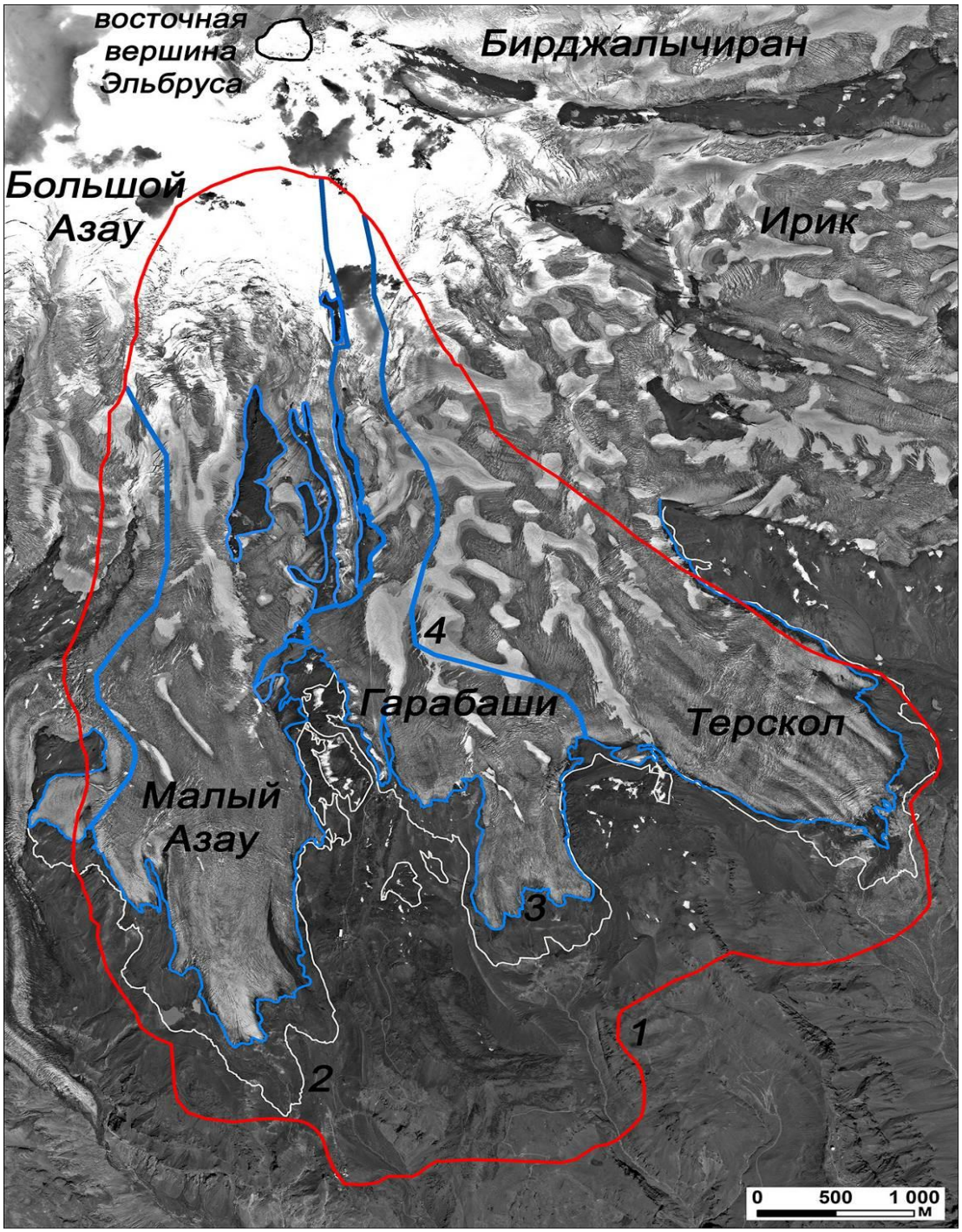


Рис. 1. Схема ледников Малый Азау, Гарабаши, Терскол и территории исследований на космоснимке со спутника Pleiades 23 августа 2023 г.: 1 – граница территории исследования, 2 – контуры ледников в 1957 г., 3 – контуры ледников в 2023 г., 4 – ледоразделы.

Деградация вышеуказанных ледников в различные периоды показаны также в ряде работ [*Васильчук Ю.К., 2010, Золотарев Е.А., 2009, Золотарев Е.А., 2012*]. Отступание ледников приводит к высвобождению значительных объемов грязекаменной массы.

На рис. 2 и 3 представлены участки приледниковой территории на высоте 3380 м.

Рис. 2. Участок у языка ледника Гарабаши, оголившийся в последние годы

Рис. 3. Селевой вал на высоте около 3100 м (устье р. Гарабаши)

Моренные и флювиогляциальные отложения формируются в предпольях ледников и ниже них по долинам рек Гарабаши, М. Азау и их притоков. Следует отметить, что гидрологический режим указанных рек формируется большим количеством притоков, например у р. Гарабаши 9 притоков, истоки которых расположены на одноименном

леднике. На восточной части южного склона горы Эльбрус рыхлые отложения представлены фрагментарно и сели не отмечены.

Благоприятными для селеформирования на южном склоне Эльбруса являются скопления рыхлых отложений на притоках рек Малый Азау и Гарабаши. К ним относятся береговые морены и скопления обвально-осыпных отложений в прирусловых участках. Крутые внутренние склоны береговых морен способствуют формированию микроселей. На участках, где морены прорезаются руслами водотоков, могут формироваться селевые врезы. Геологические условия благоприятствуют накоплению потенциальных селевых массивов в руслах водотоков (рис. 4).

Рис. 4. Участок левого притока р. Гарабаши, где морены прорезаются руслами водотоков и сформировались селевые врезы. Характер поверхности в прирусловой части р. Гарабаши ниже ее выхода с ледника

Трещиноватый характер лав на участках отступления ледников приводит к уменьшению поверхностного стока за счет фильтрации, что лимитирует активность склоновых селей. Максимальная глубина слоя рыхлых отложений близ русла водотоков не превышает 2 м. Такой же характер поверхности сохраняется до выполаживания продольного профиля соленосных водотоков.

Основной причиной активизации селевых процессов на высотах более 3100 м является отступание ледников. Специфика селевого режима ограничивает селевую деятельность на высотах более 3100 м июлем-началом сентября. По долине ручьев без названия, вытекающих из-под ледника Гарабаши ниже фронта ледника, могут проходить селевые потоки высотой фронта не более 2 м, расходом до 65 $м^3$ /с и максимальной скоростью до 5,1 м/с. Оценка выполнена в соответствии с требованиями ВСН 03-76 [*Инструкция по определению расчетных характеристик дождевых селей ВСН 03-76. Гидрометеоиздат, 1976*]. По долине ручья М. Азау (левый исток) формирование селевых потоков возможно с высоты около 3000 м. Отступание ледников и активизация селевых процессов характерна и для других участков Кавказского горного массива [*Докукин М.Д., 2012, Докукин М.Д. и др. 2012*].

Термический режим территории исследования

Динамика ледников зависит от соотношения аккумуляции и абляции. Два фактора – термический режим и количество осадков определяют изменения размеров и объемов льда в ледниках [*Frank Paul, 2015*]. По данным метеостанции Терскол среднегодовое количество осадков на территории исследования за анализируемый период не изменилось. Термический режим территории, занятой исследуемыми ледниками, характеризуется как район с резко выраженным континентальным климатом и вертикальной зональностью. Он наиболее близок к термическому режиму на метеостанциях «Пик Терскол» и «Чегет» (около 3100 м).

По их данным температура воздуха в исследуемом районе имеет резко выраженный годовой ход с минимальной средне зимней температурой 2,6 °С и максимальной температурой летом 11,4 °С. Наблюдается достаточно теплая осень, 3,7 °С, по сравнению с более прохладной весной, 1,8 °С.

По полученным результатам статистического анализа данных за весь период исследования с 1957 по 2023 гг. (66 лет) годовые, весенние и осенние температуры оставались практически постоянными с небольшой отрицательной тенденцией их уменьшения (–0,03°С/10 лет, –0,04°С/10 лет и –0,05°С/10 лет соответственно). Средние зимние температуры уменьшались со скоростью –0,16°С/10 лет, их скорость уменьшения сравнима со скоростью увеличения средних летних температур +0,17°С/10 лет. Летние температуры также отличались максимальной величиной вклада тренда в суммарную дисперсию (D = 10%).

С середины 1970-х гг. изменение термического режима исследуемого района по данным м/станции Терскол происходило за счет значительного роста средних летних температур при относительной стабильности других среднесезонных температур. Текущее десятилетие (2013–2023 гг.) характеризуется ростом среднезимних и средневесенних температур, с наиболее значимым вкладом за счет увеличения абсолютных максимумов температур. У среднелетних и среднеосенних температур наблюдается небольшая отрицательная тенденция с наибольшим вкладом в нее абсолютных минимумов температур.

В результате проведенного корреляционного анализа между среднесезонными температурами м/станции Терскол и характеристиками деградации ледника Гарабаши авторами получено, что весьма высокая зависимость скорости изменения, как общей площади, так и его правого языка наблюдается от изменения средних летних температур за 66-летний период исследования.

Выводы

По результатам исследования динамики ледников Малый Азау, Гарабаши и Терскол можно сделать следующие выводы:

С использованием данных космических снимков, аэрофотоснимков и термического режима оценены темпы деградации ледников Малый Азау, Гарабаши и Терскол. Показано, что за последние 66 лет их деградация происходили на фоне стабильных среднегодовых температурных условий.

Термический режим играет важную роль в процессе отступания ледников Центрального Кавказа. Причинами деградации исследуемых ледников являются значительные положительные аномалии летних температур. Показано, что в 21 в. произошло увеличение темпов деградации ледников под действием роста среднесуточных летних температур. Это вызвано усилением скорости роста летних температур до 0,4°С/10 лет в период глобального потепления с 1976 г. по настоящий период.

Основной причиной активизации селевых процессов на южном склоне г. Эльбрус на высотах более 3100 м является отступание ледников. Специфика селевого режима ограничивает селевую деятельность на высотах более 3100 м июлем-началом сентября. По долине ручьев без названия, вытекающих из-под ледника Гарабаши ниже фронта ледника, могут проходить селевые потоки высотой фронта не более 2 м, расходом до 65 м^3/с и максимальной скоростью до 5,1 м/с.

Финансирование

Работа выполнена за счет средств гранта «Создание карт и кадастра приледниковых озер на Северном Кавказе и оценка рисков чрезвычайных ситуаций, вызванных возможным их прорывом» Российского научного фонда (Соглашение № 24-27-20006).

Список литературы

Кадастр селевой опасности юга европейской части России. Отв. ред. канд. геогр. наук, доцент Н.В. Кондратьева. Нальчик: Печатный двор, 2015.

Сейнова И.Б. Селевые потоки Баксанской долины. – Сб. Природопользование Приэльбрусья. М., МГУ, 1992, С. 85–106.

Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Кондратьева Н.В., Юрченко Н.В. Современное состояние ледников Большого Кавказа. Нальчик, ООО «Фрегат», 2020. 132 с.

Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Буданцева Н.А., Мухина Ю.С. Быстрое сокращение ледника Большой Азау в Приэльбрусье на фоне стабильных климатических условий и возникающие при этом риски. ГеоРиск, № 2, 2010. – С.16–29.

Золотарев Е.А. Эволюция оледенения Эльбруса. Картографо-аэрокосмические технологии гляциологического мониторинга. М.: Научный мир. 2009. – 258 с.

Золотарев Е.А., Харьковец Е.Г. Эволюция оледенения Эльбруса после малого ледникового периода // Лед и снег. 2012. № 2 (118). – С. 15–22.

Инструкция по определению расчетных характеристик дождевых селей ВСН 03-76. Гидрометеоиздат, 1976

Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Багов А.М., Маркина А.В. О перестройке гидрографической сети северо-восточного подножия Эльбруса (бассейны рек Бирджалы-Су и Кара-Кая-Су) // Лед и снег. 2012. № 2 (118). – С. 23–30.

Докукин М.Д., Савернюк Е.А. Наступание ледников в конце XX века как фактор активизации гляциальных селевых процессов (Центральный Кавказ) // Труды Второй конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита», посвященной 100-летию С.М. Флейшмана. Отв. ред. С.С. Черноморец. – М.: Географический факультет МГУ, 2012. – С. 31– 32.

Frank Paul, Andreas Bauder, Christoph Marty, Jeannette Notzli. Schnee, Gletscher und Permafrost. Kryospharenbericht fur die Schweizer Alpen // DIE ALPEN, September 2015, pp. 46–52.

Распространение и особенности проявления селей на всесезонном туристско-рекреационном комплексе «Мамисон»

А.Х. Аджиев[1], Н.В. Кондратьева[1], А.Л. Кортиев[2], З.М. Керефова[1]

[1]Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, zknyaz-kbsu@mail.ru

[2]Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия, info@skgmi-gtu.ru

Аннотация. В статье приведены результаты рекогносцировочного обследования района Всесезонного туристско-рекреационного комплекса «Мамисон» (ВТРК «Мамисон»). Полевые работы проводились в июле 2023 г.
Территорию ВТРК «Мамисон» можно отнести к недостаточно изученной с точки зрения селевой деятельности. В прошлом мероприятии по защите от селей для территории изыскания не проводилось.
На территории исследования выявлено 16 водотоков с признаками прохождения селей. Определено, что объемы селей варьируют от 1000 до 50 000 м^3, очень редко (1 раз в 50 лет) могут превышать 100 000 м^3. Показано, что гидрометеорологические условия (таяние снега, осадки) оказывают основное влияние на селепроявления на территории ВТРК. В районе исследования могут иметь место сели дождевого, снего-дождевого и гляциально-дождевого генезиса. Проведена оценка селевой опасности ВТРК «Мамисон».
На основе обработки данных полевых обследований и анализа архивных материалов построена карта селевой опасности на территории ВТРК «Мамисон».
Полученные результаты, имеют практическую значимость при освоении горных территорий и должны учитываться при проектировании объектов инфраструктуры ВТРК «Мамисон».

Ключевые слова: *горные территории, природные процессы, климат, метеопараметры, сели, температура воздуха, осадки, курорт, бассейн, генезис, селевая опасность, селевой очаг*

Ссылка для цитирования: Аджиев А.Х., Кондратьева Н.В., Кортиев А.Л., Керефова З.М. Распространение и особенности проявления селей на всесезонном туристско-рекреационном комплексе «Мамисон». В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 17–27.

Spread and features of the manifestation of debris flows at the all-season tourist and recreational complex “Mamison”

A.Kh. Adzhiev[1], N.V. Kondratyeva[1], A.L. Kortiev[2], Z.M. Kerefova[1]

[1]Natural Phenomena of Alpine Geophysical, Nalchik, Russia, zknyaz-kbsu@mail.ru

[2]North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia, info@skgmi-gtu.ru

Abstract. The article presents the results of a reconnaissance survey of the area of the All-season tourist and recreational complex “Mamison” (VTRK “Mamison”). Field work was carried out in July 2023. The territory of VTRK Mamison can be attributed to insufficiently studied from the point of view of debris flow activity. In the past, no debris flow protection measures were carried out for the survey area. 16 watercourses with signs of debris flows were identified in the study area. It is determined that the volume of debris flows varies from 1000 to 50 000 m^3, very rarely (1 time in 50 years) they can exceed 100 000 m^3. It is shown that hydrometeorological conditions (snowmelt, precipitation) have a major impact on debris flows on the territory of the VTRK. There may be debris flows of rain, snow-

rain and glacial-rain genesis in the study area. An assessment of the debris flow hazard of the Mamison TTRK was carried out.
Based on the processing of field survey data and the analysis of archival materials, a debris flow hazard map was built on the territory of the Mamison VTRK.
The results obtained are of practical importance in the development of mountainous areas and should be taken into account when designing infrastructure facilities at the Mamison VTRK.

Key words: *mountainous areas, natural processes, climate, meteorological parameters, debris flows, air temperature, precipitation, resort, pool, genesis, debris flow hazard, debris flow origination site*

Cite this article: Adzhiev A.Kh., Kondratyeva N.V., Kortiev A.L., Kerefova Z.M. Spread and features of the manifestation of debris flows at the all-season tourist and recreational complex "Mamison". In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 17–27.

Введение

Территория Северной Осетии – Алании имеет значительный потенциал для рекреационного освоения [*Бероев, 1984, Вагин, 1998*]. Одним из благоприятных таких районов является высокогорное ущелье Мамисон, где сливаются реки Земегондон и Козыдон, которые, ниже по руслу, образуют реку Мамихдон.

Правительством РФ было принято решение о создании всесезонного туристско-рекреационного комплекса «Мамисон» (далее – ВТРК «Мамисон») на территории Алагирского района Республики Северная Осетия – Алания. Здесь планируется создание курорта мирового уровня. Развитие туристической отрасли региона предполагает организации около 3 тыс. новых рабочих мест, что будет очень полезно для экономики республики.

Одним из препятствий эффективного освоения горных территорий является селевые процессы, которые в республике РСО-Алания достаточно хорошо изучены и весьма частое явление [*Агибалова, 1980, Агибалова, 1983, Аджиев, 2013, Виленкин, 1955, Герасимов, 1978, Сергеева, 2020,Кадастр селевой опасности, 2015, Кадастр лавинно-селевой опасности Северного Кавказа, 2001*]. Селевые потоки (сели) – возникающий в руслах горных рек поток воды со значительными включениями глины, камней, валунов и других твердых материалов. Причины возникновения: сильные и длительные ливни, а также интенсивное таяние снега или ледника в результате которых происходит значительное обводнение грунтов и обрушение их в русла рек [*Перов, 2012*]. Формирование селей разрушает горные склоны и делает их непригодными к хозяйственному использованию.

Селевой режим территории ВТРК «Мамисон» практически не изучен. Только в последние годы начались аэровизуальные наблюдения Главным управлением МЧС России по Северной Осетии – Алания и Северо-Осетинским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СО ЦГМС). Однако, этих данных недостаточно для статистического анализа о сходах селей и определении их показателей. Выявление условий селеобразования направлено на предотвращение возможного ущерба от этих процессов.

Цель исследований: оценка селевой опасности в районе ВТРК «Мамисон». Определение селевых факторов на рассматриваемой территории для принятия обоснованных решений по защите от их негативного воздействия.

Объект исследований

Территория ВТРК «Мамисон» расположена на Центральном Кавказе в основном на северном макросклоне. Протяженность курорта – 48 км с севера на юг и на 26 км с запада на восток. Общая площадь 7183 га. Занимает наиболее высокую часть Главного

хребта с мощным оледенением, а также восточную часть Бокового хребта, который сливается здесь с Главным хребтом у массива Цеяхох (4139 м). Боковой хребет представлен хребтом Саудор. С севера участок ограничен Скалистым хребтом. Сюда же входят Среднеурухская котловина с долиной р. Айгамуга и Ардонская котловина с долиной р. Ардон. Обе котловины являются частью Северо-Юрской депрессии, имеющей транскавказское протяжение. Частично территория курорта захватывает и котловину между Главным и Южным Боковым (Водораздельным) хребтами на южном макросклоне. На западе участок занимает часть Дигорской котловины между Главным и Боковым хребтами.

Территория комплекса, находящаяся в котловине между Главным и Южным Боковым (Водораздельным) хребтами является отдельной частью с особыми географическими условиями. Всесезонный туристско-рекреационный комплекс «Мамисон» и прилегающая территория находятся в верховьях реки Ардон, долинах рек Мамихдон, Земегондон, Козыдон в высокогорном поясе на отметках от 1800–3800 м н.у.м. Непосредственно участок изысканий пересекают горные реки: Мамихдон, Земегондон и их притоки [*Аджиев, 2014*].

Материалы и методы исследования

Анализ селевой изученности района изысканий выполнен на основе опубликованной научно-технической информации, архивных и фондовых материалов, предыдущих отчетов по инженерным изысканиям территории ВТРК «Мамисон».

Оценка селевой опасности проведена методом натурного специализированного полевого обследования с привлечением на стадии обработки материала и получения результатов работ всей совокупности, имеющейся по рассматриваемому району полевой, архивной, научно-технической и исследовательской информации. Полевые работы по оценке селевой опасности выполнены в июле 2023 г.

На территории Всесезонного туристско-рекреационного комплекса ВТРК «Мамисон» к природным факторам селеформирования относятся геологические, геоморфологические и климато-ландшафтные факторы [*Кесаонов, 2016, Тавасиев, 2013*]. Антропогенный фактор здесь также со временем будет играть большую роль в связи с интенсивным хозяйственным освоением района [*Караев, 2013, Атлас, 2007, Кондратьева, 2015, Круподеров, 2014, Тавасиев, 2007*].

Результаты исследований

Геологический фактор. Согласно [*Тавасиев, 2013*], в геологическом плане состав ущелья Мамисон представляет собой нижнюю часть юрского глинистого сланца, мергелевого известняка, песчаника, туфа, туфопесчаника. Когда породы подвергаются выветриванию, они дают много мелкозернистого материала и создают крутые склоны и шлейфы, которые являются местами возникновения очагов селей. Район характеризуется широким распространением рыхлых отложений, значительным подтоплением склонов, большими запасами сыпучих веществ в очагах селей.

Долина Мамисона – широкая горная долина, хорошо развитая четвертичными ледниками и реками из легких глинистых сланцев в конце юрского периода. Восточные склоны долины более крутые, с множеством каньонов и стоков, а также несколькими многоводными водотоками, стекающими со склона к основному руслу. Западные склоны более пологие с травянистым покровом; вершины окружающих гор более округлые [*Кесаонов, 2016*].

Кроме того, имеются оползневые участки по берегам рек Земегондон, Козидон, Гибитандон, Бубидон и Камсхо, где при сильных осадках возможен смыв грязекаменной массы с бортов реки.

Температура воздуха имеет выраженный годовой ход. Наиболее значительные изменения среднемесячной температуры воздуха отмечаются в весеннее и осеннее время. Максимальных значений температура воздуха достигает в конце июля – начале

августа. Климат здесь умеренно континентальный до высоты 2000 м над уровнем моря. Температура июля – в среднем плюс 16–20 °С.

На территории исследования отмечается летний максимум осадков. Суточный максимум осадков на всех высотных уровнях превышает 100 мм, что соответствует критерию опасного гидрометеорологического явления в селеопасных районах по СП 11-103-97.

Таким образом, интенсивные жидкие осадки способствуют селеформированию, а температура воздуха ограничивает формирование селевых потоков выше участка изысканий периодом с мая по сентябрь.

Растительность может ограничивать развитие селей, но в некоторых местах, таких как альпийские луга, оползни и осыпные склоны, растительность может отсутствовать, что способствует развитию эрозии, особенно в очагах селей. Примечательно, что внутренние склоны ледников Земегендон и Козедон и осыпные шлейфы у их основания также лишены растительности.

Территория ВТРК «Мамисон» характеризуется значительными запасами эрозионного материала, которые образуются в результате деятельности лавин, эрозии склонов, осыпей, обвалов, оползней.

Результаты работ по оценке селевой опасности на территории ВТРК «Мамисон»

Основная река ущелья Мамихдон (или Мамисон), истоками которой являются реки Козыдон (левый приток Земегондона) и Земегондон.

По результатам рекогносцировочного обследования района, в рамках работы («Разработка инновационных методов диагностирования и прогнозирования лавинно-селевых явлений, деградации горного оледенения и разработка рекомендаций по защите от их негативного воздействия на рекреационные комплексы ВТРК «Мамисон») на ВТРК и прилегающей территории выявлено 16 водотоков с признаками прохождения селей (таблица 1, рис. 1–6).

Таблица 1. Водотоки на территории ВТРК «Мамисон» прилегающей территории с признаками селепроявления

№ п/п	Название реки	Куда впадает	Рисунок
1	р. Земегондон	р. Мамихдон	2
2	р. Козидон	р. Земегондон	3
3	р. Гибитандон	р. Земегондон	3
4	Верховья р. Мамихдон	р. Мамихдон	4
5	р. Камсхо	р. Мамихдон	5
6	р. Дозорный	р. Мамихдон	-
7	р. Лисридон	р. Мамихдон	-
8	Безымянный ручей № 1	правый приток р. Мамихдон	6
9	Безымянный ручей № 2	левый приток р. Мамихдон	-
10	Безымянный ручей № 3	левый приток р. Мамихдон	7
11	р. Халаца	правый приток р. Мамихдон	8
12	Безымянный ручей № 4	левый приток р. Мамихдон	9
13	Безымянный ручей № 5	левый приток р. Мамихдон	-
14	Безымянный ручей № 6	левый приток р. Мамихдон	-
15	р. Кайтиком	правый приток р. Земегондон	-
16	р. Дзуариком	правый приток р. Земегондон	-

Полевые исследования показывают, что почти все притоки и сам Мамихдон являются селеносными. Сели происходят не часто, о чем свидетельствует площадь лишайников на селевых отложениях. Анализ архивных спутниковых снимков показывает, что частота селей в районе обследования составляет в среднем один раз в три-пять лет, что подтверждают данные [*Кадастр селевой опасности, 2015*].

В руслах некоторых притоков селевых конусов выноса, при обследовании, обнаружено не было, но поскольку здесь присутствует эрозия бортов, то игнорировать в

них селевой опасностью не следует, они являются потенциально селевыми. Истоки Мамихдона – Козидон и Земегондон – также являются селеносными.

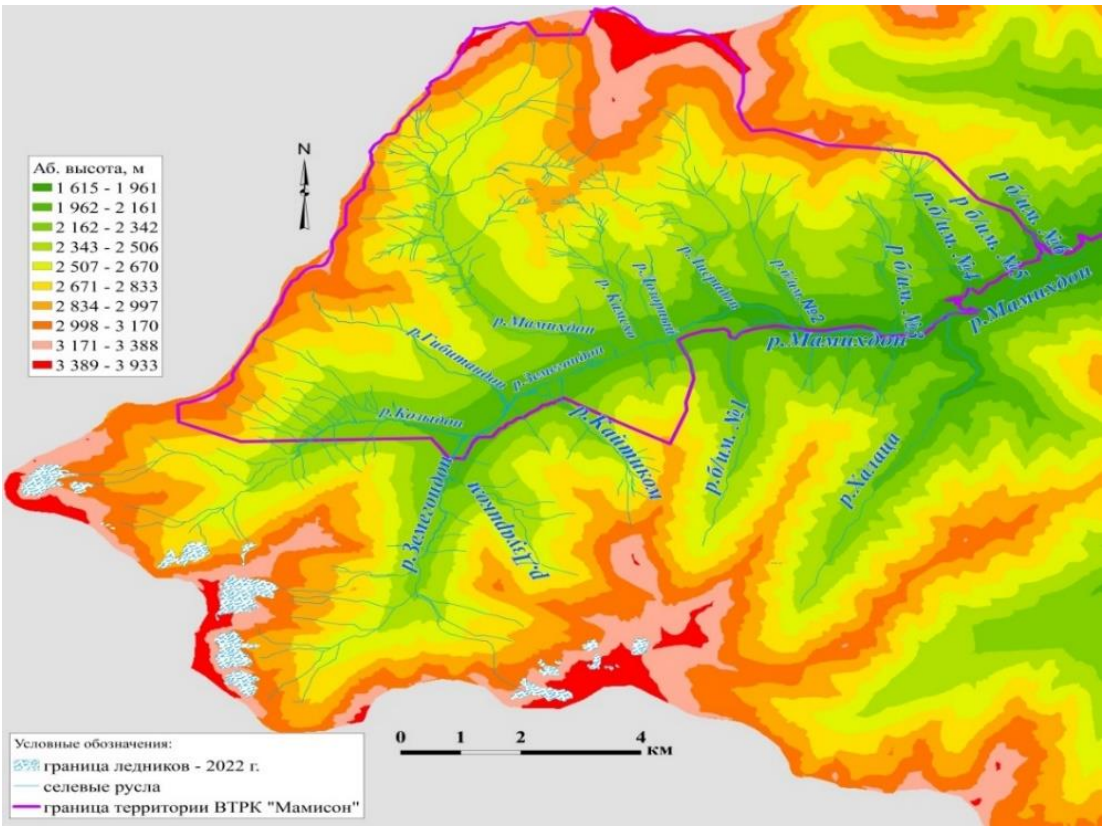


Рис. 1. Схема водотоков на территории ВТРК «Мамисон»

Рис. 2. Истоки р. Земегондон

Рис. 3. Селевой конус выноса ручья б/н, левый приток р. Земегондон

Рис. 4. Селевые отложения в русле р. Мамихдон

Рис. 5. Валуны размером от 1 м и более на берегах и в русле р. Камсхо

Рис. 6. Следы прохождения трех селевых потов в русле безымянного ручья № 4

От ледника слева на дно главной долины реки Земегондон спускается мощное скопление морен, образуя высокие холмы и гряды на левом борту. Правая сторона ущелья заполнена заросшими конечными моренами, которые сползают от небольших каров в виде каменных глетчеров. Долина реки Земегондон – это классический торг, заполненный ледниковыми, флювиогляциальными и склоновыми отложениями. Валы морен состоят из трех генераций, располагаются перед краями ледника и прислоняются друг к другу. Возраст морен – современные (XVII–XIX вв.) и исторические (II в. до н.э.) [*Кесаонов, 2016*].

Долина реки Козыдон (левый приток Земегондона) заполнена моренами на протяжении 3 км. Русло реки врезалось в морену, образовав каньон глубиной в несколько десятков метров. Очевидно, что селевые потоки способствовали этому, их очаги находятся во многих местах на левом склоне ущелья. Рыхлые поверхностные отложения являются потенциальным селевым массивом и могут служить очагами селеобразования.

В бассейне Земегондон выявлено 10 селевых притоков, у р. Козыдон – 14.

Возникновение селевых потоков часто происходит в верховьях или притоках Мамихдона, а о дальнейшем движении по основному руслу свидетельствуют селевые отложения в самом русле реки.

Селепроявления в долине Мамихдона, в основном, дождевые и снего-дождевые. Несмотря на наличие ледников, ледниково-дождевые генотипы селей возможны только в верховьях рек Козыдон и Земегондон. Это можно объяснить тем, что, несмотря на большие запасы рыхлых отложений в перигляциальной зоне, преобладающие в настоящее время малые ледники не в состоянии поставлять талую воду в количестве, необходимом для формирования ледниковых селей даже в самую жаркую погоду.

Как показали проведенные полевые исследования, в районе курорта «Мамисон» и прилегающей территории распространены такие морфологически определенные типы селеопасных участков, расположенных в непосредственной близости друг к другу, как: врезы, рытвины, скальные очаги, а также эродированные поверхности.

Кроме того, имеются оползневые участки по берегам рек Земегондон, Козидон, Гибитандон, верховья Мамихдона и Камсхо, где при сильных осадках возможен смыв грязекаменной массы с бортов реки.

В высотном диапазоне селевые очаги варьируют от 1982 до 3710 м. н.у.м. В районе обследований площадь селеопасной зоны приблизительно равна 18 км^2.

Выявленные, в ходе полевых исследований, конуса селевых отложений, и согласно [*Герасимов, 1978*], объем селевого потока колеблется от 1000 до 50 000 м^3. Объем селя может превышать 100 000 м^3, что подтверждается данными [*Схема территориального планирования Алагирского района, 2009*]. Катастрофический сель в верховьях р. Мамихдон зафиксирован 28.07.73. Селевые явления таких объемов на обследованной территории проявляются очень редко. За последние пятьдесят лет такой селевой поток зафиксирован лишь единожды.

На основе обработки данных полевых наблюдений и архивных материалах построена карта селевой опасности курорта ВТРК «Мамисон» и прилегающей территории (рис. 7).

Согласно Концепции планировки на этой территории планируется дальнейшее развитие инфраструктуры ВТРК. В этой связи при проектировании объектов инфраструктуры ВТРК следует учет селепроявлений по водотокам.

Рекомендации по обеспечению противоселевой безопасности на территории ВТРК «Мамисон»

Для уменьшения селевой активности на рассматриваемой территории необходимо проводить следующие мероприятия:

- закрепление отвалов и обнаженных массивов рыхлообломочного материала;

- обеспечение беспрепятственного поверхностного стока в водотоках на рассматриваемой территории и недопущение русловой эрозии в этих водотоках;
- запрет на вырубку леса по склонам в зонах формирования и транзита селей в руслах водотоков;
- мониторинг состояния селевых очагов в водотоках, в том числе слежение за смещением оползневых массивов.

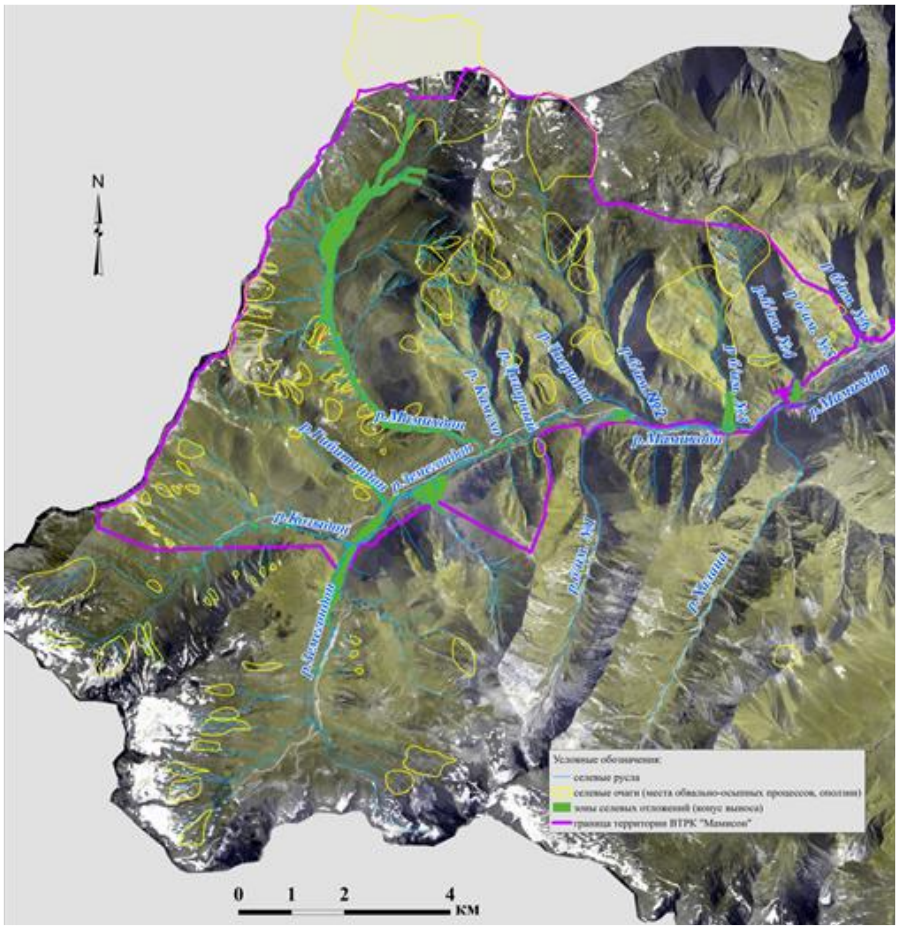


Рис. 7. Карта селевой опасности курорта ВТРК «Мамисон» и прилегающей территории

На этапах проектирования, строительства и эксплуатации различных объектов ВТРК необходимо учитывать высокую повторяемость селевых процессов, а также закладывать в пропускную способность гидротехнических сооружений расходы не только ливневого стока, но и селевых потоков.

Также рекомендуется создание эффективной системы мониторинга селевой обстановки и предупреждения чрезвычайных ситуаций, связанных с селевой опасностью.

Выводы

1. В статье приведены результаты оценки селевой опасности на основе анализа архивных материалов и полевых исследований территории ВТРК «Мамисон» и прилегающей территории.

2. Установлено, что, на курорте «Мамисон» и прилегающей территории имеются 14 селевых водотоков, где морфологический тип селевых очагов: врезы, рытвины, скальные очаги, эродированные поверхности. Определено, что объемы селей варьируют

от 1000 до 50 000 м^3, очень редко (1 раз в 50 лет) могут превышать 100 000 м^3. Селевые потоки в среднем сходят 1 раз в 3–5 лет. Выявлено, что в районе ВТРК генезис селей дождевой, снего-дождевой и гляциально-дождевой, таяние снега и осадки являются главными факторами провоцирующими селепроявления. Построена карта селевой опасности курорта ВТРК «Мамисон» и прилегающей территории, где выделены селевые русла, селевые очаги, зоны транзита и отложений селей.

3. Результаты исследований могут быть полезными при строительстве и эксплуатации объектов ВТРК «Мамисон».

Финансирование

Работа выполнена за счет средств гранта «Разработка инновационных методов диагностирования и прогнозирования лавинно-селевых явлений, деградации горного оледенения и разработка рекомендаций по защите от их негативного воздействия на рекреационные комплексы ВТРК «Мамисон» Российского научного фонда (Соглашение № 23-17-20001).

Список литературы

Агибалова, В.В. Сели в Северной Осетии / В.В. Агибалова – Орджоникидзе: Издательство Ир, 1983. – 115 с.

Агибалова, В.В. Сели в Северной Осетии и туризм / В.В. Агибалова. – Природа и природные ресурсы Северной Осетии. Том XXXIV. Орджоникидзе, 1980. – с. 112–124.

Аджиев А.Х., Разумов В.В., Разумова Н.В., Глушко А.Я., Шагин С.И., Кондратьева Н.В., Притворов А.П., Колычев А.Г., Шаповалов М.А. Опасные природные процессы Северного Кавказа // Монография. Изд-во «Феория», Москва, 2013. – 320 с.

Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций Южного федерального округа России. – М.: изд-во «Дизайн. Информация. Картография», 2007. – 386 с.

Бероев, Б.М. По Северной Осетии: 2-е изд., испр. и доп. / Б.М. Бероев. — М: Физкультура и спорт, 1984. – 144 с.

Вагин, В.С. Природные ресурсы республики Северная Осетия-Алания / В.С. Вагин; под общ. ред. В.С. Вагина. – Владикавказ: Проект-Пресс, 1998. – 3 т.

Виленкин, В.Л. Паводки и сели в Северной Осетии /В.Л. Виленкин // Изв. Северо-Осетинского НИИ. – 1955. – Т. XVII. – С. 321–325.

Герасимов, В.А. Селеопасные долины Северной Осетии / В.А. Герасимов // Труды ВГИ. – 1978. – № 40. – С. 46.

Кадастр лавинно-селевой опасности Северного Кавказа. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 2001 – 112 с.

Кадастр селевой опасности юга европейской части России. – Москва: Феория; Нальчик: Печатный двор, 2015. – 148 с.

Караев Ю.И. Влияние опасных экзогенных геологических процессов на высоконапорные ГЭС (на примере Зарамагских ГЭС, РСО-Алания). Геология и геофизика Юга России, 2013, № 4, с. 23–33.

Кесаонов, В.Х. Селевые процессы на туристическом – рекреационном комплексе «Мамисон» / В.Х. Кесаонов, Н.В. Кондратьева // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Материалы IV Международной конференции России. – 2016. – С. 93.

Кондратьева, Н.В. Риски возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера при реализации экономических и инфраструктурных проектов на туристическо-рекреационном комплексе «Мамисон» / Н.В. Кондратьева, В.Х. Кесаонов // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России-2015. – С. 174.

Круподеров, В.С. Инженерно-геологические исследования опасных геологических процессов и их особенности в начале XXI века. /В.С. Круподеров, И.И. Молодых, Б.М. Крестин, И.В. Мальнева, В.И. Дьяконова // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 8. – С. 23–28.

Перов В.Ф. Сели (учебное пособие). Изд-во МГУ, 2012. – 272 с.

Проведение изыскательских работ ледников «Козыдон и Земегондон» ВТРК «Мамисон»: отчет о НИР. – Нальчик: фонды ФГБУ «ВГИ», 2014. – 950 с.

Сергеева Г.А., Андреева Е.С., Адамян В.Л. Комплексная характеристика селевых явлений Республики Северная Осетия – Алания (Центральный Кавказ) // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 3. – С. 104–109.

Схема территориального планирования Алагирского района республики Северная Осетия – Алания [Электронный ресурс]. – Ростов-на-Дону, 2009 – Режим доступа: http://www.bestreferat.ru/referat-407277.html

Тавасиев Р.А., Голушкин ИВ. Опасные природные процессы в Цейском ущелье и их влияние на рекреационный комплекс. Вестник Владикавказского научного центра. 2007. Том 7, № 2, с. 23–29.

Тавасиев, Р.А. Ледники, каменные глетчеры и озера комплекса «Мамисон» / Р.А. Тавасиев // Вестник Владикавказского НЦ. – 2013. – Т.13, № 3. – С. 33.

Оценка селевого риска на расселение населения горных регионов Азербайджана (на примере бассейна р. Шинчай)

С.О. Алекперова

Институт географии имени академика Г.А. Алиева Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики, Азербайджан, alakbarovasamira@hotmail.com

Аннотация. В статье характеризуется оценка селевого риска на расселение населения в бассейне р. Шинчай. С помощью сравнительного анализа статистических материалов переписи населения за период 1999–2019 гг., анализа многочисленных научных исследований в этом направлении и собственных полевых исследований нами определена и составлена таблица динамики развития численности населения в бассейне р. Шинчай, также на ее основе составлена карта районирования селей по повторяемости и подверженности материальному ущербу в бассейне р. Шинчай. Составлен график развития учащения прохождения селей за период 1953–2023 гг. в селеносном бассейне р. Шинчай. На основе проведенных исследований составлена диаграмма, отражающая нанесенный ущерб на расселение населения, а также модель, которая широко анализирует и оценивает селевой риск на расселение населения в экономико-географическом аспекте. Исследование воздействия селей на расселение населения, оценка риска наносимого ими ущерба, изучение динамики численности населения в бассейне р. Шинчай, районирование селей по частоте повторяемости повышают актуальность статьи.

Ключевые слова: *оценка селевого риска, речной бассейн, селевая активность, статистический анализ, нанесенный ущерб, численность населения*

Ссылка для цитирования: Алекперова С.О. Оценка селевого риска на расселение населения горных регионов Азербайджана (на примере бассейна р. Шинчай). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 28–37.

Assessment of debris flow risk on population settlement in mountain regions of Azerbaijan (a case of the Shinchay River basin)

S.O. Alekperova

Institute of Geography named after academician H.A. Aliyev, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan, alakbarovasamira@hotmail.com

Abstract. The article describes the assessment of debris flow risk on population settlement in the Shinchay River basin. Using a comparative analysis of statistical materials from the population census for the period 1999–2019, analysis of numerous scientific studies in this direction and our own field research, we have determined and compiled a table of the dynamics of population development in the Shinchay River basin, also based on it, the zoning of debris flows according to recurrence and susceptibility to material damage in the river basin was mapped. A development graph has been drawn up for the increase in the occurrence of debris flows for the period 1953–2023 in the debris flow forming Shinchay River basin. Based on the conducted research, a diagram was compiled reflecting the damage caused to population settlement, as well as a model that broadly analyzes and assesses the debris flow risk on population settlement in the economic and geographical aspect. Studying the impact of debris flows on population settlement, assessing the risk of damage caused by them, studying population dynamics in the Shinchay River basin, and zoning debris flows by frequency of occurrence increase the relevance of the article.

Key words: *debris flow risk assessment, river basin, debris flow activity, statistical analysis, damage caused, population*

Cite this article: Alekperova S.O. Assessment of debris flow risk on population settlement in mountain regions of Azerbaijan (a case of the Shinchay River basin). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 28–37.

Введение

Сели в Азербайджане, среди всех природных разрушительных бедствий, отличаются по площади распространения, интенсивностью проявления и нанесенному ущербу. Основной актуальной проблемой, которая постоянно волнует население Азербайджана, является расселение населения на селеопасных территориях, где сели характеризуются мощной разрушительной силой и негативными последствиями.

Река Шинчай берет свое начало на Большом Кавказе на высоте 3000 м., это одна из селеносных рек Азербайджана. Бассейн р. Шинчай охватывает высокогорный, среднегорный и низкогорный пояса. Бассейн р. Шинчай ограничен с запада Гафланским, а с востока – Гочумырыгским отрогами Главного Кавказского хребта [*Ализаде и др., 2016*]. Истоки р. Шинчай расположены на абсолютной высоте 2800 м, а устье – на высоте 200 м. Длина реки вместе с ее притоками – 39 км, общая площадь речного бассейна – 306 км^2, общая площадь селевых очагов – 91 км^2, площадь реки до конуса выноса – 40,8 км^2, площадь конуса выноса – 176 км^2, плотность речной сети – 0,50 км/км^2 [*Мамедов, 2012*]. Стекающие с горных и предгорных склонов притоки р. Шинчай – Гафланчай, Гозлудеречай, Шабалыдчай, Гуручай и др. характеризуются потенциальными селевыми бассейнами [*Тарихазер и др., 2015; Tarikhazer, 2020*]. В формировании селей природные и антропогенные факторы играют большую роль, т.к. резкое усиление антропогенного воздействия, глобальные климатические изменения повышают риск развития селей. Из 28 рек бассейна в 11 реках постоянно наблюдаются разрушительные сели.

Краткий обзор проблемы

Сферами, подвергающимися селевому воздействию, являются расселение населения, промышленность, транспортная система, многочисленные отрасли сельского хозяйства, водно-оросительные системы, частные хозяйства и дома, различные объекты инфраструктуры и др. [*Тарихазер и др., 2015; Алекперова, 2018*].

В области выявления факторов, влияющих на проявление селей и мероприятий по защите от них исследования проводились по следам давно прошедших селевых процессов, причем в большинстве случаев ограничивались выявлением причин селей, объемов выноса. Почти всегда остается за рамками исследований динамика селевых очагов, оценка селевого риска и опасности [*Тарихазер и др., 2021*]. Основной причиной проявления катастрофических селей является уклон склона, резкие колебания климата, неправильный процесс расселения на селеносных территориях, негативные антропогенные действия.

Важно оценить ущерб, наносимый селями, селевой риск в селеносных зонах, изучить изменения селевых очагов, чтобы последующее прогнозирование селей и разработка противоселевых мероприятий могли опираться на надежные данные.

Методы

При проведении исследований использован обширный сравнительный анализ современной научной литературы отечественных и зарубежных ученых по изучению селевых процессов, данные материалов Министерства по Чрезвычайным Ситуациям

Азербайджанской Республики (МЧС АР) (2007–2023 гг.), анализ статистических материалов (перепись населения АР за период 1999–2019 гг.), сравнительный системный анализ, математико-статистический анализ, современные компьютерные технологии – географическая информационная система (ГИС), также были проведены полевые исследования и т.д.

Данные

Исследование было основано на данных Государственного Комитета по Статистике АР и Министерства по Чрезвычайным Ситуациям АР, материалах переписи населения АР, планах, озвученных в Государственных Программах социально-экономического развития регионов АР, годовых отчетах Государственного Национального Управления Гидрометеорологии АР и Института Географии им. акад. Г.А. Алиева, в том числе на анализе работ, проведенных в этой области другими исследователями в различных селеносных регионах мира, а также результатах личных полевых исследований автора.

Анализ

В 2019 г. (по сравнению с 1999 г.) общая численность сельского населения, проживающего в бассейне р. Шинчай, увеличилась всего на 3928 человек (таблица 1). По данным 2019 г. сели, прошедшие на р. Шинчай, оказали негативное воздействие на 25 568 человек, проживающих в ее бассейне.

Таблица 1. Динамика изменения численности населения в селеопасном бассейне р. Шинчай

Название населенного пункта	Численность населения в районах, подверженных селевой опасности (человек)			
	1999 г.	2009 г.	2019 г.	Разница 1999–2019
с. Шин	1447	1543	1585	138
с. Баш Лайский	1956	2184	2275	319
с. Джунуд	882	1010	1048	166
с. Баггал	472	528	552	80
с. Ашагы Гейнюк	2258	2791	2727	469
с. Баш Гейнюк	6839	7597	8468	1629
с. Ашагы Шабалыд	711	672	678	–33
с. Баш Шабалыд	782	871	840	58
с. Генделен	903	844	865	–38
с. Инджа	1174	1355	1490	316
с. Балталы	1829	2051	2372	543
с. Ашагы Лайский	1100	1265	1325	225
с. Зунуд	1287	1335	1343	56
Общая численность населения в бассейне р. Шинчай				
Итого, в селах	21640	24046	25568	3928

Источники: [*Данные материалы МЧС АР, 2007–2023; Перепись населения…, 2022; Регионы Азербайджана, … 2022*].

В бассейне р. Шинчай численность населения составила 21 640 человек в 1999 г., 24 046 человек в 2009 г., а в 2019 г. увеличилась до 25 568 человек. По мере увеличения населения возрастает роль антропогенного фактора в трансформации среды, что приводит к усилению селей, их воздействию на окружающую среду и увеличению материального ущерба от них. Население, проживающее в бассейне р. Шинчай и его притоках (Гарагаячай, Чахылчай, Гозлудеречай, Бабачай, Галфанчай, Сейидюрдчай, Шихгафланчай, Герухчай и др.), регулярно подвергается воздействию селей. Особенно такие населенные пункты, как Баш Гейнюк, Баш Шабалыд, Баш Лайский, Шин, Ашагы

Шабалыд, Генделен, Инджа и др., периодически разрушаются в результате схода селей. Замечено, что за исследуемый период мощность селей на р. Шинчай усилилась. За период с 1953 по 2023 гг. в бассейне в р. Шинчай наблюдается учащение прохождения селей [*Каталог, 1969; Марданов и др., 1978; Будагов и др., 2002; Тарихазер и др., 2015; Ализаде и др., 2016; Tarikhazer, 2020; Мамедов и др., 2017; Тарихазер и др., 2021*]. Мы составили график их развития за этот период (рис. 1).

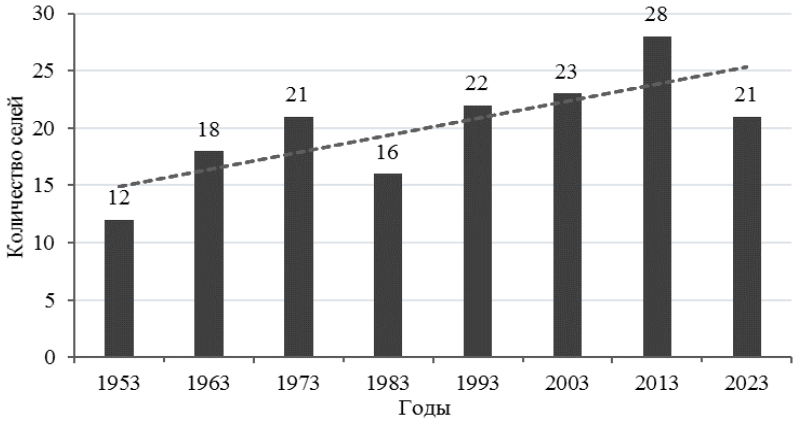


Рис. 1. График тенденции развития селей в бассейне р. Шинчай

На рис. 1 отображается наибольшая повторяемость частоты селей и это коррелируется с трендовой линией. Как за исследуемой период, так и за последние 70 лет селевые процессы, происходящие на изучаемой территории, носят катастрофический характер. Сели, наблюдаемые в бассейне р. Шинчай, нанесли большой материальной ущерб хозяйству региона.

На основе «Карты селей» (Сели в Азербайджане) И.Э. Марданова, Р.Н. Махмудова, Б.А. Будагова (1978), «Каталога рек Азербайджана» Р.Н. Махмудова (2008), а также исследований Б.А. Будагова, Н.А. Бабаханова (2002), С.А. Тарихазер (2015, 2020, 2021) и др., имеющихся материалов МЧС (за 2007–2023 гг.), анализа статистических источников и собственных проведенных нами исследований составлена таблица 2, где представлены даты прохождения наиболее опасных селевых потоков в бассейне р. Шинчай.

Ее анализ показывает, что на этой территории за период 1953–2015 гг. в результате разрушительных селевых явлений наибольший ущерб причинен автомобильным дорогам, мостам, домам, приусадебным участкам, а также сырьевой базе строительной промышленности, погибли люди. По сравнению с другими отраслями сельского хозяйства, животноводство страдает в меньшей степени, но надо отметить, что за исследуемый период было уничтожено около 7 тыс. голов скота, более 10 тыс. домашней птицы, нанесенный общий ущерб животноводству составил 55–60 тыс. манат. В исследуемой селеопасной зоне ведется строительство большого количества новых сооружений, населенных пунктов, хозяйственных объектов и т.д. без учета селевой опасности территории.

На основе проведенных исследований нами составлена диаграмма, отражающая связь между нанесенным селями ущербом на расселение населения, за период с 1999 по 2019 гг. и частотой повторяемости селевых процессов в сс. Баш Гейнюк, Ашагы Гейнюк, Баш Лайский, Шин и др., расположенных в бассейне р. Шинчай (рис. 2).

Анализ рис. 2. показал, что в бассейне около 13 сел очень часто страдают от катастрофических селевых процессов. Особенно густонаселены сс. Баш Гейнюк, Ашагы Гейнюк, Баш Лайский, Балталы. Для оценки ущерба от селей учитываются следующие показатели – повторяемость, продолжительность селеопасного периода, материалы переписей населения Азербайджанской Республики за 1999, 2009, 2019 гг., имеющиеся

данные МЧС (за 2007–2023 гг.) и анализ статистических данных. Общий нанесенный ущерб за различные годы составил примерно от 20 тыс. манат до 70 тыс. манат.

Таблица 2. Даты прохождения наиболее опасных селевых потоков в бассейне р. Шинчай

№	Дата прохождения селя	Причина возникновения селя	Последствия селя
1	15.07.1953	ливень	Сель стал причиной сильных разрушений в сс. Баш Гейнюк, Ашагы Гейнюк, Балталы. Погибло 3 человека, несколько десятков голов скота и птицы
2	18.07.1962	ливень	Затоплены сс. Ашагы Шабалыд, Бабаратма, Балталы
3	09.08.1910	проливные дожди	Разрушено с. Баш Гейнюк. Погибло 98 человек и несколько сот домашних животных
4	12.08.1914	ливень	Затоплены сс. Ашагы Шабалыд, Бабаратма, Балталы
5	01.07.1953	ливень	Было разрушено несколько жилых домов, сель также стал причиной сильных разрушений в сс. Ашагы Лайский, Ашагы Гейнюк, Балталы, погибли домашний скот и птица. Разрушены 42 дома с. Ашагы Шабалыд, 3 человека погибло
6	15.08.1955	ливень	Селевой поток повредил местную оросительную систему
7	06.06.2005	проливные дожди	Селам нанесен экономический ущерб, 5 жилых домов затоплено селевыми водами
8	2005	проливные дожди	Разрушено 2 моста, 3 частных дома.
9	23.05.2006	ливень	Сель стал причиной сильных разрушений в сс. Ашагы Лайский, Ашагы Гейнюк, Балталы, Ашагы Шабалыд, где нанесен ущерб домам, приусадебным участкам, полям, электрическим столбам, погибли домашний скот и птица, разрушен мост через реку, 2 человека погибло, 3 жилых дома полностью разрушено
10	02.07.2007	ливень	В результате повысился уровень воды в притоках реки, прошли кратковременные сели
11	23.05.2009	проливные дожди	В притоках реки прошел кратковременный сель, который стал причиной разрушений в сс. Ашагы Лайский, Шабалыд и др.
12	28.06.2009	ливень	В результате нанесен ущерб домам, приусадебным участкам, полям, электрическим столбам, погибли домашний скот и птица
13	15.07.2010	проливные дожди	Повреждена улица близ Ханского дворца, затоплены подвалы и первые этажи жилых домов и магазинов г. Шеки. Повреждены линии электро- и газоснабжения. Селевые потоки унесли несколько частных автомобилей.
14	28.06.2014	ливень	В результате прошел кратковременной сель.
15	30.06.2014	проливные дожди	В результате прошел грязевой селевой поток, причинен ущерб автомобильным дорогам, мостам.
16	05.10.2015	проливные дожди	В результате проливных дождей повысился уровень воды в реке

По данным [*Данные материалы МЧС АР, 2007–2023; Каталог селеопасных рек…, 1969; Перепись населения…, 2022; Регионы Азербайджана…, 2022; Ализаде и др., 2016; Tarikhazer, 2020; Мамедов и др., 2017; Тарихазер и др., 2021*].

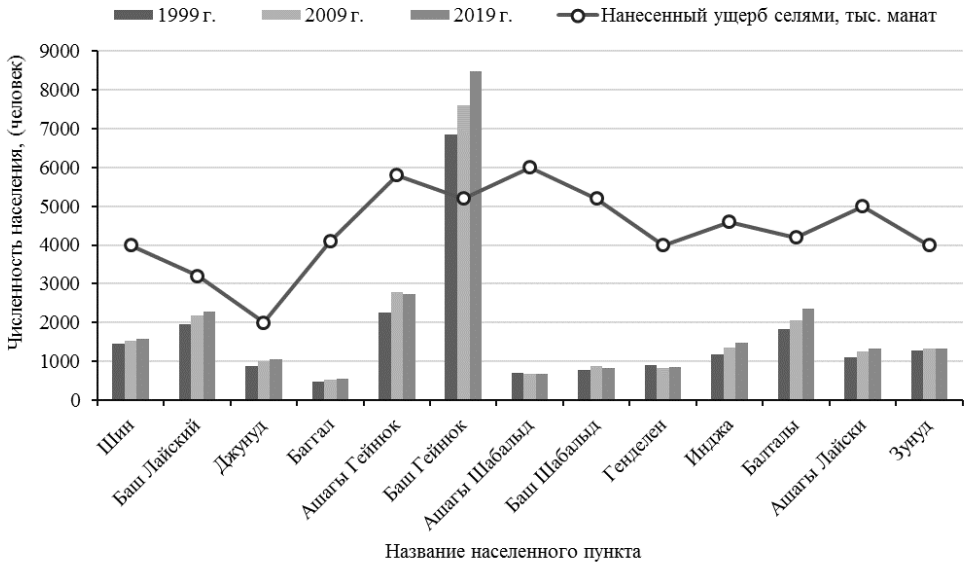


Рис. 2. Численность населения и нанесенный ущерб от разрушительных селей в бассейне р. Шинчай

Некоторые ученые [*Рустамов, 1957; Марданов и др., 1978; Будагов и др., 2002; Махмудов, 2008; Медеу, 2011; Тарихазер и др., 2015; Ализаде и др., 2016; Мамедов и др., 2017; Медеу и др. 2018; Tarikhazer, 2020;Тарихазер et al., 2021*] считают, что проявление и прохождение селей находятся в большей зависимости от формы долин, строения бассейна, уклона склонов, ливневых атмосферных осадков после длительных засушливых периодов и т.д. Крутизна склонов (35–45°) влияет на интенсивность осыпей, россыпей, обвалов, которые поступают в селевые потоки [*Ализаде и др., 2016*]. Крутизна склонов р. Шинчай в 60–75° способствует накоплению рыхлого обломочного материала прямо в русле и, при проливных дождях, ливнях, способствует формированию и прохождению разрушительных селей. Во время прохождения селей наносы отлагаются в разных участках конуса выноса. В р. Шинчай нижний предел селевых отложений находится на высоте 400 м, длина и ширина конуса выноса составляет примерно 11–14 м. [*Ализаде и др., 2016*]. Учитывая упомянутые выше факторы, можно определить степень селеопасности реки [*Алекперова, 2019*].

Многие ученые исследовали вопросы снижения ущерба от бедствий и катастроф. Например, В.А. Акимов и Ю.И. Соколов изучали современные тенденции роста риска природных и техногенных бедствий, широко анализировали снижение риска бедствий, связанных с глобальным изменением климата и управления ими. Оно заключается в четырех главных элементах управления риском – идентификация и оценка опасности; оценка уязвимости и оценка риска: количественная оценка риска; контроль риска [*Акимов и др., 2016*]. Многие ученые отмечают, что при оценке селевого риска учитывается его зависимость от количественных показателей, повторяемости и продолжительности, размеров заселенной площади в селеносных зонах и т.д.

Учитывая вышеизложенное, нами была создана модель, где отображается оценка ущерба, разрушительная сила селей, частота проявления, их влияние на развитие различных областей хозяйства, восстановление нормальной деятельности, и прогноз–планирование мероприятий по митигации риска селей изучаемой территории. По нашему мнению, для этого целесообразно провести оценку селевого риска на расселение населения в экономико-географическом аспекте, которое указано ниже (рис. 3).

Рис. 3. Модель оценки селевого риска на расселение населения в экономико-географическом аспекте

Проведенные комплексные работы и краткий анализ рис. 3 еще раз доказали достоверность нашего исследования динамики изменения численности населения, тенденции развития селей в бассейне р. Шинчай и др. Цели можем достичь в том случае, если применим полученные результаты оценки селевого риска в аспекте экономико-географической модели. Таким образом, помимо изучения наблюдаемых в этом районе селевых явлений, также появится возможность принятия мер по минимизации ущерба, причиненного ими, разработки способов защиты от них, своевременного восстановления разрушений и компенсации нанесенного ущерба. Эти данные могут быть использованы при оценке ущерба, наносимого селями особыми отделами МЧС, статистическими органами, страховыми компаниями и другими организациями.

Итогом данного исследования, на основе современных компьютерных технологий нами составлена картосхема районирования селей по частоте повторяемости, где учитываются генезис селей, тип селевых потоков с различной степенью селевой опасности, степень селевой опасности конкретной территории и основные пути прохождения селей (рис. 4).

При картографировании селеопасных районов выявлены частота повторяемости селей в бассейне р. Шинчай, а также нами были выделены три района по проявлению и величине нанесенного материального ущерба: 1) район слабого проявления селей (сели повторяются раз в 5–10 лет), 2) район среднего проявления селей (сели повторяются раз в 3–5 лет), 3) район сильного проявления селей (сели повторяются раз в 2–3 лет).

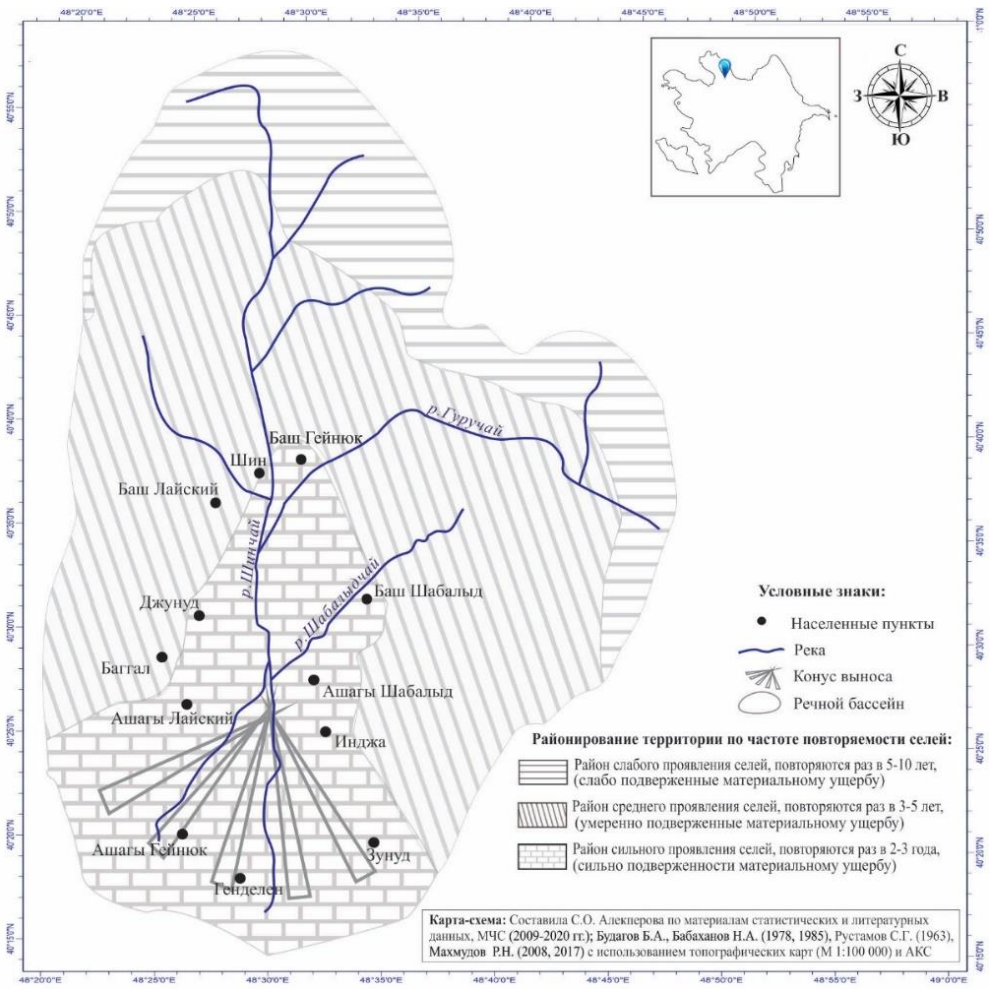


Рис. 4. Районирование селей по частоте повторяемости в бассейне р. Шинчай

Анализ картосхемы показывает, что, сильные селевые потоки оказывают существенное разрушительное воздействие в селевом русле и на конусе выноса р. Шинчай. Нанесенный ущерб зависит от размыва скоплений обломочных масс в руслах, обеспечивающих поток преимущественно грубыми обломками и количества накопленного рыхлообломочного материала.

Сильными селеносными притоками р. Шинчай являются рр. Шихгафлан, Гозлудере, Герух. Широкое русло, небольшая водоносность и малый уклон долины способствуют затуханию и распаду грязекаменного материала в притоке Гозлудеречай. Но в притоке Герухчай, хотя селевой очаг занимает относительно небольшую площадь, крутое падение реки, большая крутизна склонов, с которых сползают многочисленные осыпи, и узкое русло способствуют формированию и стремительному движению потоков на сравнительно небольшом расстоянии. По селеактивности первое место занимает приток Шихгафланчай. Его длина компенсируется крутизной склонов, большими размерами селевых очагов, легкой размываемостью слагающих долину пород (глинистые сланцы) и, особенно, ее ущелистым характером. Эти факторы способствуют селеносности р. Шихгафланчай, отличающейся от других притоков р. Шинчай тем, что по ней проходят не только грязекаменные, но и грязевые сели [*Ализаде и др., 2016*].

Исходя из вышеизложенного следует, что важное значение имеет комплексное исследование динамики развития селевых очагов, состояния берегов и защитных сооружений, постройка селезащитных дамб, страхование от рисков селей и проведение экономико-географических мероприятий с целью стабилизации экологической обстановки. Своевременная информация об угрозе развития селей, позволит значительно снизить риск и объем ущерба от селевых процессов.

Выводы

Анализ тенденций развития основных селевых опасностей и угроз, а также их прогноз на перспективу показывают, что в бассейне р. Шинчай в ближайшие годы будет сохраняться высокая степень риска возникновения разрушительных, катастрофических селевых процессов.

Анализ разных научных источников селей показывает, что в течение 1953–2023 гг. в бассейне р. Шинчай зафиксировано 166 наиболее селеопасных явлений. На изучаемой территории около 13 сел постоянно страдают от разрушительных последствий селей. В различных годах сели приводят к человеческим жертвам, например, самый страшный сель прошел в 1910 г. с. Баш Гейнюк, когда погибло 98 человек. В бассейне р. Шинчай число людей, пострадавших от селей, составило 21 640 человек в 1999 г., а в 2019 г. увеличилось до 25 568 человек.

Несмотря на реализацию противоселевых мероприятий в речных бассейнах, полностью контролировать сели пока не удается. Особенно повышают риск селей глобальные изменения климата и резкое усиление антропогенного воздействия, нерациональное освоение территории населением. Важно учитывать материальной ущерб, который могут нанести сели, при территориальной организации хозяйств, и осуществлять ряд защитных мероприятий. Для защиты хозяйственных объектов, промышленных предприятий, населенных пунктов, частных домов и имущества населения и т.д., расположенных в селеопасных речных долинах, необходимо страхование со стороны государственных или частных страховых компаний. При этом часть нанесенного селями ущерба может выплачиваться государством, а другая часть – страховыми компаниями.

Для устранения и ослабления селевого риска следует выработать меры борьбы с ними на локальном и региональном уровне. Комплексная диагностика селей и оценка селевого риска помогут своевременно избежать возможную опасность или сократить ущерб, а также определить необходимые защитные мероприятия и указать пути управления риском.

Список литературы

Акимов В.А., Соколов Ю.И. Глобальные и национальные приоритеты снижения риска бедствий и катастроф. МЧС России. Москва, 2016, 396 с. ISBN 978-5-93970-176-1

Алекперова С.О. Воздействие селей на природно-хозяйственную систему Большого Кавказа и методы борьбы с ними (в пределах азербайджанской части Большого Кавказа) / Грозненский естественнонаучный бюллетень, научно-технический журнал, Т.3, № 4(12), 2018 г. с. 5–11. DOI: 10.25744/genb.2018.12.4.001

Алекперова С.О. Изменение экологической напряженности горных геокомплексов под воздействием селевых процессов в азербайджанской части Большого Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий Кавказа коллективная монография, IX Международной научно-практической конференции «Горные территории: приоритетные направления развития», Том II, 4–7, г. Владикавказ, 2019 с. 28–34.

Алекперова С.О., Мамиева С.А. Влияние селей на территориальную организацию хозяйств в населенных пунктах бассейнов горных рек (на примере междуречья Дзегамчай–Гянджачай в азербайджанской части Малого Кавказа) / Научный журнал «Вопросы географии и геоэкологии», № 1, Алматы, Казахстан, 2022. с. 37–46. https://doi.org/10.55764/2957-9856/2022-1-37-45.05

Ализаде Э.К., Тарихазер С.А., Гамидова З.А., Алекперова С.О. Влияние опасных природно-разрушительных явлений на природно-хозяйственную Шеки-Загатальского экономического района // Материалы научно-практической конференции, посвященной демографическое развитие в Азербайджанской Республике: перспективы и региональные проблемы расселения населения. Шеки, 2016 с. 149–170

Будагов Б.А., Бабаханов Н.А. Природные разрушительные явления и их экономические последствия (на примере Республики Азербайджан) // Стихийные природные процессы: географические, экологические и социально-экономические аспекты. М.: 2002. с. 168–178

Мамедов М.А. Гидрография Азербайджана, Баку, 2012, 254 с.
Мамедов С.Г., Алекперова С.О. Гамидова З.А., Исмаилова Л.А. Изучение морфометрических показателей рельефа селеопасных бассейнов по данным радарных спутниковых снимков (на примере междуречья Шинчай-Дамирапаранчай) / Вестник Московского Государственного Областного Университета, Серия: Естественные науки, МГОУ, № 2, Москва 2017, с. 59–69
Марданов И.Е., Махмудов Р.Н., Будагов Б.А. Карта селей (Сели в Азербайджане). Баку, 1978.
Махмудов Р.Н. Каталог рек Азербайджана. Баку: 2008, 106 с.
Махмудов Р.Н. Современные изменения климата и опасные гидрометеорологические явления. Баку, 2017, 231 с.
Медеу А.Р. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Основы управления. Том 1, – Алматы, 2011. 284 с.
Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Баймолдаев Т.А., Киренская Т.Л., Степанов Б.С. Селевые явления юго-восточного Казахстана. Т. 2, Алматы 2018, с. 278
Медеу А.Р. Благовещенский В.П., Ранова С.У. Оценка и картографирование селевой опасности в бассейнах рек Киши и Улкен Алматы // Евразийский Союз Ученых: Публикация научных статей в ежемесячном научном журнале. 3 (60), Москва 2019, с. 9–12
Таланов Е.А. Региональная оценка эколого-экономического риска от водной эрозии и селей. – Алматы, 2007. – 352 с.
Tarikhazer S.A. The geographical prerequisites for the identification and prevention of dangerous geomorphological processes in the mountain geosystems of the Alpine-Himalayan belt (on the example of the Major Caucasus of Azerbaijan) // Journal of Geology, Geography and Geoecology. Украина, Днепропетровск, № 1, 2020, с. 176–187. https://doi.org/10.15421/112016.
Тарихазер С.А., Кучинская И.Я., Керимова Э.Дж., Алекперова С.О. Issues of geomorphologıcal-landscape rısk (on the example of the Kishchay river) // Известия НАН РК. Серия геологии технических наук. Казахстан, № 6, Казахстан, 2021 с. 133–140
Тарихазер С.А., Алекперова С.О. Прогнозирование селевых явлений и их воздействие на природно-хозяйственную систему южного склона Большого Кавказа (в пределах Азербайджана) / Научные журналы Северного (Арктического) федерального Университета имени М. В. Ломоносова, Науки о земле, Севера Уральского отделения РАН, 2015, с. 38–49
Тарихазер С.А., Гамидова З.А., Алекперова С.О. Геолого-геоморфологическая оценка селевых процессов (на примере бассейна р. Акери) / Материалы научно-практической конференции, посвященной 110-летию профессора С.Г. Рустамова по тему «Современные проблемы водоснабжения в Азербайджане», 6–7 октября, Баку 2021, с. 106–113
Данные материалы МЧС Азербайджанской Республики (2007–2023 гг.).
Каталог селеопасных рек на территориях Северного Кавказа и Закавказья. Тбилиси, 1969, 340 с.
Перепись населения Азербайджанской Республики в 2019 году. Баку 2022, 925 с.
Регионы Азербайджана – статистический сборник, Баку 2022, 775 с.
Рустамов С.Г. Селевые патоки в Азербайджане. Азерб. ССР. 1957, т. VII, с. 119–129

Тектонические структуры в районе ледника Колка и их влияние на развитие экзогенных и эндогенных процессов

А.Ф. Барановский, Э.В. Запорожченко

Селевая ассоциация, Пятигорск, Россия, baranovskiy24@mail.ru, ednad17@mail.ru

Аннотация. Предложена схема тектонического строения в районе долины р. Колка (Россия, РСО-Алания), в том числе, в ледниковом цирке Колка установлены разрывные неотектонические структуры. Рассмотрены вопросы возможного влияния на ледник Колка современных тектонических движений, с которыми в 2002 г. были связаны проявления вулканогенных процессов, масштабных обвалов и, в конечном итоге, сходы каменно-ледовой лавины и селевых потоков.

Ключевые слова: *Геналдонская катастрофа, ледник Колка, долина р. Колка, каменно-ледовая лавина, селевой поток, неотектоника, активные тектонические зоны, обвалы, газовые извержения*

Ссылка для цитирования: Барановский А.Ф., Запорожченко Э.В. Тектонические структуры в районе ледника Колка и их влияние на развитие экзогенных и эндогенных процессов. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 38–49.

Tectonic structures in the Kolka Glacier area and their influence on the development of exogenous and endogenous processes

A.F. Baranovsky, E.V. Zaporozhchenko

Debris Flow Association, Pyatigorsk, Russia, baranovskiy24@mail.ru, ednad17@mail.ru

Abstract. A scheme of the tectonic structure in the area of the Kolka River valley (Russia, RSO-Alania) is proposed, including discontinuous neotectonic structures in the Kolka glacial cirque. The issues of the possible influence of modern tectonic movements on the Kolka glacier, which in 2002 were associated with manifestations of volcanogenic processes, large-scale landslides and, ultimately, descents of rock-ice avalanches and debris flows, are considered.

Key words: *Genaldon disaster, Kolka Glacier, Kolka River valley, rock-ice avalanche, debris flow, neotectonics, active tectonic zones, landslides, gas eruptions*

Cite this article: Baranovsky A.F., Zaporozhchenko E.V. Tectonic structures in the Kolka Glacier area and their influence on the development of exogenous and endogenous processes. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 38–49.

Введение

Ледник Колка, расположенный в истоках реки Геналдон (Российская Федерация, Республика Северная Осетия – Алания, рис. 1, 2), неоднократно становился причиной формирования грандиозных по масштабам каменно-ледовых лавин, сход которых каждый раз сопровождался бедствиями для людей. Документально зафиксированы случаи схода таких лавин, трансформирующихся в селевые потоки, 3 июля 1902 г., 6 июля 1902 г. и 20 сентября 2002 г.

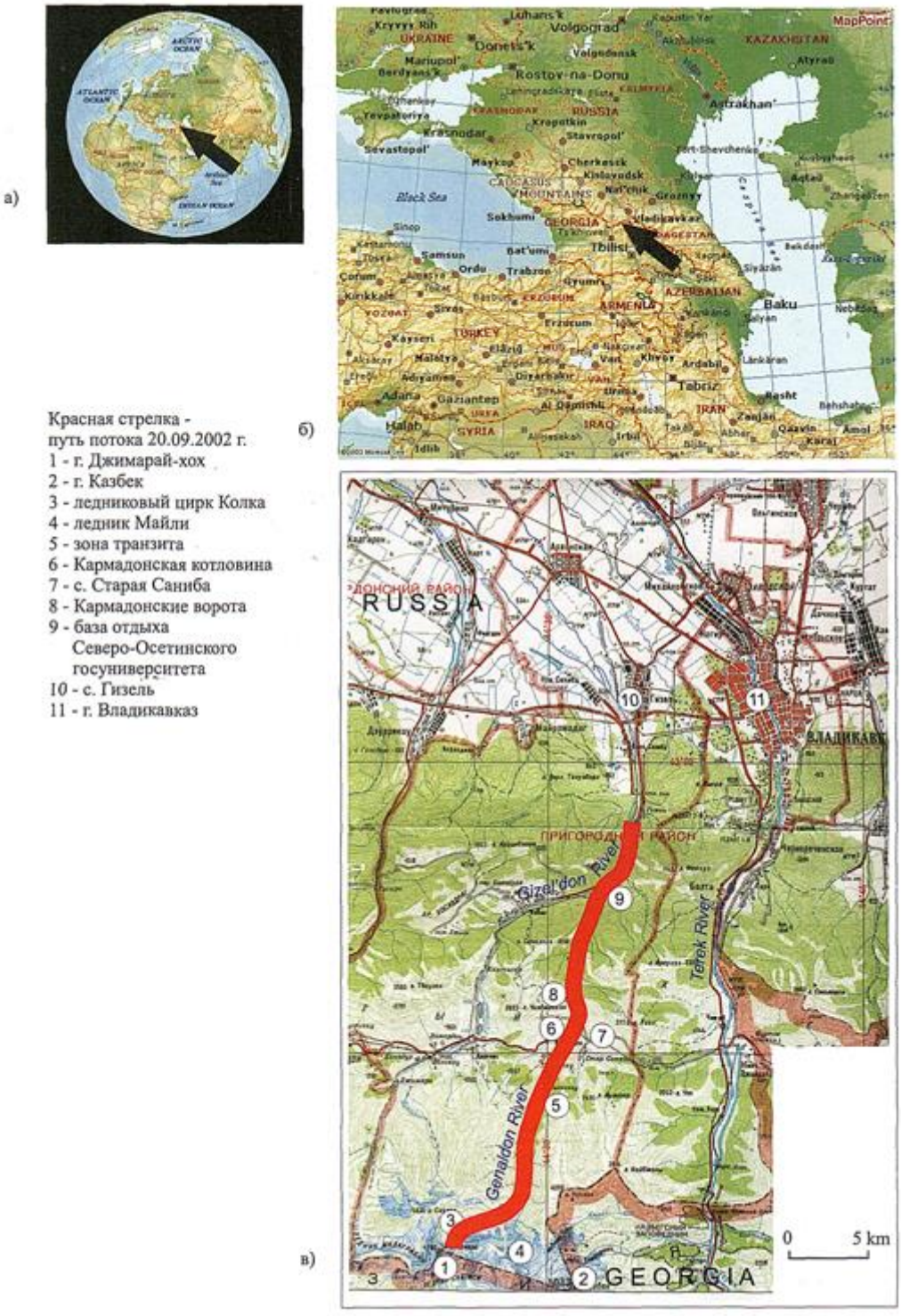


Рис. 1. Район Геналдонской катастрофы: а – положение в мире (картографическая основа: Microsoft Corp., 2003); б – положение на Кавказе (картографическая основа: Microsoft Corp., 2003); в – детали строения района (картографическая основа: Роскартография, 2000). По материалам [*Петраков, 2006*]

В 2002 г. произошел одномоментный выброс всей массы полого залегающего ледника Колка, при этом средняя скорость лавины в долине р. Геналдон составила 360 км/ч [*Заалишвили, 2014*]. По данным В.В. Поповнина с соавторами «Каменно-ледовая масса, основную часть которой составлял лед Колки, прошла 19 км <…> до удара о Скалистый хребет. <…> На заключительном этапе катастрофы произошло

формирование грязекаменных селевых потоков ниже ледового тела, остановленного тесниной Скалистого хребта. <…> После Кармадонских ворот грязекаменный сель прошел 17 км. <…> Объем селевых отложений оценивается <…> в 3–5 млн м^3» [*Поповнин, 2003*]. Эти события и привели к Геналдонской катастрофе с человеческими жертвами.

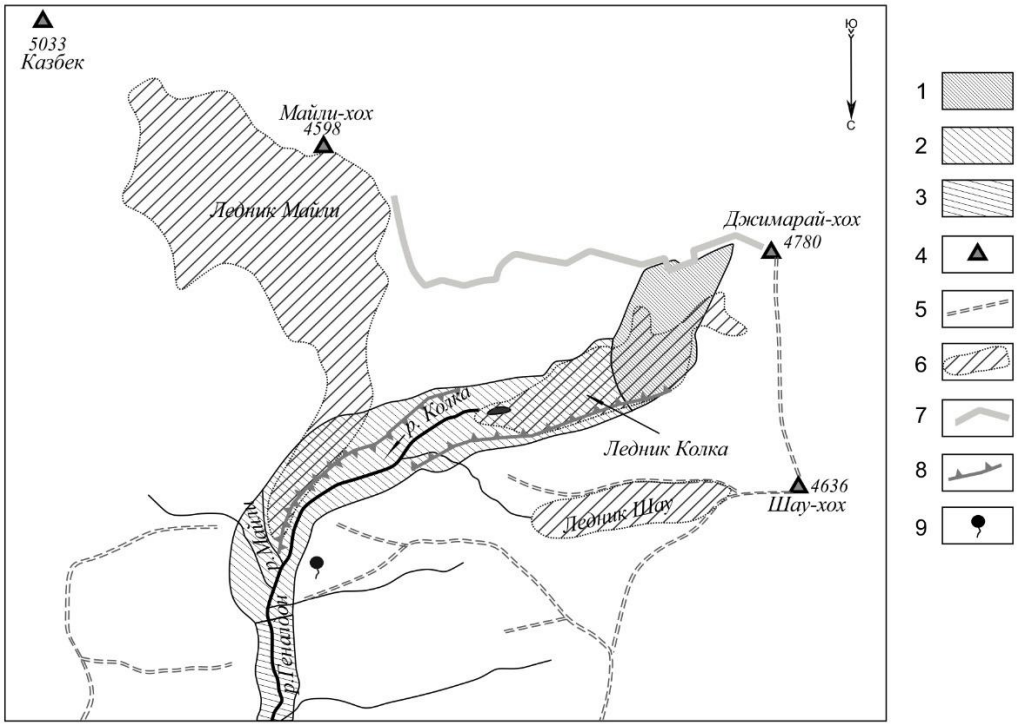


Рис. 2. Обзорная схема бассейна р. Колка: 1 – зона фирново-каменно-ледовых обвалов; 2 – зона начального движения ледово-каменной массы в 2002 г.; 3 – зона транзита ледово-каменного селя по р. Геналдон; 4 – горные вершины; 5 – горные хребты; 6 – ледники (в границах 2001 г.); 7 – участок висячих ледников; 8 – береговые морены ледников Колка и Майли; 9 – Верхне-Кармадонские минеральные источники. Схема составлена по материалам [*Поповнин, 2003*]

Мгновенная разгрузка ледника и огромная скорость движения каменно-ледовой лавины, общая масса которой оценивается приблизительно в 100 млн т, стали предметом многочисленных дискуссий и гипотез. Большинство исследователей считают, что для развития такого рода неординарных природных явлений необходимо мощное внешнее воздействие на ледник.

Анализ происходивших в ущелье Колка климатических, эндогенных и экзогенных процессов говорит о том, что Геналдонская катастрофа «была обусловлена, прежде всего, глубинными эндогенными геологическими факторами – тектонической активизацией и раскрытием зон повышенной проницаемости земной коры (глубинных разломов)» [*Бергер, 2006*].

В работе А.Ф. Барановского, Э.В. Запорожченко с большой долей вероятности показано, что выброс ледника в 2002 г. произошел в результате газовых извержений в ледниковом цирке Колка [*Барановский, 2023*]. Предполагалось, что место расположения газовых взрывов под тыловой частью ледника Колка приурочено к участку пересечения активных разломов.

Ниже, на основе дешифрирования материалов космической съемки приводится характеристика разноранговых разрывных тектонических нарушений, формирующих современный облик долины р. Колка и оказывающих влияние на развитие экзогенных и эндогенных процессов в ледниковом цирке Колка.

Методы

Результаты дешифрирования тектонических структур в районе долины р. Колка представлены на рис. 3–5. Для визуальной привязки, на всех рисунках подписан ледник Майли, который также показан на обзорной схеме бассейна р. Колка (рис. 2).

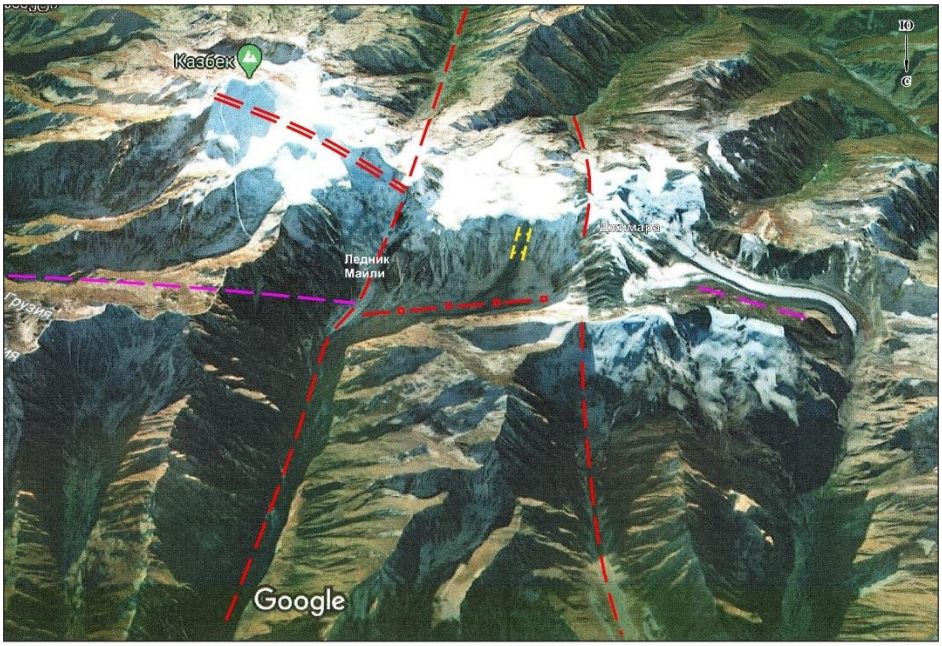


Рис. 3. Обзорная схема с элементами тектоники. Подложка: космический снимок Google, 2020 г.

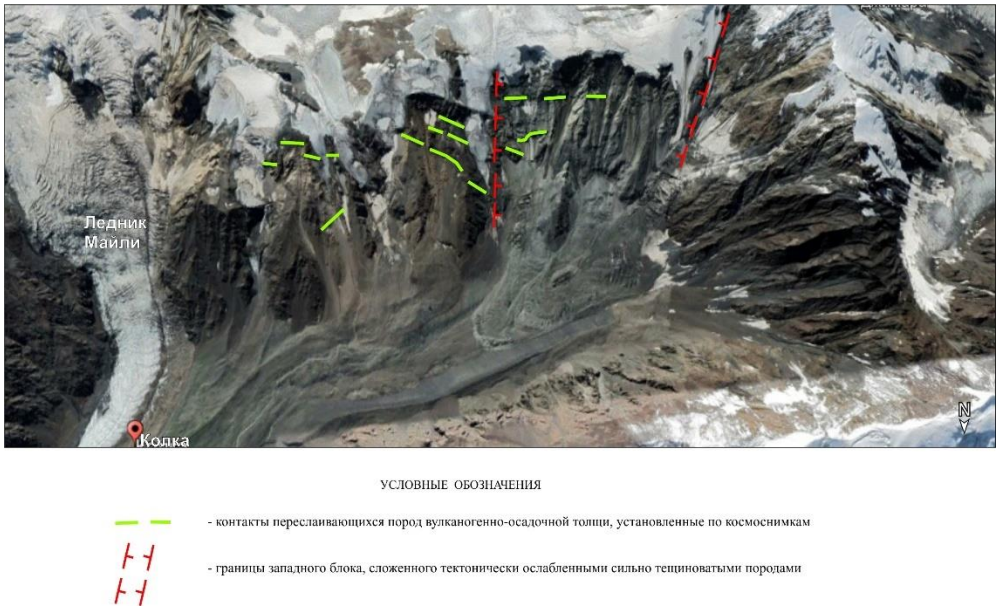
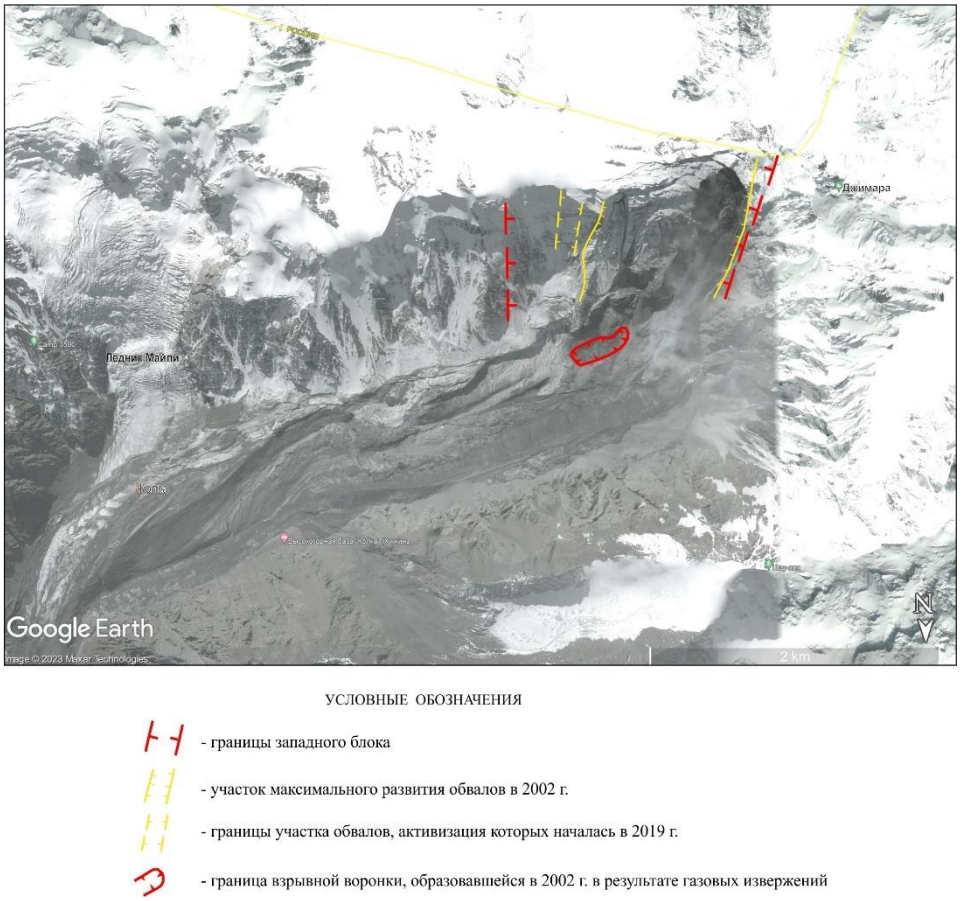


Рис. 4. Строение поперечной (меридиональной) тектонической зоны. Подложка: космический снимок Google, 2019 г.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- границы западного блока
- участок максимального развития обвалов в 2002 г.
- границы участка обвалов, активизация которых началась в 2019 г.
- граница взрывной воронки, образовавшейся в 2002 г. в результате газовых извержений

Рис. 5. Схема расположения обвальных участков и проявлений газовых извержений в ледниковом цирке Колка. Подложка: космический снимок Google от 25.09.2002

Рис. 3 представляет собой мелкомасштабную схему, охватывающую фрагмент высокогорной восточной части Центрального Кавказа с господствующей вершиной Казбек (абсолютная отметка восточной вершины – 5034 м) и расположенной в 9 км к западу от нее горой Джимарайхох (Джимара – 4780 м). В этом районе широко развито современное оледенение, в том числе, к северо-востоку от горы Джимарайхох находится ледник Колка.

Дешифрирование линейных неотектонических структур осуществлялось по характерным формам рельефа, главным образом, по врезам речных долин и уступам. Прямолинейность выделенных разломов свидетельствует о том, что все они являются крутопадающими.

На рис. 4 и 5 в ледниковом цирке Колка в крупном масштабе показаны тектонические структуры, участки проявления обвального процесса и газовых извержений.

Результаты

На обзорной схеме с элементами тектоники (рис. 3) отражены разрывные нарушения северо-западного, субмеридионального и широтного простирания. Среди них, главной тектонической структурой, вероятно, является разлом общекавказского (северо-западного) простирания, который прослеживается от г. Казбек до ледника Майли. Далее, западным продолжением этого нарушения, по-видимому, является разлом, показанный на геологической карте масштаба 1:200 000 (ПГО «Севкавгеология», 1989 г.) и проходящий по прямолинейному участку правого истока р. Мидаграбиндон, вдоль долинного ледника Мидаграбин.

На участке между ледником Майли и г. Джимарайхох нарушение СЗ простирания в рельефе явно не прослеживается, поскольку его пересекает более молодая поперечная меридиональная тектоническая зона, ограниченная с запада и востока разломами, расстояние между которыми постепенно сужается в южном направлении. В пределах поперечной зоны находится широтно ориентированное ущелье Колка, при этом, западный разлом поперечной меридиональной зоны проходит в истоках реки Колка, пересекая восточный склон г. Джимарайхох, а восточный – в районе слияния рек Колка и Майли, вдоль долин Майли – Геналдон.

Показанный на рис. 3 широтный разлом, протягивающийся от нижней части ледника Майли в восточном направлении, был откартирован при геологической съемке масштаба 1:200 000 и, скорее всего, является более древним по отношению к неотектоническим нарушениям СЗ и меридионального простирания. Западное продолжение широтного разлома вдоль р. Колка на геологической карте не показано, но подтверждается данными В.М. Котлякова с соавт.: «Ледник Колка находится на пересечении двух разломов – крупного субширотного, на котором расположена и долина Колки, и субмеридионального, проходящего в тыловой части ледника» [*Котляков, 2014, с. 96*]. Следует отметить, что в долине Колки широтный разлом в рельефе явно не выражен. Вместе с тем, о его наличии свидетельствуют некоторые косвенные признаки, в том числе: прямолинейность ущелья и его правобережного гребня, различное геоморфологическое и геологическое строение левого и правого склонов, вытянутая вдоль долины форма взрывной воронки, образовавшейся в 2002 г.

Строение верхней части поперечной меридиональной тектонической зоны в разрезе отражено на крутом правобережном склоне ущелья Колка (рис. 4), где обнажаются породы вулканогенно-осадочной толщи нижней подсвиты кистинской свиты и верхней подсвиты циклаурской свиты нижней юры (геологическая карта листа К-38-IX масштаба 1:200 000, ПГО «Севкавгеология», А.Н. Губкина, В.А. Ермаков, 1989 г.).

В пределах поперечной зоны, общая ширина которой на этом участке составляет порядка 4 км, уверенно выделяются два самостоятельных тектонических блока – восточный и западный. Граница между блоками достаточно четкая крутопадающая, практически вертикальная.

В западном блоке вулканогенно-осадочная толща характеризуется более интенсивной трещиноватостью и выделяется общим серым фототоном.

Определение характера движения этих блоков, положения и угла наклона плоскости сместителя разрывных нарушений является сложной задачей, для решения которой необходимо проведение детальных исследований, включая полевые наблюдения. Но очевидно, что оба блока находятся в зоне влияния современных тектонических движений и испытывают давление с разрядкой напряжений, прежде всего, в западном блоке, где происходят интенсивные обвалы.

В восточном блоке, на участке, прилегающем к западному блоку, общая субгоризонтальная ориентировка контактов пород меняется на более крутое залегание. Кроме того, на границе блоков по тектоническому нарушению наблюдается смещение переслаивающихся пачек осадочных и вулканогенных пород.

Западный блок представляет собой разрывную зону, сложенную тектонически ослабленными сильно трещиноватыми вулканогенно-осадочными породами. Поверхность этого участка склона изрезана эрозионными ложбинами. Разрушение пород западного блока происходит более интенсивно по сравнению с восточным блоком.

Установленные структуры поперечной тектонической зоны нашли отражение в рельефе и в плане образуют протягивающиеся южнее правобережного склона ущелья Колка линейные меридиональные геоморфологически выраженные формы. В том числе, центральной части тектонически ослабленной зоны западного блока соответствует пониженный рельеф (рис. 3). Сама же поперечная меридиональная зона на участке между г. Джимарайхох и правым бортом долины р. Майли в целом характеризуется более низким рельефом и возможно представляет собой грабен – вытянутый в меридиональном направлении опущенный тектонический блок, ограниченный

сбросами. Как отмечает С.А. Несмеянов: «<…> практически все <…> приповерхностные разрывы получают отражение в рельефе, т.е. являются рельефообразующими» [*Несмеянов, 2012, с. 305*].

В 2002 г. интенсивные обвалы горных пород и льда на правом борту ледникового цирка Колка были приурочены именно к западному тектоническому блоку (рис. 5), где в результате тектонических и гравитационных процессов сформированы выделяющиеся в рельефе крупные ступенчато расположенные гравитационно-тектонические блоки пород [*Барановский, 2023*] (рис. 6). Общая ширина западного блока на правом борту ледникового цирка Колка составляет 1,2 км, а участка максимальной активизации обвалов в 2002 г., который, собственно, и является отражением разлома, ограничивающего поперечную меридиональную тектоническую структуру с запада, – порядка 500–600 м.

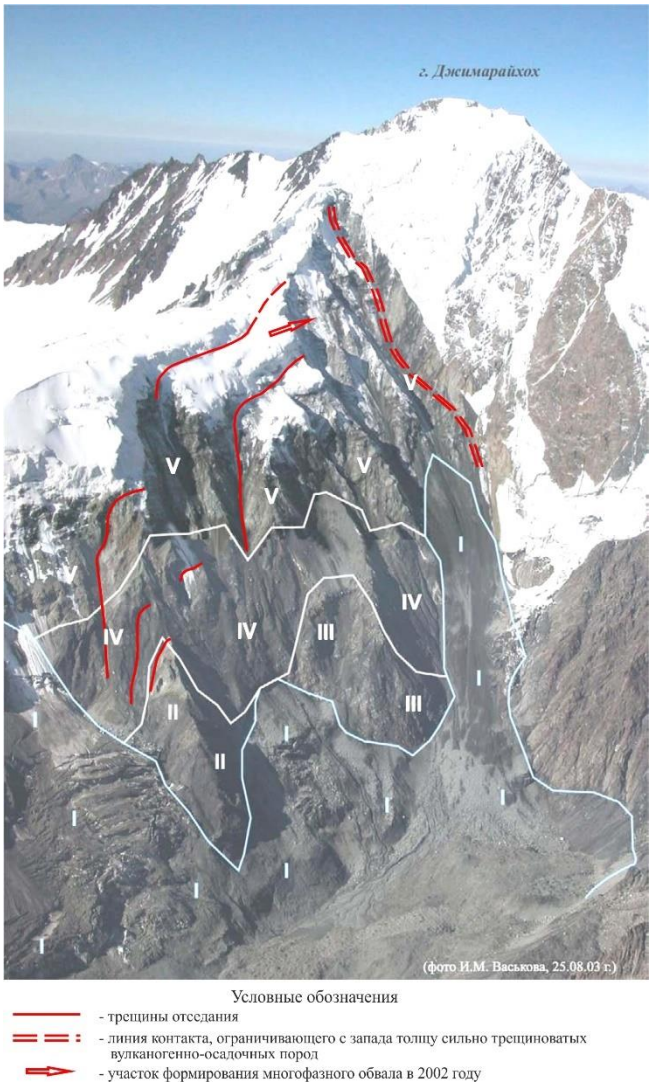


Рис. 6. Зона обвала с восточного гребня горы Джимарайхох. В основании склона лежат ледники, закрытые с поверхности чехлом обломочного материала (I), лавы и силлы долеритов (II), прорванные штоками гранодиоритов (III), которые перекрываются пачкой графитизированных сланцев (IV), выше залегают вулканогенно-осадочные породы (V), которые венчаются ледово-фирновыми полями. По данным [*Васьков, 2016, Барановский, 2023*]. Фото И.М. Васькова, 25.08.2003

По сведениям О.В. Тутубалиной с соавт., «установлено, что резкая активизация обвалов с северного склона г. Джимарайхох произошла в конце июля – первой половине

августа 2002 г. Обвалы льда с висячих ледников практически завершились к 20 сентября, скальные обвалы продолжались длительное время после катастрофы» [*Тутубалина, 2005*].

Начиная с 2019 г., немного восточнее участка интенсивных обвалов 2002 г., на космоснимках фиксируется другая, меньшая по масштабам, зона обвалов горных пород, которая, вероятно, отражает новый участок разрядки тектонических напряжений (рис. 3, 5).

Единственный снимок, представленный в Google до 2002 г. и датированный 1985-м годом имеет низкое качество изображения. Тем не менее, на нем видно, что в районе тектонически ослабленной зоны западного блока крутой правобережный склон ледникового цирка Колка завален большими массами обрушившегося льда и горных пород.

Проявление гравитационных процессов с периодами резкой активизации обвалов, сильная трещиноватость горных пород, образование гравитационно-тектонических блоков, являются весомыми аргументами, указывающими на современную тектоническую активность западного блока, который является отражением зоны разрывного нарушения сбросового типа. Скорее всего, вдоль этого разлома происходят максимальные смещения в пределах поперечной меридиональной зоны. В этой связи обращают на себя внимание следующие выводы С.А. Несмеянова: «Сложность строения разрывных структур позволяет допустить принципиальную возможность самостоятельного перемещения внутренних элементов шовных, разрывных и трещинных зон относительно обоих крыльев этих разрывных структур, т.е. осуществление особых внутриразрывных тектонических движений» [*Несмеянов, 2012, с. 314–315*]; «<…> можно считать доказанным существование особого вида тектонических движений – высокоскоростных, кратковременных смещений блоков в пределах всех типов разрывных структур». «Активными могут быть тектонические структуры любого ранга и размера». «Зафиксированы смещения <…> в зонах шириной от 0,1 до 6–8 км с обычной продолжительностью от нескольких месяцев до первых лет» [*Несмеянов, 2012, с. 301, 315, 319*].

С неотектоническими процессами вероятнее всего связана и высокая сейсмическая активность, установленная в летний период 2002 г., за 1–2 месяца до схода ледника Колка: «Детальное исследование сейсмической обстановки в Северной Осетии в 2002 г., выполненное В.Н. Дробышевым по данным Геофизической службы РАН, показало, что самым сейсмически активным месяцем в этом году был июль: за 18 суток массив Джимарайхох испытал шесть сейсмических ударов. 14 июля произошло самое большое землетрясение: в эпицентре, который находился всего в 8 км к западу от вершины, сила подземного толчка достигала 5,2 баллов. В этот же день было еще два удара, оказавших воздействие на гору силой 2–3,5 балла. <…> Следующее значительное землетрясение силой 3,4 балла зафиксировано здесь 22 августа, с эпицентром в 70 км к северо-северо-западу от горы Джимарай-хох» [*Котляков, 2014, с. 92*].

На северном продолжении западного блока, в днище долины р. Колка, расположена взрывная воронка (рис. 5, 7), образовавшаяся в результате газовых извержений, ставших главной причиной выброса ледника Колка 20 сентября 2002 г. [*Барановский, 2023*]. Вероятнее всего, место проявления газовых извержений приурочено к узлу пересечения широтного разлома, проходящего вдоль долины р. Колка, с западным тектоническим блоком, где в тектонически ослабленной зоне породы наиболее проницаемы для освобождающихся из магмы газов и пара. Хорошо сохранившийся вокруг взрывной воронки шлейф обломков горных пород (рис. 7) может свидетельствовать о неоднократных взрывах газа и пара, т.к. выброшенный из воронки при первом извержении обломочный материал не мог остаться нетронутым. При движении, ледник должен был захватить эти обломки или хотя бы оставить на поверхности шлейфа какие-то следы.

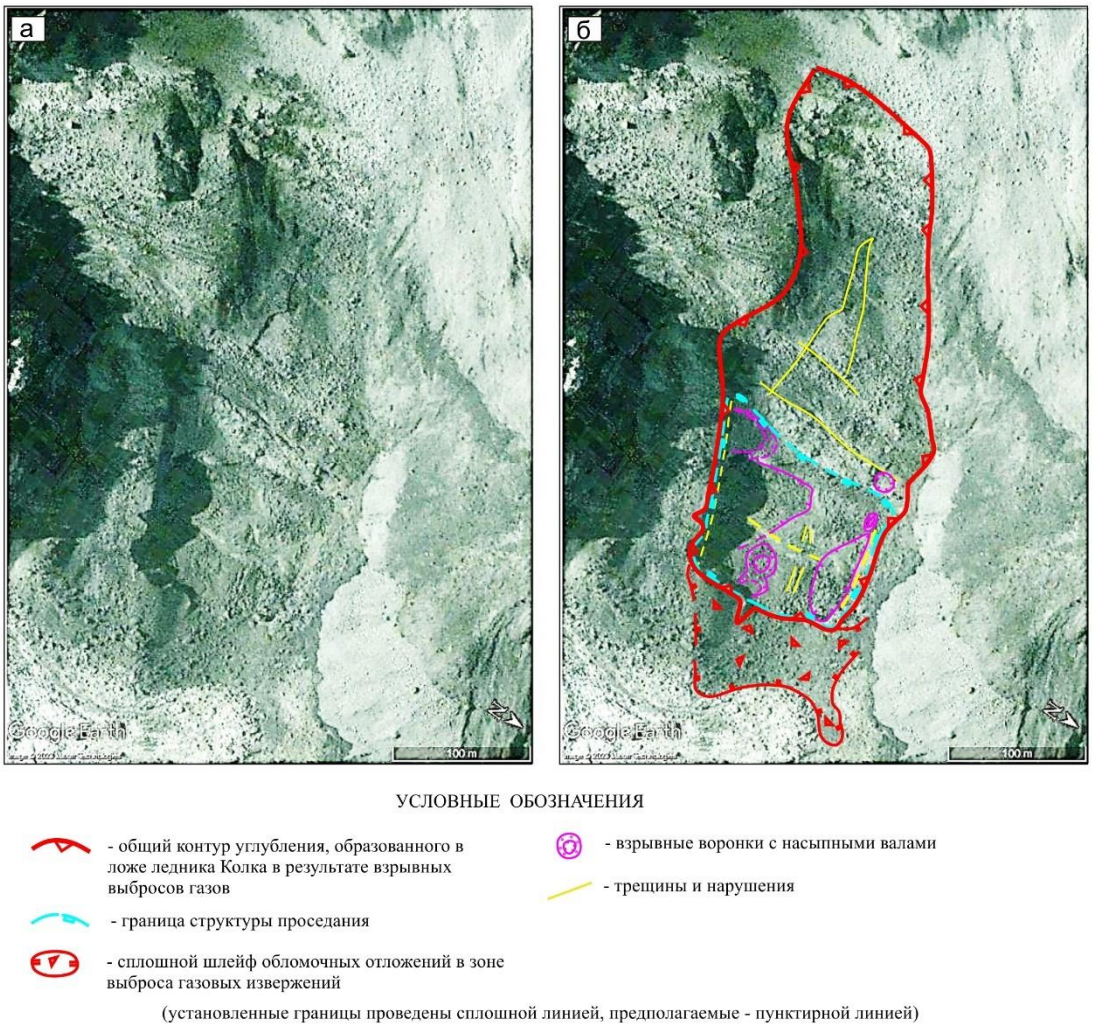


Рис. 7. Участок проявления эндогенных процессов в днище долины р. Колка: а – фрагмент космического снимка Google от 25.09.2002; б – фрагмент того же космического снимка с данными интерпретации форм рельефа, сформировавшихся в результате деятельности неотектоники и газовых извержений. По данным [*Барановский, 2023*]

О возможности проявления вулканогенных процессов в долине р. Колка также свидетельствуют данные В.Н. Арбузкина с соавт. и А.Г. Гурбанова. «О наличии приповерхностной магматической камеры в истоках р. Геналдон и, что особенно важно, под ледником Колка свидетельствуют результаты обработки тепловых космических снимков <…>», «<…> из анализа графиков с динамикой температур видно, что пики максимальных значений температур появлялись практически одновременно. Такое поведение теплового поля можно объяснить динамикой эндогенных процессов, например поступлением в приповерхностную магматическую камеру/камеры новых (и небольших по объему) порций магматического расплава <…>» [*Арбузкин, 2014*].

А.Г. Гурбанов, рассматривая критерии оценки современного состояния Казбекского вулканического центра, указывает на «наличие современных приповерхностных магматических камер и питающего их глубинного очага с расплавом, выявленных дистанционными и геофизическими методами исследований» [*Гурбанов, 2014*].

Таким образом, наблюдающаяся на протяжении длительного времени активность обвалов горных пород и льда в районе одного и того же участка правобережного склона ледникового цирка Колка, а также проявление масштабных обвалов и газовых извержений в 2002 г. свидетельствуют о том, что зона разлома, ограничивающая

поперечную меридиональную структуру с запада, и, вероятно, широтный разлом, проходящий по долине р. Колка, являются современными активными разрывными нарушениями, в пределах которых в определенные периоды времени резко нарастают тектонические напряжения и амплитуды смещений по разломным зонам.

Надо полагать, что тектонические движения, особенно в периоды сильной активизации, оказывают как непосредственное, так и опосредованное влияние на ледник Колка, тыловая часть которого расположена на пересечении широтного и меридионального разломов. В том числе, в 2002 г. масштабные обвалы, вызванные неотектоническими движениями, сформировали мощный конус выноса на поверхности ледника Колка («к моменту схода лед перевалил через левую морену, т.е. увеличил свою мощность более чем в 2,5–3 раза за счет обвальных масс висячих ледников» [*Чотчаев, 2014*]), а газовые извержения, которые, вероятно, также связанны с неотектоникой, стали причиной одномоментного выброса всей огромной массы ледника 20 сентября 2002 г. [*Барановский, 2023*].

За прошедшие годы после Геналдонской катастрофы 2002 г. выполнен большой объем научных исследований разной направленности, высказано множество предложений о проведении мониторинговых наблюдений, предупредительных и даже превентивных мер с целью исключения в дальнейшем трагических последствий, связанных с внезапными сходами ледника Колка, формирующими каменно-ледовые лавины и селевые потоки. В том числе, гляциологический мониторинг [*Петраков, 2017*] позволяет получить очень важные данные о динамике и объемах постоянно меняющегося ледника Колка.

В этой связи, приведем мнение Бергера М.Г. о целях и задачах исследований после Геналдонской катастрофы 20 сентября 2002 г.: «В последнее время получили распространение представления о том, что неважно, что (какое именно природное явление) и почему (благодаря действию каких именно природных факторов) произошло 20 сентября 2002 г. на леднике Колка. Главное – создать систему мониторинга, чтобы знать «что происходит» <…> Без ясного понимания природы катастрофы на леднике Колка и в Геналдонском ущелье, того, что произошло 20 сентября 2002 г., каковы непосредственные причины этой катастрофы (вызвавшие ее природные факторы), что ей предшествовало – каковы ее предшественники (предупредительные признаки), никакая обоснованная и грамотная система мониторинга не может быть создана» [*Бергер, 2014а*].

«Установление природы грандиозной катастрофы на леднике Колка и в Геналдонском ущелье 20 сентября 2002 г., определение причин этой катастрофы, источников энергии, движущих сил, условий подготовки и проявления, предвестников, механизма протекания – сложная научная проблема, решение которой требует глубоких знаний и больших усилий. Оно имеет отнюдь не только теоретико-познавательное, но и исключительно большое прикладное значение: только на основе решения этой проблемы возможны грамотный целенаправленный мониторинг состояния ледника Колка и приледниковой зоны, обоснованный прогноз развития ледника, в том числе времени проявления его катастрофических пульсаций, планирование и своевременное эффективное проведение работ по их предотвращению и минимизации негативных последствий» [*Бергер, 2014б*].

Основываясь на изложенных выше данных о проявлении эндогенных геологических процессов, в дополнение к действующим в настоящее время системам мониторинга, предлагается создать в ледниковом цирке Колка геодинамический полигон для проведения периодических высокоточных геодезических измерений. Эти наблюдения позволят определить динамику (скорость, направление, амплитуды) современных движений земной поверхности и, главное, зафиксировать период резкой активизации перемещений в разломных зонах, что и привело к катастрофе 2002 г.

Как отмечает С.А. Несмеянов, «Локальные измерения нацелены на выяснение реального хода тектонических процессов. Поэтому режимные измерения на геодинамических полигонах непрерывны или характеризуются частым повторением. Они дают основной материал для характеристики типов и величин современных движений земной коры <…>». «Особое внимание уделяется активным разрывам,

сочленениям тектонических структур и районам эпицентров землетрясений» [*Несмеянов, 2012, с. 327*].

Наряду с геодезическими измерениями следует организовать мониторинг для наблюдений за обвальным процессом, поскольку резкая активизация обвалов, как в 2002, так и в 1902 гг., стала индикатором последовавших через непродолжительное время сходов высокоскоростных каменно-ледовых лавин, формирующихся в ущелье Колка. В том числе, наблюдения должны включать дистанционное зондирование Земли из космоса.

Выводы

В результате дешифрирования космических снимков установлено, что долина р. Колка расположена в пределах меридиональной неотектонической структуры, ограниченной с запада и востока разрывными нарушениями.

Меридиональная структура в ледниковом цирке Колка в поперечном сечении разделяется на два самостоятельных тектонических блока: восточный и западный. Западный блок находится в зоне активного разлома и сложен тектонически ослабленными сильно трещиноватыми породами.

К западному блоку в 2002 г. был приурочен участок максимального развития масштабных обвалов льда и горных пород. На северном продолжении западного блока, на пересечении с широтным разломом, где находится тыловая часть ледника Колка, произошло газовое извержение, которое и стало решающим фактором одномоментного выброса огромной массы ледника 20 сентября 2002 г.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что масштабные обвалы и взрыв газов и пара в 2002 г. были связаны с тектонической активностью как меридионального разлома, отражением которого является зона активных обвалов в западном блоке, так и широтного нарушения, проходящего вдоль долины р. Колка.

Таким образом, можно констатировать, что неотектонические движения в той или иной мере оказывают влияние на ледник Колка и являются одной из причин быстрой разгрузки ледника с катастрофическими последствиями, связанными со сходами каменно-ледовой лавины и селевых потоков.

В этой связи, с целью получения оперативной информации о динамике перемещений в тектонических зонах, необходима организация в районе ледникового цирка Колка геодинамического полигона для проведения режимных высокоточных геодезических измерений за современными движениями земной поверхности. Также необходимо ведение мониторинга гравитационных процессов, которые являются индикатором периодов резкого возрастания неотектонической активности.

Особенности возможного влияния современных тектонических движений на сход каменно-ледовой лавины из ущелья Колка в 2002 г. дают основание для оценки роли неотектонического фактора и в других очагах зарождения подобных масштабных лавин. В первую очередь, это актуально для ледниковых цирков, имеющих схожие с Колкой геоморфологические условия.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь при работе над статьей сотрудникам филиала «Южный региональный центр государственного мониторинга состояния недр» ФГБУ «Гидроспецгеология»: И.Б. Королеву, Э.А. Светашовой, О.А. Мирошниковой.

Список литературы

Арбузкин В.Н., Фельдман И.С., Трофименко Е.А. Результаты первого этапа электроразведочных работ АМТЗ и МТЗ в Геналдонском ущелье // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 92–103.

Барановский А.Ф., Запорожченко Э.В. К вопросу о факторах схода ледника Колка в 2002 году // Гидросфера. Опасные процессы и явления. Т 5. Выпуск 1. Санкт-Петербург, 2023. С. 8–33.

Бергер М.Г. Природная катастрофа на леднике Колка 20 сентября 2002 года – внезапный газодинамический выброс ледника // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах. Доклады международной конференции Владикавказ – Москва, 23 – 26 июня 2004 г. Владикавказ. Олимп, 2006. С. 41–56.

Бергер М.Г. О природе катастрофы на леднике Колка и в Геналдонском ущелье 20 сентября 2002 г. // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014а. С. 247–251.

Бергер М.Г. О возражениях против газодинамической природы катастрофы на леднике Колка и в Геналдонском ущелье 20 сентября 2002 г. // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014б. С. 268–270.

Васьков И.М. Катастрофические обвалы: происхождение и прогноз. Владикавказ: ООО НПКП «МАВР», 2016. 369 с.

Гурбанов А.Г. Результаты проведенных геологических, геофизических, геодезических и дистанционных исследований как основа разработки Программы комплексного мониторинга с отслеживанием и анализом признаков вулканической опасности в пределах Казбекского вулканического центра в Геналдонском ущелье // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 113–114.

Заалишвили В.Б., Невская Н.И., Харебов К.С. Анализ инструментальных записей схода ледника Колка (по данным локальной сети сейсмических наблюдений) // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 141–149.

Котляков В.М., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Десинов Л.В., Осокин Н.И., Чернов Р.А. Кармадонская катастрофа: что случилось и чего ждать дальше / Русское географическое общество. Москва: ООО «Издательский дом «Кодекс», 2014. 184 с.

Несмеянов С.А. Инженерная геотектоника / Москва: Наука, 2004. 783 с.

Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Оценка и прогноз динамики ледовых образований и рельефа после Геналдонской катастрофы 2002 года // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах. Доклады международной конференции Владикавказ – Москва, 23–26 июня 2004 г. Владикавказ. Олимп, 2006. С. 171–190.

Петраков Д.А., Коваленко Н.В., Черноморец С.С., Бойко Е.С., Дробышев В.Н., Аристов К.А. Гляциологический мониторинг ледника Колка в 2002–2014 гг.// Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе. Доклады международной конференции 2014 г. Владикавказ. Вестник Владикавказского научного центра. Том 13. № 4. 2015 г. С. 43–50.

Поповнин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Гляциальная катастрофа 2002 года в Северной Осетии // Криосфера Земли. 2003. Т. VII. № 1. С. 56–77.

Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Петраков Д.А. Ледник Колка перед катастрофой 2002 года: новые данные // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 4. С. 62–71.

Чотчаев Х.О., Малиев И.Н. О гидродинамической и газодинамической гипотезах причин схода ледника Колка 20 сентября 2002 г. // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 265–270.

Необычные селевые потоки на Кавказе в 2022–2023 годах

М.Ю. Беккиев, М.Д. Докукин, Р.Х. Калов, А.Р. Акаев

Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия, inrush@bk.ru

Аннотация. Приводятся результаты исследования селепроявлений в верховьях долин рр. Малка и Черек-Безенгийский в 2022 г. (Кабардино-Балкарская республика, Россия) и в долине р. Бубисцкали (Грузия) в 2023 г. В работе использованы материалы аэрофотосъемок и разновременные космоснимки. Анализ материалов показал, что в условиях изменения климата в высокогорной зоне образуются селевые потоки на участках ледниково-моренных комплексов, где ранее они не фиксировались. Очагами формирования селей были длительно существующие слабонаклонные моренные массивы, содержащие лед: гряда береговой морены ледника Мижиргичиран с острым гребнем (бассейн р. Черек Безенгийский), языкообразный моренный массив с фронтальным уступом (верховья правого притока р. Малка). Селевые потоки формировались не в результате эрозионных или оползневых процессов, а стеканием разжиженных моренных масс в результате таяния внутреннего льда и проникновения по трещинам поверхностного стока талых вод с выше расположенного ледника. В долине р. Бубисцкали 03.08.2023 произошел редкий обвально-селевой процесс в результате падения и сползания скального блока на ледник со срезанием части ледника. Обвальными массами были заблокированы подледные каналы стока талых вод, и затем произошел прорыв накопившихся в леднике масс воды и ее сброс в виде паводка и селевого потока. Ниже по долине в поток добавился ливневый сток и материал склоновых селей и оползней. Такая же блокировка подледных каналов стока талых вод с дальнейшим прорывом наблюдалась в леднике Мижиргичиран. В этом случае они были закрыты плотными грязекаменными массами от селя с береговой морены. Наблюдающиеся сложные селевые процессы и селевые очаги необычных морфологических типов предопределяют необходимость постоянного мониторинга ледниково-моренных комплексов с целью оценки потенциальных селевых угроз в связи с продолжающейся деградацией ледников.

Ключевые слова: *космоснимок, селевой поток, ледник, моренный массив, береговая морена, обвал*

Ссылка для цитирования: Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., РКалов.Х., Акаев А.Р. Необычные селевые потоки на Кавказе в 2022–2023 годах. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 50–59.

Extraordinary debris flows in the Caucasus in 2022–2023

M.Yu. Bekkiev, M.D. Dokukin, R.Kh. Kalov, A.R. Akaev

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, inrush@bk.ru

Abstract. The results of a study of debris flows in the upper reaches of the valleys of the Malka and Cherek-Bezengiysky rivers in 2022 (Kabardino-Balkarian Republic, Russia) and in the valley of the Bubistskali River (Georgia) in 2023 are presented. The work uses aerial photography materials and multi-time satellite images. The analysis of the materials showed that under the conditions of climate change in the high-altitude zone, debris flows form in areas of glacial-moraine complexes where they were not previously recorded. The original site of debris flow formation were long-existing slightly inclined moraine arrays containing ice: the ridge of the lateral moraine of the Mizhirgichiran glacier with a sharp ridge (the basin of the Cherek Bezengiysky River), a tongue-shaped moraine array with a frontal ledge (the upper reaches of the right tributary of the Malka River). Debris flows

were formed not as a result of erosion or landslide processes, but by the runoff of liquefied moraine masses as a result of melting of internal ice and penetration of surface runoff of meltwater from the glacier located above. In the Bubistskali River valley 03.08.2023 a rare rockslide – debris flow process occurred as a result of the fall and sliding of a rock block onto a glacier and cutting off part of the glacier. The landslide masses blocked the subglacial channels of meltwater runoff, and then there was an outburst of the accumulated masses of water in the glacier and its discharge in the form of a flood and a debris flow. Down the valley, rainwater runoff and the material of slope debris flows and landslides were added to the stream. The same blockage of the subglacial channels of meltwater runoff with a further outburst was observed in the Mizhirgichiran glacier. In this case, they were covered with dense mudstone masses from debris flows from the lateral moraine. The observed complex debris flow processes and debris flow original sites of unusual morphological types determine the need for constant monitoring of glacial-moraine complexes in order to assess potential debris flow threats due to the ongoing degradation of glaciers.

Key words: *satellite image, debris flow, glacier, moraine massif, lateral moraine, rockslide*

Cite this article: Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Akaev A.R. Extraordinary debris flows in the Caucasus in 2022–2023. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 50–59.

Введение

В условиях изменения климата в горах наблюдается ускорение темпов деградации ледников. Это в свою очередь приводит к вовлечению освободившихся ото льда территорий в селевые процессы и появлению новых селевых очагов, которые по своему потенциалу могут значительно превышать ранее изученные и зафиксированные в картах и кадастрах [*Кадастр, 2015*]. При этом изменяются сами селевые процессы и развиваются сложные процессы взаимодействия различных факторов и цепочки процессов с различными причинно-следственными связями, когда следствие одного процесса становится причиной другого [*Assessment of Glacier, 2017; Беккиев, 2022*]. Картина селевой деятельности и активности усложняется. Особенно это касается селевых процессов в массивах морен, содержащих погребенные и мертвые льды, которые достигают апогея после длительного периода подготовки. Ранее выявленные закономерности селевых процессов требуют уточнений и изменений, например традиционные типы селевых очагов, приведенные в литературе и руководящих документах [*РД 52.30.238-90*]. По результатам мониторинга селевых процессов появляются возможности обобщения и развития представления о масштабах селевой деятельности в конкретных районах и степени селевой опасности. В настоящей работе приведены примеры некоторых необычных селепроявлений, произошедших в последние годы на Кавказе, которые в дальнейшем предполагается учитывать при оценке потенциальных селевых угроз.

Материалы и методы

В работе были использованы космоснимки Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м, Landsat 4–5 с разрешением 30 м и Landsat 8–9 с разрешением 15 м с сайта https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/ с а также космоснимки сверхвысокого разрешения с сервиса Google Earth (19.09.2011 и 15.10.2019) на участки селевых очагов в верховьях р. Малка и р. Бубисцкали. Космоснимок спутника PlanetScope на участок ледника Буба (Тбилиса) 06.08.2023 получен с сайта https://eos.org/thelandslideblog [*The 4*

August, 2023]. Разновременные космоснимки совмещались в программе ArcMap по опорным точкам.

Для анализа селепроявлений в верховьях рек Малка и Мижирги были проведены аэрофотосъемки с применением квадрокоптера DJI Mavic Air 2 и построены ортофотопланы и цифровые модели местности в программе Agisoft Metashape Professional, в том числе до и после селя в долине р. Мижирги.

Результаты исследования и обсуждение

Особенности селевого потока 13.08.2022 на р. Мижирги (бассейн р. Черек Безенгийский)

На рис. 1 показана зона зарождения селевого потока у ледника Мижиргичиран.

Рис. 1. Зона зарождения селя в верховьях долины р. Мижирги. Фото с квадрокоптера 23.08.2022. 1 – селевой очаг на правой береговой морене ледника Мижиргичиран, 2 – селевой очаг у конца ледника Мижиргичиран

По свидетельству очевидцев селевой поток по р. Мижирги вышел к альплагерю «Безенги» в 21:30 13 августа 2022 г. Осадков в этот день зафиксировано не было. В результате сравнения материалов аэрофотосъемок 26.07.2022 и 28.08.2022 было выявлено, что формирование селя происходило в два этапа. На рис. 2 показаны фрагменты ортофотопланов двух селевых очагов.

Особенностью селевого очага № 1 (рис. 1, рис. 2*а*, *б*) является то, что подготовка формирования селя проходила длительный период. В работе [*Беккиев, 2023*] показано, что массив гряды береговой морены был деформирован в результате наступания ледника Мижирги в начале XXI в. и продолжения его активности в дальнейшем. В результате аэрофотосъемки 26.07.2022 выявлено, что в кармане береговой морены к тому времени уже была четкая зияющая трещина протяженностью 450 м и шириной до 1,5 м, по которой происходило сползание массива береговой морены, и в которую уходил водный поток, протекавший здесь ранее. Произошло водонасыщение массива морены и его сход в виде плотного грязекаменного потока. На месте гряды береговой морены, возвышающейся над тальвегом кармана на 3–4 м и над ледником на 8 м, образовался

врез длиной 230 м и шириной 35–40 м (рис. 2*б*). Высота правой стенки среза составила около 16–20 м, а левой – 6–9 м. Средний уклон очага по дну среза на расстоянии 200 м был небольшим – 6,7°. Тот факт, что ниже среза поток углубился на 4 м в тело ледника, позволяет сделать вывод о том, что это был не оползневой процесс сдвига морены, а именно селевой поток со значительной долей водной составляющей. Объем обломочного материала, вынесенный из массива морены составил около 110 тыс. м^3 [*Акаев, 2023]*. Следует отметить, что морфологически выраженный в виде гряды береговой морены селевой очаг ранее не мог оцениваться очагом, так как еще не было зафиксировано таких случаев.

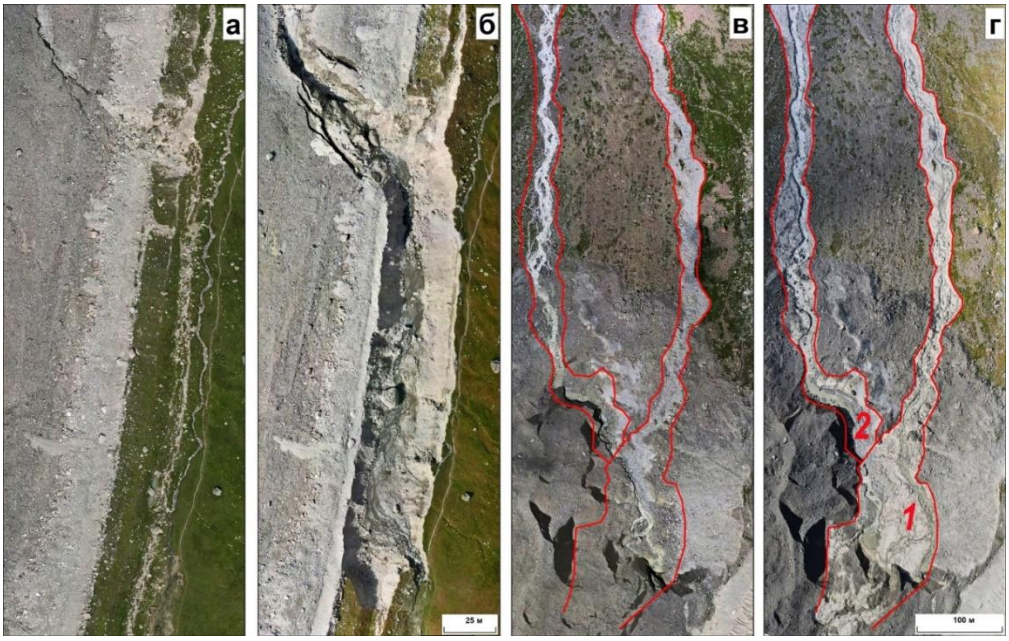


Рис. 2. Участок правой береговой морены ледника Мижиргичиран до и после селя на фрагментах ортофотопланов: а – 26.07.2022, б – 28.08.2022. Участок конца ледника Мижирги и формирования второй волны селя 13 августа: в – 26.07.2022, г – 28.08.2022. 1 – отложения селя с береговой морены, 2 – участок размыва русла и отложений селя в результате прорыва накоплений воды в подледных каналах стока ледника Мижирги

Далее селевой поток прошел по поверхности ледника 660 м и отложил часть материала толщиной до 8 м (№ 1 на рис. 2*г*) на участке выхода водного потока из-под ледника. В результате был заблокирован подледный канал стока талых вод с ледника, и через некоторое время водный поток прорвался на поверхность на участке слева от отложенной селевой массы (№ 2, рис. 2*г*). Если в первой фазе селевого потока массы, сошедшие с массива береговой морены, проходили по правому руслу р. Мижирги без врезания в него, а отлагая часть материала по всей ширине, то во второй фазе селевого потока водный поток, вырвавшийся из ледника, врезался в русло левого потока. За счет эрозионного процесса в левом русле на протяжении 1600 м общий объем вынесенного селем материала и отложенного на участке перед альплагерем «Безенги» с частичным заносом его территории, а также на слиянии с рекой Черек Безенгийский составил около 200 тыс. м^3 [*Мальнева, 2023б*]. Следует отметить, что за время существования альплагеря селевой поток на его территорию не выходил.

Особенности селевого потока 04–05.10.2022 на р. Султангарасу (бассейн р. Малка)

Р. Султангарасу (другое название Кала-Кулак) является правым притоком р. Малка ниже слияния рек Бирджалысу и Кызылкол. Сель начался в ночь на 5 октября 2022 г. после ливней, продолжавшихся двое суток, зафиксированных на территории

минеральных источников на высоте 2350 м. Селем была перекрыта дорога и занесена часть территории с расположенными домиками. По данным метеостанции Чегет на высоте 3040 м 4 октября выпало более 60 мм осадков в виде ливневого снега (http://www.pogodaiklimat.ru/). Анализ имеющихся космоснимков на этот период времени показал, что в 10:50 4 октября часть территории соседнего бассейна р. Каракаясу была открыта от облаков и до высоты около 2900 м покрыта свежим снегом (космоснимок Landsat-8). До этого снег выпадал в сентябре – 25 сентября на массиве селевого очага лежал плотный снег (космоснимок Landsat-8). 6 октября после схода селя снежный покров был сплошным с четкой границей до высоты примерно 2970 м (космоснимок Sentinel-2). Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод о том, что на участке селевого очага перед сходом селя осадки выпадали в основном в твердом виде.

На рис. 3*б, в* показано состояние селевого очага 7 октября 2022 г. в момент проведения аэрофотосъемки. К этому времени снежный покров оставался в виде отдельных локальных фрагментов в складках местности.

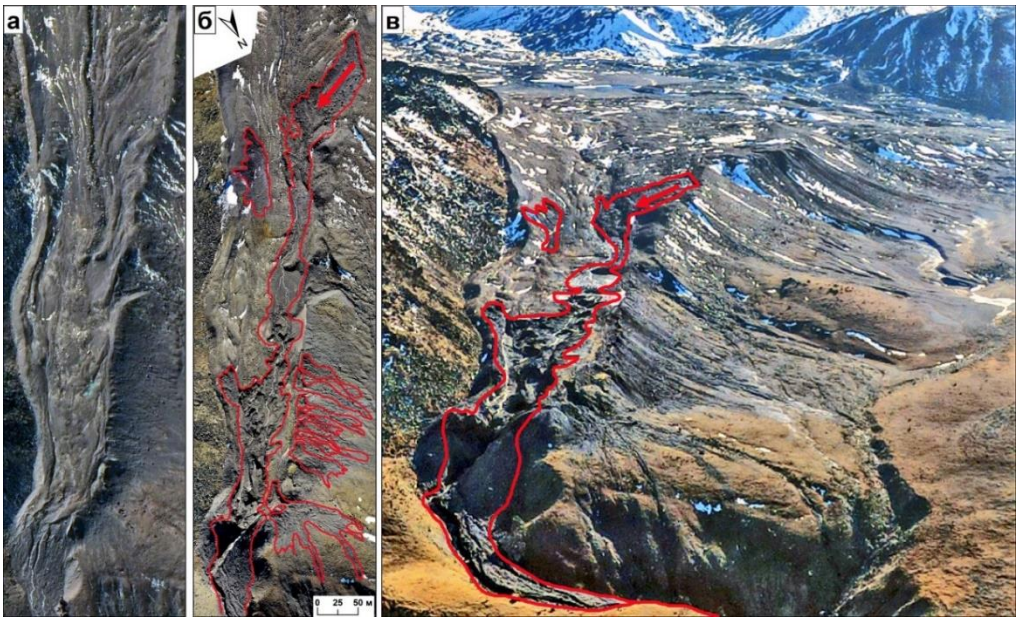


Рис. 3. Участок селевого очага в верховьях долины р. Султангарасу в бассейне р. Малка: а – космоснимок Pleiades-1A 15.10.2019 (Google Earth), б – ортофотоплан 07.10.2022 (красные контуры – зона селевой денудации моренных масс), в – фото моренного массива с квадрокоптера 07.10.2022 с контуром зоны селевой денудации (проявления микроселей не показаны). На фрагментах б и в стрелкой показано направление стекания разжиженных моренных масс

Очаг селя на р. Султангарасу морфологически выражен в виде языкообразного моренного массива, прислоненного справа к склону древнего лавового потока, а слева возвышающегося над дном долины на 40–50 м (рис. 3*в*), чем создается впечатление, что это террасовидная береговая морена древнего ледника, заполнявшего всю долину р Султангарасу в XVII в., как показано на картах [*Сейнова, Золотарев, 2001; Золотарев, 2009]*. Отличительной особенностью этого моренного языка шириной между гребнями боковых валов в нижней части 70 м, а на участке, откуда стекала селевая масса – до 190 м, является медленное движение его поверхности [*Мальнева, 2023а*]. Движение масс моренного языка в осевой части происходило со средней скоростью 2,2–2,3 м/год в 1957–2011 гг., а в период 2011–2019 гг. произошло ускорение – в среднем до 6,8 м/год.

Моренные массы в виде селевого потока стекали по поверхности основной части массива без образования четких эрозионных форм (рытвин и врезов) – остались углубления неправильной формы. В верхней части зоны селеформирования (отмечено стрелкой на рис. 3*б, в*) угол наклона поверхности составлял 9,5°. Разжиженные моренные

массы сошли фронтом шириной 40–45 м. В нижней части моренного языка ширина зоны стекания моренных масс составляла 85 м, толщина слоя сошедшей вниз массы – в среднем 6 м (от 3–4 м до 8–10 м). На фронтальном уступе моренного языка образовался врез глубиной до 12–13 м и шириной – до 45 м. Общий объем селевой массы, вынесенной из моренного массива, приблизительно составил около 50 тыс. м^3, что является максимальным значением, как отмечено в Кадастре селевой опасности [*Кадастр, 2015*].

Угол наклона поверхности моренного языка на участке отрыва и выноса моренных масс в нижней его части составлял всего 6–7°, что в условиях неровности подстилающей поверхности (см. рис. 3*в*) свидетельствует о том, что для перемещения такого количества моренных масс потребовалось накопление больших объемов воды для их разжижения и длительный период подготовки процесса. Поэтому селевой поток мог формироваться даже при околонулевых температурах воздуха в октябре.

Накоплению водных масс в теле моренного языка способствовало неравномерное движение и взаимодействие различных по форме участков моренных масс. Тот факт, что ускорение движения происходило в течение последних 10–15 лет, свидетельствует также о реакции погребенных льдов на потепление климата. В это время наблюдалось ускоренное таяние и сокращение ледников.

Одной из возможных причин усиленного таяния погребенного льда могло быть воздействие вулканических газов, выход которых в виде высокого столба был зафиксирован 8 июня 2020 г. туристами на участке на расстоянии 1 км к югу от зоны селеформирования [*Мальнева, 2023а*].

Особенности селевого потока 03.08.2023 на р. Бубисцкали (бассейн р. Чанчахи, Грузия)

Сель, сошедший по р. Бубисцкали 3 августа 2023 г., разрушил курорт Шови и привел к гибели 32 человек. На рис. 4 показана зона поражения селем в долине р. Бубисцкали протяженностью около 13,5 км, площадью 2,26 км^2.

Рис. 4. Зона поражения селем 03.08.2023 в долине р. Бубисцкали (показана красным контуром) на космоснимке Sentinel-2 от 17.08.2023 г.

Процесс, который вызвал катастрофу на курорте Шови в Грузии, называли оползнем, и вначале не было информации о зоне его зарождения. 8 августа 2023 г. был выставлен в интернете космоснимок PlanetScope image от 6 августа (*The 4 August, 2023*), который авторами был привязан к космоснимкам Sentinel-2 и космоснимку Google Earth. Было проведено сравнение с ситуацией до схода обвала (селя) и оконтурена зона поражения обвальным и селевым процессом в ледниковой зоне (рис. 5).

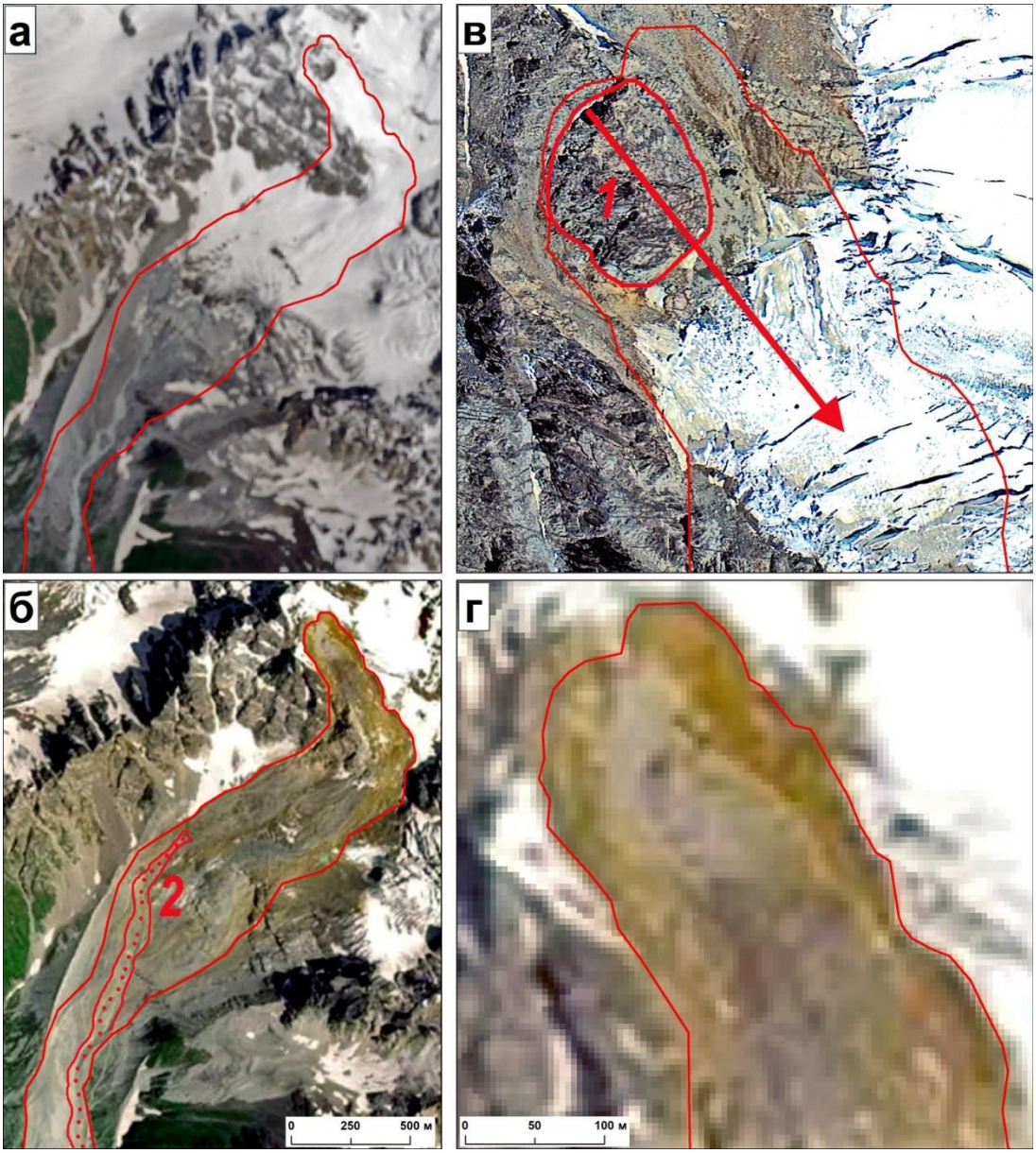


Рис. 5. Очаг обвально-селевого процесса в долине р. Бубисцкали на космоснимках: а – Sentinel-2 от. 13.07.2023, б – PlanetScope от 06.08.2023, в – Google Earth от 19.09.2011, г – PlanetScope от 06.08.2023. 1 – контур обвалившегося скального блока над ледником Буба (современное название в Грузии – Тбилиса), 2 – след прохождения паводка и селя с ледника Буба. Красные контуры на всех фрагментах – зона поражения обвально-селевым процессом 03.08.2023. Красной стрелкой показано направление обрушения скального блока

Линия отрыва обвала, инициировавшего селевой процесс, находилась на высоте 3820 м. Селевые массы остановились на высоте 1400 м. Средний угол наклона пути схода обвально-селевой массы составил 10,2°.

По данным (*The 4 August, 2023*) начало обвально-селевого процесса определено по сейсмическому сигналу в 14:57 по местному времени, а видео наблюдателей показало, что массы достигли курорта около 15:05 (продолжительность события – 8 мин). Это соответствует средней скорости 20 м/с. В заключении по материалам обследования [*Эксперты назвали, 2023*] отмечено: «К западу от ледника Буба произошел обвал скального массива, который, придя в движение, столкнулся с ледником, вызвав обрушение определенной его части, что могло привести к разливу застоявшихся подледниковых вод, после чего образовавшийся поток стал двигаться с большой скоростью в русле долины. 3 августа 2023 г. совпало несколько геологических и

гидрометеорологических явлений – интенсивное таяние ледника, вызванное изменением климата, осадки в виде дождя, камнепад в верховьях, оползне-эрозионные процессы и прохождение селя в долине Бубисцкали, что привело к образованию селевого потока экстремального характера».

В результате анализа разновременных космоснимков авторами определено, что площадь в плане обрушившего скального блока составляла 15 тыс. м^2. До обрушения скальный блок был обособлен на склоне эрозионно-осыпными ложбинами, что может характеризовать геолого-тектонические условия как благоприятные, способствующие обвалу. Объем скальных масс оценивается специалистами в 500 000 м^2 (данные интернета без конкретных указаний авторов, были оценки и до 1 млн м^3). При обрушении была срезана и вовлечена в движение значительная масса льда ледника. Ниже обвальные массы разделились на два потока, обходя скальный выступ и накрыли ледник, перекрыв каналы подледникового стока с последующим быстрым сбросом накопившейся воды в виде мощного водного импульса, который проявился в виде врезавшегося в моренные отложения нового русла потока (№ 2 на рис. 5*б*). Сам процесс прорыва подледниковых вод ввиду короткого периода обвально-селевого процесса был охарактеризован как «разлив застоявшихся подледниковых вод», что даже не подразумевало времени для их накопления из-за блокировки выходных гротов. Скорее всего, в этом месте были подледные накопления воды в пустотах после предыдущих обвалов, отложения которых видны на космоснимках прошлых лет, и поэтому их сброс в условиях малого времени блокирования был быстрым.

Оценить особенность обвально-селевого процесса в долине р. Бубисцкали можно сравнив с подобными процессами в Швейцарии в долине Бондаска в 2017 г. и в Индии в долине р. Дхаулиганга в 2021 г. [*Mergili, 2020; Shugar, 2021*]. В Швейцарии обвал объемом более **3 млн м^3** (значительно больше, чем в случае Бубисцкали) с захватом 0,6 млн м^3 масс льда ледника трансформировался в селевой поток, который принес разрушения в деревне Бондо (высота 840 м) на расстоянии **6 км** (более чем в два раза меньше, чем в случае Бубисцкали) от места отрыва обвала на горе Пиццо Ченгало (3396 м) со средним углом наклона пути около 23°. Обвал с горы Ронти (6063 м) объемом около **27 млн м^3** с высоты 5500 м пронесся по долинам Ронти Гад, Ришиганга и Дхаулиганга до трансформации в селевой поток на расстояние около 16 км до высоты 1900 м со средним углом наклона около 13°. Отложения селевого потока и паводка фиксировались на расстоянии 150 км в долине р. Алакнанда.

В отличие от ранее исследованных обвально-селевых процессов процесс в долине р. Бубисцкали выделяется тем, что объем отложенных селевых масс (по оценкам специалистов 5 млн м^3) был намного больше, чем объем обрушившегося скального блока. И в то же время скорость селевого потока была очень высока, как при движении ледово-каменных лавин. При этом следы склоновых селевых потоков в нижней части долины р. Бубисцкали, выглядевшие очень свежими на космоснимке 17.08.2023 (рис. 4), почти не отличаются от следов селей на космоснимке Google Earth от 28.07.2020 г., что дает основание уменьшить роль склоновых селей в трансформации обвала в селевой поток. Возможно, в обвально-селевом потоке доля вовлеченного в движение ледникового льда была сопоставима с объемом скального материала, и это стало причиной мощного эрозионного процесса ниже в долине за счет быстрого таяния льда. При этом количество выпавших осадков в сообщениях не приводилось, что не дает возможности оценить их роль в процессе.

Выводы

Результаты исследований селепроявлений последних лет показали, что в условиях изменения климата и повышения темпов деградации ледников и мерзлоты происходит активизация селевой деятельности на участках, где она ранее не была зафиксирована. Новые селевые очаги по особенностям морфологии и генезиса не так явно выражены, что значительно усложняет их распознавание в будущем и тем самым затрудняет оценку селевой опасности. Довольно необычно, что селевые потоки, связанные с деградацией

мерзлоты, могут сходить в условиях околонулевых температур, что повышает продолжительность селеопасного периода. Селевые процессы чаще становятся каскадными, и это увеличивает протяженность их зоны поражения. Эти и другие особенности селей в высокогорной зоне в дальнейшем следует учитывать при оценке селеопасности территорий, что повышает значение комплексного мониторинга селепроявлений на основе анализа разновременных космоснимков, проведения обследований с использованием беспилотных летательных аппаратов.

Список литературы

Акаев А.Р., Шидугов И.Ж. Применение БПЛА для мониторинга экзогенных процессов в приледниковой зоне (на примере ледника Мижирги) // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XIII / Науч. ред. И.А. Керимов, В.А. Широкова, В.Б. Заалишвили, В.И. Черкашин. М.: ИИЕТ РАН, 2023. С. 425–430. DOI: 10.26200/GST0U.2023.54.78.054

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Шагин С.И. Пространственно-временные особенности развития разрушительных процессов в ледниковой зоне (на примере последних событий на Памире, в Тибете и Гималаях) // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Коллективная монография. Научный редактор В.Б. Заалишвили. Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2022. С. 362–369.

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Акаев А.Р. Выявление признаков подготовки катастрофических склоновых процессов для предупреждения чрезвычайных ситуаций // Безопасность населения от быстроразвивающихся опасных природных явлений. XXV Международная научно-практическая конференция по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций по теме (в рамках проведения XIV Международного салона средств обеспечения безопасности «Комплексная безопасность-2023»). М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2023. С. 7–18.

Золотарев Е.А. Эволюция оледенения Эльбруса. Картографо-аэрокосмические технологии гляциологического мониторинга. М.: Научный мир, 2009. 238 с.

Кадастр селевой опасности юга европейской части России / Кондратьева Н.В., Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Гедуева (Гяургиева) М.М., Перов В.Ф., Разумов В.В., Сейнова И.Б., Хучунаева Л.В. Москва, Нальчик: Феория, 2015. 148 с.

Мальнева И.В., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Акаев А.Р. Селевой поток в урочище Джилы-Су (Северное Приэльбрусье) 4 октября 2022 г.: причины и факторы // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях. Материалы Общероссийской научно-практической конференции. М.: ООО «Геомаркетинг», 2023а. С.111–118.

Мальнева И.В., Докукин М.Д., Анаев М.А., Акаев А.Р., Хаджиев М.М. Условия развития склоновых процессов в Кабардино-Балкарской Республике в 2022 и 2023 гг. // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы Восемнадцатой Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций. М.: ООО «Геомаркетинг», 2023б. С. 159–169.

РД 52.30.238-90 Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям. Выпуск 1. Организация и проведение работ по изучению селей. М.: Гидрометеоиздат, 1990. 198 с.

Сейнова И.Б., Золотарев Е.А. Ледники и сели Приэльбрусья. (Эволюция оледенения и селевой активности). М.: Научный мир, 2001. 204 с.

Эксперты назвали причину трагедии в Шови – предварительное заключение [Электронный ресурс]. URL: https://sputnik-georgia.ru/20230806/eksperty-nazvali-prichinu-tragedii-v-shovi-predvaritelnoe-zaklyuchenie-280988283.html (дата обращения: 22.03.2024).

Assessment of Glacier and Permafrost Hazards in Mountain Regions. Technical Guidance Document. Prepared by Allen S., Frey H., Huggel C. et al. Zurich, Switzerland / Lima, Peru, 2017. 72 p. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26332.90245

Mergili M., Jaboyedoff M., Pullarello J., Pudasaini S.P. Back calculation of the 2017 Piz Cengalo–Bondo landslide cascade with r.avaflow: what we can do and what we can learn. // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2020. Vol. 20. Iss. 2. P. 505–520. https://doi.org/10.5194/nhess-20-505-2020

Shugar D.H., Jacquemart M., Shean D., Bhushan S., Upadhyay K., Sattar A., Schwanghart W., McBride S., Van Wyk de Vries M., Mergili M., Emmer A., Deschamps-Berger C., McDonnell M., Bhambri R., Allen S., Berthier E., Carrivick J.L., Clague J.J., Dokukin M., Dunning S.A., Frey H.,

Gascoin S., Haritashya U.K., Huggel C., Kääb A., Kargel J.S., Kavanaugh J.L., Lacroix P., Petley D., Rupper S., Azam M.F., Cook S.J., Dimri A.P., Eriksson M., Farinotti D., Fiddes J., Gnyawali K.R., Harrison S., Jha M., Koppes M., Kumar A., Leinss S., Majeed U., Mal S., Muhuri A., Noetzli J., Paul F., Rashid I., Sain K., Steiner J., Ugalde F., Watson C.S., Westoby M.J. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya // Science. 2021. Vol. 373. Iss. 6552. P. 300–306. DOI: 10.1126/science. abh4455

The 4 August 2023 debris flow at Shovi in Georgia. By Dave Petley 8 August 2023. [Electronic data]. Access way: https://eos.org/thelandslideblog/the-4-august-2023-debris-flow-at-shovi-in-georgia (access date: 03.22.2024).

Межгодовая и внутригодовая изменчивость селевой активности в горах Иле Алатау

В.П. Благовещенский, А.Р. Медеу, Т.С. Гуляева, С.У. Ранова, Т.Л. Киренская

АО «Институт географии и водной безопасности» Министерства науки и высшего образования, Алматы, Казахстан, victor.blagov@mail.ru

Аннотация. Исследована межгодовая и внутригодовая изменчивость селевой активности в хребте Иле Алатау, расположенном на юго-востоке Казахстана. В качестве показателей селевой активности использовались количество селей и суммарный объем селей. Исследовалась изменчивость активности отдельно для дождевых и гляциальных селей. Использовались данные о селях с 1900 по 2023 г. За этот период в Иле Алатау зафиксировано 30 дождевых и 30 гляциальных селей. Среди гляциальных селей 20 были вызваны прорывами ледниковых озер. Максимальные объемы селей в Иле Алатау достигают нескольких млн м^3. Селевые катастрофы, вызванные дождевыми селями, отмечались в 1921, 1947 1950, 1989, 1999, 2002, 2006 г. Катастрофические прорывные гляциальные сели сходили в 1956, 1958, 1963, 1973, 1977, 1980, 1993, 2014, 2015 г. Разрушительная способность селей в значительной мере зависит от его объема. На долю мелких и средних селей приходится 80,1 % количества селей и 3,0% суммарного объема. Очень крупные и огромные сели составляют 19,1% количества селей, но на их долю приходится 97% суммарного объема. Количество селей и их суммарный объем очень сильно колеблются от года к году. Максимальное количество селей в год составило 11, максимальный суммарный объем селей в год составил 6200 тыс. м^3. Для гляциальных селей отмечен период повышенной селевой активности в 1960–1980 гг. Для дождевых селей статистически значимого многолетнего тренда не установлено. В течение года дождевые сели отмечаются с мая по август. Максимум активности дождевых селей приходится на июнь-июль. Гляциальные сели формируются с июля по сентябрь, с максимумом активности в июле-августе.

Ключевые слова: *сели, селевая активность, межгодовая изменчивость, Иле Алатау*

Ссылка для цитирования: Благовещенский В.П., Медеу А.Р., Гуляева Т.С., Ранова С.У., Киренская Т.Л. Межгодовая и внутригодовая изменчивость селевой активности в горах Иле Алатау. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 60–67.

Interannual and intraannual variability of debris flow activity in the Ile Alatau Mountains

V.P. Blagoveshchensky, A.R. Medeu, T.S. Gulyaeva, S.U. Ranova, T.L. Kirenskaya

JSC "Institute of Geography and Water Security" of the Ministry of Science and Higher Education, Almaty, Kazakhstan, victor.blagov@mail.ru

Abstract. The interannual and intraannual variability of debris flow activity in the Ile Alatau ridge located in the southeast of Kazakhstan was studied. The number of debris flows and the total volume of debris flows were used as indicators of debris flow activity. Activity variability was studied separately for rain and glacial debris flows. Data on debris flows from 1900 to 2023 were used. During this period, 30 rain and 30 glacial debris flows were recorded in Ile Alatau. Among glacial debris flows, the 20 were caused by outbursts of glacial lakes. The maximum volumes of debris flows in Ile Alatau reach several million cubic meters. meters. Debris flow disasters caused by rain debris flows were observed in 1921, 1947, 1950, 1989, 1999, 2002, 2006. Catastrophic breakthrough glacial debris flows

occurred in 1956, 1958, 1963, 1973, 1977, 1980, 1993, 2014, 2015. The destructive ability of debris flows largely depends on its volume. The share of small and medium debris flows accounts for 80% of the number of debris flows and 3% of the total volume. The number of debris flows and their total volume variable greatly from year to year. The maximum number of debris flows per year was 11, the maximum of the total annual volumes of debris flows was of 6200 thousand m^3. For glacial debris flows, a period of increased debris flow activity was noted in 1960–1980. For rain debris flows, no statistically significant long-term trend has been established. During the year, rain debris flows occur from May to August. The maximum activity of rain debris flows occurs in June-July. Glacial debris flows form from July to September, with maximum activity in July-August.

Key words: *debris flows, debris flow activity, interannual variability, Ile Alatau*

Cite this article: Blagoveshchensky V.P., Medeu A.R., Gulyaeva T.S., Ranova S.U., Kirenskaya T.L. Interannual and intraannual variability of debris flow activity in the Ile Alatau Mountains. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 60–67.

Введение

Горный хребет Иле (Заилийский) Алатау расположен в юго-восточной части Республики Казахстан. Он является самым северным хребтом Северного Тянь-Шаня, протягиваясь на расстояние 120 км вдоль 43° С.Ш. Хребет отличается очень сильной селевой активностью, что в сочетании с высокой степенью освоенности района обусловливает частую повторяемость селевых катастроф. Поэтому изучение межгодовой и внутригодовой изменчивости, а также долговременной тенденции селевой активности имеет как научное, так и практическое значение.

От степени селевой активности зависят селевая опасность и селевой риск. Поэтому их оценка всегда начинается с изучения селевой активности. Селевая активность может быть охарактеризована количеством селей и их объемом, происшедших на определенной территории за определенное время.

Вопросы изменчивости селевой активности за длительный период времени рассматривались в работах [*Кюль и др., 2021, Bolch et al., 2011, Gartner et al., 2002, Pasmore et al., 2008, VanDine et al., 2002, Stoffel et al., 2005*].

Данные о селевой деятельности в Иле Алатау и о параметрах селевых потоков приведены в работах [*Баймолдаев, Винходов, 2007, Бекенов, Касенов, 2023, Виноградов и др., 1976, Горбунов, Северский, 2001, Дуйсенов, 1971, Женжурист, 1923, Керемкулов и др., 1988, Медеу, 2011, Медеу и др., 2016, Медеуов и др., 1993, Яфязова, 2007*].

Методы

При исследовании селевой активности с практической точки зрения нас в первую очередь интересует разрушительная способность селей, которая зависит от их объема. Поэтому объем селей является в сочетании с частотой схода являются главными показателями селевой активности. Если констатация факта схода селя обычно не вызывает затруднений, то определение его объема представляет большую проблему. Как правило в описаниях селей приводятся данные об объеме отложенной селевой массы, которые получают геодезическими методами. Из-за большой трудоемкости инструментальные измерения объема селей производились только для отдельных очень крупных селей с объемами более 1 млн $м^3$. Точность таких измерений была не велика. В результате данные об объемах селей, приводимые в разных источниках, могут различаться более чем в 2 раза. Таким образом, приблизительность оценки объемов селей приходится принимать, как форс-мажор.

В большинстве случаев объемы селей оценивались визуально, исходя из опыта наблюдателя. Поэтому при обобщении многолетних данных о селях в Иле Алатау,

полученных в разное время разными авторами, приведенных в работе [*Медеу и др., 2016*], все сели по объемам разделялись на 4 категории: очень мелкие (селепроявления), мелкие, средние, крупные. Этот подход был использован и в данной работе. При этом была добавлена еще одна категория – очень крупных селей. Градации объемов и максимальных расходов селей различных категорий приведены в таблице 1.

Таблица 1. Количественные характеристики селей различных категорий

Категория		Количественная характеристика			
Номер	Название	Объем, тыс. $м^3$	Максимальный расход, $м^3/с$	Максимальная высота валов, м	Длина пути
1	мелкие	Менее 1	Менее 10	Менее 1	Сотни метров
2	средние	1–10	10–100	1–2	До 1 км
3	крупные	10–100	100–1000	2–5	До 10 км
4	очень крупные	100–1000	1000–10000	5–10	Более 10 км
5	огромные	Больше 1 млн	Более 10000	Более 10	Десятки км

Так как по большинству селей, за исключение особенно крупных, количественных данных об объемах нет, суммарный объем селей оценивался в виде индекса, который рассчитывался как десятичный логарифм суммарного объема селей в $м^3$. При расчетах суммарного объема селей средний объем селя 1-й категории принимался равным 300 $м^3$, 2-й – 3000 $м^3$, 3-й – 30 000 $м^3$, 4-й – 300 000 $м^3$ и 5-й – 300 000 $м^3$. Такое значение среднего значения объема селей выбрано ввиду логарифмического закона распределения селей по категориям размеров. Для селей, по которым есть данные об объемах, величины объемов учитывались в натуральном измерении.

Селевые явления в Иле Алатау довольно разнообразны по генезису. Они могут быть дождевые, гляциальные, снеготаяния, сейсмогенные и антропогенные.

Как по количеству, так и по суммарным объемам более 95 % составляют дождевые и гляциальные сели. Они вносят максимальный вклад в селевую опасность и селевую активность. За период с 1921 по 2023 г. зафиксировано 568 селей с суммарным объемом 38 271 тыс. $м^3$. По количеству преобладают дождевые сели. Они составляют 80 % от общего количества селей. Но по суммарным и средним объемам преобладают гляциальные сели. Их суммарный объем составляет 70% общего объема селей. Средний объем дождевых селей равен 25 тыс. $м^3$, а средний объем гляциальных селей – 237 тыс. $м^3$, почти в 10 раз больше. Если с 1921 по 2023 г. отмечен только один дождевой сель объемом больше 1 млн $м^3$, то среди гляциальных селей таких огромных селей было 7 (1956, 1958, 1963, 1973, 1977, 1980, 1993 гг.).

Распределения количества и суммарного объема этих селей по категориям приведено в таблице 2. Все распределения имеют резкую асимметрию, при этом распределения количества селей имеют положительную асимметрию, а распределения суммарных объемов – отрицательную. У дождевых селей сели объемом меньше 10 тыс. $м^3$ составляют 81,5% общего количества селей, а их суммарный объем – 8.4% от общего суммарного объема. Для гляциальных селей сели объемом меньше 10 тыс. $м^3$ составляют 74,3% общего количества селей, а их суммарный объем – 0,073% от общего суммарного объема.

Сели снеготаяния составляют незначительную часть как по количеству, так и по объему. Они отмечаются в марте и начале апреля. Сейсмогенные сели сходят при сильных землетрясениях интенсивностью 9–10 баллов, которые случаются очень редко, и не имеют сезонного предпочтения. Также довольно редки и антропогенные сели, но, поскольку они часто бывают связаны с прорывами искусственных водоемов, то чаще всего они происходят в конце весны во время интенсивного снеготаяния.

Имеющиеся данные позволяют исследовать изменчивость активности только дождевых и гляциальных селей только за последние 72 года, с 1951 по 2023 г. На

формирование этих селей воздействуют совершенно различные факторы. Дождевые сели формируются под влиянием сильных осадков в низкогорной и среднегорной зонах, а гляциальные сели формируются под влиянием высоких температур воздуха в высокогорной зоне. Поэтому изменчивость активности дождевых и гляциальных селей рассматривалась отдельно.

Таблица 2. Распределение количества и суммарного объема дождевых и гляциальных селей по категориям размера

Генезис селя			Категория размера селя					Всего
			мелкие	средние	крупные	очень крупные	огромные	
Дождевые	количество	число	58	313	61	22	1	455
		доля, %	12,7	68,8	13,4	4,8	0,2	100
	суммарный объем, тыс. $м^3$	число	17	939	1830	6600	2100	11 486
		доля, %	0,2	8,2	15,9	57,5	18,3	100
Гляциальные	количество	число	25	59	20	2	7	113
		доля, %	22,1	52,2	17,7	1,8	6,2	–
	суммарный объем, тыс. $м^3$	число	8	177	600	600	25 400	26 785
		доля, %	0,03	0,7	2,2	2,2	94,8	100
Все сели	количество	число	83	372	81	24	8	568
		доля, %	14,6	65,5	14,3	4,2	1,4	–
	суммарный объем, тыс. $м^3$	число	25	1116	2430	7200	27 500	38 271
		доля, %	0,1	2,9	6,3	18,8	71,9	100

Распределение селевой активности дождевых и гляциальных селей внутри сезона показано на рис. 1–4.

Повторяемость и масштабность селей в течение года меняются в зависимости от изменений главных селе формирующих факторов. Первые дождевые сели сходят в начале мая, а последние – в начале августа. Гляциальные сели сходят с до конца августа. В годовом годе активности дождевых селей отмечается два максимума. Первый из них приходится на вторую декаду мая, а второй, более сильный, – на первую декаду июля. Это связано с годовым ходом осадков.

Формирование гляциальных селей происходит в период с первой декады июня по третью декаду августа. Наибольшее количество гляциальных селей отмечено во вторую декаду июля и в первую декаду августа, а наибольшие суммарные объемы – на первую декаду июля и первую декаду августа. В это время в гляциальной зоне отмечаются максимальные температуры воздуха, обусловливающие максимальное таяние ледников, наполнение моренных озер и протаивание льдосодержащих озерных плотин. В апреле-мае происходит сход селей весеннего снеготаяния, связанный с таянием снежного покрова и прорывом снежных плотин, образованных лавинными снежниками. Однако, такие случаи довольно редки, а объемы селей при этом не велики (в основном 1, максимум 2 категории).

Закономерности сезонного распределения селевой активности имеют значение для пространственно-временных прогнозов селевой опасности. Очаги формирования дождевых селей наиболее широко распространены в Иле Алатау. Они встречаются во всех горных речных бассейнах на высотах от 1000 до 3400 м н.у.м. Количество очагов

гляциальных селей гораздо меньше. Они приурочены к ледниковым озерам, подпруженным молодыми моренами с ледяным ядром. При этом с течением времени они могут исчезать или появляться в процессе перестройки ледниково-моренных комплексов в связи с климатическими изменениями. Распространены они только в бассейнах рек, имеющих крупные долинные ледники (от Узын Каргалы на западе, до Турген на востоке Иле Алатау). Расположены они в зоне выше 3400 м н.у.м.

Рис. 1. Внутригодовая изменчивость количества дождевых селей

Рис. 2. Внутригодовая изменчивость активности дождевых селей

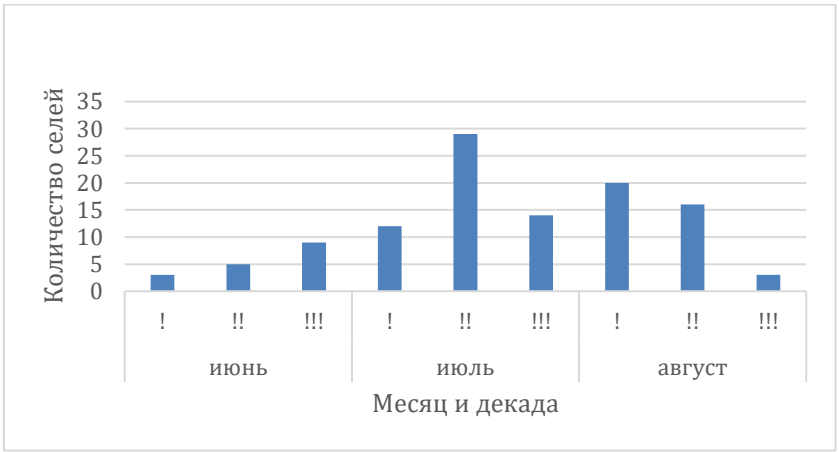


Рис. 3. Внутригодовая изменчивость количества гляциальных селей

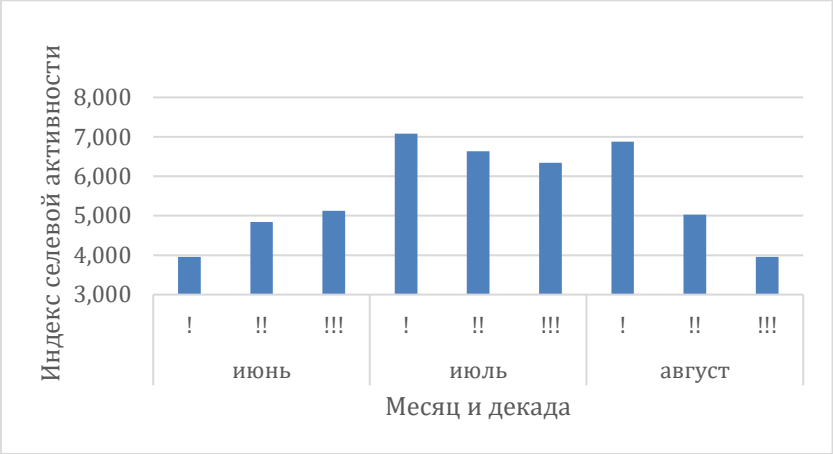


Рис. 4. Внутригодовая изменчивость активности гляциальных селей

За период систематических наблюдений с 1950-х по 2023 г. в Иле Алатау было 12 лет, когда не было ни одного дождевого селя, и 33 года, когда не было гляциальных селей, и только 4 года, когда не было ни дождевых, ни гляциальных селей. Характер межгодовой изменчивости активности дождевых и гляциальных значительно различается (таблица 3, рис. 5, 6). При этом, как для дождевых, так и для гляциальных селей межгодовые различия очень велики. Были годы, когда количество дождевых селей составляло 24, а индекс селевой активности был равен 5,6 (1988 г.), Коэффициент межгодовой вариации, равный отношению стандартного отклонения к среднему многолетнему значению равен 1,1 для количества селей и 0,48 – для индекса селевой активности. Для гляциальных селей годовое количество селей за год достигает 11, а индекс селевой активности – 6,79 (1973 г.). Экстремальные годы селевой активности для дождевых и гляциальных селей не совпадают. Коэффициент вариации количества гляциальных селей составляет 1,56, а для суммарных объемов он равен 0,99.

Таблица 3. Межгодовая изменчивость активности дождевых и гляциальных селей

Генезис селей		Максимальное	Среднее	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент линейного тренда	Достоверность аппроксимации тренда
Дождевые	количество	24	5,2	5,9	1,1	0,026	0,0087
	суммарный объем, тыс. $м^3$	420	36,4	74,1	2,04	-	-
	индекс селевой активности	5,62	3,46	1,67	0,48	-0,0003	0,00005
Гляциаль-ные	количество	11	1,4	2,2	1,6	-0,020	0,037
	суммарный объем, тыс. $м^3$	6200	364	1208	3,31	-	-
	индекс селевой активности	6,79	2,46	2,43	0,99	-0,032	0,078

Генезис селей		Максимальное	Среднее	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент линейного тренда	Достоверность аппроксимации тренда
Все сели	количество	24	6,6	6,1	0,92	-0,020	0,037
	суммарный объем, тыс. $м^3$	6200	400	1204	3,0	-	-
	индекс селевой активности	6,79	4,32	1,38	0,32	-0,025	0,143

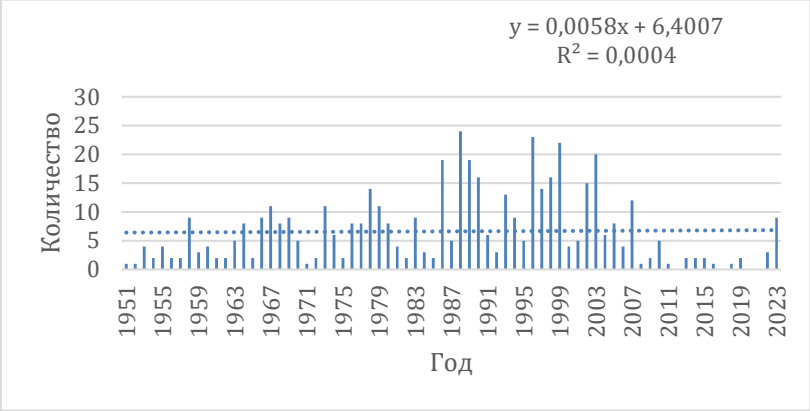


Рис. 5. Межгодовая изменчивость количества селей

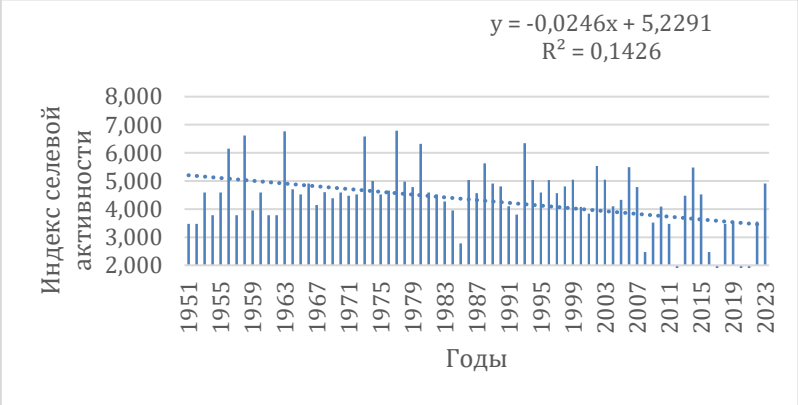


Рис. 6. Межгодовая изменчивость индекса селевой активности

В многолетнем ходе активности дождевых селей как для количества, так и для суммарного объема статистически значимых трендов не выявлено. Слабый отрицательный линейным тренд с коэффициентом аппроксимации 0,037 установлен для количества гляциальных слей. Более выражен отрицательный тренд у индекса селевой активности гляциальных селей. Его коэффициент аппроксимации равен 0,078. Уменьшение количества и суммарного объема гляциальных селей после 1980 г. частично можно объяснить успешным проведением профилактических опорожнений прорывоопасных моренных озер.

Выводы

Индекс селевой активности, равный десятичному логарифму суммарного объема селей, является объективным количественным показателем, который можно использовать для анализа внутрисезонной, межгодовой и пространственной изменчивости селевой активности.

Межгодовая изменчивость селевой активности в Иле Алатау выражена очень сильно. На этом фоне многолетние тренды проявляются очень слабо. Эти закономерности необходимо учитывать при проектировании селезащитных сооружений.

Для дальнейших исследований селевой активности необходимо унифицировать регистрацию селей и улучшить методы количественных измерений параметров селей.

Благодарности

Работы выполнены при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант № BR21881982.

Список литературы

Баймолдаев Т.А., Виноходов В.Н. «Казселезащита» – оперативные меры до и после стихии. – Алматы: Бастау, 2007. – 284 с.

Бекенов К.А., Касенов М.К. Селевая безопасность, 50 лет деятельности Казселезащиты: итоги, эффективность, перспективы, 1973–2023 гг. – Алматы: Zialy baspfsy, 2023. – 208 с.

Виноградов Ю.Б., Хонин Р.В., Земс А.Э. Селевой поток 15 июля 1973 г. на Малой Алматинке // Селевые потоки. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – № 1. – С. 60–73.

Горбунов А.П., Северский Э.В. Сели окрестностей Алматы: Взгляд в прошлое. – Алматы: Наука, 2001. – 80 с.

Дуйсенов Е. Д. Селевые потоки в Заилийском Алатау. – Алма-Ата: Казахстан, 1971. – 192 с.

Женжурист Э.М. Алма-Атинская катастрофа 8-го июля 1921 г. // Вестн. ирригации. – 1923. – № 1. – С. 62–76.

Керемкулов В.А., Цукерман И.Г. Обзор сведений о прорывах моренных озер Заилийского Алатау // Селевые потоки. – 1988. – № 10. – С. 62–77.

Кюль Е. В., Гедуева М. М., Атаев З. В. Селевая активность в бассейне реки Самур (Восточный Кавказ) по результатам мониторинга 2020 года // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2021. Т. 15. № 1. С. 73–88. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-1-73-88.

Медеу А.Р. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Основы управления. – Алматы: Гылым, 2011. – 284 с.

Медеу А.Р., Баймолдаев Т.А., Киренская Т.Л. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Антология селевых явлений и их исследования. – Алматы: Гылым, 2016. – 576 с.

Медеуов А., Колотилин Н. Ф., Керемкулов В. А. Сели Казахстана. – Алматы: Гылым, 1993. – 160 с.

Яфязова Р.К. Природа селей Заилийского Алатау: Проблемы адаптации. – Алматы: Наука, 2007. – 158 с.

Bolch T., Peters J., Blagovechshenskiy V., Yegorov A., Pradhan B., Buchroithner M. Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan // Natural Hazards. – 2011. – Vol. 59, N. 3. – P. 1691–1714.

Gartner H., Stoffel M. Detailed mapping and dendrogeomorphological analysis of a debris flow torrent in Switzerland // Proceedings of the International Symposium, INTERPRAEVENT. – Matsumoto: Interpraevent, 2002. – P. 199–207.

Passmore D., Harrison S., Vanessa Winchester V., Rae A., Severskiy I., Pimankina N. Late Holocene Debris Flows and Valley Floor Development in The Northern Zailiiskiy Alatau, Tien Shan Mountains, Kazakhstan // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. – 2008. – Vol. 40, N 3. – P. 548–560.

VanDine D. F., Bovis M., History and goals of Canadian debris flow research, a review // Natural Hazards. – 2002. – N 26. – P. 69–82.

Stoffel M., Lièvre I., Conus D., Grichting M.A., Raetzo H., Gärtner H.W., Monbaron M. 400 Years of Debris-Flow Activity and Triggering Weather Conditions: Ritigraben, Valais, Switzerland // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. – 2005. – Vol. 37, N 3. – P. 387–395.

Выполнение селезащитных сооружений в узкой полосе отвода автодорог

И.С. Богданов, П.А. Александров

ООО «ГЕИОЗОЛ Проект», Санкт-Петербург, Россия, info@geoizolproject.ru

Аннотация. В статье описывается опыт проектирования гибкого селеудерживающего барьера на свайном основании, который был построен в 2023 г. на 15-м км федеральной автомобильной дороги Р-297 «Амур» Чита – Хабаровск в Забайкальском крае Российской Федерации. Особенность принятого технического решения заключается в размещении защитного сооружения в границах узкой полосы отвода автодороги. В статье приводится описание вариантов технических решений, которые рассматривались на этапе разработки концепции противоселевой защиты, в рамках предпроектных разработок, а также приводятся основные параметры принятого в проектной документации конструктивного решения противоселевой защиты.

Ключевые слова: *инженерная защита территории, селезащита, сель, селеудерживающий барьер, GEOIZOL-MP, стесненные условия строительства, автомобильная дорога*

Ссылка для цитирования: Богданов И.С., Александров П.А. Выполнение селезащитных сооружений в узкой полосе отвода автодорог. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 68–76.

Debris flow protective structures installation in narrow right of way

I.S. Bogdanov, P.A. Alexandrov

GEOIZOL Project LLC, Saint-Petersburg, Russia, info@geoizolproject.ru

Abstract. This article describes the experience in designing of flexible debris flow retention barrier based on pile foundation which was built in 2023 on the 15th kilometer of the federal highway P-297 “Amur” between Chita and Khabarovsk in Zabaykalsky region of Russian Federation. The main feature of the technical solution is that protective structure is placed in narrow right of way. The article provides description of alternative ways of technical solutions which were taken into account during the conceptual design stage of mud flow protection in case of pre-design concept. Also, the article provides general characteristics of constructive solution for debris flow protection accepted in the design documentation.

Key words: *engineering protection of territory, debris flow protection, debris flow, flexible debris flow retention barrier, GEOIZOL-MP, constrained building conditions, highway*

Cite this article: Bogdanov I.S., Alexandrov P.A. Debris flow protective structures installation in narrow right of way. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 68–76.

Введение

Традиционные сооружения инженерной защиты от селевых потоков (массивные селезадерживающие и селенаправляющие дамбы, запруды, селепропускные,

стабилизирующие сооружения) имеют крупные габариты, занимают значительные площади, требуют выполнения большого объема земляных работ и применения многочисленного парка строительной техники. Эти факторы затрудняют или делают невозможным возведение традиционных сооружений в стесненных условиях строительства без остановки движения автотранспорта.

Гибкие селеудерживающие барьеры (рис. 1) имеют компактные размеры, могут быть выполнены с применением малогабаритной техники, в том числе на крутых горных склонах без устройства технологических подъездных дорог с возможностью доставки материалов и строительной техники с помощью авиации (когда это экономически обосновано).

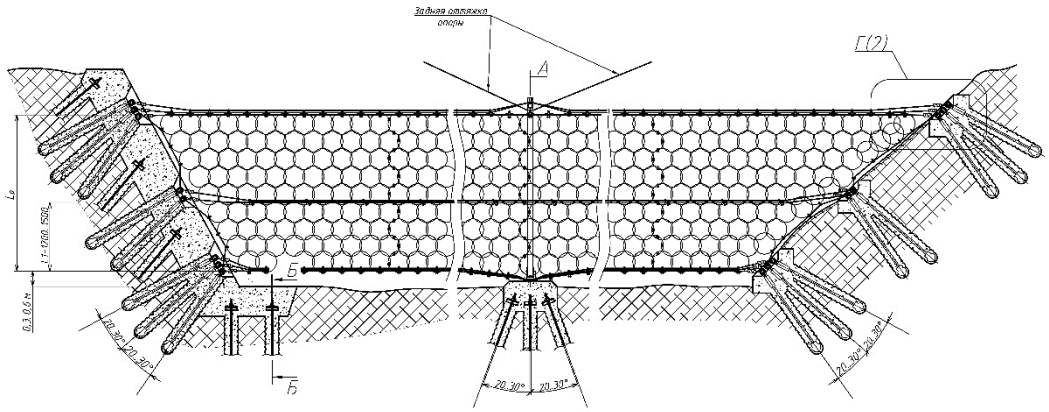


Рис. 1. Общий вид селеудерживающего барьера, установленного в горном кластере Сочи

Работа селезадерживающих барьеров основана на остановке селевого потока и удержании его твердой составляющей в верхнем бьефе, исключая его дальнейшее движение с вовлечением в поток больших масс грунта. Гибкий селеудерживающий барьер представляет собой металлоконструкцию, основным элементом которой является высокопрочная стальная сеть, которая задерживает твердый сток и пропускает жидкую фазу селевого потока. В России применяется сеть с кольцевыми ячейками, так называемая кольчужная сеть производства российской компании «Геобарьер» (рис. 2). Сеть закрепляется на стойках, оборудуется системой демпфирующих элементов (гасителей энергии) и при необходимости дополнительно закрепляется на рельефе стальными тросовыми оттяжками.

Рис. 2. Кольчужная сеть

Барьеры устанавливают поперек селеопасных русел. Конструкции рассчитаны на восприятие ударных нагрузок от селевого потока. В эксплуатируемом варианте использования сооружения, после прохождения селя барьер очищается от твердого стока, при необходимости меняются демпфирующие элементы. В неэксплуатируемом варианте заполненный твердым стоком барьер становится рельефообразующей структурой.

На протяжении последних нескольких десятилетий гибкие селеудерживающие барьеры нашли широкое применение в альпийском горном регионе Западной Европы. Параллельно с этим собственные разработки вели российские исследователи. Массовое применение в России таких конструкций произошло в рамках подготовки к Зимним Олимпийским играм в Сочи.

На сегодняшний день гибкие селеудерживающие барьеры являются эффективным решением инженерной защиты от селевой опасности, которое позволяет выполнить мероприятия в трудных условиях строительства.

Условия проектирования

Объект проектирования расположен на территории городского округа Чита в Забайкальском крае, на км 15 автомобильной дороги федерального значения Р-297 «Амур» Чита – Невер – Свободный – Архара – Биробиджан – Хабаровск.

Читинский район расположен на Забайкальском среднегорье, где горные территории преобладают над равнинными. Район проводимых работ находится в Читино-Ингодинской впадине, приподнятой над уровнем моря на 640–650 м. В геоморфологическом отношении участок работ расположен в долине р. Смоленая, переходя на склон местного водораздела.

25 июля 2018 г. после выпадения большого количества осадков (около 300 мм в течение недели) произошел выход селевых масс со склона горы Кучугыр на автомобильную дорогу. Работы по расчистке федеральной трассы заняли 9 дней, движение автомобилей было восстановлено лишь 3 августа (рис. 3).

Рис. 3. Участок автотрассы «Амур» в месте схода селя

Помимо аномальных осадков к благоприятным условиям для формирования селя следует отнести горный рельеф, V-образные поперечные профили и крутые борта логов, широкое распространение легкоразмываемых грунтов (супесей). Рельеф на участке характеризуется как денудационно-эрозионный, уклоны поверхности от 10° до 15° в зоне

накопления (разгрузки), от 12° до 20° в зоне транзита, от 15° до 25° в зоне формирования селей. По морфологическим особенностям склоны волнистые, реже прямолинейные.

Для оценки рисков формирования повторных селей на участке проведены инженерные изыскания, в ходе которых были выявлены три селеопасных бассейна общей площадью 92 000 кв. м, которые простираются на 220–250 м в юго-западном направлении вверх по склону от защищаемой автодороги. По совокупности гидрографических и гидрологических характеристик селевых потоков данные селевые бассейны относятся к категории простых с одним выраженным руслом. Категория опасности селевых процессов по площадной пораженности (более 50%) – весьма опасная, согласно таблице 5.1 СП 115.13330.2016 «Геофизика опасных природный воздействий». Расчетный объем селевых потоков по трем бассейнам составил 68 000, 70 000 и 90 000 куб. м.

Выполнение противоселевой защиты было включено в состав работ по капитальному ремонту участка км 10 – км 20 трассы Р-297 «Амур». Проектирование мероприятий выполнялось в несколько этапов, из которых следует выделить три: разработку концепции инженерной защиты от селей, технико-экономическое сравнение вариантов в рамках предпроектных работ, разработку комплектов проектной и рабочей документации.

Концепция противоселевой защиты и предпроектные разработки

По результатам рассмотрения первичных исходных данных, а также на основании информационного запроса были предложены несколько вариантов выполнения мероприятий инженерной защиты, направленных на ликвидацию опасных селевых процессов и/или исключения их воздействия на защищаемую автодорогу.

Первый вариант предусматривал устройство в селевых бассейнах (в зонах формирования и транзита потоков) каскада гибких селеудерживающих барьеров, препятствующих развитию и подпитке селя.

Устройство барьеров предполагалось в неэксплуатируемом варианте. После прохождения селевого потока барьер не расчищается и вместе с задержанным твердым стоком становится рельефообразующим элементом, выполаживая лог водотока для снижения вероятности возникновения очагов селеобразования.

В качестве дополнительных мероприятий вблизи барьеров, в местах со вскрытыми грунтами предусматривалось устройство противоэрозионной защиты на крутонаклоненных участках склонов, а также закрепление русла сошедшего селя (разрушенной части склона). Для регулирования стока и снижения рисков возникновения селевых процессов предлагалось устройство укрепленных водотоков со сбросом в кювет автодороги.

Второй вариант предусматривал установку каскада подпорных стен (свайных, бетонных гравитационных или армогрунтовых), служащих рельефообразующими элементами. Пространство выше стен должно было засыпаться грунтом для выполаживания склона и исключения образования на пологих террасах очагов селеобразования. На поверхности засыпки предусматривались противоэрозионные мероприятия.

Спланированные площадки обеспечивались системой водоотведения, включающей сеть водоотводных канав, собирающих воду с поверхности, сеть водоотводных лотков вдоль стен, укрепленный быстроток по поверхности засыпки в каждом лавиносборе и конструкции водопропуска в каждом сооружении.

Третий вариант предполагал исключение воздействия селевых потоков на автодорогу путем устройства селепропускных сооружений закрытого типа под полотном дороги (рис. 4). Сооружения представляют собой заглубленные бетонные или свайные сооружения коробчатого типа с сечением, достаточным для пропуска расчетного селевого потока, одновременно с этим выполняя функцию водопропускных сооружений.

Рис. 4. Селепропускное сооружение закрытого типа, выполненное в горном кластере Сочи

Разработка концепции противоселевых мероприятий претерпела несколько итераций. Одним из наиболее существенных факторов, повлиявших на выбор технического решения, стало расположение селеопасных бассейнов и логов на территории земель лесного фонда. Размещение объектов за пределами границы полосы отвода автодороги потребовало бы сложных длительных мероприятий по установлению публичного сервитута. В связи с этим было принято решение расположить противоселевое сооружение в непосредственной близи от защищаемого объекта, а именно вдоль автодороги на всем протяжении селеопасного участка.

Рассмотрены два варианта конструкции. Первый – гибкий селеудерживающий барьер, размещенный на железобетонном основании. Второй – дамба в виде монолитной подпорной стены на свайном основании, совмещенной с амортизирующим грунтовым отпором (рис. 5).

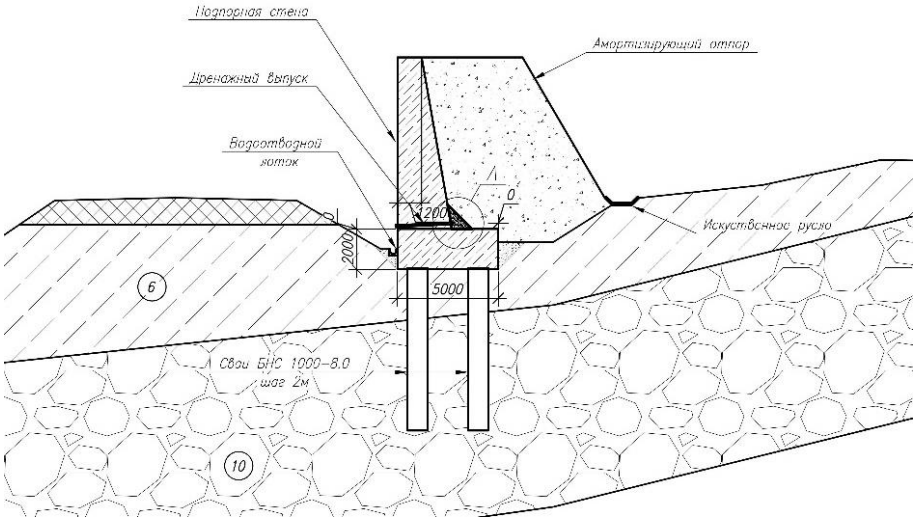


Рис. 5. Дамба в виде подпорной стены на свайном основании с грунтовым отпором. Разрез

На этапе предпроекта был выполнен расчет оценки эффективности применения этих конструкций. Капитальные и эксплуатационные затраты, которые рассчитывались исходя из срока службы сооружений не менее 50 лет, по второму варианту оказались выше на 70%. При этом ширина основания дамбы превышала 20 м, что не позволяло

разместить сооружение в границах полосы отвода автодороги (рис. 6). Следовательно, при реализации второго варианта требовалось выполнение длительных мероприятий по выделению дополнительных сервитутов. По сумме преимуществ был выбран первый вариант.

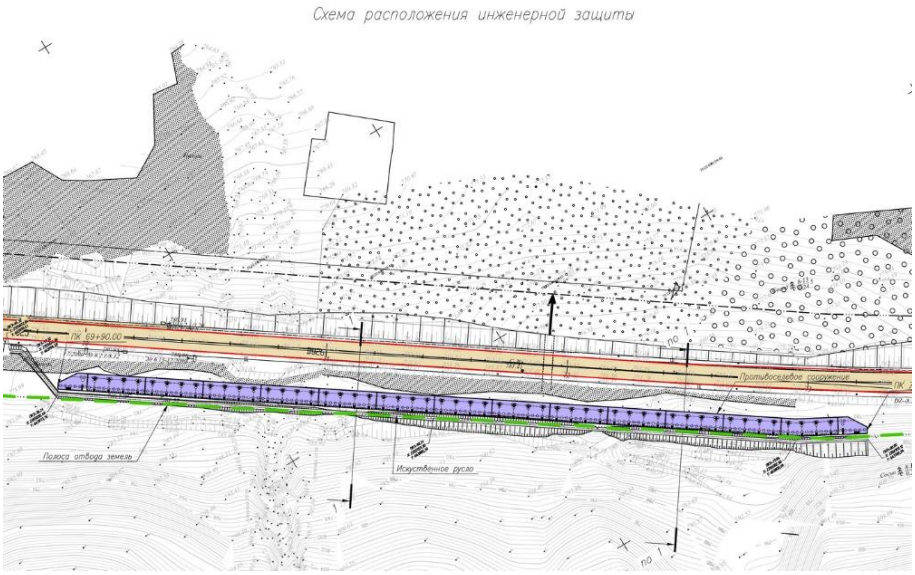


Рис. 6. План расположения сооружения инженерной защиты от селей в границах полосы отвода автодороги

Конструктивные решения

Расчеты показали, что с учетом всех особенностей, среди которых высокие нагрузки, специфика рельефа и необходимость размещения сооружения в узкой полосе отвода дороги, классическое исполнение противоселевого барьера (с системой оттяжек) окажется неэффективным.

Для исключения воздействия селевых явлений на дорогу запроектирована ограждающая селеулавливающая (противооползневая) конструкция, включающая компактно размещенные элементы большой жесткости (рис. 7). Гибкий стальной барьер спроектирован и произведен индивидуально для этого объекта компанией «Геобарьер».

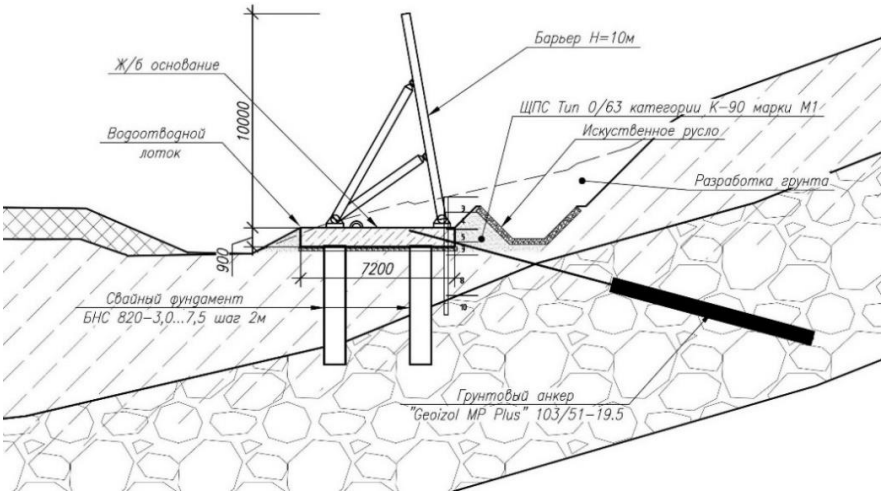


Рис. 7. Гибкий селеулавливающий барьер с лямбда-образными стойками на свайном основании. Разрез

Проектом предусмотрено устройство сетчатого селеудерживающего барьера ГБ-3500.00.000. Для предотвращения опрокидывания при воздействии значительного объема селевых масс с учетом потенциально возможной скорости потока барьер установлен на массивное железобетонное основание на свайном фундаменте. Расчетное давление селевого потока в нижней точке барьера составило 146,3 кПа. Для обеспечения устойчивости сооружения, с учетом динамической и статической нагрузок, приняты буронабивные сваи диаметром 820 мм, длиной 3,0–7,5 м, заглубленные в материковый гранит, устраиваемые с шагом 2,0 м. Общая протяженность сооружения составила 282 м.

Для восприятия значительных горизонтальных нагрузок, возникающих при ударе селевой волны, конструкция усилена грунтовыми буроинъекционными анкерами GEOIZOL-MP 103/78 длиной 19,5 м.

В ходе проведенных расчетов определено, что высота отложения селевых масс выше уровня фундамента составит 9 м (рис. 8), в этой связи требуемая эффективная высота барьера принята 10 м.

Стойки барьера в профиль повторяют очертания греческой буквы лямбда (λ). Стойка состоит из главной мачты, отклоненной от вертикали на 10° по направлению движения потенциального селя (в сторону дороги), и двух подпорок. Стойки шарнирно, с помощью фундаментных болтов закрепляются к закладным деталям, выполненным в железобетонном основании. Поперечную устойчивость стойки обеспечивают канатные оттяжки, которые крепят к середине вертикальной мачты. Сверху и снизу лямбда-стойки объединены несущими канатными поясами прочностью на разрыв 316 кН. Несущие канаты крепят к петлям закладных элементов через энергопоглотители.

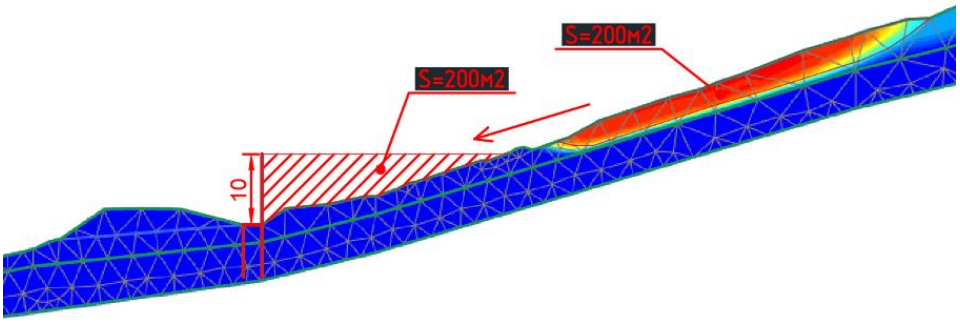


Рис. 8. Определение эффективной высоты барьера

Лямбда-стойки установлены с шагом в 6 м. Каждая пара образует секцию (всего их 47), которая перекрывается полотном кольчужной сети. Кольца, из которых состоит сеть, плетутся из высокоуглеродистой проволоки и представляют собой высокопрочный стальной канат толщиной 20 мм без начала и конца. Каждое кольцо диаметром 420 мм вплетается в шесть соседних, образуя полотно сети, прочность которой на разрыв составляет свыше 1500 кН/пог. м. Сеть при помощи такелажных скоб сверху и снизу крепится к несущим канатам. Края сеток соединены между собой, образуя сплошное непрерывное полотно. Согласно расчетам, барьер в нижней точке выдерживает давление потока свыше 140 кПа.

Выводы

Концепция применения гибких селеудерживающих барьеров предусматривает выполнение инженерной защиты от селевых процессов на труднодоступных территориях и в стесненных условиях строительства. При этом возможно использование различных вариантов конструктивных решений, которые разрабатываются в зависимости от специфики конкретного проекта.

В рамках проектирования мероприятий противоселевой защиты участка трассы «Амур» (рис. 9) инженеры компании «ГЕОИЗОЛ Проект» в общей сложности проработали около десятка различных вариантов защитных сооружений.

Рис. 9. Строительство селеудерживающего барьера на автодороге «Амур»

Индивидуальный подход, учитывающий все сложности и ограничения, позволил предложить оптимальное решение инженерной задачи. Реализованный вариант с устройством селеудерживающей конструкции, созданной по индивидуальному проекту, позволил обеспечить безопасную эксплуатацию объекта с наименьшими затратами времени и финансовых средств. В том числе за счет компактного размещения сооружения в границах полосы отвода автомобильной дороги без необходимости выделения дополнительных земельных участков.

Список литературы

Bichler A., Yonin D., Stelzer G. Flexible debris flow mitigation: introducing the 5.5 Mile debris fence // Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding: Proceedings of the 11-th Annual Symposium on Landslides and Engineered Slopes, Banff, Canada, 3–8 June 2012 (edited by Eberhardt et al.). London: Taylor and Francis Group, 2012. P. 1209–1214.

Bogdanov I.S. Comprehensive engineering protection of the territory on the example of the Sochi Mountain cluster / Zhussupbekov, A., Sarsembayeva, A., & Kaliakin, V.N. (Eds.). (2023). Smart Geotechnics for Smart Societies: Proceedings of the 17th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (17th ARC, Astana, Kazakhstan, 14–18 August, 2023) (1st ed.). CRC Press. P. 2330–2333 URL: https://doi.org/10.1201/9781003299127.

Gleirscher E., Stelzer G., Illmer D., Bichler A. Snowcatcher – full-scale test site in the Stubai Valley // Proceedings of the International Symposium on Mitigative Measures against Snow Avalanches and Other Rapid Gravity Mass Flows, Siglufjörður, Iceland, April 3–5, 2019. vedur.is/gogn/snjoflod/varnarvirki/snow2019abstracts/Snow2019_Gleirscher_Illmer_Stelzer_Bichler_eabstract.pdf.

Salimova Barno Jamalovna Features of engineering surveys in the design of protection from mudslides of highways // International scientific review. 2023. №LXXXVIII. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/features-of-engineering-surveys-in-the-design-of-protection-from-mudslides-of-highways (дата обращения: 06.03.2024).

Wendeler C., Volkwein A. Hazard prevention using flexible multi-level debris flow barriers. Protection against debris flows by installation of 13 flexible barriers in the Milibach River (Canton Berne, Switzerland) // INTERPRAEVENT 2008 – Conference Proceedings, Vol. 1. 2008.

Маций С.И., Сухляева Л.А. Полуколичественная оценка селевого риска на автомобильных дорогах // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. № 4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/polukolichestvennaya-otsenka-selevogo-riska-na-avtomobilnyh-dorogah (дата обращения: 20.03.2024).

Салимова Б.Д. Инженерная защита автомобильных дорог в горных районах // Экономика и социум. 2023. № 3–1 (106). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/inzhenernaya-zaschita-avtomobilnyh-dorog-v-gornyh-rayonah (дата обращения: 06.03.2024).

СП 115.13330.2016 Свод правил. Геофизика опасных природный воздействий: Актуализированная редакция СНиП 22-01-95 утвержден Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации 16.12.2016 N 956/пр: введен 17.06 2017. – М.: Стандартинформ, 2018.

ТУ-1275-001-75212412-04 Технические условия. Сетка стальная с кольцевыми ячейками. Изменение № 1 утвержден ФГУП Стандартинформ: введен 10.12.2015. – Москва. 2015. ООО «ГЕО-БАРЬЕР». 2004. URL: https://www.geobarrier.ru/_files/ugd/c4dfcd_dbc682a8d3f44af392bfa45f923b9a20.pdf (дата обращения: 06.03.2024).

Applicability of a rainfall-induced debris flow warning model: A case from Typhoon Khanun in Nantou County, Taiwan, 2023

J.C. Chen[1,2], W.S. Huang[1], X.Z. Lai[1], J.Q. Fan[1], F.B. Li[1], G.L. Li[1]

[1]Fujian College of Water Conservancy and Electric Power, Yongan, China

[2]Huafan University[1], Taipei, Taiwan, China, chenjinnchyi@gmail.com, 1912656941@qq.com

Abstract. Nantou County in Taiwan has endured a major earthquake and numerous extreme rainfall events over the past few decades, leading to significant disasters and economic losses due to landslides and debris flows. This study employs the parameter *RI* as the rainfall indicator, defined by the product of the 24-hour cumulative rainfall (*R*) and the hourly rainfall intensity (*I*). An empirical model correlating rainfall return period *T* of *RI* with the probability of debris flow occurrence (*P*) was used. The *P–T* model reflects the probability characteristics of debris flow occurrences after the Chi-Chi earthquake and extreme rainfall events and has been applied to the Chenyoulan Stream Watershed (CSW) in Nantou County, Taiwan. In early August 2023, Typhoon Khanun triggered numerous debris flows in Ren'ai Township, Nantou County. This study used the *P–T* model to evaluate the probability of debris flow occurrences in Ren'ai Township and examined the model's applicability. The results showed that the peak *RI* in Ren'ai Township reached 933 cm²/h, far exceeding the critical *RI* value of 365 cm²/h for triggering multiple debris flows in the CSW. Consequently, several debris flow events were recorded. The *P–T* model, combined with yellow and red risk levels, is reasonable for this case study.

Key words: *rainfall indicator, debris flow occurrence, probability, risk level*

Cite this article: Chen J.C., Huang W.S., Lai X.Z., Fan J.Q., Li F.B., Li G.L. Applicability of a rainfall-induced debris flow warning model: A case from Typhoon Khanun in Nantou County, Taiwan, 2023. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 77–83.

Применимость модели предупреждения о дождевых селях на примере тайфуна «Ханун» в уезде Наньтоу, Тайвань, 2023 год

Ц.Ч. Чэнь[1], В.С. Хуан[2], С.Ч. Лай[2], Ц.Ц. Фань[2], Ф.Б. Ли[2], Г.Л. Ли[2]

[1]Университет Хуафань, Тайбэй, Тайвань, Китай, chenjinnchyi@gmail.com; 1912656941@qq.com

[2]Фуцзянский колледж водного хозяйства и энергетики, Школа гидротехники, Юнъань, Китай

Аннотация. Уезд Наньтоу на Тайване за последние несколько десятилетий пережил сильное землетрясение и многочисленные экстремальные осадки, что привело к значительным бедствиям и экономическим потерям из-за оползней и селевых потоков. В данном исследовании в качестве индикатора осадков используется параметр *RI*, определяемый как произведение 24-часового суммарного количества осадков (*R*) и почасовой интенсивности осадков (*I*). Была использована эмпирическая модель, связывающая период повторяемости осадков *T* с вероятностью возникновения селевых потоков (*P*). Модель *P–T* отражает характеристики вероятности возникновения селевых потоков после землетрясения Чи-Чи и экстремальных дождевых явлений и была применена к водосборному бассейну ручья Ченьоулан (CSW) в уезде Наньтоу, Тайвань. В начале августа 2023 г.

[1] Previously.

тайфун «Ханун» вызвал многочисленные селевые потоки в пос. Ренъай в уезде Наньтоу. В данном исследовании использовалась модель *P–T* для оценки вероятности возникновения селевых потоков в пос. Ренъай и изучалась применимость модели. Результаты показали, что пиковое значение *RI* в поселке Ренъай достигло 933 см^2/ч, что значительно превышает критическое значение *RI* в 365 см^2/ч для возникновения многочисленных селевых потоков в CSW. В результате было зарегистрировано несколько селевых потоков. Модель *P–T* в сочетании с желтым и красным уровнями риска показала свою эффективность в рамках данного исследования.

Ключевые слова: *параметр осадков, сход селевых потоков, вероятность, уровень риска*

Ссылка для цитирования: Чэнь Ц.Ч., Хуан В.С., Лай С.Ч., Фань Ц.Ц., Ли Ф.Б., Ли Г.Л. Применимость модели предупреждения о дождевых селях на примере тайфуна «Ханун» в уезде Наньтоу, Тайвань, 2023 год. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 77–83.

Introduction

Extreme rainfall events have caused many countries to face serious debris flow disasters in recent years [*Joshi, Kumar, 2006; Chen, Chuang, 2014; Borga et al, 2014; Wang et al., 2015; Joe, Tongkul, Roslee, 2018; Nam, Lee, Kim, 2019; Gong et al., 2020*]. To avoid or reduce debris flows hazards, monitoring and early warning of debris flows is a concern topic for many researchers. The use of rainfall record to determine the rainfall threshold (critical rainfall) for debris flow occurrence is a commonly used method for debris flow warning [*Destro at al., 2017*]. Accumulated rainfall, rainfall intensity, and rainfall duration are widely used evaluation indicators for rainfall characteristics [*Caine, 1980; Wieczorek, 1987; Jan, Chen, 2005; Shieh et al., 2009; Chen et al., 2011*]. However, the occurrence of debris flows is not only related to the characteristics of rainfall, but also influenced by the terrain, lithology, sediment supplement, and soil cover conditions of a catchment [*Destro at al., 2017; Jan, Chen, 2005; Chen, Jan, 2008*]. This leads to high uncertainty in monitoring and warning the occurrence of debris flows. Especially after extreme rainfall events, there is a significant change in sediment supplement in a catchment area, and the critical rainfall of debris flows will also change accordingly [*Chen et al., 2009; Tang, Zhu, Li, 2009; Chen, 2011; Chen, Ja, Huang, 2013; Pan et al., 2018; Shen, Huang, Tsai, 2020*]. This poses greater challenges for debris flow monitoring and prediction [*Guzzetti et al., 2008; Nikolopoulos, 2014*]. Due to the high uncertainty of debris flow occurrence, some researchers have introduced the concepts of risk and probability to evaluate the occurrence of debris flow [*Chen, Jan, 2008; Chen, Jan, Lee, 2007*]. In Taiwan, soil and water conservation units use an integrated indicator of cumulative rainfall and rainfall intensity, and then differentiate the probability of debris flow occurrence into yellow and red alerts based on the low and high probabilities [*Jan, Lee, 2004*]. Chen and Huang [*2021*] developed a probabilistic model of debris flow occurrence based on rainfall return period *T* (the model of debris flow occurrence probability *P* and *T*) that reflects the effects of long-term rainfall changes and extreme events. This model reflects the probability characteristics of debris flow occurrence after the Chi-Chi earthquake and extreme rainfalls, and was applied to the Chenyoulan Stream Watershed (CSW), Nantou County, Taiwan. The Typhoon Khanun in early August 2023 caused multiple debris flows in Ren'ai Township, Nantou County. This study used the *P-T* model to evaluate the probability of debris flow occurrence in Ren'ai Township and tested the applicability of the model.

Extreme rainfall in the study area

The study area is located in Ren'ai Township, Nantou County, in the mountainous area of central Taiwan. The altitude of this township ranges from 382 to 3560 m (Fig. 1), and

according to the data from the Ren'ai Rainfall Station, its annual average rainfall is approximately 2300 mm. From August 3 to 4, 2023, the peripheral circulation of Typhoon Khanun and the strengthening of southwest winds brought record breaking rainfall with accumulated rainfall of 992.5 mm in 48 h to Ren'ai Township, Nantou County, causing multiple debris flows and landslides. Among them, the St. Benedict (SB) gas station in Nanfeng Village (as shown in Figs. 1 and 2), an area affected by the debris flow potential stream with No. "Touxian DF013", was buried for the 7th time by the debris flow, making it the building with the most times buried by debris flow in Taiwan's history [*ARDWCT, 2023*]. There were four records of this gas station being buried by debris flows in 2000, once in February, twice in April, and once in May, due to sufficient loose sediment supplement within one year after the 921 earthquakes in 1999. Subsequently, during the impact of Typhoon Mindulle and the July 2 flood in 2004 and Typhoon Sinlaku in 2008, the gas station was also buried again due to the heavy rainstorm. Now, Typhoon Khanun in 2023 has buried the SB gas station for the seventh time. The rainfall analysis results show that a breaking heavy rainfall occurred in Ren'ai Township, Nantou County from August 3rd to 4th (Fig. 3). The peak hourly rainfall I = 114 mm/h occurred on August 4th from 15:00 to 16:00. The maximum 24-hour cumulative rainfall R=818mm, which occurs at the peak of the hourly rainfall 24 h before. The peak hourly rainfall and maximum daily cumulative rainfall R_d =644mm on August 4th were both historical records of this rainfall station (Fig. 4), leading to frequent occurrences of debris flows and landslides. These slope hazards were mostly concentrated in the central mountainous area of Taiwan, especially Nantou County being the most severely affected (36, accounting for 78% of the total disaster points), of which 29 occurred in Ren'ai Township. According to the data compiled by the Ministry of Agriculture of Taiwan, Typhoon Khanun caused a total agricultural loss exceeding NT $238 million, of which Nantou County accounted for 73% of the total loss, with a loss amount exceeding NT $173.39 million.

Probabilistic rainfall-induced debris flow warning model

Rainfall index RI

A rainfall index RI was used to develop the model associated with probability of debris flow occurrence. RI is defined as

$$RI = R \times I, \tag{1}$$

where R is the 24-hour cumulative rainfall and I is the hourly rainfall intensity. The RI index has been used to study an extreme rainfall associated with debris flows [*Chen, Jan, Huang, 2013; Chen, Huang, 2021*]. RI > 365 cm^2/h, can be identified as extreme rainfall that triggered multiple debris flows in the CSW [*Chen, Jan, Huang, 2013*].

The P–T model

An empirical model correlating T with the probability of debris flow occurrence (P) has been proposed by Chen and Huang [*Chen, Huang, 2021*]. The P–T model reflects the probability characteristics of debris flow occurrences after the Chi-Chi earthquake and extreme rainfall events and has been applied to CSW in Nantou County, Taiwan. Due to the lack of sufficient debris flow data in Ren'ai Township, Nantou County to establish the P-T relationship, this study used the empirical relationship from CSW in the same county for analysis. The P–T relationship of the unaffected by extreme events period is:

$$P = 1 - e^{-0.20(\frac{T}{0.46})^{0.99}}. \tag{2}$$

In which

$$T = (RI/180)^{2.38} + 0.97. \tag{3}$$

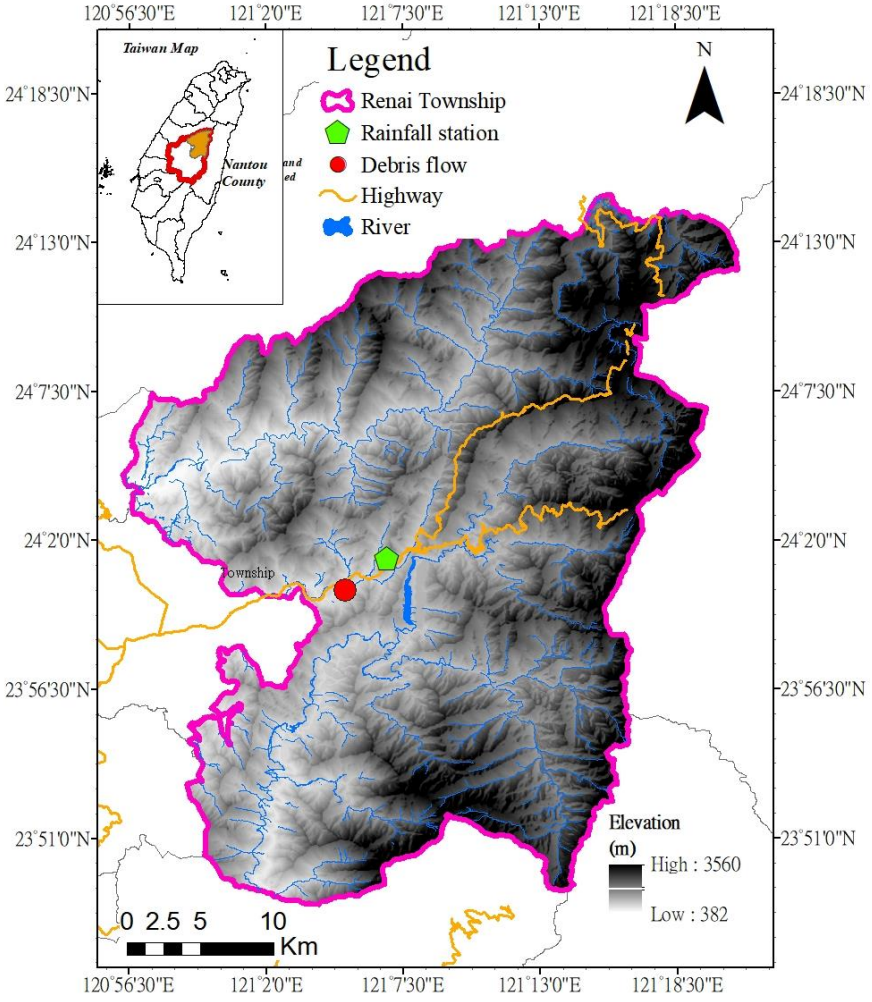


Fig. 1. The study area in Ren'ai Township, Nantou County. The red circle symbol showing the debris flow event at The St. Benedict (SB) gas station

a) b) c)

Fig. 2. St. Benedict (SB) gas station (No. "Touxian DF013" potential debris flow stream) in Nanfeng Village has been buried seven times by debris flows, making it the most buried building in Taiwan history [*ARDWCT, 2023*]: a – the first debris flow hazard at the SB gas station in the rainstorm in Feb. 2000 after the 921 earthquakes in 1999 (provided by J.D. Shieh on Feb. 28, 2000 [*ARDWCT, 2023*]); b – the sixth debris flow hazard at the SB gas station during Typhoon Sinlaku in 2008 (provided by S.C. Huang on Sept. 23, 2008 [*ARDWCT, 2023*]); c – Fifteen years later, from Aug. 3rd to 4th, 2023, Typhoon Khanun's outer circulation caused the SB gas station to be buried for the seventh time by debris flow (from CTS TV image)

The *P–T* model (Eqs. (2) and (3)) was used to calculate the probability of debris flow occurrences in Ren'ai Township and examined the model's applicability. *P* was determined when the rainfall index *RI* >30 cm²/h.

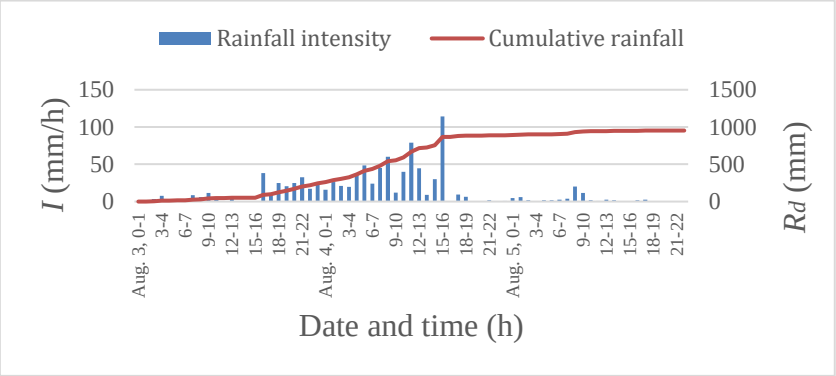


Fig. 3. Changes in hourly and cumulative rainfall at Ren'ai rainfall station. The cumulative rainfall from August 3rd to August 5th was 933 mm

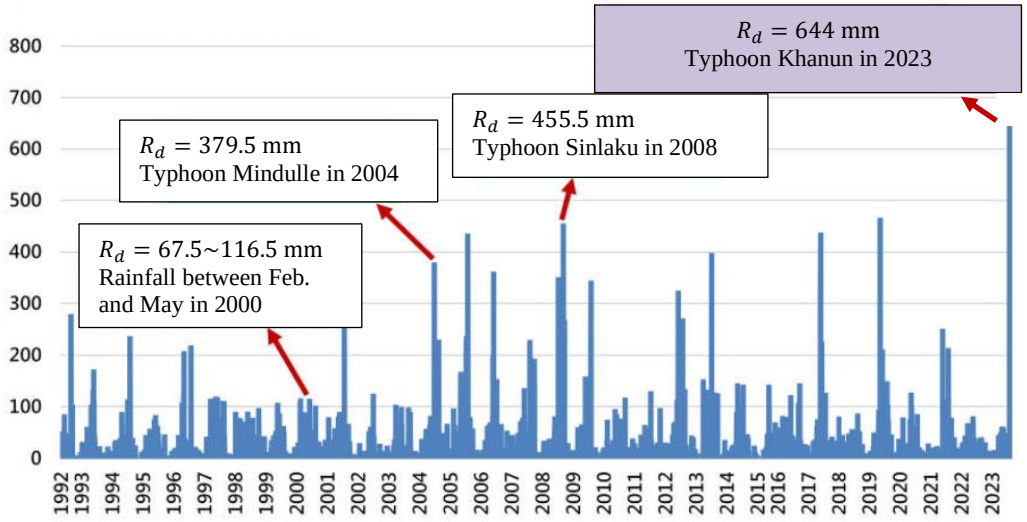


Fig. 4. Time series of daily cumulative rainfall R_d at Ren 'ai rainfall station, Ren 'ai Township, Nantou County (Source: Central Meteorological Administration; Drawn by: National Science and Technology Center for Disaster Prevention and Rescue (modified after [*Huang et al., 2023*])

Debris flow warning

Based on the temporal variation of rainfall data, the probability of debris flow occurrence P can be calculated using Eqs (2) and (3). In the application of early warning for debris flows, it is recommended to distinguish the risk levels into yellow and red. When P >0.5, the yellow risk level enters the warning state until the subsequent 6 h of rainfall result in P <0.5. When P >0.7, enter the red risk level that needs to be evacuated, and adjust to the yellow risk level until the subsequent 6 h of rainfall make P <0.7.

Results

According to the change in the probability line of debris flow occurrence (the red line in Fig. 5), the probability P of debris flow occurrence exceeded 0.5 after 5:00 on August 4th, entering the yellow warning zone of debris flow. By 8:00, P had exceeded 0.7, entering the red warning zone of debris flow. The RI value was 495 cm^2/h between 11:00 and 12:00, exceeding the rainfall standard for triggering multiple debris flows (RI = 365 cm^2/h). The corresponding probability of debris flow occurrence reaches 0.99. Although the rainfall slightly eased in the 3 to 4 h after RI = 495 cm^2/h, the rainfall intensity reached a peak of 114 mm/h from 15:00 to 16:00, and RI surged to 933 cm^2/h and the probability of debris flow occurrence once again

reach 0.99. According to relevant media reports and on-site investigations, multiple debris flows appeared in the study area in the evening after the peak hour rainfall. Debris flows submerged gas station, roads, and houses but fortunately did not cause any deaths. The results of this study showed that the *P*–*T* model is reasonable to calculate the probability of debris flow occurrence and distinguish the risk levels of yellow warning and red evacuation, which can effectively mitigate the occurrence of debris flow hazards. However, in the years following the extreme rainfall event of Typhoon Khanun, the rainfall threshold for triggering debris flows may decrease, and the probability of such events may increase. Therefore, it is necessary to adjust the rainfall warning model for a debris flow after this event.

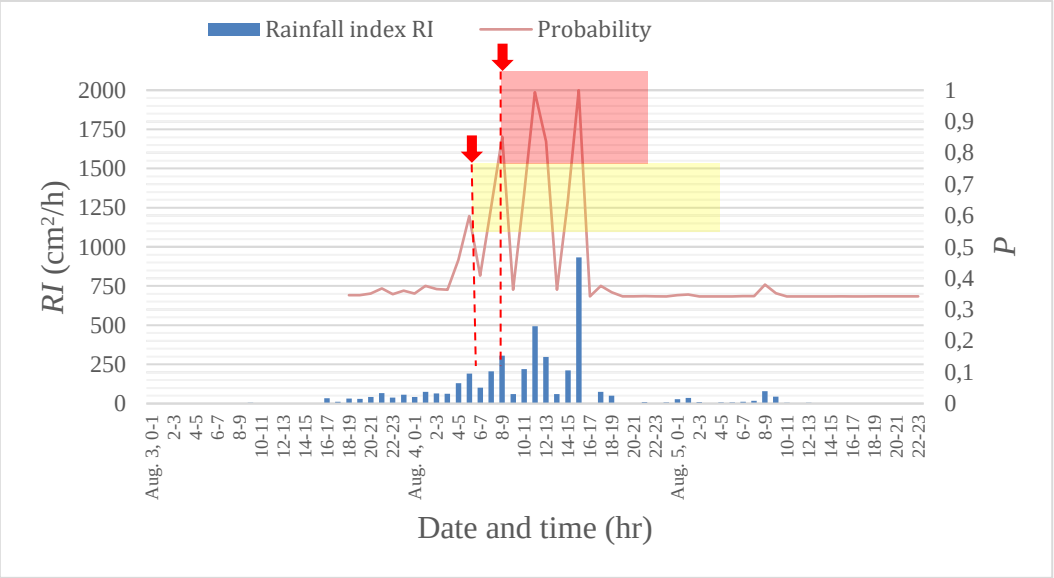


Fig. 5. Changes in rainfall index *RI* and probability *P* of debris flow occurrence. *P* was predicted when the rainfall index *RI* >30 cm²/h. According to the predicted *P*, different warning levels were proposed, with a yellow warning level of 0.5<*P*<0.7 and a red evacuating level of *P* >0.7.

Conclusions

This study used the *P*–*T* model to evaluate the probability of debris flow occurrence in Ren'ai Township, Nantou County, Taiwan, and examined the applicability of the model. The *P*–*T* model is based on the relationship between the rainfall index *RI* and its rainfall return period *T*, and combined with the Weibull function to establish a model between RI and the probability of debris flow occurrence. This model has effectively assessed the probability of debris flows occurring in CSW in Nantou County, Taiwan. In the case study of Renai Township, Typhoon Khanun brought record breaking rainfall, with a maximum hourly rainfall of 114 mm/h and a maximum cumulative rainfall of 818 mm within 24 h, resulting in multiple debris flow events. The results showed that the *P*–*T* model calculated the probability of debris flow occurrence in this study area, distinguished the risk levels of yellow warning and red evacuation, and effectively mitigating the occurrence of debris flow hazards.

References

Joshi, V., Kumar, K. Extreme rainfall events and associated natural hazards in Alaknanda Valley, Indian Himalayan Region, Journal of Mountain Science 2006, 3(3):228–236, DOI: 10.1007/s11629-006-0228-0.

Chen, J.C., Chuang, M.R., Discharge of landslide-induced debris flows: case studies of Typhoon Morakot in southern Taiwan", Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2014: 14, 1719–1730.

Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., Jakob, M. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows. J. Hydrol. 2014, 518: 194–205.

Wang, F., Wu, Y.H., Yang, H., Tanida, Y., and Kamei, A. Preliminary investigation of the 20 August 2014 debris flows triggered by a severe rainstorm in Hiroshima City, Japan, Geoenvironmental Disasters 2015, 2:17, DOI 10.1186/s40677-015-0025-6.

Joe, E.J., Tongkul, F., Roslee, R. Relationship Between Rainfall and Debris Flow Occurrence in the Crocker Range of Sabah, Malaysia. Malaysian Journal of Geosciences 2018, 2(1): 18–29.

Nam, D.H., Lee, S.H., and Kim, B.S. Development of Nomogram for Debris Flow Forecasting Based on Critical Accumulated Rainfall in South Korea, Water 2019, 11, 2181; doi:10.3390/w11102181.

Gong, X.L., Chen, K.T., Chen, X.Q., You, Y., Chen, J.G., Zhao, W.Y., and Lang, J. Characteristics of a Debris Flow Disaster and Its Mitigation Countermeasures in Zechawa Gully, Jiuzhaigou Valley, China, Water 2020, 12, 1256; doi:10.3390/w12051256.

Destro, E., Marra, F., Nikolopoulos, E. I., Zoccatelli, D., Creutin, J.D., Borga, M., Spatial estimation of debris flows-triggering rainfall and its dependence on rainfall return period Geomorphology 2017, 278, 269–279.

Caine, N., The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flow. Geogr. Ann. Ser. A. Phys. Geogr 1980. 62A, 23–27.

Wieczorek, G. F. Effect of rainfall intensity and during in debris flows in central Santa Cruz Mountain, California, Eng. Geol. 1987, 7, 93–104.

Jan, C. D. and Chen, C. L. Debris flow caused by Typhoon Herb in Taiwan. In: Jakob M. and Hungr O. (eds.), Chapter 21, Debris-flow hazards and related phenomena, 2005, Praxis, UK, pp 539–563.

Shieh, C. L., Chen, Y. S., Tsai, Y. J., and Wu, J. H. Variability in rainfall threshold for debris flow after the Chi-Chi earthquake in central Taiwan, China, Int. J. Sediment Res. 2009, 24, 177–188.

Chen, J.C., Huang, W.S., Jan, C.D., and Tsai, Y.F. Rainfall conditions for the initiation of debris flows during Typhoon Morakot in the Chen-Yu-Lan watershed in central Taiwan. Proc. of the 5th Int. Conf. on Debris Flow Hazards Mitigation, 2011, Padua, Italy. Genevois R., Hamilton D.L., and Prestininzi A. (eds.), 31–36.

Chen, J.C., Jan, C.D., Probabilistic Analysis of Landslide Potential of an Inclined Uniform Soil Layer of Infinite Length – Application, Environmental Geology 2008, Vol.54, No.6, pp. 1175–1183, DOI 10.1007/s00254-007-0900-x.

Chen, N.S., Yang, C.L., Zhou, W., Hu, G.S., Li, H., and Hand, D. The Critical Rainfall Characteristics for Torrents and Debris Flows in the Wenchuan Earthquake Stricken Area, J. Mt. Sci. 2009, 6, 362–372.

Tang, C., Zhu, J., and Li, W.L. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake, B. Eng. Geol. Environ. 2009, 68, 187–194, https://doi.org/10.1007/s10064-009-0201-6.

Chen, J. C. Variability of impact of earthquake on debris flow triggering conditions: case study of Chen-Yu-Lan Watershed, Taiwan, Environ. Earth Sci. 2011, 64(7), 1787–1794.

Chen, J.C., Jan, C.D., Huang, W.S. Characteristics of rainfall triggering of debris flows in the Chenyulan watershed, Taiwan, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2013, 13:1015-1023, doi:10.5194/nhess-13-1015-2013.

Pan, H. L., Jiang, Y. J., Wang, J., and Ou, G. Q. Rainfall threshold calculation for debris flow early warning in areas with scarcity of data, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2018, 18, 1395–1409.

Chen, J.C., Huang, W.S., Tsai, Y.F. Variability in the characteristics of extreme rainfall events triggering debris flows: A case study in the Chenyulan watershed, Taiwan, Natural Hazards 2020, 102: 887–908.

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P. The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update. Landslides 2008, 5:3–17.

Nikolopoulos, E.I., Crema, S., Marchi, L., Marra, F., Guzzetti, F., Borga, M., Impact of uncertainty in rainfall estimation on the identification of rainfall thresholds for debris flow occurrence. Geomorphology 2014, 221:286–297.

Chen, J.-C., C.-D. Jan and M.-S. Lee (2007), "Probabilistic Analysis of Landslide Potential of an Inclined Uniform Soil Layer of Infinite Length – Theorem", Environmental Geology, Vol.51, No.7, pp.1239–1248. DOI 10.1007/s00254-006-0417-8

Jan, C.D., and Lee, M.H. A debris-flow rainfall-based warning model. J. Chin. Soil & Water Conserv. 2004, 35(3), 273–283 (in Chinese).

Chen, J.-C., Huang, W.-S. Evaluation of Rainfall-Triggered Debris Flows under the Impact of Extreme Events: A Chenyulan Watershed Case Study, Taiwan. Water 2021,13,2201. https://doi.org/10.3390/w13162201.

ARDWCT (Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, Taiwan), Historical Image Platform: The building buried most frequently by debris flows in history, 2023 (in Chinese)

Huang, S. C., Lee Z. R., Huang B. C., Wang, A. S., Zhu, R. L., Yu Y. C., Meteorological Analysis of Typhoon Khanun and Subsequent Southwest Wind and Heavy Rainfall Events in 2023, National science and technology Center for Disaster Reduction (NCDR), Disaster Prevention and Rescue Electronic Report No. 219, issued on October 10, 2023 (in Chinese).

Vegetation recovery and debris flow effects following tropical cyclone-induced disturbances in Eastern Cuba

R. Delgado-Téllez[1], N. Viña-Dávila[2], A. Peña-de la Cruz[3], Y. Savón-Vaciano[3]

[1]Mountain Development Centre, Environmental Agency, Guantánamo, Cuba, tellezdel@gmail.com

[2]Caribbean Biological Corridor Secretariat, Santo Domingo, Dominican Republic

[3]Cuban Institute of Meteorology, Guantánamo, Cuba

Abstract. Tropical cyclones, with intense rainfall, often trigger debris flows that impact natural ecosystems. In this study, we focus on the eastern region of Cuba, specifically the area affected by debris flows following Hurricane Matthew. Our investigation tracks vegetation dynamics over time, considering both immediate and long-term effects. First, fieldwork conducted shortly after Hurricane Matthew allowed us to assess the impact of the hurricane on the terrain. Then, to evaluate vegetation recovery, we established a baseline using one-square-kilometer polygons and a network of measurement points. Leveraging Sentinel 2-A/B imagery and Landsat archives, we analyzed the normalized vegetation index before and after the event. Our study spanned both dry and rainy periods, extending up to eight years post-event. The results show that in the zone with the highest debris flow density, the vegetation recovered relatively quickly from direct hurricane impacts. However, the recovery period also presented an opportunity for invasive species to establish themselves. These newcomers may further compete with native flora. Consequently, there is a gradual shift in vegetation cover, which could increase the risk of debris flows during future events. Understanding these dynamics is crucial for effective land management and disaster risk reduction in regions prone to tropical cyclones and associated debris flows.

Key words: *debris flows; NDVI trends; mountain areas; hurricane Matthew*

Cite this article: Delgado-Téllez R., Viña-Dávila N., Peña-de la Cruz A., Savón-Vaciano Y. Vegetation recovery and debris flow effects following tropical cyclone-induced disturbances in Eastern Cuba. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 84–85.

Восстановление растительности и последствия селевых потоков, вызванных тропическими циклонами на востоке Кубы

Р. Дельгадо-Теллез[1], Н. Винья-Давила[2], А. Пенья де ла Круз[3], И. Савон-Васиано[3]

[1]Центр развития горных территорий, Агентство по защите окружающей среды, Гуантанамо, Куба, tellezdel@gmail.com

[2]Секретариат Карибского биологического коридора, Санто-Доминго, Доминиканская республика

[3]Кубинский институт метеорологии, Гуантанамо, Куба

Аннотация. Тропические циклоны, сопровождающиеся интенсивными осадками, часто вызывают селевые потоки, которые влияют на природные экосистемы. В данном исследовании рассматривается восток Кубы, в частности территории, пострадавшие от селевых потоков после урагана «Мэтью». В нашем исследовании прослеживается динамика растительности во времени с учетом как непосредственных, так и долгосрочных последствий. Полевые работы, проведенные вскоре после урагана «Мэтью», позволили нам оценить его воздействие на местность. Затем, чтобы оценить темпы и характер восстановления растительности,

мы организовали наблюдения, организовав полигоны площадью 1 км^2 и сеть точек измерения. Используя снимки Sentinel 2-A/B и архивы Landsat, мы проанализировали нормализованный индекс растительности до и после урагана. Наше исследование охватывало как сухой, так и дождливый периоды и продолжалось в течение восьми лет после события. Результаты показывают, что в зоне с наибольшей плотностью селевых потоков растительность относительно быстро восстановилась после прямого воздействия урагана. Однако период восстановления также дал возможность закрепиться инвазивным видам. Эти новые виды могут в дальнейшем конкурировать с местной флорой. Таким образом, происходит постепенное изменение растительного покрова, что может повысить риск возникновения селевых потоков во время будущих событий. Понимание этой динамики крайне важно для эффективного землепользования и снижения риска бедствий в регионах, подверженных тропическим циклонам и связанным с ними селевым потокам.

Ключевые слова: *селевые потоки; NDVI; горные районы; ураган «Мэтью»*

Ссылка для цитирования: Дельгадо-Теллез Р., Винья-Давила Н., Пенья де ла Круз А., Савон-Васиано И. Восстановление растительности и последствия селевых потоков, вызванных тропическими циклонами на востоке Кубы. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 84–85.

The full text of the article will be published in the Journal of Mountain Science.

Селе-паводковые явления на территории Республики Узбекистан. Опыт использования инструментов по оценке риска возникновения быстроразвивающихся паводков (ИДСП)

И.В. Дергачева, А.С. Меркушкин, Ф.С. Агзамов, С.С. Мягков, К.В. Дергачев

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Ташкент, Узбекистан, Dergacheva_iv@mail.ru

Аннотация. В статье приводятся результаты анализа данных многолетних наблюдений за проявлением селе-паводковой активности на территории Республики Узбекистан и дается краткий анализ возможностей использования инструментов Системы оценки риска возникновения быстроразвивающихся паводков в Центральной Азии (ИДСП) для минимизации возможных негативных последствий селе-паводковых явлений дождевого генезиса.

Ключевые слова: *Селе-паводковые явления, пространственно-временное распределение, быстроразвивающиеся паводки, стихийные бедствия.*

Ссылка для цитирования: Дергачева И.В., Меркушкин А.С., Агзамов Ф.С., Мягков С.С., Дергачев К.В. Селе-паводковые явления на территории Республики Узбекистан. Опыт использования инструментов по оценке риска возникновения быстроразвивающихся паводков (ИДСП). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 86–93.

Debris flow and flood phenomena on the territory of the Republic of Uzbekistan: Experience in using tools for assessing the risk of flash floods (FFGS)

I.V. Dergacheva, A.S. Merkushkin, F.S. Agzamov, S.S. Myagkov, K.V. Dergachev

Scientific Research Hydrometeorological Institute, Tashkent, Uzbekistan, Dergacheva_iv@mail.ru

Abstract. The article presents the results of an analysis of long-term observation data on the manifestation of debris flow and flood activity on the territory of the Republic of Uzbekistan and provides a brief analysis of the possibility of using tools for assessing the risk of flash floods (FFGS) to minimize the possible negative consequences of debris flow and flood phenomena of rain genesis.

Key words: *debris flow and flood phenomena, spatio-temporal distribution, flash floods, natural disasters*

Cite this article: Dergacheva I.V., Merkushkin A.S., Agzamov F.S., Myagkov S.S., Dergachev K.V. Debris flow and flood phenomena on the territory of the Republic of Uzbekistan: Experience in using tools for assessing the risk of flash floods (FFGS). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 86–93.

Введение

Горные и предгорные территории Республики Узбекистан подвержены опасности селе-паводковых явлений. В стране осуществляется ряд мероприятий по улучшению

экологической обстановки, предупреждению чрезвычайных ситуаций при паводковых и селевых явлениях, защите населения и социальных объектов, отраслей экономики от негативного воздействия опасных природных явлений, а также направленных на улучшение систем мониторинга и прогнозирования стихийных гидрометеорологических явлений. В стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан «организация и развитие системы раннего оповещения населения о чрезвычайных ситуациях» обозначена как одна из основных задач. В связи с этим актуальное значение приобретают исследования, направленные на изучение, картографирование и предупреждение селе-паводковых явлений на территории Узбекистана и трансграничных бассейнов, и создание автоматизированных систем раннего предупреждения.

Краткий обзор проблемы

В настоящее время по всей Республике Узбекистан идет активное освоение горных и предгорных территорий: на плодородных предгорных почвах развивается сельское хозяйство, строятся новые ГЭС, повышается добыча природных ископаемых, очень активно развивается горный туризм, строятся новые рекреационные зоны, что, соответственно, ведет к необходимости строительства гидротехнических сооружений на горных реках, прокладки новых дорог, ЛЭП и многого другого. Часто строительство, особенно в частном секторе, ведется без учета селеопасности территории, и в селеопасные зоны попадают жилые, рекреационные и хозяйственные объекты. В результате необдуманных действий каждый год разрушительные селе-паводковые потоки наносят большой урон сельскому хозяйству, инфраструктуре, нарушают экологическую обстановку, становятся причиной гибели людей (рис. 1, 2).

Рис. 1. Разрушения после селя в пос. Чадак Папского района Наманганской области Узбекистана, май 2016 г.

На селе-паводковые явления влияют различные гидрометеорологические и другие соответствующие факторы (рельеф, антропогенная деятельность человека и т.п.). Масштабы этих явлений во многом зависят от интенсивности и высоты слоя, времени, пространственного распределения и фазы осадков. Погода и ветер оказывают влияние на снеготаяние, которое, в свою очередь, влияет на размер паводка. Рельеф влияет на заполнение селей твердой составляющей. Развитие систем раннего предупреждения селе-паводковых явлений и систем заблаговременного оповещения о ситуации в

верховьях может спасти жизни и снизить экономические потери f*Синопсис публикации ВМО, № 1047, 2009*].

Снижение риска стихийных бедствий и обеспечение готовности к ним на основе функционирования систем раннего предупреждения внезапных паводков и селевых потоков отражено как приоритетное направление в Сендайской рамочной программе по снижению риска бедствий на 2015–2030 г. для создания жизнестойких сообществ. В настоящее время в Узбекистане ведутся исследования в данном направлении.

Рис. 2. Прохождение селевого паводка в с. Эгизбулак Форишского района Узбекистана, 20 апреля 2020 г.

Методика исследования

При определении основных характеристик селей и паводков, установлении периодов повышенного риска образования селей различного генезиса, изучении и оценке зависимости их образования от гидрометеорологических факторов, установлении закономерностей распространения селей и паводков использованы методы математической статистики – корреляционный и многофакторный анализ, объективный метод выравнивания и нормализации корреляционных связей. В процессе выполнения работы применялись методы картографических исследований, сравнительно-географический, метод географического обобщения и аналогии. Для создания цифровых моделей рельефа использован метод построения цифровой модели рельефа с использованием современных компьютерных технологий. Основу исходных данных и картографической информации составляют опубликованные и утвержденные тематические карты, спутниковые снимки, материалы наблюдений, проводимых в Научно-исследовательском гидрометеорологическом институте и Узгидромете.

Результаты анализа пространственно-временного распределения селе-паводков

В Узбекистане все реки, включая временные водотоки, в пределах гор и предгорий являются селеопасными. Повторяемость катастрофических селей большой разрушительной силы в одном бассейне, в среднем, несколько десятков лет, что не исключает возможности повторения селей и в более короткий промежуток времени [*Дергачева, 2022*]. Распределение числа случаев селей по районам Узбекистана за весь период наблюдений (1900–2022 г.) приведено на рис. 3.

Селевая опасность в горах существует в основном в определенные месяцы и обусловлена периодами ливневой активности (рис. 4).

В результате анализа внутригодового распределения селей за многолетний период установлено, что в последние годы наблюдается растягивание времени селе-паводковой активности и смещение пика на более поздние сроки, что связано с влиянием климатической изменчивости и изменением в режиме выпадения осадков. Активность кратковременных интенсивных осадков наблюдается не только в весенние месяцы, но и летом, что особенно опасно в сочетании с высокими температурами воздуха, так как может вести к усиленному таянию высокогорных снегов и ледников и способствовать образованию селей и паводков дождевого и прорывного генезиса, которые обладают особо разрушительной силой.

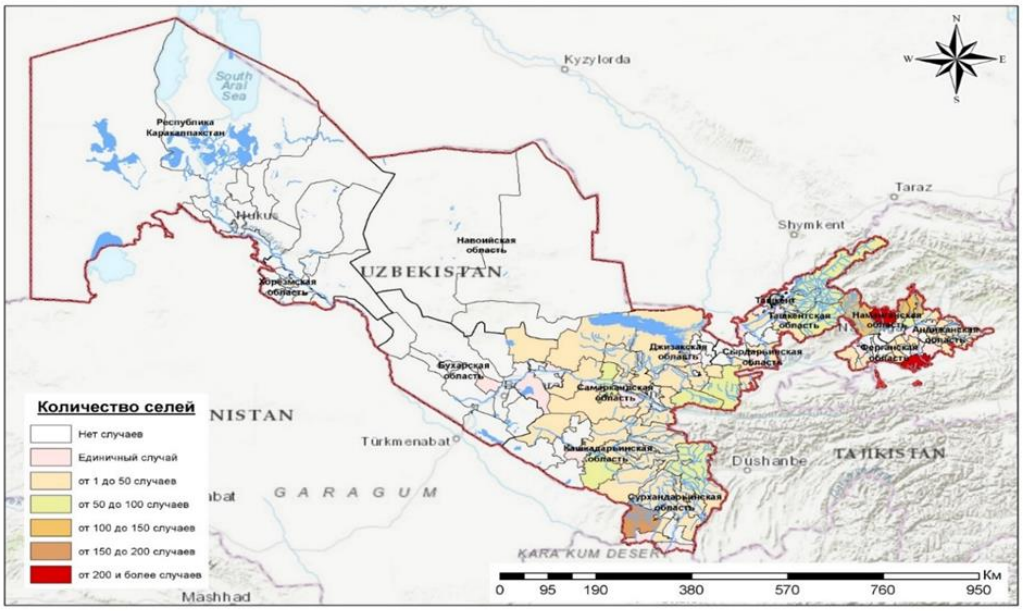


Рис. 3. Распределение случаев схода селей по территории Узбекистана в разрезе административных районов

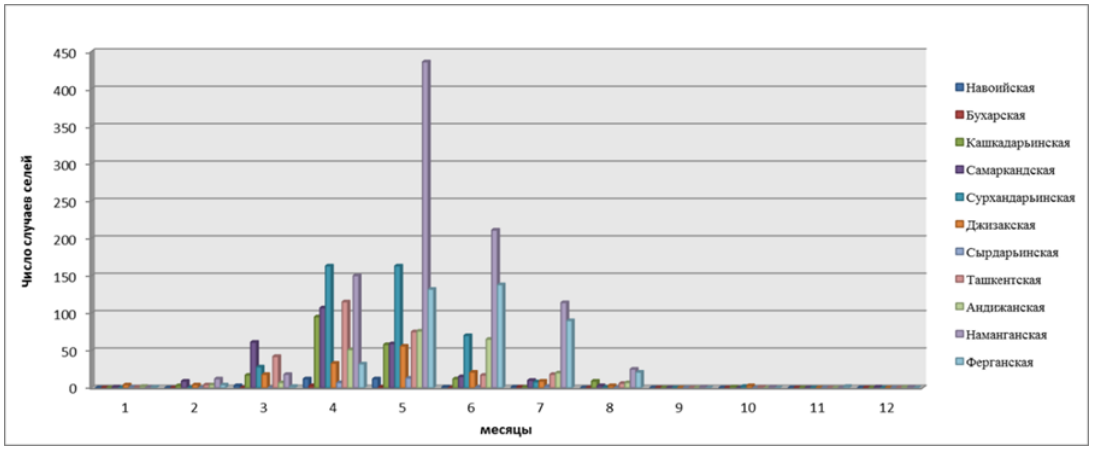


Рис. 4. Внутригодовое распределение частоты селей и паводков по областям за период 1990–2022 г.

На основе анализа данных были сделаны следующие основные выводы:

– в связи с глобальным изменением климата возрастает количество экстремальных погодных явлений, в том числе ливней, которые выступают определяющим фактором возникновения селей, паводков и наводнений;

- развитие инфраструктуры в районах, подверженных селевой и паводковой активности, приводит к неизбежному росту количества нанесенного ущерба при прохождении селей и экстремальных паводков;
- по всей горной и предгорной территории Узбекистана может наблюдаться рост селе-паводковой активности дождевого генезиса, что повысит риски в связи интенсивным освоением горных и предгорных территорий и ростом населения;
- в случае дальнейшего увеличения температур воздуха, и особенно при аномально высоких температурах воздуха по горным территориям, возможно увеличение рисков, связанных с прорывом озер приледниковой зоны с неустойчивыми плотинами.

Опыт использования инструментов информационно-диагностической системы для оценки риска возникновения быстроразвивающихся паводков (ИДСП)

Паводки, в том числе и быстроразвивающиеся паводки, основной причиной которых являются интенсивные осадки очень часто носят трансграничный характер. На территорию Узбекистана селе-паводковые потоки приходят с территории Киргизстана и Таджикистана. Поэтому при анализе разработок в области предупреждения паводков и селей большое внимание уделялось системам, разрабатываемым для трансграничных бассейнов.

Быстроразвивающиеся паводки, к которым относятся и селе-паводковые явления отличаются от речных паводков своими короткими временными масштабами и возникновением в небольших пространственных масштабах, что делает прогнозирование быстроразвивающихся паводков проблемой, отличной от прогнозирования паводков крупных рек. При прогнозировании быстроразвивающихся паводков прежде всего интересует прогноз причин их возникновения, главные из них – интенсивных дождях и осадки на водонасыщенные почвы. Внезапные паводки происходят по всему миру, а время их развития варьируется в зависимости от региона от минут до нескольких часов в зависимости от земной поверхности, геоморфологических и гидрометеорологических особенностей региона. Однако для большинства этих районов не существует официального процесса или возможностей для разработки предупреждений о быстроразвивающихся паводках.

В настоящее время в Узбекистане интерактивной онлайн системы раннего предупреждения селе-паводковой опасности для территории Узбекистана на основе информационно-диагностическая система для оценки риска возникновения быстроразвивающихся паводков (ИДСП), которая является диагностическим инструментом для анализа событий, связанных с погодой, которые могут спровоцировать формирование быстроразвивающихся паводков. ИДСП разработана специалистами гидрологического научно-исследовательского центра (ГНИЦ), Сан-Диего, США при поддержке Всемирной Метеорологической Организации (ВМО), гидрологических научно-исследовательских центров, Национального управления по исследованию океанов и атмосферы США, Национальной метеорологической службы и Агентством Соединенных Штатов по международному развитию, Бюро по оказанию помощи другим странам в случае стихийных бедствий.

ИДСП предназначена для сокращения разрушительных последствий, вызываемых быстроразвивающимися паводками, а именно: сокращения количества жертв, вреда для людей и ущерба имуществу.

Быстроразвивающиеся паводки – это явление, возникающее в результате интенсивных или избыточных дождевых осадков, выпадающих в короткий промежуток времени, обычно менее 6 часов, и приводящих к довольно быстрому подъему уровня воды в реке. Селевые паводки, отличаются от паводков насыщенностью твердой составляющей в потоке, что увеличивает их разрушительную силу, но подход, используемый в ИДСП, может быть применим и к условиям Узбекистана с некоторыми поправками.

Информационно-диагностическая система для оценки риска возникновения быстроразвивающихся паводков использует оценки спутниковых данных об осадках в режиме реального времени, получаемые при помощи алгоритма Hydro Estimator, доступные в настоящее время на регулярной основе во всем мире [*Руководство по использованию ИДСП для региона Центральной Азии, 2016*]. Выходной продукт системы, представлены в виде набора карт для сумм осадков за период времени 1, 3, 6 и 24 часа для бассейнов площадью от 100 до 300 км^2. На рис. 5 приведены данные суммарного количества осадков с 23 по 24 апреля 2019 г., полученные по алгоритму Global Hydro Estimator (GHE) (по данным в инфракрасной области спектра), скорректированные по микроволновым спутниковым данным об осадках с целью повышения точности. Данные представлены в миллиметрах. Именно в эти даты по территории Узбекистана наблюдалось выпадение интенсивных осадков, позже были зафиксированы селе-паводковые явления по горным и предгорным районам республики, поэтому в качестве тестирования ИДСП, для возможности применения как аналоговой, взят период времени 23–24 апреля 2019 г.

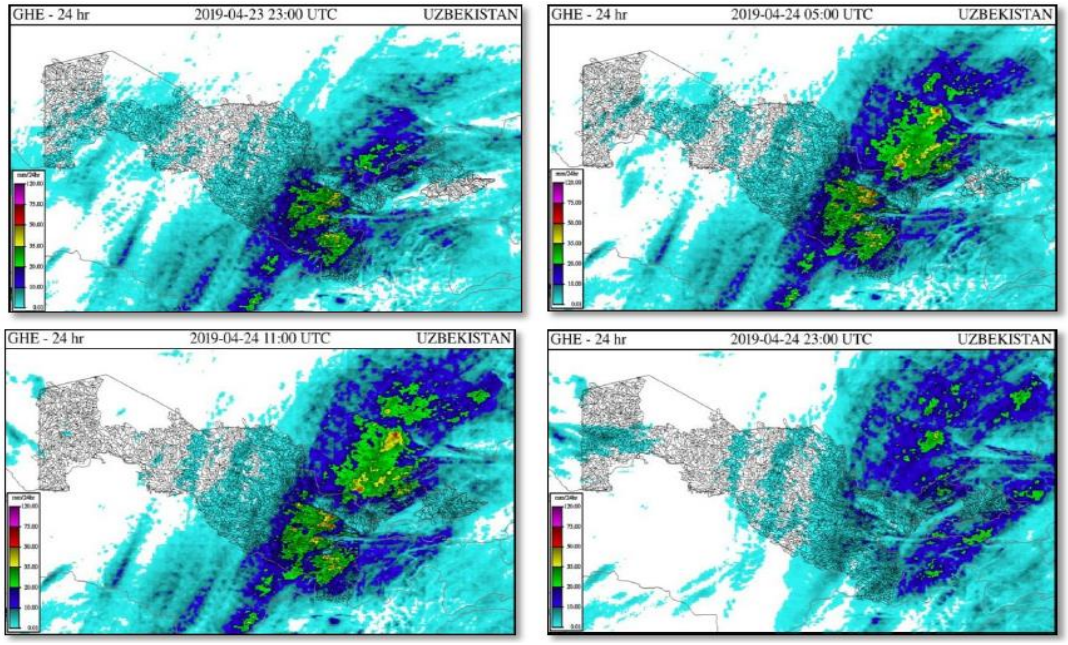


Рис. 5. Данные суммарного количества осадков с 23 по 24 апреля 2019 г., полученные по алгоритму Global Hydro Estimator

Для производства объединенной продукции (спутниковые данные и наземные наблюдения) для средних по площадям осадков (рис. 6) сначала проводится корректировка погрешностей спутниковой продукции с использованием имеющихся данных осадкомеров, а затем получают продукцию для всего поля путем объединения данных, полученных из различных источников, в соответствии с заранее установленной иерархией.

Гидрологические характеристики показателя риска возникновения быстроразвивающихся паводков основываются на поверхностных и почвенных параметрах водосбора, создающих в замыкающем створе водосбора условия заполнения русла до уровня поймы. В ИДСП модель расчета влажности почвы с сосредоточенными параметрами использует информацию о средних по бассейну осадках, испарению, температуре, топографии бассейна и характеристиках почвы в качестве входных данных для непрерывной оценки влажности почвы и характеристик стока. На рис. 7 приведены карты средней влажности почвы (глубина приблизительно 20–30 см), полученные по модели Сакраменто для каждого из суббассейнов. Можно проследить, как меняется увлажненность почвы в течение 6 ч.

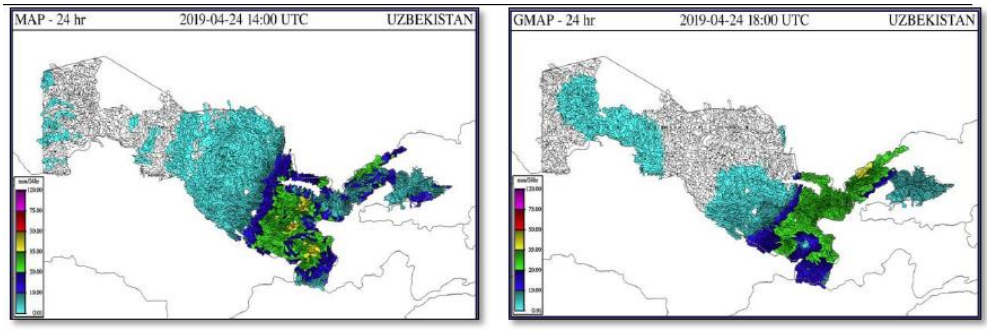


Рис. 6. Накопление средних по площади осадков по территории Узбекистана для суббассейнов за последние 24 ч 24 апреля 2019 г.

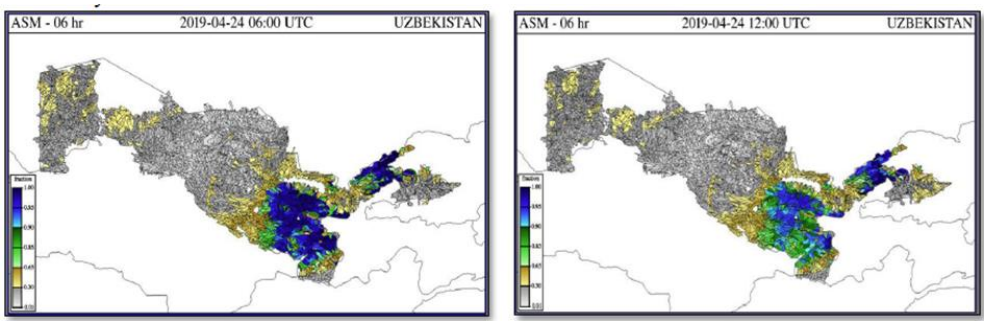


Рис. 7. Средние значения влажности почвы (глубина 20–30 см), полученные по модели Сакраменто для каждого из суббассейнов

ИДСП основана на расчете двух показателей: риска возникновения быстроразвивающихся паводков и угрозы быстроразвивающихся паводков. Оба показателя предоставляют пользователю информацию, необходимую для оценки потенциальной возможности возникновения быстроразвивающегося паводка, включая оценку неопределенности, связанной с данными.

Подход к визуализации показателей риска и угрозы быстроразвивающихся паводков, предназначенный для производства предупреждений о быстроразвивающихся паводках, основывается на сопоставлении в режиме реального времени наблюдаемого или прогнозируемого объема дождевых осадков в течение определенного временного промежутка и на определенной площади водосбора с характерным объемом дождевых осадков на тот же промежуток времени и ту же площадь водосбора, создающим в замыкающем створе водосбора условия заполнения русла до уровня берегов. Показатель риска возникновения быстроразвивающихся паводков для условий 23–24 апреля 2019 г. приведен на рис. 8. Фиолетовые зоны показывают суббассейны, где при ожидаемом выпадении осадков до 15 мм за 6 ч могут сформироваться паводки.

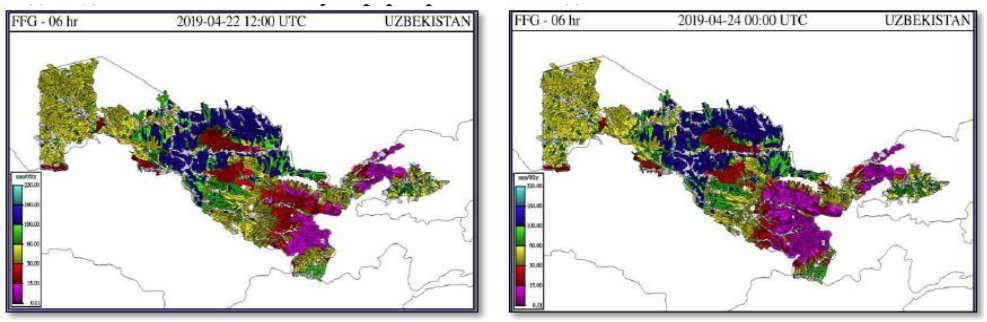


Рис. 8. Пример. Показатель риска возникновения быстроразвивающихся паводков для условий 23–24 апреля 2019 г.

Если наблюдаемый или прогнозируемый объем дождевых осадков превосходит показатель риска возникновения быстроразвивающихся паводков на тот же временной промежуток, этот переизбыток называют угрозой быстроразвивающихся паводков, и это означает, что в замыкающем створе водосбора или поблизости от него возникает возможность наводнений. Карты угрозы быстроразвивающихся паводков приведены на рис. 9.

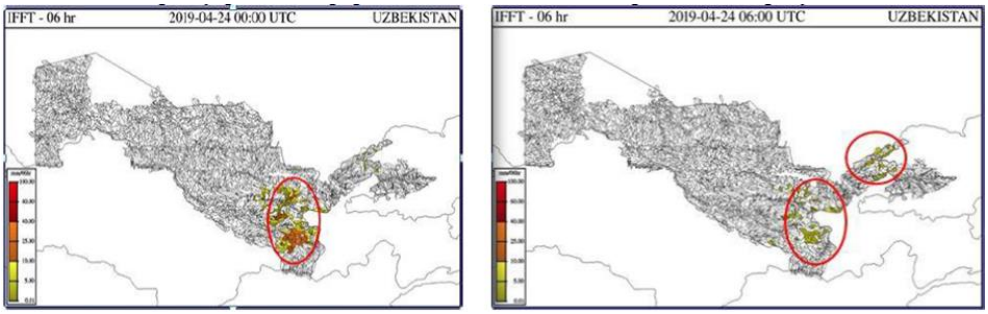


Рис. 9. Карты угрозы быстроразвивающихся паводков по территории Узбекистана 24 апреля 2019 г.

Выводы

Система управления наводнениями в Центральной Азии (ЦАРИДСП) улучшает качество предупреждений о селевых паводках, но требует доработок и уточнений, так как по результатам анализа, проводимого в НИГМИ в течение двух лет тестирования системы, ИДСП часто переоценивает опасность. Составление предупреждений о возможности образования селевых потоков должно проводиться специалистами синоптиками и гидрологами, основываясь на многолетних исследованиях в данной области. ИДСП является мощным и современным вспомогательным аппаратом.

Ни одна даже самая совершенная система предупреждения не будет эффективна без качественной системы раннего оповещения и поддержки населения. Конечно, необходимо проводить инженерные мероприятия по укреплению берегов селеопасных рек, расчистке русел рек, саев и селепропусков, строить противоселевые сооружения и селехранилища, но также необходимо вести постоянную целенаправленную работу с населением, воспитывать серьезное отношение к такому грозному и разрушительному явлению, как сели и паводки. Не допустимо строительство жилых, хозяйственных построек, зон отдыха в близи русел селеопасных рек. Постройки не только сами находятся под угрозой разрушения, но и усугубляют селеопасную ситуацию, являясь дополнительным препятствием на пути потока, способным временно сдержать воду, как дамба, после прорыва которой поток только наберет еще большую силу. Только комплексный подход к решению этой проблемы может дать положительные результаты.

Список литературы

Дергачева И.В., Салимова Б.Д. Исследование селевой активности в горных и предгорных районах Республики Узбекистан // Проблемы современной науки и образования, 2022. № 9 (178), с. 48–52.

Концептуальный документ «Интегрированное управление наводнениями». Синопсис публикации ВМО, № 1047, 2009 г. https://www.livelib.ru/book/197377/readpart-navodneniya-ot-zaschity-k-upravleniyu-nauchnye-redaktory-chlenkorrespondent-ran-v-n-lykosov-i-professor-v-a-zemtsov-p-yu-pushistov/~10

Руководство по использованию Информационно-диагностической системы для оценки риска возникновения быстроразвивающихся паводков для региона Центральной Азии. – Т., 2016. – 11 с.

Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг.

Высокогорные озера Узбекистана и трансграничных территорий, как потенциальный источник возникновения селей

И.В. Дергачева, М. Мирджапаров, З.Д. Тилляходжаева, С.В. Мягков

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Ташкент, Узбекистан, Dergacheva_iv@mail.ru

Аннотация. Лимнические системы – наименее изученный компонент водных ресурсов Узбекистана. Они характеризуются высокой изменчивостью в распределении по территории, по времени существования, отличаются разнообразием и непостоянством качества вод. Водные ресурсы озер широко используются в самых различных сферах – в основном в рыбохозяйственных и рекреационных целях, горные озера являются источниками пресных вод.

По территории озера расположены неравномерно. Наибольшее количество озер находится в горных зонах, на высоте 2000–3000 м. Горные озера, в основном, завального или ледниково-моренного происхождения.

Прорывы высокогорных озер являются одним из мощных селе-формирующих факторов. Прорывы озер происходят не часто, но носят чрезвычайно разрушительный характер. Сотрудниками Узгидромета совместно с представителями МЧС ведутся специальные наблюдения за состоянием некоторых прорывоопасных озер.

Специалистами НИГМИ разработана и внедрена в оперативную практику Узгидромета и МЧС: Многоуровневая информационная система «Прорывоопасные озера Узбекистана», в которую вошла информация по 680 озерам, расположенным на территории Узбекистана и в трансграничных бассейнах рек, несущих свои воды на территорию республики. В статье приводятся результаты анализа пространственно-временного распределение высокогорных озер, описаны недостатки мониторинга и даны некоторые рекомендации.

Ключевые слова: *сели прорывного генезиса, прорывоопасные озера, трансграничные паводки, стихийные бедствия*

Ссылка для цитирования: Дергачева И.В., Мирджапаров М., Тилляходжаева З.Д., Мягков С.В. Высокогорные озера Узбекистана и трансграничных территорий, как потенциальный источник возникновения селей. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 94–103.

High-mountain lakes of Uzbekistan and transboundary territories as a potential source of debris flows

I.V. Dergacheva, M. Mirjaparov, Z.D. Tillahodjaeva, S.V. Myagkov

Scientific Research Hydrometeorological Institute, Tashkent, Uzbekistan, Dergacheva_iv@mail.ru

Abstract. Limnic systems are the least studied component of the water resources of Uzbekistan. They are characterized by high variability in distribution over the territory and time of existence, and are distinguished by diversity and variability in water quality. The water resources of lakes are widely used in a variety of areas – mainly for fishing and recreational purposes; mountain lakes are sources of fresh water.

The lakes are unevenly distributed throughout the territory. The largest number of lakes are located in mountainous areas, at an altitude of 2000–3000 m. Mountain lakes are mainly of dam or glacial-moraine origin.

Outbursts of high-mountain lakes are one of the powerful debris flow forming factors. Lake outbursts do not occur often, but are extremely destructive. Employees of Uzhydromet, together with representatives of the Ministry of Emergency Situations, are conducting special observations of the condition of some outburst-hazardous lakes.
NIGMI specialists developed and implemented into the operational practice of Uzhydromet and the Ministry of Emergency Situations: A multi-level information system "Breakthrough-hazardous lakes of Uzbekistan", which included information on 680 lakes located on the territory of Uzbekistan and in transboundary river basins carrying their waters to the territory of the republic. The article presents the results of an analysis of the spatiotemporal distribution of high-mountain lakes, describes the shortcomings of monitoring and gives some recommendations.

Key words: *outburst-triggered debris flows, outburst-prone lakes, transboundary floods, natural disasters*

Cite this article: Dergacheva I.V., Mirjaparov M., Tillahodjaeva Z.D., Myagkov S.V. High-mountain lakes of Uzbekistan and transboundary territories as a potential source of debris flows. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 94–103.

Введение

Горные и предгорные территории занимают 21,2% от общей площади Республики Узбекистан. Эти территории не испытывают дефицита в водных ресурсах, здесь и на сопредельных территориях Кыргызстана и Таджикистана берут свое начало подавляющее большинство рек, в том числе и две главные водные артерии Центральной Азии – Сырдарья и Амударья. Здесь в горах Тянь-Шаня и Памиро-Алая сверкают россыпью самоцветов сотни горных озер, которые издревле манят к себе людей своей, иногда суровой красотой, чистейшими водами и овеяны множеством легенд и сказаний. Трудно переоценить значение горных озер для развития горного туризма и рекреационных зон. Но вместе с тем, величественные и могучие горы и горные озера, как неотъемлемая часть горного ландшафта, очень уязвимы к климатическим изменениям.

В современных условиях активного использования предгорных и горных территорий Узбекистана становится все более актуальной проблема угрозы прорыва высокогорных озер различного генезиса. Исследования указывают на то, что в горных районах повсеместно распространены современные экзогенные процессы, выражающиеся в образовании селей, оползней, обвалов, схода лавин и прорыва горных озер. Среди вышеперечисленных катастрофических природных явлений особенно разрушительной силой обладают селевые потоки, образовавшиеся в результате прорыва гляциальных и завальных озер, а также внутриледниковых и внутриморенных емкостей [*Виноградов, 1977; Глазырин, 1968; Черноморец, 2015; Ерохин, 2016*].

Климатические изменения, рост аномальных погодных явлений, активное освоение горных территорий, стремительное развитие горного туризма обуславливают необходимость регулярного мониторинга за состоянием высокогорных озер. Мониторинг прорывоопасных озер в Узбекистане осуществляется в соответствии с постановлением Президента Республики Узбекистан – «О мерах по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, связанных с опасными гидрометеорологическими явлениями и геологическими процессами» ПП № 426 от 18.11.2022, в котором определены задачи вовлеченных министерств и ведомств по организации мониторинга за опасными природными и техногенными явлениями и ликвидации их последствий.

Степень изученности и краткий обзор проблемы

Изучение озер Средней Азии ведется со второй половины XIX в. и имеет почти двухсотлетнюю историю. В начальный период огромный вклад в изучение озер привнесли выдающиеся исследователи Средней Азии: П.П. Семенов-Тянь-Шанский, А.П. Федченко, Н.А. Северцев, А.В. Каульбарс, А.А. Тилло, Л.С. Берг.

В 1920-е гг. изучение озер Средней Азии начинает приобретать комплексный характер с проведением гидрологических, гидробиологических и других специальных наблюдений. В этот период огромный вклад в лимнологические исследования внесли ученые А.Л. Бородинский, Н.П. Васильковский, В.Ф. Гурвич, Д.Н. Кашкаров, Н.А. Кайзер, Н.Л. Корженевский, Н.Г. Маллицкий, С.Д. Муравейский, Л.А. Молчанов.

В начале 1940-х гг. лимнологические исследования практически прекратились, и лишь в середине 1960-х гг. вопросы изучения озер становятся первостепенными, начинается послевоенный этап изучения озер. Основные вопросы истории гидрологических исследований этого периода освещены в работах В.Л. Шульца, Ю.Н. Иванова, А.М. Никитина, А.А. Аваряскина, И.А. Ильина, В.Н. Рейзвиха, В.М. Федотовой. Наиболее подробно исследованиями озер в Средней Азии занимались: В.Л. Шульц, описавший исследования озер, относящиеся ко второй половине XIX в.; В.Н. Рейзвих, описавший состояние изучения озер до 1960-х гг.; А.М. Никитин, написавший монографию «Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР» в 1987 г.

В конце XX в. основными направлениями в исследованиях становятся оценка возможности прорыва плотин завальных и моренных озер, оценка водных ресурсов горных озер, получение характеристик их гидрометеорологического режима. Вопросами устойчивости естественных плотин прорывоопасных озер различного генезиса, разработкой математических моделей прорывов и расчетом гидрографов прорывов занимались Ю.Б. Виноградов, Г.Е. Глазырин, В.Н. Рейзвих, Я.С. Стависский, В.И. Шатравин, И.Г. Цукерман, В.А. Керемкулов, Ю.М. Денисов, Г.Н. Горелкин, Д.Д. Нурбаев, Б.К. Царев, Г.Н. Старыгин, В.Н. Шамсутдинов.

В последние десятилетия исследованиями в направлении изучения ледников, ледниковых озер, гляциальных селей и их генезиса на территории Средней Азии занимаются Черноморец С.С., Петров М.А., Савернюк Е.А., Висхаджиева К.С., Ерохин С.А., Семакова Э.П., Тарасов Ю. и др.

Но, несмотря на длительную и богатую историю изучения высокогорных озер Средней Азии, в настоящее время осталось еще много нерешенных вопросов, касающихся распространения, генезиса, прорывоопасности, механизмов прорыва высокогорных озер малых форм. Информационные технологии и методы дистанционного зондирования земли, в последние десятилетия, развиваются стремительно, что способствует появлению новых возможностей для изучения прорывоопасных высокогорных озер. Проведен ряд работ по идентификации и каталогизации высокогорных озер Узбекистана, но на сегодняшний день каталог не издан. Сведения о распространении ледниковых и моренных озер по территории Узбекистана, приведенные в разных источниках последних лет, не совпадают, что, вероятно, обусловлено временным характером существования этих озер и их динамичностью. Практически отсутствует информация по озерам бассейнов трансграничных рек, несущих воду на территорию Узбекистана.

Методика исследования

При определении основных морфометрических характеристик озер, установлении периодов повышенного риска образования селей прорывного генезиса, изучении и оценке зависимости образования прорывных селей от гидрометеорологических факторов, установлении закономерностей распространения озер использовались методы математической статистики – корреляционный и многофакторный анализ, объективный метод выравнивания и нормализации корреляционных связей. В процессе выполнения

работы широко применялись методы картографических исследований, сравнительно-географический, метод географического обобщения и аналогии. Для создания цифровых моделей рельефа и батиграфических компьютерных карт использовался метод построения цифровой модели рельефа с использованием современных компьютерных технологий. Основу исходных данных и картографической информации составляют опубликованные и утвержденные тематические карты, спутниковые снимки, материалы наблюдений, проводимых в Научно-исследовательском гидрометеорологическом институте и Узгидромете.

Для картографирования бассейнов труднодоступных и трансграничных рек, определения и уточнения географических координат прорывоопасных озер, их площадных и линейных морфометрических характеристик в диссертационной работе применялся дистанционный метод с использованием интернет-ресурсов Google Earth, Google Maps, OpenStreetMap. Для идентификации озер проводился сравнительный анализ снимков доступных в OpenStreetMap – спутниковые снимки Bing, MapBox, DigitalGlobe, ASTER, OrbView-3 и интернет-ресурса Google Earth. Было проведено обширное ручное редактирование и разметка, получены интерактивные карты и схемы бассейнов рек Узбекистана и сопредельных территорий, для наглядности карты дополнены всплывающими окнами с основными характеристиками и скриншотами озер, использовано большое количество фотоматериалов.

Результаты анализа пространственного распределения высокогорных озер Узбекистана и трансграничных территорий

Географическое положение озера – широта, долгота и высота над уровнем моря является его важной характеристикой, позволяющей сделать выводы о генетическом типе озера и основных чертах его режима [*Муракаев, 2004*]. Одной из задач, решенной в работе, является определение географического положения высокогорных прорывоопасных озер на территории Узбекистана и на сопредельных территориях, сток с которых осуществляется на территорию Республики.

На территории Республики Узбекистан и сопредельных территориях в ходе исследования выявлено 680 озер, прорыв которых угрожает народному хозяйству Узбекистана [*Dergacheva, 2018*].

На территории Узбекистана высокогорные прорывоопасные озера расположены на территории трех областей – Ташкентской, Сурхандарьинской и Кашкадарьинской. Большое количество озер расположено за пределами Узбекистана, в бассейнах рек, стекающих на территорию Узбекистана. Такие трансграничные бассейны приурочены к областям Узбекистана, на территорию которых они несут воду, и представляют потенциальную угрозу, в случае прорыва высокогорных озер.

На территории Узбекистана и сопредельных государствах выделено 20 речных бассейнов, на которых расположены высокогорные прорывоопасные озера.

На территории Ташкентской области – бассейны рек Коксу, Ахангаран, Пскем, включая бассейн реки Майдантал, расположенный на территории Казахстана, бассейн реки Чаткал, прорывоопасные озера расположены на территории Киргизстана.

Бассейны рек Гавасай, Кассансай, Алабука, Чортоксай и Коксу – прорывоопасные озера расположены на территории Киргизстана, прорыв потенциально опасен для территории Наманганской области.

Бассейны рек Майлису, Ак-Буура, Араван-сай – озера расположены на территории Киргизстана, сток в Андижанскую область.

На территорию Ферганской области несут свои воды с территории Киргизстана четыре реки – Исфайрамсай, Шахимардан, Сох и Исфара. В бассейнах этих рек сосредоточено 251 высокогорное озеро.

Бассейн реки Заравшан – прорывоопасные озера расположены на территории Таджикистана, потенциальная угроза Самаркандской области. Кашкадарьинская область – бассейн реки Кашкадарья. Сурхандарьинская область – прорывоопасные озера

расположены в бассейне реки Сурхандарья на территории Узбекистана и Таджикистана. Карта расположения бассейнов рек и озер приведена на рис. 1.

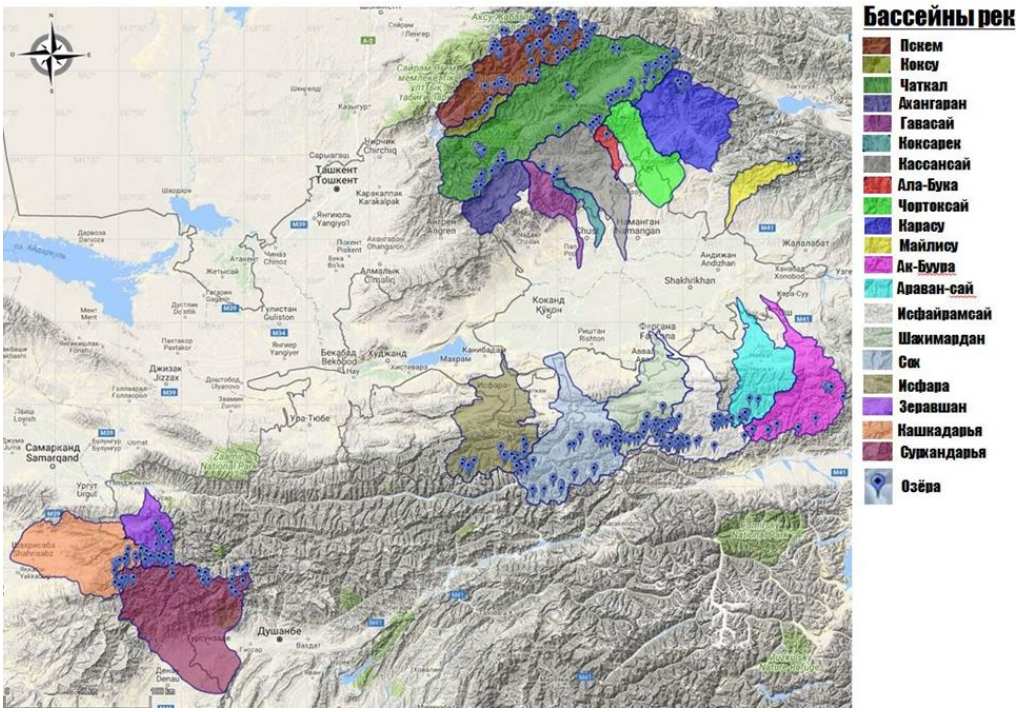


Рис. 1. Карта расположения бассейнов рек, на территории которых находятся прорывоопасные озера

Наибольшее число озер расположено в бассейнах рек: Пскем – 129, Чаткал – 116, Исфайрамсай – 94, Сох – 71. Распределение числа озер по речным бассейнам приведено на рис. 2.

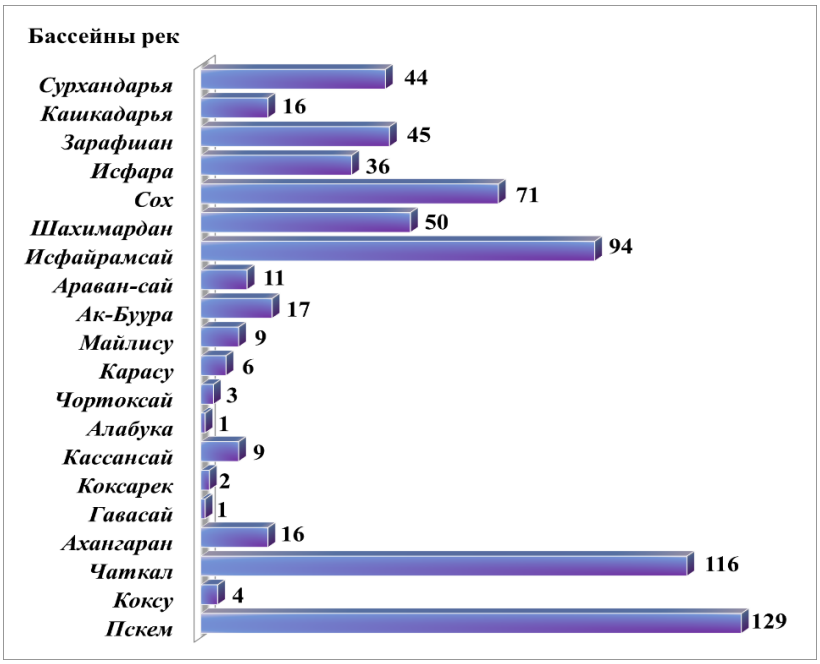


Рис. 2. Распределение высокогорных прорывоопасных озер Узбекистана и сопредельных государств по речным бассейнам

На территории вышеуказанных бассейнов выделены подбассейны рек, весь список которых приводится в базе данных по прорывоопасным озерам. Для примера, в бассейне реки Пскем выделено 24 подбассейна: притоки Ойгаинга – Шавурсай, Тюзашу, Аксаккой, Тастарсай, Акапчигай, Баркраксай, Коксу, Бештор и два безымянных левых притока; притоки Майдантала – Шингиз, Ашутор, Атжайляу, Корумтор, Аютор, три левых и один правый безымянных притока; Ануальгенсай, Ихначсай, Пскемсай, Бадаксай и Урунгач. Карта расположения подбассейнов бассейна реки Пскем приведено на рис. 3.

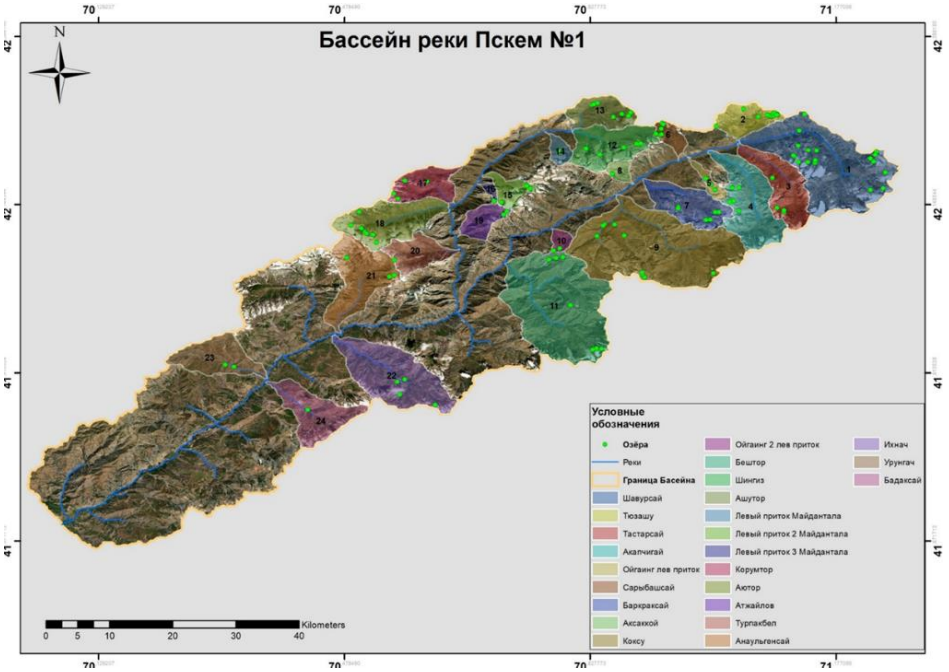


Рис. 3. Карта расположения подбассейнов бассейна реки Пскем

В каждом из бассейнов выделены прорывоопасные озера. Пример карты расположения озер бассейна реки Тюзашу с таблицей основных характеристик озер приводится на рис. 4. В бассейне выделены высокогорные озера, их снимки и номера, также приведены на данном рисунке. Используя, ГИС технологии можно удобно и быстро просмотреть, как именно по территории бассейнов распространены озера. При необходимости можно оперативно вносить изменения по расположению и количеству озер в каждом бассейне, что актуально при мониторинге гляциогенных и моренных озер.

Высокогорные озера являются неотъемлемой частью высокогорного ландшафта. В основном, по описываемой территории, они представлены водоемами малых форм с объемами не более 1 км^3. На долю таких озер приходится 80% от общего числа озер и лишь 13,18% от общего объема озер Распределение суммарных объемов воды в озерах по бассейнам приводится на рис. 5.

Наибольшее сосредоточение озер находится в интервале высот от 3000 до 4000 м. Подобное распределение озер обусловлено тем, что на этих высотах расположены мощные геологические разломы и сбросы, тектонические впадины; наблюдаются отрицательные формы рельефа, связанные с проявлением деятельности современного и древнего оледенения, благоприятные для образования большого числа озерков и очень малых озер [*Никитин, 1986*]. Наибольший суммарный объем озер, находится на высотах от 1500 до 2500 м. Это объясняется тем, что на высотах до 2500 м расположены крупные завальные озера, а в диапазоне высот от 3000 м и выше находится большое число ледниковых и моренных озер, отличающихся малыми и очень малыми формами. В частности, самое крупное озеро исследуемой территории Сарычелек (493 млн м^3) находится на высоте 1859 м.

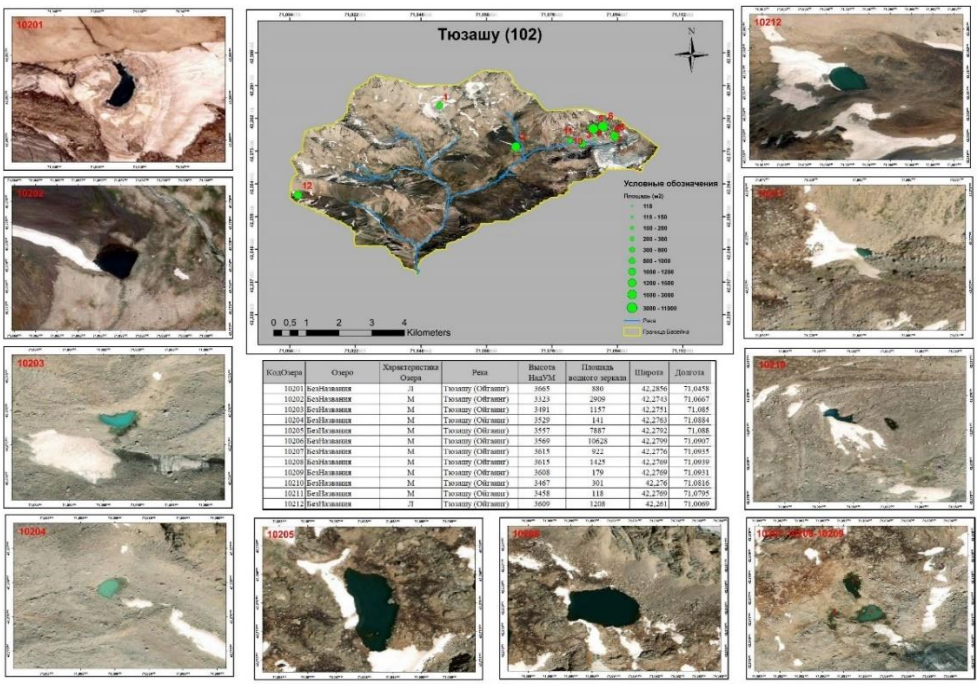


Рис. 4. Карта расположения высокогорных озер в бассейне реки Тюзашу

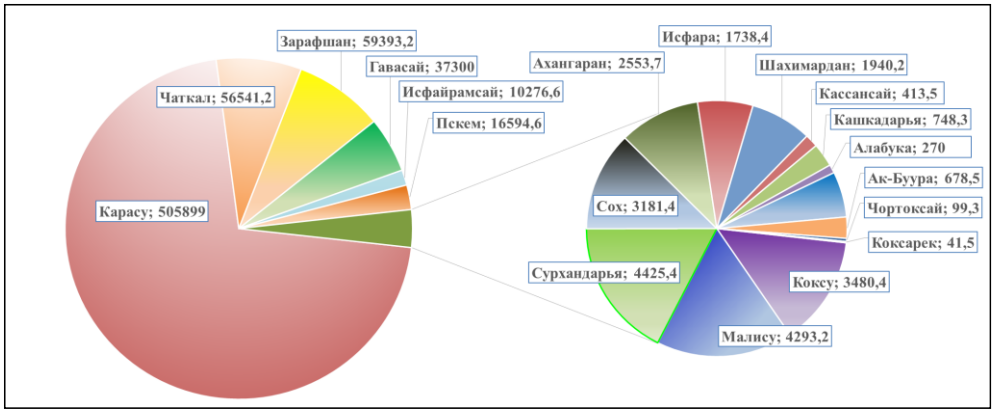


Рис. 5. Распределение суммарных объемов озер (млн м^3) по бассейнам рек

В работе определены морфометрические характеристики озер. Для мониторинга размеров высокогорных озер, расчета и прогноза их гидрологического режима одной из основных характеристик является объем высокогорного озера. Используя данные дистанционного зондирования помимо данных о местоположения озера – географические координаты и высота местности, можно определить только площадные и линейные характеристики озера – площадь зеркала озера, его длину, ширину и периметр. Для определения запасов воды в озере необходимо определить связь между характеристиками озер, которые можно определить по картам и снимкам и их объемами. В ходе исследования была проведена работа по определению эмпирических параметров с целью расчета объемов труднодоступных озер V по площадям озер F, полученных по данным дистанционного зондирования. В базе данных по прорывоопасным высокогорным озерам, собранной за время исследования, большинство озер с известными площадями водной поверхности и объемами – завального типа, так как эти озера хорошо изучены. Данные по ледниковым и моренным озерам крайне ограничены, что затрудняет задачу однородной эмпирической выборки достаточно длинного ряда. Выбрано 28 ледниковых и моренных озер с площадью водного зеркала не более

60 000 м^2. Получена эмпирическая формула для оценки объемов ледниковых и моренных озер:

$$V = 1{,}3571 \times F^{1{,}126}, (R^2 = 0{,}94).$$

Расчет объемов озер был проведен с использованием формулы (1) и формул других авторов [*Huggel, 2003; Кидяева, 2014*], приведенных вместе с результатом расчета на рис. 6.

При сравнении полученных по формулам результатов с данными экспедиционных исследований видно, что для озер площадью менее 5000 м^2, объемы переоценены, для озер более 5000 м^2 – недооценены, что обуславливает необходимость нахождения более тесных связей и поиска новых путей решения данной задачи.

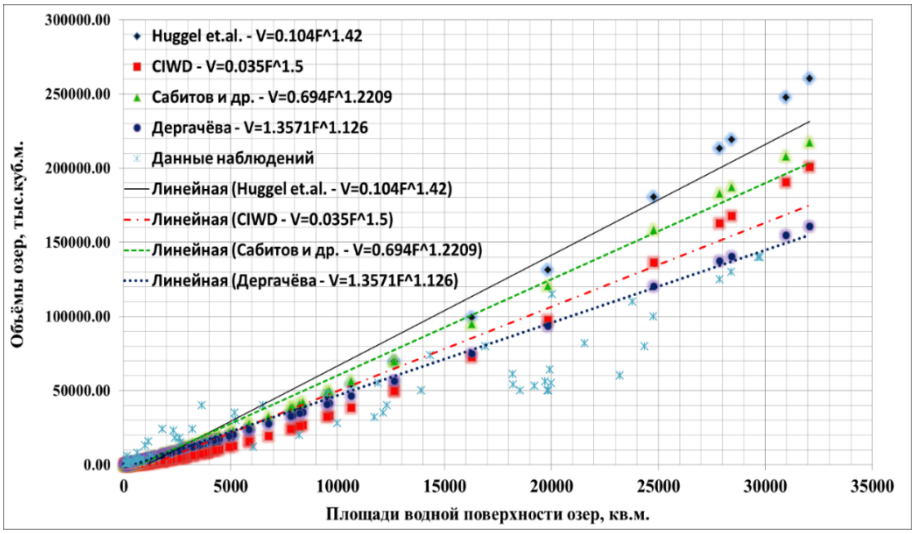


Рис. 6. Сравнение графиков расчета объемов озер по эмпирическим уравнениям разных авторов с данными экспедиционных исследований

В исследовании был проведен анализ внутригодового распределения селей различного генезиса, наибольшее количество селей дождевого генезиса приходиться на май месяц (рис. 7), а прорывные сели наблюдались в июне и июле [*Дергачева, 2023*].

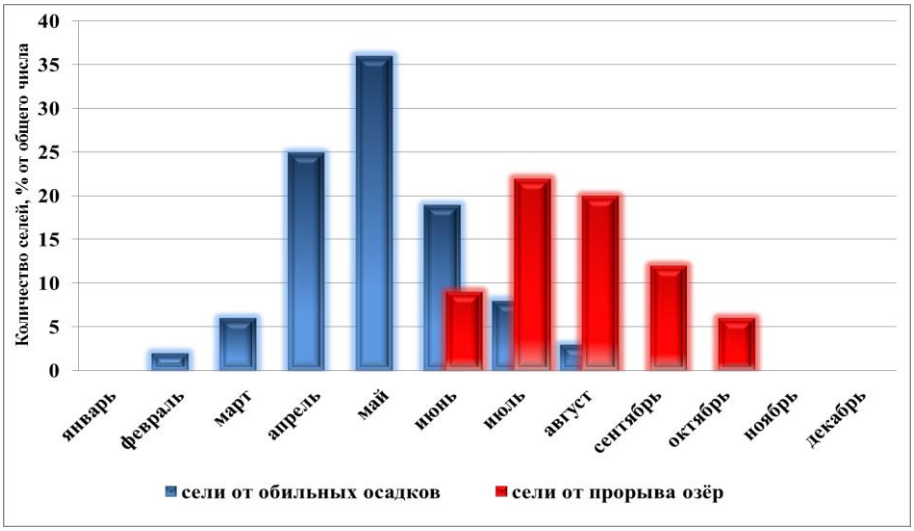


Рис. 7. Внутригодовое распределение селей различного генезиса

Выводы

В силу своего географического положения Узбекистан находиться в уязвимом положении относительно возможных негативных последствий в результате прорывов высокогорных озер. Гляциальные и прорывные сели и паводки чаще всего зарождаются на территории трансграничных государств. Особенно это актуально для густонаселенных территорий Ферганской долины, где почти 90% высокогорных озер находиться на территории Киргизии, а в случае их прорыва, паводковые волны несут разрушения на территорию Узбекистана. Стихийные бедствия не знают административных границ, поэтому к решению проблем связанных, в том числе и с прорывными селями нужен региональный подход. Необходим единый подход как к мониторингу высокогорных озер, так и к созданию единых баз и банков данных, а также к разработке систем раннего предупреждения на региональной основе. При экстремальных условиях – практически все горные озера являются прорывоопасными, поэтому во всех густонаселенных горных долинах, которые в верховьях имеют озера, необходимо принимать меры для уменьшения риска от потенциального воздействия прорывных паводков.

Очень важное значение, для прогнозирования и предупреждения паводковых явлений имеет мониторинг гидрометеорологических явлений, влияющих на возникновение паводков различного генезиса. Мониторинг может обеспечить информационный базис для моделирования процессов, описывающих гидрологическое, геологическое, физико-механическое состояние водного объекта и объектов, влияющих на его состояние, а также моделирования критических состояний и сценариев катастрофического развития событий. Недостатки системы мониторинга в Центральноазиатском регионе – одна из главных причин сдерживающих развитие методов прогнозирования.

В настоящее время остро стоят задачи: сбора и обмена информацией между странами региона; создания единого информационного пространства. Для создания единого информационного пространства в области гидрометеорологии стран Центральноазиатского региона необходимо организовать ведение региональных баз и банков данных. Это значительно повысит эффективность гидрометеорологического обслуживания и обеспечит возможность прогнозирования и предупреждения опасных гидрологических явлений, в целях снижения их негативных последствий.

Список литературы

Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1977, 155 с.

Глазырин Г.Е., Рейзвих В.Н. К расчету гидрографа стока при прорыве завальных озер // Тр. САНИГМИ. – 1968. – Вып. 32(47). – С. 8 – 12.

Дергачева И.В., Тилляходжаева З.Д. Селе-паводковые явление на территории Узбекистана и их влияние на здоровье населения // «Экономика и социум», № 1 (104)-2, 2023 год. С. 225–231.

Dergacheva I. Flash floods caused by the breakthrough of high-mountain lakes on the territory of Uzbekistan // European science review, 2018, P. 75–81

Ерохин С.А. Оценка прорывоопасности горных озер Кыргызстана в 2011 году. Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики. Издание восьмое с изменениями и дополнениями. – Б., Министерство чрезвычайных ситуаций Кыргызской Республики, 2011. – С.604–606.

Кидяева В.М. Оценка потенциальной опасности при прорывах горных озер: автореф. дис. … канд. геогр. наук. М: МГУ, 2014. 29 с.

Муракаев Р.Р., Старыгин Г.Н., Шамсутдинов В.Н. Гляциальные озера в верховьях рек, несущих воду на территорию Узбекистана//Труды САНИГМИ. -2004.-Вып. 167(243).

Мягков С.В. Гипотеза о разрушении тела плотины, состоящей из льда и обломочного материала // Сб. Тр. САНИГМИ. – 2001. – Вып.163(244). – С.169–179.

Никитин А.М. Водные ресурсы и водный баланс озер и водохранилищ Средней Азии / Под ред. Ю.Н. Иванова // Труды САНИИ. – 1986. – Вып. 108 (189). – 96 с.

Черноморец С.С., Висхаджиева К.С., Савернюк Е.А., Петров М.А., Ерохин С.А. и др. Селевые процессы на Алайском и Киргизском хребтах (на примерах бассейнов рек Шахимардан и Аксай) // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Материалы IV Международной конференции Россия, Иркутск Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. –С. 56–59.

Huggel C., Kääb A., Haeberli W., Krummenacher B. Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps // Natural Hazards and Earth System Sci., 2003, No. 3, p. 647–662.

Методика оценки селевой опасности на примере Западного Кавказа, Сочинский район

Е.В. Дзагания, К.Г. Самаркин-Джарский, Л.М. Самаркина-Джарская

ООО «ГК «Инжзащита», Сочи, Россия, krylenka@gmail.com, samarkin@bk.ru, l_samarkina@mail.ru

Аннотация. В статье содержится обзор существующих в России нормативных методик определения селевой опасности для выполнения инженерных изысканий для строительства. Отмечен ряд проблем при выделении категорий (степеней) селевой опасности на примере района Сочи, Западный Кавказ.
Предлагается пошаговая методика определения селевой опасности ландшафтным методом, учитывающим горную поясность и особенности каждого ландшафта по заранее установленному перечню факторов, воздействующих на формирование селевых потоков. Методика универсальна для исследуемого региона, применима для территорий различных размеров, адаптируема для условий других регионов.

Ключевые слова: *селевая активность, оценка селевой опасности, Сочи, селевой поток, селевой очаг, ландшафтный метод*

Ссылка для цитирования: Дзагания Е.В., Самаркин-Джарский К.Г., Самаркина-Джарская Л.М. Методика оценки селевой опасности на примере Западного Кавказа, Сочинский район. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 104–114.

Methodology for assessing debris flow hazard (a case of the Western Caucasus, Sochi region)

E.V. Dzaganiia, K.G. Samarkin-Dzharskii, L.M. Samarkina-Dzharskaia

LLC "GK "Inzhzashchita", Sochi, Russia, krylenka@gmail.com, samarkin@bk.ru, l_samarkina@mail.ru

Abstract. The article contains an overview of the regulatory methods existing in Russia for determining debris flow hazards for performing engineering surveys for construction. A number of problems were noted when identifying categories (degrees) of debris flow hazard using the example of the Sochi region, Western Caucasus.
A step-by-step methodology for determining debris flow hazard using the landscape method is proposed, taking into account the mountainous zonation and features of each landscape according to a pre-established list of factors affecting the formation of debris flows. The methodology is universal for the region under study, applicable to territories of various sizes, and adaptable to the conditions of other regions.

Key words: *debris flow activity, debris flow hazard assessment, Sochi, debris flow, debris flow origination site, landscape method*

Cite this article: Dzaganiia E.V., Samarkin-Dzharskii K.G., Samarkina-Dzharskaia L.M. Methodology for assessing debris flow hazard (a case of the Western Caucasus, Sochi region). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 104–114.

Введение

Территория муниципального образования Сочи находится в гористой местности на юге Краснодарского края Российской Федерации на территории площадью около 3,5 тыс. км^2, во влажном субтропическом поясе. Муниципальное образование город Сочи (далее МО Сочи) протянулось полосой протяженностью более 100 км и шириной 40–80 км вдоль побережья Черного моря.

Рельеф отличается значительным разнообразием. Вдоль побережья Черного моря находятся сравнительно узкие приморские террасы шириной до 2,5 км. Далее, вглубь суши рельеф меняется от холмистых низкогорий до высокогорий альпийского типа с высотой до 3280 м н.у.м. (гора Агепста) Главного Кавказского хребта. Селитебные территории, в основном, находятся в пределах до 10 км от береговой линии. Отдельные населенные пункты удалены от побережья на 30–40 км (поселок Красная Поляна, село Марьино, село Солох-Аул).

Актуальность проблем выявления, мониторинга, оценки, анализа, прогноза и предупреждения селевой опасности для города Сочи возрастает с каждым годом. Стремительно растет население. Численность постоянных жителей увеличилась примерно в 5 раз за 20 лет. Количество туристов может в разы превышать население муниципального образования. Расширяются горнолыжные курорты, проектируются и строятся дороги. Хозяйственное и рекреационное освоение территорий происходит от морского побережья и долин горных рек в нижнем течении до горных массивов высотой более 1800–2000 м н.у.м. (хребты Аибга, Ачишхо, Аишхо, Псехако, Псеашхо, Фиштинский массив).

Опасные селевые процессы формируется под влиянием комплекса факторов, основными из которых являются возможность увлажнения крупнообломочных грунтов, скапливающихся в значительном количестве на крутых склонах и в руслах рек. Кроме того, существенную роль играет хозяйственная деятельность человека (подрезки склонов, вырубка лесов, распашка склонов, создание запруд и т.п.), изменения климатических факторов, растительного и почвенного покрова и других.

Так как каждый ландшафт обладает уникальным комплексом свойств, в разрабатываемой методике предлагается использовать этот комплексный элемент для выявления категории опасности ландшафта.

В данной работе предлагается методика комплексного определения селевой опасности территорий с целью объективной и максимально достоверной оценки.

Краткий обзор проблемы

В настоящее время в Российской Федерации (далее РФ) изыскания для строительства в районах развития селевых процессов регламентируются действующим нормативным документом (далее НД) [*СП 479.1325800.2019, 2020*]. НД разработан для территории РФ. В нем приведены генетическая классификация селевых потоков, факторы формирования, соответствующие классу селя, основные причины и механизмы зарождения селей, виды селевых потоков по соотношению твердой и жидкой составляющих селевой смеси и их характерные признаки.

Согласно картографической части НД, для оценки степени селевой опасности на «Схеме зонирования селевых явлений на территории Российской Федерации» [*СП 479.1325800.2019, 2020*], используются следующие градации категорий селевой опасности: «высокая», «средняя», «слабая», «потенциальная». Также на карте выделены участки формирования вулканогенных селей.

Районирование включает селевые зоны: теплую и холодную, которые подразделяются на 6 селевых регионов и 15 селевых областей.

Согласно этому делению, изучаемый Сочинский район находится в области Черноморского побережья Кавказа Европейского региона теплой зоны. Степень селевой опасности области Черноморского побережья Кавказа оценивается как слабая, с селеопасным периодом 12 месяцев (т. е. в течение всего года).

В тексте этого же НД приведена Таблица А.1 «Перечень субъектов Российской Федерации, на территории которых распространены селевые процессы, и категории селевой опасности». В Таблице А.1 категории селевой опасности, максимально возможные для отдельной территории, отличаются от «Схемы зонирования…» и определены следующим образом: «весьма опасная», «опасная», «умеренно опасная». Краснодарский край (где находится Черноморское побережье Кавказа и город Сочи) в Таблице А.1 отнесен к категории «опасная».

Таким образом, в НД [*СП 479.1325800.2019, 2020*] выделяются как степени селевой опасности: высокая, средняя, слабая, потенциальная и участки формирования вулканогенных селей, так и категории максимальной селевой опасности: весьма опасная, опасная, умеренно опасная. Чем именно отличаются градации степеней и категорий селевой опасности, в НД не указано. Можно предположить соответствие степеней категориям: «высокая» – «весьма опасная», «средняя» – «опасная», «слабая» – «умеренно опасная». В таком случае, в НД имеется неопределенность при классификации селевой опасности по одному и тому же району, не приведены какие-либо количественные параметры соответствия степеней и категорий процессов. Например, в Краснодарском крае в Сочи, в области Черноморского побережья Кавказа на «Схеме…» степень селевой опасности определена как «слабая». В этом же НД категория максимальной селевой опасности для всего Краснодарского края «опасная», при этом большая часть территории края – это равнины. Кроме того, в силу масштабности районирования территории РФ, детальная оценка крупных и неоднородных по климату, рельефу, геологическим условиям территорий, таких, как Черноморское побережье Кавказа, отсутствует.

Для определения характеристик селевых потоков разных генетических типов в расчетном створе НД [*СП 479.1325800.2019, 2020*] дает ссылки на ранее принятые методики и руководящие документы, в том числе [*ВСН 03-76, 1976*]. В *ВСН 03-76* приведены количественные параметры семи селевых категорий (таблица 1) от наиболее опасной (категория 1) до минимальной (категория 7).

В примечании дано указание оценивать значение удельного коэффициента селеактивности по высшему значению для своей категории для пунктов 1, 2, 3. Для селевых очагов, где имеют распространение глинистые и аспидные сланцы нижней юры, мергели, аргиллиты, песчаники карбонатно-терригенного флиша верхней юры, мела, палеогена, слабосцементированные конгломераты, суглинки, глины, лессовидные породы, галечники неогена и четвертичного периода.

В таблице 1 заключена неопределенность в выборе значения коэффициента селевой активности из достаточно широких диапазонов.

Еще одним НД, где оценивается селевая опасность территории РФ, является *«Геофизика опасных природных воздействий»* [*СП 115.13330.2016, 2016*]. В Таблице 5.1. НД приводятся ***степени опасных процессов***, при этом категории «низкая» и «потенциальная» – отсутствуют. Фрагмент, касающийся Черноморского побережья Кавказа, приведен в таблице 1.

Таблица 1. Категории опасности природных воздействий (сели), фрагмент Таблицы 5.1 из [*СП 115.13330.2016, 2016*]

Показатели, используемые при оценке категории опасности природного процесса (ОПП)	Категории опасности процессов			
	чрезвычайно опасные (катастрофические)	весьма опасные	опасные	умеренно опасные
Площадная пораженность территории, %	-	Более 50	10–50	Менее 10
Объем единовременного выноса, млн м	-	Более 0,5	0,05–0,5	Менее 0,05
Скорость движения, м/с	2–15			
Повторяемость, ед./год	-	Менее 0,01	0,1–0,01	Более 0,1

Районирование селевой опасности территории РФ в этом же НД представлено в приложении Б на «Карте распространения селевых явлений на территории Российской Федерации».

На «Карте…» выделено ***5 категорий районов***: с высокой, средней, низкой степенями селевой активности, а также потенциальной селевой опасности и категория неселеопасных территорий. Согласно этой карте, район города Сочи находится преимущественно в районе с низкой степенью селевой активности. Южной части территории (бассейны рек Мзымта и Псоу), присвоена средняя степень селевой опасности.

Таким образом, в тексте НД документа [*СП 115.13330.2016, 2016*] дана характеристика категорий на основании площади пораженности территории (%), объема единовременного выноса, повторяемости (ед./год), но неясна связь табличных значений со степенями селевой опасности на карте районирования.

Еще одним источником сведений о селевой опасности района Красная Поляна МО Сочи является [*Кадастр селевой опасности Юга Европейской части России, 2015*]. В нем селеопасность территории оценивается категориями: по количественному параметру – объему максимального единовременного выноса грунта (W, тыс. м³): слабая (W = 1–10000); средняя (W = 10001–100000); сильная (W = 10001–100000). Также сели в «Кадастре…» различаются по соотношению твердой и жидкой составляющих селевой смеси и генезису. Районирование производится по бассейновому принципу: степень селеопасности принимается для всего бассейна водотока.

На территории Красная Поляна (бассейн реки Мзымта) выделены бассейны с селеопасностью: сильной, средней, слабой и с отсутствием данных (вероятно, потенциально селеопасные) с указанием водного генезиса: ледниково-дождевые, дождевые, снежно-дождевые.

Еще один источник: «Паспорт гидрометеорологической безопасности Краснодарского края» [*ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2017*]. Район Сочи выделен как Сочи-Краснополянский район типичных грязекаменных селей (высокая и катастрофическая опасность). Указывается, что район распространения грязекаменных селей с крупнообломочным материалом, поступающим преимущественно из оползневых очагов, отмечается в бассейнах рек Шахе, Сочи (высокая опасность), Мзымта (катастрофическая опасность), и Псоу. В высокогорной области сели формируются на склонах хребтов Хуко, Чура, Амуко, Иегош, Ачишхо, Аибга и др. в верховьях рек Аше, Псезуапсе, Шахе, Сочи, Мзымта и Псоу, а также их притоков (причем с катастрофической степенью опасности) – рек Бзыч, Ачипсе, Бешенка, Кепша, Чвежипсе и др.

Проблемы при определении селевой опасности:

1. В прикладных нормативных документах для проведения инженерных изысканий, справочных материалах выявлены разночтения в классификации и определении селевой опасности и селеактивности даже в рамках одного документа, например: [*СП 479.1325800.2019, 2020; СП115.13330.2016, 2016*]. Существует необходимость устранения неопределенности и разночтений при оценке селевой опасности.
2. В НД [*ВСН 03-76, 1976*] категории селевой опасности соответствуют диапазонам количественных значений коэффициента селеактивности, который необходимо учитывать в расчетах параметров селевых потоков. Диапазон значений коэффициента селеактивности для каждой категории весьма широк, что создает неоднозначность выбора значения для расчетов параметров дождевых паводков.
3. Коэффициент селеактивности применяется в расчетах характеристик дождевых селей. От точности определения параметра селевой активности зависит точность расчетов и прогноза возможных селевых воздействий на сооружения и окружающую среду. Существует необходимость совершенствования методики определения селевой активности для обеспечения сопоставимости результатов оценки комплексной селевой опасности.

4. Бассейн даже небольшого водотока может включать несколько зон с различными категориями селеактивности. Для более крупных бассейнов, включающих реки с притоками, оценка селеактивности еще больше усложняется. Требуется совершенствование методики определения опасности комплексного процесса. Методика должна быть достаточно универсальной, применимой для территорий различных размеров, т. е. масштабируемой в зависимости от задач и размеров территории исследований, адаптируемой к условиям других регионов.

Ландшафтный метод оценки селевой опасности

Учет условий формирования селевых потоков

Понятие ландшафта обозначает относительно однородный участок географической оболочки, ограниченный естественными или хозяйственными рубежами, единый в орографическом, тектоническом и климатическом отношениях, обладающий закономерным сочетанием функционально взаимосвязанных компонентов и пространственных элементов естественного и антропогенного происхождения.

Среди общих для всего района Сочи природных факторов следует отметить высокую сейсмическую опасность. На территории возможны 9-балльные землетрясения. Сейсмические явления могут активизировать сход оползней, обвально-осыпные явления, разрушения ледников, сход лавин, создавая запрудные и прорывные явления. Кроме того, землетрясения могут разрушить существующие гидротехнические сооружения и сооружения инженерной защиты на реках, привести к разрушению дамб на озерах и искусственных запрудах. Вулканические явления в районе Сочи не активны.

Для района характерна высокая оползневая опасность, обусловленная тем, что поверхность горных склонов сложена преимущественно непрочными грунтами: глинистые сланцы, мергели, аргиллиты, песчаники. На склонах образуются скопления рыхлого обломочного материала, которые являются потенциальными селевыми очагами.

Территория сильно расчленена, имеет густую гидрографическую сеть, водотоки имеют крутые уклоны, что способствует быстрому наполнению русел и подъему уровней воды в реках. Кроме того, весь район отличается повышенной влажностью, частыми дождевыми паводками на реках, возможными в течение всего года.

Большую часть территории пока еще составляют покрытые лесом горные склоны. По всей протяженности района весь приморский склон Черного моря подвержен техногенному воздействию – по нему пролегают железные и автомобильные дороги, пересекая все устьевые участки рек, впадающих в Черное море.

Высотная зональность рассматриваемого района способствует тому, что в пределах одного бассейна могут одновременно формироваться селевые потоки различного генезиса, на формирование которых оказывают гидрологические, метеорологические, орографические, геологические, гидрогеологические, фитоценотические факторы.

Отличительные черты обусловлены горной поясностью и различием степени антропогенного вмешательства и ландшафтов [*Дзагания, 2020*].

Требования к методике оценки мультиопасных процессов и явлений

1. Требования к методике оценки селевой опасности (безопасности) территорий можно сформулировать следующим образом:
2. Методика должна быть максимально простой для использования на практике.
3. Методика должна быть универсальной для исследуемого региона и адаптируемой для других условий.

4. Методика должна учитывать наиболее неблагоприятные исторические события, исключающие возможность заселения наиболее опасных территорий (например, Кармадонского ущелья после двух трагедий с разницей в 100 лет).

5. Методика должна максимально учитывать формирующие сели факторы и отражать природные и антропогенные (климатические, гидрологические, геоморфологические, орографические, геологические, гидрометеорологические, растительные, почвенные, техногенные) особенности каждой территории.

6. Категориям селевой опасности должны соответствовать количественные значения (диапазоны значений), которые затем могут быть приведены к коэффициенту селевой активности, используемому в нормативной методике по определению характеристик дождевых селей [*ВСН 03-76, 1976*].

7. Классификация должна содержать оценку антропогенного воздействия, как усиливающего, так и понижающего категорию селевой опасности.

Порядок определения селевой опасности ландшафтным методом

Для определения категории селевой опасности в условиях высотной поясности предлагается использовать универсальный ландшафтный метод, который заключается в реализации шагов согласно приведенному ниже алгоритму.

1. Составляется перечень факторов, характеризующих исследуемую территорию и влияющих на образование селевых потоков. Примерный перечень составлен авторами и приведен в таблице 2. Факторы оцениваются на основании экспертных оценок, нормативных документов, справочников.

Таблица 2. Перечень факторов для определения категории селевой опасности

№	Основные факторы	Факторы формирования селей	Характеристика по степени влияния
I	**Природные**		
1	***Климатические***		
1.1	Атмосферные осадки	интенсивность осадков	максимальное суточное количество осадков
		увлажненность	количество дождевых осадков за год
1.2	Температура	таяние ледников, снежников	активность таяния, объем таяния
1.3	Опасные метеорологические процессы	смерч	наличие опасности
2	***Гидрологические***		
2.1	Паводковый режим	условия формирования паводков	расход воды и скорость подъема уровня, параметры водосборного бассейна
2.2		возможность одновременного половодья и паводка	оценка возможности
2.3	Устойчивость берегов	возможность образования завалов	наличие резких перегибов русла, узостей, завалов, устойчивость берегов
		устойчивость и строение берегов	
2.4	Русловые процессы	признаки селевых процессов в русле	наличие характерных признаков селевых процессов, наличие карчехода
		скопления рыхлого материала в русле, карчеход	
2.5	Наводнения	исторические наводнения, селевые потоки	сведения о событиях, оценка последствий
2.6	Лимнологические	озерность	степень опасности прорывных явлений
		наличие крупных водоемов	

№	Основные факторы	Факторы формирования селей	Характеристика по степени влияния
3	***Геоморфологические***		
3.1	Рельеф	тип рельефа	наличие условий селеопасности
		пересеченность, наличие глубоких эрозионных врезов	
3.2	Крутизна склонов	уклоны	условия селеопасности
4	***Геологические***		
4.1	Эндогенные	вулканические	отсутствуют для района исследований
		сейсмические	сейсмичность
4.2.1	Гравитационные	обвалы, осыпи	наличие, распространение
4.2.2		оползни	наличие, распространение
4.2.3		лавины	степень опасности
4.3	Геологическое строение	источники рыхлообломочного материала	наличие селевых очагов
4.4	Гидрогеологические	подтопление	условия переувлажнения
		подземные воды	
5	***Биоценотические***		
5.1	Почвенные	почвенный покров	задернованность, нарушенность
5.2	Растительные	растительный покров	сообщества, нарушенность
5.3		Залесенность	распространение леса
II	**Антропогенные**		
6.1	Техногенные	карьеры, отвалы	оценка воздействия
		утечки жидкостей из коммуникаций на склоны	
		хранилища жидких отходов	
		подрезка склонов	
		сброс концентрированного стока	
6.2	Гидротехнические	искусственное сужение и искривление русла	наличие негативного влияния
		недостаточные сечения мостовых переходов	
		нарушение устойчивости русла	
		берегозащитные и противоселевые сооружения	
		дамбы, плотины, водохранилища	
6.3	Экологические	деградация биоценозов из-за техногенного воздействия, болезней и вредителей	оценка распространения и воздействия
		распашка склонов, повреждение почвенного покрова	
		восстановительные агромелиоративные мероприятия	
6.4.	Управленческие	размещение зданий и сооружений на селеопасных территориях	оценка воздействия
		соответствие застройки и инженерной защиты территории	

2. Значения факторов в различных единицах измерения или качественные оценки каждого фактора по психофизической шкале «желательности безопасности» преобразуются в количественные сравнимые безразмерные частные показатели d_i, значения которых лежат на кривой «функции желательности Харрингтона» и изменяются от 0 до 1 [*Адлер, 1976*] (таблица 3). Наиболее неблагоприятный недопустимый вариант частного показателя селевой опасности d_i приравнивается к значению «0». Значение $d_i = 1$ соответствует наиболее желаемой величине i-го

параметра. Значения $d_i \geq 0,37$ обычно используют в качестве диапазона допустимых значений.

Таблица 3. Дискретная шкала функции «желательности» (степени безопасности)

Характеристика опасности (степени влияния фактора)	Частный показатель d_{ui}, д.ед.
Не воздействует, опасность отсутствует	$d_{ui} = 1,0$
Потенциальная	$0,81 \leq d_{ui} < 0,99$
Низкая	$0,64 \leq d_{ui} < 0,81$
Средняя	$0,51 \leq d_{ui} < 0,63$
Высокая	$0,38 \leq d_{ui} < 0,50$
Чрезвычайная	$0,01 \leq d_{ui} < 0,37$
Катастрофическая	0

3. Выделяются ландшафты, как правило, соответствующие определенным высотным поясам. Производится средневзвешенная оценка селевой опасности бассейна, включающего более одного ландшафта по относительным площадям каждого ландшафта в составе бассейна. Если водосборный бассейн находится в пределах одного ландшафта, полученный обобщенный показатель идентичен селевой опасности ландшафта, в котором он находится. Для каждого ландшафта рассчитывается обобщенный показатель селевой опасности по перечню факторов (таблица 2) и соответствующих градаций частных показателей (таблица 3) по формуле среднего геометрического:

$$D_U = \left[\prod(d_{UJ})\right]^{1/N_U} = (d_{U1} \cdot d_{U2} \cdot d_{U3} \ \ldots \cdot d_{Nu})^{1/Nu} \quad (1)$$

где D_u – обобщенный показатель селевой опасности ландшафта; d_u – частные показатели u-го фактора, Nu – количество частных показателей.

Авторами выполнена оценка обобщенных показателей селевой опасности высотно-зональных ландшафтов Сочинского района Западного Кавказа (таблица 4)

Таблица 4. Оценка обобщенных показателей селевой опасности высотно-зональных ландшафтов Сочинского района Западного Кавказа

Высоты, м	Ландшафт	Характеристика	Обобщенный показатель селевой опасности
2400–3500	Гляциально-нивальный пояс	Высокогорный рельеф. Растительность отсутствует, весь год имеются ледники и снежники. Истоки водотоков	0,55
2000–2400	Субнивальный пояс	Высокогорный рельеф. Растительность представлена мхами и лишайниками с единичными экземплярами сосудистых растений. Истоки водотоков	0,50
1800–2000	Альпийские луга	Климат суровый, с длинным периодом существования снежного покрова, который фрагментарно сохраняется до конца августа. Истоки и верхнее течение водотоков	0,64
1600–1800	Субальпийские криволесья и кустарники. Речные долины верхнего пояса	Крутые, часто скалистые склоны, троговые долины, днища и склоны цирков, «бараньи лбы», морены, долгоснежные участки. Растительность представлена субальпийским криволесьем, вечнозелеными кустарниками, субальпийскими лугами. Каменистые русла водопадного типа	0,65

Высоты, м	Ландшафт	Характеристика	Обобщенный показатель селевой опасности
1100–1600	Среднегорно-лесные ландшафты, речные долины среднего пояса	Среднегорный рельеф с крутой и средней крутизны склонами, большее увлажнение в связи с более низкими летними температурами. В этих условиях преобладают буково-пихтовые леса	0,76
350–1100	Нижнегорно-лесные ландшафты, долины крупных рек	Склоны средней крутизны с глубокими речными ущельями и труднопроходимыми каньонами. В условиях умеренно континентального климата формируются каштановые и смешанные широколиственные леса с хорошо выраженным подлеском из листопадных кустарников и папоротников.	0,79
50–350	Нижний предгорный ландшафт	Склоны средней крутизны, пересеченный рельеф. Сосновые леса, дубовые и смешанные широколиственные леса (колхидские) с подлеском из вечнозеленых кустарников и лиан. Разреженные сообщества пойм с галечниковыми и песчаными островами. Заросли кустарников в широких долинах с фрагментами лугов и древесно-кустарниковой растительности	0,83
0–50	Приморские склоны	Уклоны различные, от равнинных террас до обрывистых склонов. Фрагменты болот и заболоченных лугов колхидского типа, окаймлены песчано-галечными пляжами	0,82
0–3500	Интразональный пояс	Впадины, ложбины стока, долины временных и постоянных водотоков	0,37
0–1100	Нарушенные и антропогенно измененные ландшафты без застройки	Поврежденная растительность и почвенный покров	0,73
5–1100	Сельский	Низкоплотная жилая застройка, фермы, пасеки с преобладанием незастроенных участков с садами, чайными плантациями, лесным хозяйством, пастбищами	0,78
0–600	Городской	Плотно застроенная городская территория, степень озеленения низкая	0,72
0–1800	Рекреационный в лесной зоне	Гостиницы, лыжные трассы, канатные дороги, горные подъездные дороги и тропы, инфраструктура, фрагменты лесов с вырубками	0,71
1801–3000	Рекреационный в альпийской зоне		0,49
0–2000	Производственный	Карьеры, отвалы, свалки, хранилища жидких отходов, линейные объекты, дороги	0,54

4. Комплексная категория селевой опасности территории из бассейна или нескольких бассейнов производится с учетом площади каждого ландшафта в границах исследуемой территории:

$$K = \left(C_1 \cdot D_{U1} + C_2 \cdot D_{U2} + \ldots + C_n \cdot D_{Un}\right) \Big/ \sum_1^n C_i \qquad (2)$$

где K – комплексный суммарный показатель селевой опасности в границах изучаемой территории; C_1 – площадь отдельного бассейна территории, D_{Un} – обобщенный показатель селевой опасности.

Анализ

Категория селевой опасности может быть определена по ряду критериев с помощью балльной системы частных показателей, основанных на анализе объективной информации из научной, нормативной и справочной литературы и сведений об аварийных ситуациях.

Обобщенный показатель категории селевой опасности определяется для каждого ландшафта, как устоявшегося природного комплекса. Этот параметр приводится к коэффициенту селевой активности как разность единицы и показателя селевой опасности.

Для бассейна реки Мзымта (самая крупная река на Черноморском побережье Краснодарского края, охватывающая все ландшафты, площадь водосборного бассейна 885 км²) авторами получена комплексная категория селевой опасности $K = 0{,}72$ (низкая).

Для бассейна селеопасного водотока река Сулимовская, левого притока реки Мзымта с площадью водосборного бассейна 7 км² селевая опасность оценивается показателем $K = 0{,}45$ (высокая), что обусловлено тем, что значительную часть бассейна занимает селеопасный интразональный ландшафтный пояс (глубоко врезанное ущелье водотока). Высокая селевая опасность прогнозируется в верховьях рек в условиях нивального и субнивального ландшафтов, а также в бассейнах, большую часть которых занимает интразональный русловой пояс.

Выводы

Предлагаемый ландшафтный метод простой, универсальный, применимый для территорий различных размеров. Он позволяет дать объективную комплексную оценку селевой опасности, основываясь на знаниях о ландшафтах исследуемого региона, включающих климатические, гидрологические, геоморфологические, орографические, геологические, гидрометеорологические, растительные, почвенные, техногенные и антропогенные условия территории. В значительной степени качество оценки зависит от исходного перечня частных показателей (факторов) и адекватности их оценки. Точность определения селевой опасности выше для малых бассейнов.

Для совершенствования методики желательно ее апробировать для различных селеопасных регионов и подобрать наиболее весомые факторы (частные показатели), учитывающие сведения об уже имевших селевых событиях. Полученные количественные оценки селевой опасности могут быть использованы при принятии управленческих решений и уточнения показателя селевой активности при расчетах параметров селей.

Благодарности

Авторы благодарят руководство компании ООО «ГК «Инжзащита» за содействие и предоставленную возможность выполнения исследований.

Список литературы

Адлер Ю.А., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1976. — 280 с.

Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций Российской Федерации / Под общ. ред. С.К. Шойгу. М.: Дизайн. Информация. Картография, 2010. 696 с. EDN: VHKUHT.

ВСН 03-76 Инструкция по определению расчетных характеристик дождевых селей / Ред. А.И. Чеботарев, И.И. Херхеулидзе, Б.И. Серпик: Л.: Гидрометеоиздат, 1976.

Дзагания Л.М. Применение лесомелиорации для селезащиты на Черноморском побережье Западного Кавказа // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита Труды 6-й Международной конференции, Душанбе–Хорог, Таджикистан, 20–26 сентября 2021 года / Отв. редакторы С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. Том 1. – Душанбе–Хорог, Таджикистан: Общество с ограниченной ответственностью «Промоушн», 2020. – С. 405–417. – EDN JKEEUX.

Кадастр селевой опасности Юга Европейской части России / ВГИ, отв. ред. Кондратьева Н.В. М.: ООО «Феория», 2015.

Паспорт гидрометеорологической безопасности Краснодарского края, ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», Обнинск, 2017. 117 с.

СП 479.1325800.2019 Инженерные изыскания для строительства в районах развития селевых процессов / ООО "ИГИИС" рук. М.И. Богданов, С.А. Гурова, исполнители – Г.Р. Болгова, Г.В. Мисник, М.Н. Цымбал, И.Л. Кривенцова; МГУ им. М.В. Ломоносова, отв. С.А. Сократов, исполнители: В.Ф. Перов, С.С. Черноморец, А.Л. Шныпарков, Е.А. Савернюк, П.Б. Гребенников. – М.: Стандартинформ, 2020.

СП 115.13330.2016 Геофизика опасных природных воздействий / ООО "ИГИИС", авт. коллектив М.И. Богданов – руководитель темы, Г.Р. Болгова, С.А. Гурова, Н.П. Иевлева, И.Д. Колесников, Н.Г. Корнева, Е.В. Леденева, канд. геол.-минерал. наук М.С. Наумов. М.: Стандартинформ, 2018.

Infrastructure safety in Russian mountains: From debris flow assessment to technical mitigation

E. Garova[1], S. Fuchs[2], B. Chadromtsev[1], A. Pedanov[3], P. Grebennikov[3], I. Iltuganov[1], P. Lobanov[1], P. Ponomarjovs[1]

[1]LLC PK TRUMER, Moscow, Russia, e.garova@trumer.su

[2]BOKU University, Vienna, Austria, sven.fuchs@boku.ac.at

[3]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. Debris flows pose significant natural hazards globally, causing widespread destruction and loss of life. Despite annual efforts to mitigate their impacts, regions such as the Russia's Far East and Southern European regions are continuously impacted by debris flow events. These hazards not only threaten mountain settlements but also endanger linear infrastructures like power lines and roads, leading to severe disruptions and emergencies.

To address these challenges and to mitigate underlying hazards, quantitative risk information is crucial. However, in many mountainous regions, essential data is either lacking or inaccessible. In response, this study proposes a comprehensive approach that integrates traditional engineering field methods with modern modelling and remote sensing techniques. By combining ground-truth data with numerical simulations and satellite imagery, we aim to develop reproducible workflows for reliable and cost-efficient debris flow mitigation.

Traditional methods such as topographical surveys and geomorphological mapping provide foundational insights into hazard dynamics, albeit with limitations in remote areas. Meanwhile, remote sensing technologies, including UAVs, enable high-resolution data acquisition, facilitating detailed terrain analysis and hazard monitoring. By integrating these methodologies, we develop comprehensive hazard maps and risk management strategies tailored to the specific needs of linear infrastructure such as railway lines. This holistic approach not only enhances the accuracy of hazard assessments but also improves the efficiency of mitigation measures, ultimately reducing the socio-economic impacts of debris flow events and enhancing community resilience to natural disasters.

Key words: *debris flow, technical mitigation, remote sensing, hazard maps*

Cite this article: Garova E., Fuchs S., Chadromtsev B., Pedanov A., Grebennikov P., Iltuganov I., Lobanov P., Ponomarjovs P. Infrastructure safety in Russian mountains: From debris flow assessment to technical mitigation. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 115–124.

Безопасность инфраструктуры в горах России – от оценки селевой опасности до защиты от селей

Е. Гарова[1], С. Фукс[2], Б. Чадромцев[1], А. Педанов[3], П. Гребенников[3], И. Ильтуганов[1], П. Лобанов[1], П. Пономарев[1]

[1]«ПК Трумер», Москва, Россия, e.garova@trumer.su

[2]Институт инженерии горных рисков, Университет природных ресурсов и наук о жизни, Вена, Австрия, sven.fuchs@boku.ac.at

[3]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. Селевые потоки представляют собой серьезную стихийную опасность во всем мире, вызывая масштабные разрушения и гибель людей. Несмотря на

ежегодные усилия по их сокращению, такие регионы, как Дальний Восток России и Южная Европа, постоянно подвергаются воздействию селей. Эти опасные процессы угрожают не только горным поселениям, но и линейной инфраструктуре, например ЛЭП и дорогам, что приводит к серьезным разрушениям и чрезвычайным ситуациям.

Для решения этих проблем и смягчения последствий решающее значение имеет количественная информация о рисках. Однако во многих горных регионах необходимые данные либо отсутствуют, либо недоступны. Это исследование предлагает комплексный подход, который объединяет традиционные инженерные полевые методы с современными методами моделирования и дистанционного зондирования. Объединив наземные данные с численным моделированием и спутниковыми снимками, мы разрабатываем воспроизводимые процессы для надежной и экономически эффективной защиты от селей.

Традиционные методы, такие как топографические исследования и геоморфологическое картографирование, дают фундаментальное, хотя и ограниченное представление о селевых процессах для отдаленных районов. Между тем, технологии дистанционного зондирования (в том числе БПЛА) позволяют собирать данные с высоким разрешением и облегчают детальный анализ местности и мониторинг опасностей. Интегрируя эти методологии, мы разрабатываем комплексные карты опасностей и стратегии управления рисками, адаптированные к потребностям линейной инфраструктуры, такой как железнодорожные пути. Комплексный подход не только повышает точность оценки опасных процессов, но и увеличивает эффективность мер по защите от селей, в конечном итоге снижая социально-экономические последствия их схода и повышая устойчивость населения к стихийным бедствиям.

Ключевые слова: *селевой поток, меры защиты, дистанционное зондирование, карты опасности*

Ссылка для цитирования: Гарова Е., Фукс С., Чадромцев Б., Педанов А., Гребенников П., Ильтуганов И., Лобанов П., Пономарев П. Безопасность инфраструктуры в горах России – от оценки селевой опасности до защиты от селей. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 115–124.

Introduction

Debris flows are natural hazards that lead to destruction and loss of life all across the world. Situated amongst landslides, rockfall, and floods [*Rickenmann, 2002*], debris flows are mixtures of water and sediment, ranging from clay-sized particles to boulders of several meters in diameter. The destructive nature of debris flows is mainly due to potentially high values of density, velocity, and discharge. Front velocities exceeding 20 m/s have been observed [*e.g., Costa, 1982*], and peak discharges one or two orders of magnitude larger than normal floods in the same catchment have been estimated. About 10% of the territory of Russia is prone to debris flow hazards [*Perov et al., 2017*]. Despite the efforts taken annually to reduce their adverse effects, they continue to cause damage, with the territories of the Far Eastern region and the south of European Russia suffering the most [*Gavrilova et al., 2011*]. Debris flow processes are not only especially harmful for mountain settlements but also for linear infrastructures such as power and communication lines, railways, and roads. Linear infrastructure is not only directly exposed, but any interruption also results in secondary effects such as reduced accessibility or an interruption of supply chains, creating an emergency situation [*Petrova, 2020*].

In order to mitigate these hazards and to adapt to the adverse consequences, quantitative information on risk is needed. However, similar to snow avalanche hazards, in many mountain regions necessary data is missing [*Shnyparkov et al., 2012*] or not available due to institutional circumstances [*Papathoma-Köhle et al., 2021*], and considerable efforts have to be undertaken

systematically to acquire necessary information. In this contribution, we present an approach to close this gap by combining traditional engineering field methods with modelling approaches and modern remote sensing methods such as the use of uncrewed[2] aerial vehicles (UAVs) or satellite data. This allows us to achieve a reproducible workflow targeted at reliable and cost-efficient technical mitigation to protect exposed infrastructure from the impact of debris flow hazards.

The integration of traditional and modern techniques offers several advantages in assessing and mitigating debris flow hazards. Traditional engineering field methods provide valuable ground-truth data, including topographical surveys, lithological analysis, and geomorphological mapping, which form the basis for understanding local terrain characteristics and hazard dynamics. However, these methods are often time-consuming and labour-intensive, particularly in rugged or inaccessible terrain.

In contrast, modelling approaches, such as numerical simulations and statistical analyses, enable the extrapolation of field data to larger spatial scales and the quantification of hazard probabilities and magnitudes. These models allow for scenario-based risk assessments, considering various factors such as rainfall intensity, slope gradient, and land cover, to identify high-risk areas and prioritize mitigation efforts.

Additionally, modern remote sensing techniques, including UAVs and satellite imagery, offer a non-invasive and cost-effective means of acquiring high-resolution spatial data over large areas. UAVs, equipped with cameras, LiDAR sensors, and other remote sensing instruments, can capture detailed terrain information with centimetre-level accuracy, allowing for the generation of digital elevation models (DEMs), orthophotos, and 3D reconstructions of the landscape. Similarly, satellite imagery provides synoptic views of terrain features and environmental conditions, enabling the monitoring of changes over time and the detection of potential hazard triggers.

By integrating these diverse datasets and methodologies, researchers and practitioners can develop comprehensive hazard maps, vulnerability assessments, and risk management strategies tailored to specific regions and infrastructure networks. This holistic approach not only improves the accuracy and reliability of hazard assessments but also enhances the efficiency and effectiveness of mitigation measures, ultimately reducing the socio-economic impacts of debris flow events and enhancing community resilience to natural disasters.

Methods

In order to assess debris flow hazards and to design and implement engineering protection, it is necessary to determine the severity affecting the element at risk, including characteristic features of the hazard-prone area. First and foremost, the hazard inventory process entails gathering and analysing essential information pertaining to debris flow events. This includes compiling data on historical occurrences, assessing the geomorphological characteristics of the terrain, and identifying factors contributing to debris flow initiation and propagation. By examining past events and understanding the underlying geological, hydrological, and topographical factors, it becomes possible to delineate areas susceptible to debris flow hazards and anticipate future risks. Consequently, the hazard inventory includes information on assumed probabilities of occurrence (frequencies) and magnitudes (volumes), as well as an impact analysis. Engineering surveys (geology, geomorphology) are a standard procedure to achieve this type of information, and this procedure is well-justified and widely applied also in remote mountain areas [*Kharichkin et al., 2021*]. The overall workflow includes three stages: 1) preliminary desktop mapping, 2) field survey and 3) processing of the collected data including process modelling where appropriate.

(1) As part of the first stage, visual analysis of the traces of debris flow processes is performed, leveraging accessible datasets like Google Earth and high-resolution satellite

[2] The terms ‘unmanned aircraft systems’ (UAS), ‘remotely piloted aircraft systems’ (RPAS) or ‘unmanned aerial vehicle’ (UAV) are used synonymously to emphasise the lack of people in piloting and crewing roles on board. Following recent discussions in the scientific literature, we prefer to use the word ‘uncrewed’ here [*Joyce et al. 2021*].

imagery, etc. The analysis incorporates morphological, geological and landscape criteria, and is performed in accordance with existing recommendations [*Perov, 2012*]. As a result, a preliminary map of debris flow hazards is created showing the general susceptibility of the infrastructure at risk, and informing subsequent stages of hazard evaluation and risk mitigation strategies.

(2) The second stage includes a detailed geomorphological mapping aiming at a spatially explicit delineation of release, transit and deposition areas focusing on debris flows, an overall assessment of slope movement and other indicators for mass wasting. The main objectives are to describe the conditions for the formation of debris flows and to obtain quantitative characteristics. The preliminary scheme of debris flows obtained in stage 1 is updated, the forms of debris flow relief and deposits are described. The results of these studies allow us to draw conclusions about the nature of debris flows in the basin; the sources of solid and liquid supply of flows; possible mechanism of their origin; genesis; their discharge volume and frequency [*Perov, 2012*]. The mapping is a prerequisite to obtain a deeper understanding of the potential geohazard situation within the project area.

Another step of the second stage is to gather remote sensing data from UAVs, which due to technological advances became increasingly prominent in recent years [*Rossini et al., 2023*]. In the last few years, research with drones has been widely used in mountainous areas. UAVs provide the opportunity to conduct research with high spatial resolution, expanding our capabilities to monitor the changing environment and landscape features. The use of modern methods has allowed accelerating the acquisition of information about the research site, with the accuracy matching that of the classical survey methods. By combining drone surveys with traditional methods, it is possible to promptly obtain precise data for assessment and modelling of debris flow hazards, which therefore becomes a base for a further mitigation concept. With the development of survey technologies, it has become easier to obtain detailed data in remote mountainous areas, such as an orthophotoplan, a 3D model or a heightmap of the territory. We conduct drone flights using a DJI Matrice 300 RTK UAV with a DJI Zenmuse P1 photogrammetric camera and a DJI Zenmuse L1 lidar (airborne laser scanner) as payload.

(3) The third stage the boundaries of basins, the system of debris flow-prone watercourses, the directions and slopes of the talweg channels are clarified. Information on the granulometric composition is summarized. Based on the results of the field survey, a final map of debris flow characteristics is being created in a GIS environment, and a written report describes in detail the information on magnitudes and frequencies of every identified hazard phenomenon using a scheme based on the Austrian Standard ONR 24810 (Fig. 1).

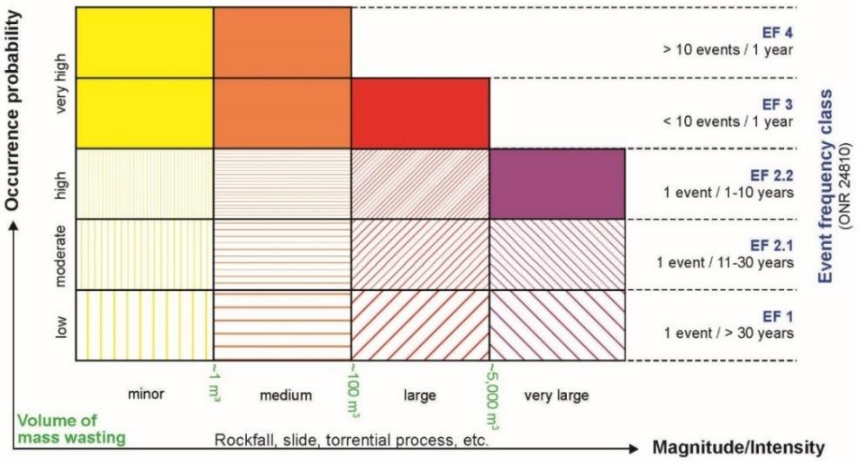


Fig. 1. Geohazard matrix for mass wasting processes differentiating volume (intensity) and frequency of rockfall, sliding processes and torrential processes. Classification based on the Austrian Standard ONR 24810:2020 01 with minor adjustments [*Austrian Standards Institute, 2017*]

The result of the UAV flights and the desktop processing of the data is an orthophotoplan, a digital elevation model and a topographic plan at a scale of 1:500. An orthophotoplan is a digitally transformed image of an area (object) created from overlapping photos. A digital elevation model (DEM) is based on a point cloud classification after airborne laser scanning, which contains information about the height of the true terrain, excluding vegetation and buildings. The topographic plan is the basis for the design of engineering protection. Planned features such as roads, forest, rock outcrops and utility infrastructure are plotted on the topographic plan from an orthophoto.

Results

In the following, results of individual stages (1) to (3) are presented using the example of a project in the Baikal Ridge, Irkutsk region, Russia.

(1) A debris flow hazard assessment was carried out on the section of the Baikal-Amur railway, which runs through the Baikal Ridge. At the preliminary stage nine catchment basins were highlighted using available 2010 satellite images in Google Earth, and a preliminary desktop mapping was undertaken to identify process types and activities. The position of the identified catchment areas, where occurrence of the hazards is possible, is shown in Fig. 2.

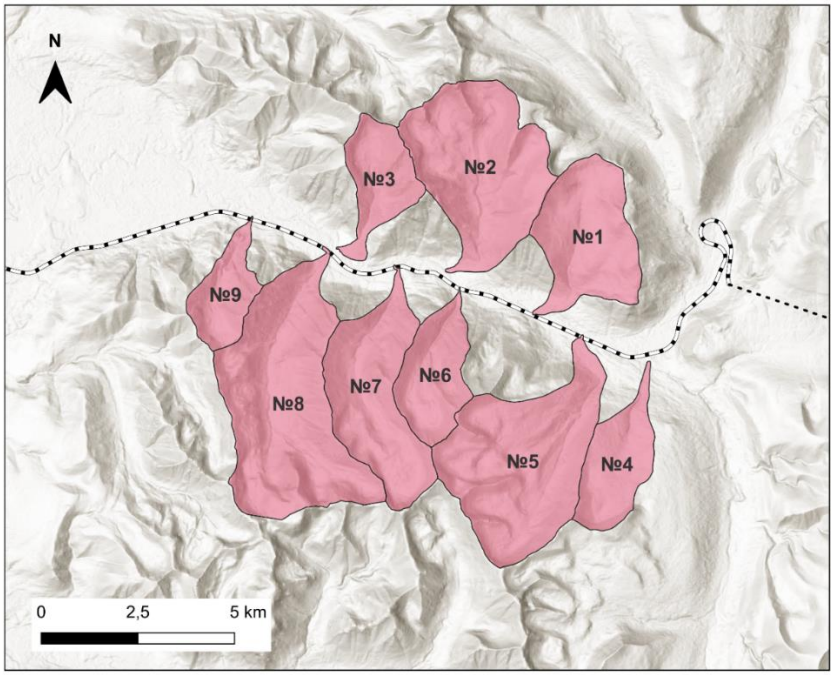


Fig. 2. Preliminary stage, scheme of debris flow basins, the Baikal Ridge. Image source: ESRI World Hillshade

(2) These nine basins were studied during the second stage during a field campaign in 2023. Detailed geomorphological mapping was conducted along the studied section of the railway and in the debris basins. Debris flow landforms and deposits were depicted, and, as such, the results of stage (1) were updated and assessed in more detail. The main attention was paid to creeks with indicators of debris flow activity. The traces of high-water levels, debris flow splashes on trees and the maximum size of boulders carried by debris flows were identified. As a result of the field study, an assessment of debris flow activity was estimated. The coefficient of debris flow activity characterising the intensity of the development of the debris flow processes [*Perov, 1996*] was assigned to the channels of nine brooks. The coefficient values were determined on the basis of visual analysis of satellite images and a field survey of the area. The most intense debris flows occurred in the Vredny brook basin (Fig. 3).

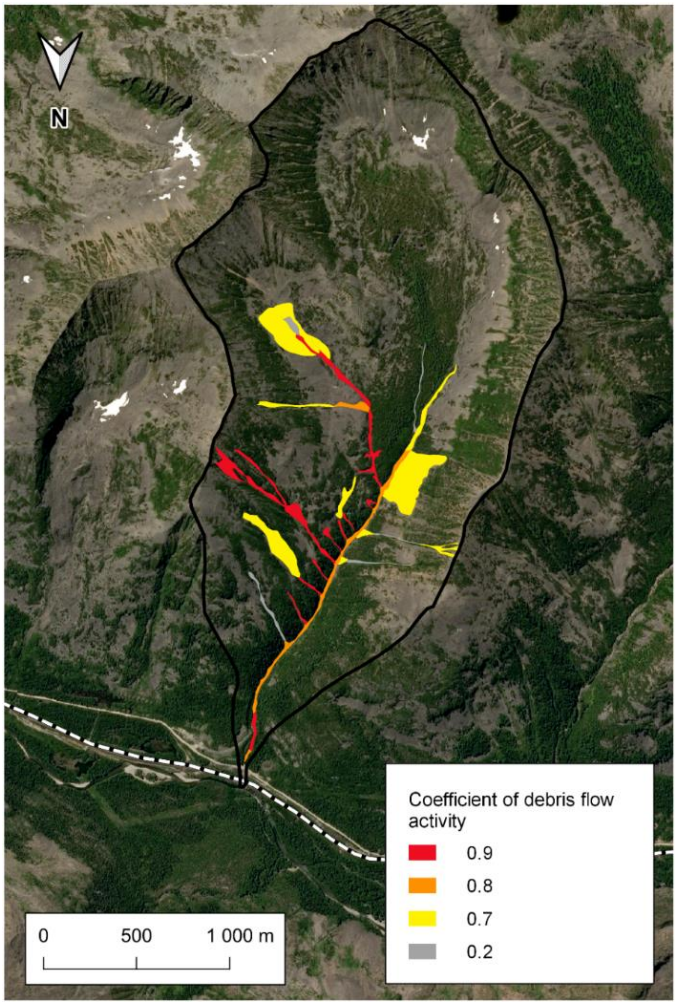


Fig. 3. Coefficient of debris flow activity assigned to the Vredny creek, the Baikal Ridge. Image source: Google Earth

(3) In total UAV flights with camera and lidar covered an area of 45 km^2. The result of the postprocessing of data from the Baikal Ridge was a digital elevation model with a resolution of 5 cm/pixel (Fig. 4). Combined with the terrain analysis modules in QGIS, the morphological characteristics of debris flow valleys were obtained, and the data was used to refine mapping and risk assessment results in order to obtain a design concept for technical mitigation.

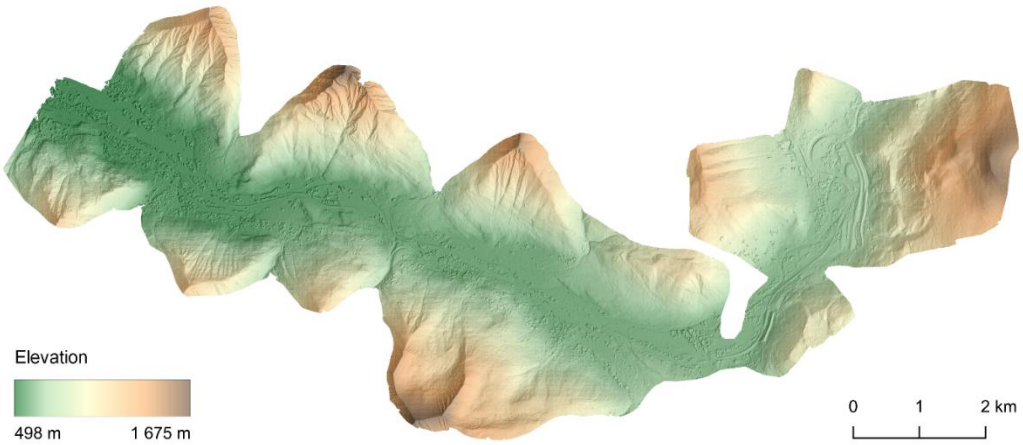


Fig. 4. Digital elevation model of the studied section of the Baikal Ridge

Design concept

Based on these results, the design concept for hazard mitigation was created. When developing engineering protection systems in mountainous areas, the key point in the design of protective structures is the choice of their installation locations. Most often a combination of structures is used to help control the destructive power of the event by restricting velocity and erosive potential and based on principles of economic efficiency of risk reduction investments [*see e.g., Fuchs and McAlpin 2005*]. Mathematical modelling is mainly used to calculate debris flows and obtain basic quantitative characteristics.

Engineered protective measures for controlling debris flows are often located on the debris fan and can be divided into two categories: open and closed control structures. Open structures generally provide controlled passage of debris into the deposition zone. This strategy differs from closed structures, which attempt to stop further progression of debris within the fan or along the channel. These systems are designed to absorb initial dynamic pressure created by fronts of debris. At the same time, they provide a mechanism for inducing coarse-grained deposition by dewatering combined with a reduction of debris velocity [*Bichler et al., 2012*]. Within the study area, we suggested to use Trumer flexible systems (the so-called Debris Catcher), as they are very cost-efficient and can be adapted to a multitude of terrain features. Typical barriers are installed in run-out or deposition zones, close to the elements at risk that they protect. The Debris Catcher has a unique design without retaining ropes and therefore no components in the upstream path of the flow that can fail or compromise the functionality of the system (Fig. 5). When the volume of debris material is relatively small, the barrier retains it completely and stops the debris flow. In case of large volumes of sediments, a barrier only reduces the energy of the debris flow, but does not stop it. For large debris flows a cascade of barriers is recommended [*Trumer Schutzbauten, 2014*].

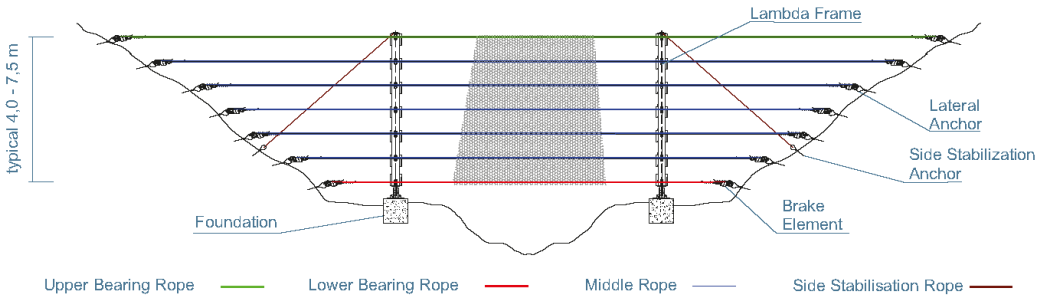


Fig. 5. Typical layout of the Trumer Schutzbauten Debris Catcher (front view). Please note that every debris flow structure is custom designed for a specific site and loading conditions and so the exact details of the system will vary from site to site. Source: Trumer Schutzbauten 2014

For the studied section of the Baikal-Amur railway, a cascade of two Trumer Debris Catchers was suggested to be installed in the channel, 150 and 250 m upstream of the rail track (Figs. 6 and 7). The main purpose of the cascading system is to retain individual large events. The Debris Catchers were designed considering judgment from post debris event field observations and calculations according to Russia's standard VSN 03-76 [*VSN 03-76, 1976*]. During the field stage normal discharge of the creek as well as block geometry were measured. Loading design input was based primary on the accepted in Russia methodology of parameter calculation of debris flows of certain probabilities. According to calculations, the maximum discharge of a 1-in-100-year debris flow event in Vredny basin is 37 m^3/s, with static pressure of 5 kPa, and dynamic pressure of 138 kPa. In this scenario the Trumer Debris Catcher was found to be the most suitable solution, as the structure can withstand impact pressure up to 150 kPa. With two barriers in a row, the retention capacity increases. The installation place was chosen to maximize the debris storage volume behind the structure and to have relatively easy access to the systems for maintenance.

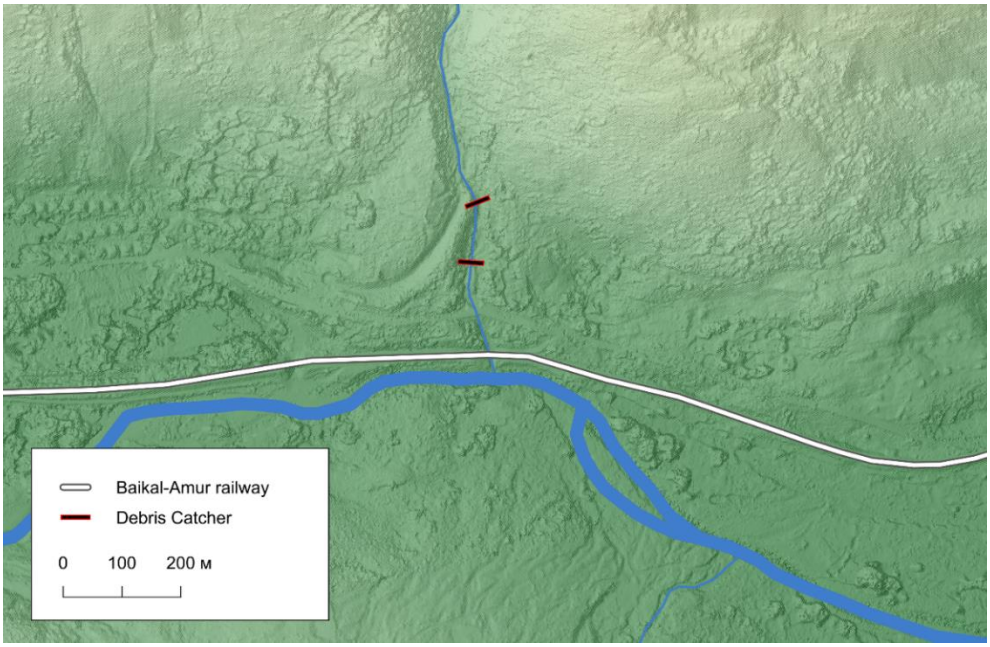


Fig. 6. Proposed cascade of Trumer Debris Catcher barriers, the Baikal Ridge. Image source: own digital elevation model

Fig. 7. Debris Catcher system from Trumer Schutzbauten (TS-DC-LAMBDA). Source: Trumer Schutzbauten

Discussion

The central aspect within debris flow risk assessment is to ensure an acceptable safety level and sustainable use for the exposed mountain areas with regards to economic and social conditions. This becomes of vital importance when tailoring the hazard and risk assessment along traffic infrastructure with high significance, limited number of applicable structural measures, and a dynamic environment of elements at risk. We propose a framework for working

in a debris flow prone area from scratch, from hazard assessment to the development of an effective engineering protection concept. Concerning the mitigation strategy, it is crucially important to assess both the magnitude and frequency of the hazard and develop an individual protection concept in order to secure infrastructure and reduce the existing risk to an acceptable level.

Detailed geomorphological mapping is one of the most important tools for the assessment of natural hazards. It serves to recognize and interpret the 'silent witnesses' [*Aulitzky, 1992*] as a backward-looking indication of earlier hazardous processes. At the same time, critical constellations and key positions of the process dynamics in the terrain are recognized and assessed (forward-looking indication) [*Keiler et al., 2000*]. According to generally accepted methods [*e.g., Heinimann et al., 1998*], the terrain analysis requires as preliminary work a desktop evaluation of all relevant data on spatial features (search for topographical, geological, lithological, hydrological and other documents and maps, evaluation of existing event registers) as well as a precise interpretation of aerial photographs and satellite-based imagery of the area under investigation (stage 1).

The subsequent site inspection serves to check, possibly correct and supplement the preliminary mapping derived from the basic data. While geomorphological mapping already has a long history in the assessment of natural hazards such as debris flows, the combination with new technology such as the use of drones to create high-resolution terrain models is innovative in particular in data-scarce regions (stage 2). As it can be seen from the experience of Trumer, application of UAVs makes it possible to actively use the results of drone survey to apply terrain analysis in GIS and design measures for the engineering protection of the investigated territory (stage 3).

This integration of modern technology not only enhances the accuracy and efficiency of the hazard assessment process but also opens up new possibilities for proactive risk management. By utilizing UAVs, which can access remote or hazardous areas with greater ease and safety than traditional methods, researchers and engineers can gather data in a more comprehensive and timely manner. Additionally, the high-resolution terrain models generated by UAVs allow for detailed analysis and visualization of terrain features, facilitating better-informed decision-making in the design and implementation of protective measures.

Furthermore, the use of Geographic Information Systems (GIS) alongside drone technology enables the integration of various spatial data layers, such as land use, vegetation cover, and hydrological characteristics, into a unified platform for comprehensive risk assessment and consecutive design of mitigation solutions. This spatial analysis approach provides valuable insights into the spatial distribution and interaction of factors contributing to debris flow hazards, helping to prioritize areas for intervention and optimize resource allocation. Additionally, GIS facilitates the communication of risk information to stakeholders through interactive maps and visualisations, enhancing their understanding of potential hazards and the effectiveness of proposed mitigation measures.

In addition to its application in hazard assessment and risk management, geomorphological mapping with drones holds promise for supporting post-disaster recovery and resilience-building efforts. By rapidly assessing changes in terrain morphology following a debris flow event, researchers can identify areas of heightened vulnerability and prioritise restoration efforts. Moreover, the availability of up-to-date and accurate terrain data can inform the design of resilient infrastructure and land-use planning strategies aimed at reducing future disaster risks.

Overall, the integration of drones and GIS technology into geomorphological mapping represents a significant advancement in the field of natural hazard assessment and risk management. By combining the strengths of remote sensing, spatial analysis, and geospatial visualization, this approach offers a powerful toolkit for understanding, predicting, and mitigating debris flow hazards in mountain regions. However, it is essential to continue refining methodologies and leveraging technological innovations to further enhance the accuracy, efficiency, and accessibility of hazard assessment and risk management practices, ultimately contributing to the safety and sustainability of mountain communities worldwide.

References

Aulitzky H (1992) Die Sprache der „Stummen Zeugen“. In: Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent (ed.) Internationales Symposion Interpraevent, Bern, 29. Juni – 03. Juli 1992, Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt, 139–174

Austrian Standards Institute (2017) Technischer Steinschlagschutz – Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung, ONR 24810. Österreichisches Normungsinstitut, Wien

Bichler A, Yonin D, Stelzer G. (2012) Flexible debris flow mitigation: introducing the 5.5 mile debris fence. In: Eberhardt E, Froese C, Turner K, Leroueil S (eds) Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding. CRC Press, New York. 1955–1960

Chernomorets SS, Viskhadzhieva KS (eds) Debris flows: Disasters, risk, forecast, protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe – Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 509–516

Costa JE (1984) Physical geomorphology of debris flows. In: Costa JE, Fleischer PJ (eds) Developments and applications of geomorphology. Springer, Berlin. 268–317

Fuchs S, McAlpin MC (2005) The net benefit of public expenditures on avalanche defence structures in the municipality of Davos, Switzerland. Natural Hazards and Earth System Sciences 5 (3):319–330. https://doi.org/10.5194/nhess-5-319-2005

Gavrilova S, Gryaznova V, Danilina A, Shniparkov A. (2011) Analysis of the distribution of natural hazards in the late XX-early XXI century on the territory of Russia. Georisk 4:58–64. (In Russian)

Heinimann H, Hollenstein K, Kienholz H, Krummenacher B, Mani P (1998) Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern

Joyce KE, Anderson K, Bartolo RE (2021) Of course we fly unmanned – we’re women! Drones 5 (1):21. https://doi.org/10.3390/drones5010021

Keiler M, Zischg A, Fuchs S (2000) Anwendung und Umsetzung des „Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene“ mittels GIS. In: Zollinger F, Fiebiger G (eds.) Internationales Symposion Interpraevent, Villach, 26.-30. Juni 2000, Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt, pp 61–70

Kharichkin A, Rogov K, Dranitsyn A (2021) The use of modern methods of aerophotography based on UAVs for the project of engineering protection measures against dangerous geological processes. Bulletin of the NIC Construction. 29 (2):123–135. (In Russian)

Papathoma-Köhle M, Thaler T, Fuchs S (2021) An institutional approach to vulnerability: evidence from natural hazard management in Europe. Environmental Research Letters 16 (4):044056. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe88c

Perov V (1996) Debris flow processes: a terminological dictionary. Moscow: Moscow State University, 123. (In Russian)

Perov V, Chernomorets S, Budarina O, Savernyuk E, Leontyeva T. (2017) Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events. Natural Hazards 88 (Suppl. 1):199-235. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2841-3

Perov V. (2012) Debris flow research. Faculty of Geography, Moscow State University, Moscow. (In Russian)

Petrova E (2020) Impacts of debris flows on the technosphere according to the database analysis. In:

Rickenmann D (2002) Über Murgänge in den Alpen. Wasser & Boden 54 (4): 23–26

Rossini M, Garzonio R, Panigada C, Tagliabue G, Bramati G, Vezzoli G, Cogliati S, Colombo R, Di Mauro B. (2023) Mapping surface features of an Alpine glacier through multispectral and thermal drone surveys. Remote Sensing 15 (13):3429. https://doi.org/10.3390/rs15133429

Shnyparkov AL, Fuchs S, Sokratov SA, Koltermann KP, Seliverstov YG, Vikulina MA (2012) Theory and practice of individual snow avalanche risk assessment in the Russian arctic. Geography, Environment, Sustainability 5 (3): 64–81.

Trumer Schutzbauten (2014) Debris flow protection systems. Debris catcher, data sheet. https://trumerschutzbauten.com/wp-content/uploads/2017/11/TRUMER-Debris-Catcher-Canada-ENGLISH-10_14.pdf (accessed 28 July 2024).

VSN 03–76 (1976). Instructions for determining the calculated characteristics of rain debris flows. Leningrad: Hydrometeoizdat (in Russian)

Forecasting of debris flow processes and control with innovative construction along the Military Georgian Road

G.V. Gavardashvili[1,2]

[1]Georgia National Academy of Sciences, Tbilisi, Georgia

[2]Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, givi_gava@yahoo.com

Abstract. The paper presents the results of theoretical, laboratory and scientific field studies for the purpose of efficient flood protection of the Georgian Military Road.
The erosion coefficients of mountain slopes of erosion-debris flow active right tributaries of Tetri Aragvi catchment have been calculated taking into account the degree of soil and ground surface damage and the class of erosion, as well as the values of turbulent debris flow peak discharge have been determined taking into account the corresponding provision coefficient.
In order to control debris flows in the gorge of the Mleta River, the right tributary of the Tetri Aragvi River, a design of an innovative flood control structure has been presented, with its novelty priority certified by the patent certificate of Georgia No. P2020 7068 B.
After determination of the main hydrological and hydraulic parameters of the Mleta River gorge and hydraulic laboratory large-scale modeling of the flood control dam, a scientific methodology was developed, according to which the structure was designed in the channel of the Mleta River gorge.
From August to November of 2022, the structure was constructed in the bed of the Mleta River gorge, and from April to May of 2023, the structure effectively discharged its function by retaining the debris flow mass in the headrace of the bed of the Mleta River gorge and protected the St. George Church dated by 1879 from destruction.

Key words: *Georgian Military Road, debris flow, debris flow control structure*

Cite this article: Gavardashvili G.V. Forecasting of debris flow processes and control with innovative construction along the Military Georgian Road. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 125–133.

Прогнозирование и контроль селевых процессов с помощью инновационного строительства на Военно-Грузинской дороге

Г.В. Гавардашвили[1,2]

[1]Национальная академия наук Грузии, Тбилиси, Грузия, o.natishvili@gtu.ge

[2]Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета, Тбилиси, Грузия

Аннотация. В статье представлены результаты теоретических, лабораторных и научно-полевых исследований с целью эффективной защиты от наводнений Военно-Грузинской дороги.
Рассчитаны коэффициенты эрозии горных склонов эрозионно-селевых активных правых притоков водосбора Тетри-Арагви с учетом степени повреждения почвы и поверхности земли и класса эрозии, а также определены значения пиковых расходов турбулентных селей с учетом соответствующего коэффициента обеспеченности.
Для борьбы с селевыми потоками в ущелье реки Млета, правого притока реки Тетри-Арагви, представлен проект инновационного противопаводкового сооружения, приоритет новизны которого подтвержден патентным свидетельством Грузии № P2020 7068 B.

После определения основных гидрологических и гидравлических параметров ущелья реки Млета и гидравлического лабораторного масштабного моделирования противопаводковой дамбы была разработана научная методология, согласно которой было спроектировано сооружение в русле ущелья реки Млета.
С августа по ноябрь 2022 г. сооружение было построено в русле ущелья реки Млета, а с апреля по май 2023 г. оно эффективно выполнило свою функцию, задержав селевые массы в верховьях русла ущелья реки и защитив от разрушения Георгиевскую церковь 1879 г.

Ключевые слова: *Военно-Грузинская дорога, сель, противоселевые сооружения*

Ссылка для цитирования: Гавардашвили Г.В. Прогнозирование и контроль селевых процессов с помощью инновационного строительства на Военно-Грузинской дороге. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 125–133.

Introduction

The original route of the Georgian Military Road envisioned a connection between Tbilisi and Vladikavkaz post offices, passing through the post offices along the road.

The lower reaches of the Aragvi River in the area of the Georgian Military Road is low- and middle-mountainous. From Zemo Mleta village there starts high-mountainous relief with mountain-forest, subalpine, alpine, subnival and nival landscape zones changing to mid-mountainous terrain with broad-leaved forests and meadows from Zemo Larsi village [*Chernomorets, 2005*]. The famous Narzani mineral springs are found in the River Bidari valley. Fig. 1 presents a map of the Georgian Military Road compiled in 1913.

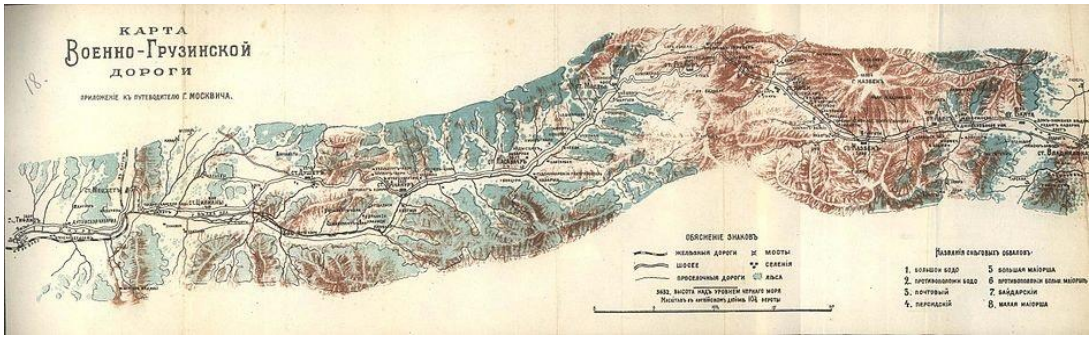


Fig. 1. Map of the Georgian Military Road, 1913

Examples of the recent history of debris flows in the Georgia Military Road corridor and adjacent areas prove that due to frequent debris flows, the potential for decentralization of critical infrastructure in the areas adjacent to their transit corridor has increased significantly causing adverse environmental and, consequently, socio-economic problems.

Since it is impossible to accurately predict the failure of regulating bed structures on the Georgian Military Road due to the diversity of debris flows and their occurrence in different periods, today we have an option of a universal set of measures the utilization of which would significantly reduce the negative impact of natural disasters [*Lin et al., 2009*].

The above is in itself linked to the need for various innovative methods and technologies based on scientific research. In general, most debris flow control structures are a system of complex structural elements, due to which they fulfill such functions as debris flow containment, debris flow transit, debris flow regulation and bank protection from debris flow [*Armanini, Larcher, Odorizzi, 2011*].

Taking into account all the foregoing, the protection of the Georgian Military Road against natural disasters: debris flows, erosion and landslide processes, floods, snow

avalanches, etc. has great practical importance as it is the shortest transit highway between Russia and the republics of the South Caucasus (Georgia, Azerbaijan and Armenia)

Forecasting erosion and debris flow processes in the Georgian Military Road corridor

Assessment of erosion processes of mountain slopes is of particular importance to determine the ecological processes on erosion-debris flow mountain rivers in the catchment area of the Mtkvari River [*Gavardashvili, 2011*].

Taking into account the Climate Change, the following natural processes were observed by us: e.g. geographically, there are 4 active river catchment basins fixed in the Aragvi catchment basin, the left tributary of the Mtkvari River: Tetri (Mtiuleti) Aragvi, Black (Gudamakari) Aragvi, Pshavis Aragvi and Khevsuretis Aragvi [*Guide for adaptation to the climate change, 2016*]. Of them, the catchment basin of the Tetri Aragvi is distinguished with the most active erosive-debris flow processes and the catchment basin of the Mletis Khevi River is most active, forming debris flows with peak discharges once in every 4 years in the past. As for now, there are debris flow passages with peak discharges registered in it once in every 4 years. This area is a representative of different catchment basins of the Mtkvari River of an erosive-debris flow type [*Gavardashvili, 2022, Natural Hazards in Georgia, 2011*].

As a result of field scientific research conducted by us in the Mtkvari River basin, an equation by which the erosion coefficient of a mountain slope in relation to time is calculated [*Gavardashvili, 2022*]:

$$E = [0.58 + 1.40(F_1/F_0) \cdot (t/T)^{0.21}], \quad (1)$$

where: F_1 is the eroded area in the river catch basin (km^2); F_0 is the total area of the river catch basin (km^2); t is the time interval (year); T is the period of total observation

The value of the peak discharge of debris flow of various provisions is calculated by the following formula [*Gavardashvili, 2022*]:

$$Q_{\max} = A(34 + 400i)F_0^{0.61}\text{m}^3/\text{s}, \quad (2)$$

where: A is the debris flow discharge coefficient, whose variation, by considering provision coefficient ratio P (%) is given in Table 1.

Table 1. Relationship between the debris flow discharges coefficient (*A*) and provision coefficient, *P* (%)

Provision coefficient *P* (%)	0.1	1	3	5	10	25
Debris flow discharge coefficient *A*	2.4	1.0	0.7	0.6	0.5	0.3

Using relations (1) and (2), the values of the erosion coefficient of active tributaries of erosion-debris flow type in the catchment area of the Tetri Aragvi River and the peak discharge of debris flows of 1% provision were calculated, the numerical values of which are given in Table 2.

Structural description of the elastic debris flow-regulating barrage

Natural anomalies, debris flows in particular, are of a particular importance for designing efficient engineering solutions. Debris flow is a terrible phenomenon of the natural calamities and the regulation measures are associated with their genesis and dynamics.

The rigidity and structural solutions of the barrages used in practice fail to transform the flow on the pressure surface or redistribute the dynamic force.

By considering the above-mentioned, an innovative structure of the elastic debris flow-regulating barrage was designed by the joint efforts of the scientific workers of Ts.

Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University and NGO Ecocenter for Environmental Protection, with its Know-How approved by the Patent License of Georgia [*Gavardashvili et al., 2019*].

Table 2. Basic data of debris flow-type tributaries in the catchment basin of the Tetri Aragvi River

No.	River	Catchment area F_0, km^2	Bed slope i	Erosion coefficient E	Erosion class, according to Prof. R. Morgan scale	Degree of damage, t/ha per year	1% max. debris flow discharge, m^3/s
1	Mletis Khevi	1,28	0,260	1,13	Fourth	10–50	131,0
2	Tsiskvilt Khevi	1,50	0,251	0,89	Third	5–10	87,0
3	Kotoras Khevi	0,62	0,290	1,62	Fifth	50–100	98,0
4	Arakhvetis Khevi	1,45	0,216	0,96	Third	5–10	109,0
5	Qimbariani Khevi	0,60	0,220	0,95	Third	5–10	70,0
6	Nagvarevis Khevi	6,50	0,247	1,00	Fourth	10–50	387,0
7	Chokhelt Khevi	6,96	0,290	0,95	Third	5–10	550,0
8	Zemo Amirt Khevi	1,87	0,264	0,92	Third	5–10	200,0
9	Kvemo Amirt Khevi	0,96	0,310	0,73	Second	2–5	140,0
10	Chadistsikhis Khevi	1,30	0,360	1,17	Fourth	10–50	141,0

The sections of the elastic debris flow-regulating barrage are made of triangular prisms of the same height inserted in the bed, tight packed with their side faces. The base heights of the prisms increase along the debris flow current and form a springboard. The structure's top is directed against the current and there are elastic ropes stretched between the edges above the prisms connected with one another with the lateral ropes forming pockets between the edges to receive the debris flow mass. This type of barrage allows receiving debris flow smoothly (Fig. 2).

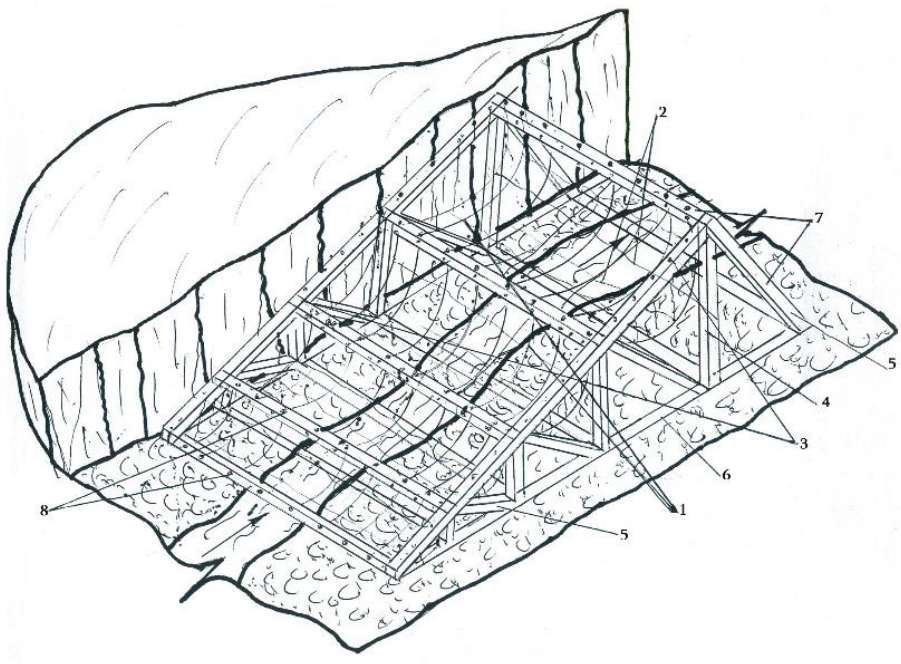


Fig. 2. Debris flow control elastic barrage

Unlike barbed wire structures, the innovation of the elastic barrier is presented in a constructive solution. It is made of triangular prisms connected by stems of equal height, which are placed in the bed of the debris flow.

The construction is presented in the form of sections. The pressure surface hanging in it is made of ropes and has a curved shape of an elastic mesh. According to the current direction, the height of the prism stems increases and it is represented as a springboard.

The size and length of the cross-section of the structure depends on the strength and structure of the debris flow. The structure is shown in Fig. 1. The arrangement of the constituent elements given in № 1 is as follows: Triangular prisms (3), Triangular prism bases (4), Prism base heights (5), Prism grips (6), Attachment holes (7) or nets may be arranged in these places. Hanging hooks – longitudinal (1) and transverse (2) elastic ropes.

Laboratory modeling of the elastic debris flow-regulating barrage

For the sake of laboratory modeling of the elastic debris flow-regulating barrage, a hydraulic duct was selected at the hydraulic laboratory of Ts. Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University with sizes: width: 0,36 m, height: 0,29 m, length: 12 m, duct gradient alteration: 0,01–0,06, [*Natishvili, Gavardashvili, 2019; Natishvili, Gavardashvili, 2015*].

As for the model of the elastic debris flow-regulating barrage, by considering the parameters of the hydraulic duct, they are as follows: length of the model barrage: 0.60 m, width: 0.36 m, maximum height of the barrage: 0.15 m, number of steps: 3, step base length: 0.20 m, sizes of the open-end network to be installed in the elastic pockets: 5–7 mm with the first option, 4–5 mm with the second option and 2–3 mm with the third option.

By considering the above-mentioned, a laboratory model of the elastic debris flow-regulating barrage was made with its general view given in Figs. 3 and 4. Fig. 5 shows the laboratory model of the structure in the hydraulic duct.

Experiments on the laboratory model of the elastic debris flow-regulating barrage will be done during the motion of the turbulent debris flow through the debris flow duct by observing the following parameters of modeling similarity [*Gavardashvili, 2011, Natishvili et al., 2016.*]: the laboratory experiments will be done for debris flow motion through the hydraulic duct for dynamic similarity (*Fr = ident*), geometrical similarity (bed gradient: *i = ident*), drift motion ($V_{water} / V_{sediments}$ = *ident*), bed resistance coefficient (Chezy coefficient *C = ident*).

Fig. 3. Laboratory model of the elastic debris flow-regulating barrage

Fig. 4. Model of the elastic debris flow-regulating barrage in the hydraulic duct

Fig. 5. Debris flow regulation elastic barrage during the laboratory tests

Construction design and building

The dynamic impact of the flow on the innovative debris flow control structure is calculated with the following dependence:

$$P_1 = \frac{\gamma \omega V^2}{g} \sin\psi f(m) \text{ N/m}^2, \quad (3)$$

where γ is the volume weight of the debris flow (N/m3); ω is the area of the effective cross-section (m2); V is the flow velocity (m/s); φ – angle of internal friction; ψ is the gradient angle to the structure base (0); ψ is the internal friction coefficient and equals to:

$$\psi = tg^2\left(45^0 - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (4)$$

where h_0 is the equivalent depth of cohesiveness (m); H is the depth of current (m); a is the coefficient $(1 - h_0)\psi$. $f(m)$ is the coefficient and depends on the rheological properties of the debris flow:

$$f(m) = \frac{16 - \left(\alpha^3 + 4\alpha\sqrt{\alpha}\right)\left(2 + \sqrt{\alpha}\right)^2}{\left(\alpha^3 + 4\alpha\sqrt{\alpha}\right)\left(2 + \sqrt{\alpha}\right)^2} \quad (5)$$

The innovative debris flow control structure is a bearing frame of a metal structure with steel details. Considering the technical characteristics of the structure, a point foundation was selected for it, and waterproof concrete W8, Class B25, made with Portland cement was used for the foundations. The structure, which is in contact with the ground and the river filtration current, is waterproofed with up-to-date insulating materials. The bearing structure of the anti-debris flow control barrage, as a single spatial system, is designed for permanent and temporary dynamic loads. The calculation was performed with software „Lira Sapr 2019" (License Number 1/7165).

The detail project is developed in accordance with normative documents effective in the territory of Georgia: Concrete and reinforced concrete structures (03.01.-09); Building Foundations (DN 02.01-08); Building climatology (DN 01.05-08); SNiP 2.01.07.85 Loads and Impacts; SNiP II-23-81: Steel structures; SNiP 2.03.11-85: Protection of structures against corrosion. The calculation results are given in Figs. 6 and 7.

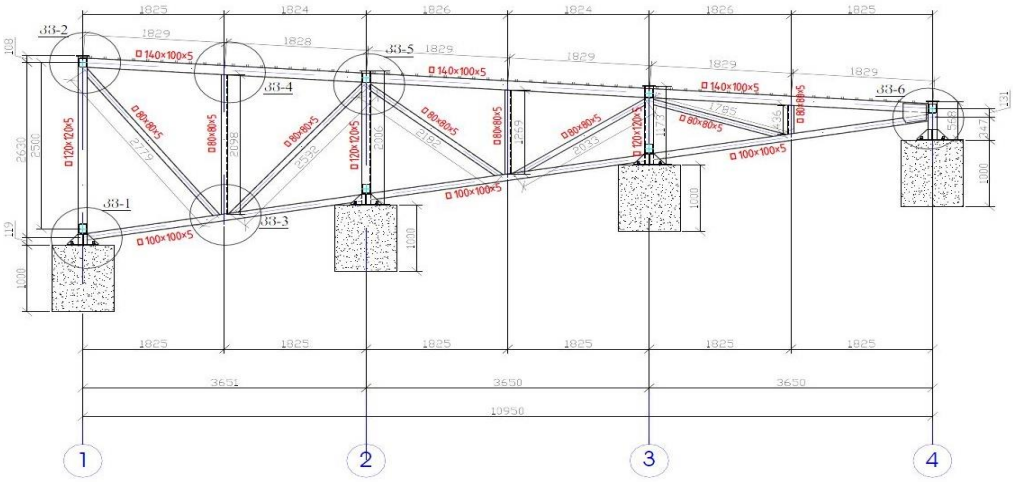


Fig. 6. Longitudinal section of the debris flow regulation

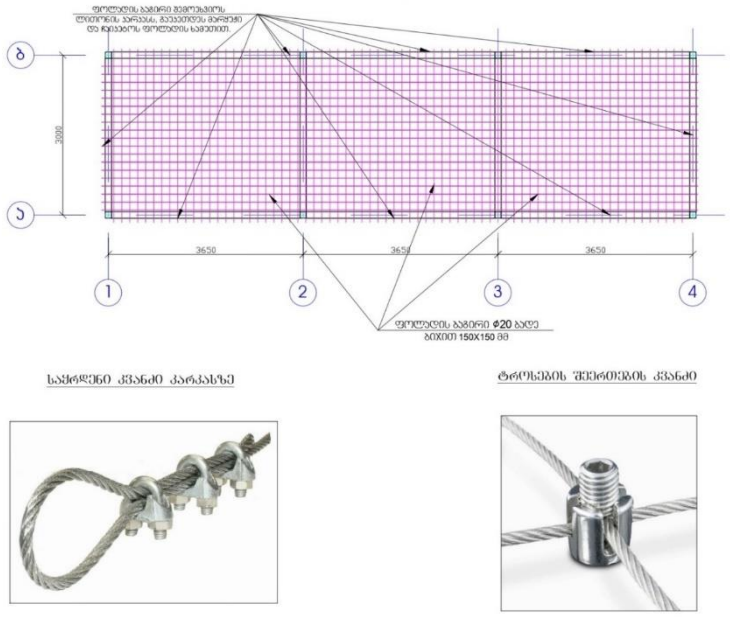


Fig. 7. Construction view in plan and nodes

The volume of solid fractions accumulated in the headrace of the debris flow regulation elastic barrage is calculated as a function of time according to the following dependence:

$$W_t/W_T = \left[0{,}90 + 0{,}10\left(\bar{d}/\Delta\right)^{1{,}51}\right] (t/T)^{2{,}34}, \quad (6)$$

where W_t is the volume of solid fractions retained by the structure at a given moment of time (m^3), W_T is the total volume of fractions retained at the headrace of the structure (m^3); ($W_T = q_{sd}.B.T$), (m^3), B – width of the river bed (m); Δ is the permeability factor of the structure, t is the elementary time period (min), T is the time of complete filling of the structure with sediments in its headrace (min). There are metal cables suspended from the steps of the structure to make the barrage open-end by providing square holes (0.15 x 0.15 (m^2). According to the design data, the structure carries water mass with solid fractions less than 0,15 m to the tailrace, while the solid fractions greater than 0,15 m remain in the headrace of the structure.

Based on the conducted theoretical, laboratory and field studies, in order to regulate the solid fractions in the Mleta riverbed at 1600 m asl, in October of 2022 an experimental model of the debris flow regulation elastic barrage was built by us, and the debris flow formed in May

of 2023 filled the first step of the structure with solid fractions. The general view is given in Fig. 8.

a b

Fig. 8. General view of the debris flow regulation elastic barrage regulating solid fractions: structure before (a) and after (b) the debris flow passage

The expedition and field scientific studies and their analysis in the headrace of the elastic debris flow control barrage have yielded the following results: the structure contained the debris flow mass together with solid fractions in the headrace along a 30-m section, the volume of which is 112 m^3, and the height of the debris flow mass at the first step of the structure was 1.0 m (Fig. 9). The weight of the largest stone transported by the debris flow and retained in the headrace of the structure was 1.19 tons. The riverbed slope was 15° in the headrace of the structure before the debris flow passage in the riverbed, and the slope of the longitudinal profile of the surface of the debris flow mass accumulated in the headrace of the structure after the debris flow passage decreased by 4° to 11°.

Fig. 9. General view of the debris flow regulation elastic barrage

Conclusions

Based on the theoretical, laboratory and field scientific studies conducted under the financial support of the grant project of the Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia "Debris flow regulation elastic Barrage" in 2020–2023, the following basic conclusions can be made:

- an innovative design of an debris flow regulation elastic barrage, the priority of which is confirmed by a Georgian patent, has been developed to stabilize mountain riverbeds;
- in order to effectively regulate sediments in riverbeds, laboratory experiments were conducted on the model of the debris flow regulation elastic barrage, when two-phase flows loaded with sediment of different diameters were flowing in the hydraulic channel;
- based on the conducted experiments, the methodology as well as hydrological and hydraulic calculations of turbulent debris flows were worked out and used to develop a working design of the debris flow regulation elastic barrage;
- by using the working design, an experimental structure of the debris flow regulation elastic barrage was installed in the Mleta riverbed in September and October of 2022;
- in May 2023, turbulent debris flow was formed in the Mleta River gorge bed, and the flow affected the experimental model of the debris flow regulation elastic barrage with a dynamic impact force. The structure did not collapse and is operable to date proving its reliability.

References

Armanini A., Larcher M & Odorizzi M. (2011). Dinamic Impact of a Debris Flow Front Against a Vertical Wall. 5th International Conference on Debris-Flow Hazards (Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment). Padua, ITALY, pp. 1041–1049.

Gavardashvili G., Kukhalashvili E., Kupreishvili Sh., Gavardashvili N. (2019). Elastic debris flow-regulating barrage. Georgian Patent #AP 2019 14656 A. Official, Bulletin of the Industrial Patent #15(523), SAKPATENTI, 12/08/2019, Tbilisi, p. 6.

Gavardashvili G. (2011). Measures for the Safety of Mountain Landscapes During Natural and Tehnogenic Disasters. Tbilisi, Universal, 273 p. (In Georgian).

Gavardashvili G.V. (2022). Predicting Erosive and Debris Flow Processes and the Innovative Measures to Control Them. "Cambridge Scholars Publishing House" ISBN: 1-5275-8482-8; ISBN13: 978-1-5275-8482-2; Cambridge, UK, p. 245. https://www.cambridgescholars.com/product/978-1-5275-8482-2

Guide for adaptation to the climate change (2016) Tbilisi, p. 266.

Natural Hazards in Georgia. SENN, Tbilisi, (2011), 65 p. http://drm.cenn.org/paper_atlas/RA-part-3.pdf;

Natishvili O.G., Gavardashvili G.V. (2019) – Calculation of Impact Action of a Coherent Debris flow Current in the Wave Motion Mode on a Transverse Structure. 9th International Scientific and Technical Conference, Modern Problems of Water Management, Environmental Protection, Architecture and Construction". Tbilisi, pp. 210–214.

Natishvili O.G., Gavardashvili G.V. (2015). Calculation of properties of the motion of the hear piece of a coherent debris flow. Collection of Scientific Works of the Ts. Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, № 70, Tbilisi, pp. 138–143.

Natishvili O., Kruashvili I., Gavardashvili G., Inashvili I. (2016). Methodic Recommendations to design anti-debris flow structures (hydraulic calculations). Georgian National Academy of Science, Tbilisi, p. 48.

Chernomorets S.S. (2005). Debris flow loci before and after catastrophes. Moscow: Nauchnyi Mir, p. 200.

Lin M., Wang K., Chen T. & Lin S. (2009). The Case Study of Debris Flow Hazard Caused by Typhoon Morakot in TAIWAN, 5th. International Conference on Debris-Flow Hazards (Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment). Padua, ITALY, 14.

Увеличение рисков техногенных катастроф вследствие глобальных климатических изменений

З.Ж. Гергокова

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, zayna.gerg@mail.ru

Аннотация. В работе анализируется мировой тренд к увеличению интенсивности масштабных аварий накопителей промышленных отходов горно-обогатительных и горнодобывающих предприятий различных стран. По данным актуальных (2021, 2022 гг.) наземных и аэровизуальных обследований гидротехнических сооружений (ГТС) хвостохранилища Тырныаузского горно-обогатительного комбината (ТГОК), проводится оценка рисков возникновения чрезвычайных ситуаций катастрофического характера. Отдельно рассматриваются объекты комплекса ГТС хвостохранилища ТГОК, состояние которых на сегодняшний день вызывает наибольшие опасения, приводятся сведения о динамике изменений их параметров. Целью проведения данного исследования, помимо определения современной, текущей обстановки на отдельных элементах комплекса ГТС хвостохранилища, является выработка основных направлений проведения мероприятий по улучшению складывающейся ситуации. На основе анализа полученных результатов даются необходимые рекомендации.

Ключевые слова: *экологическая катастрофа, гидротехническое сооружение, селевой режим, хвостохранилище, сейсмическая активность, токсичные отходы, тоннель*

Ссылка для цитирования: Гергокова З.Ж. Увеличение рисков техногенных катастроф вследствие глобальных климатических изменений. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7- й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 134–139.

Increased risks of man-made disasters due to global climate change

Z.Zh. Gergokova

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, zayna.gerg@mail.ru

Abstract. The paper analyzes the global trend towards an increase in the intensity of large-scale accidents of industrial waste storage facilities of mining and processing enterprises of various countries. According to the data of current (2021, 2022) ground-based and aerovisual surveys of hydraulic structures (GTS) of the tailings storage facility of the Tyrnyauz Mining and Processing Plant (TGOC), an assessment of the risks of catastrophic emergencies is being carried out. Separately, the objects of the GTS complex of the TGOC tailings dam are considered, the condition of which, to date, causes the greatest concern, information is provided on the dynamics of changes in their parameters. The purpose of this study, in addition to determining the current, current situation on individual elements of the GTS complex of the tailings' storage facility, is to develop the main directions of measures to improve the current situation. Based on the analysis of the results obtained, the necessary recommendations are given.

Key words: *environmental disaster, hydraulic engineering structure, debris flow regime, tailings dump, seismic activity, toxic waste, tunnel*

Cite this article: Gergokova Z.Zh. Increased risks of man-made disasters due to global climate change. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 134–139.

Введение

Проблема обеспечения безопасной эксплуатации и содержания хранилищ промышленных отходов горнодобывающих или горно-обогатительных предприятий, в настоящее время, чрезвычайно остро стоит во всем мире. Поскольку предметом хранения в них являются десятки миллионов тонн высокотоксичной мелкозернистой массы, даже, казалось бы, незначительные отклонения от современных стандартов промышленной безопасности в плане надлежащего содержания всего комплекса гидротехнических сооружений грозит масштабной техногенной катастрофой с чудовищными последствиями.

Поскольку большинство хвостохранилищ расположены на горных склонах, как правило, в устьях рек 2-го порядка, подобные чрезвычайные происшествия чаще всего происходят вследствие размыва или разрушения каскада, удерживающих массы отходов, дамб обвалования с образованием селевых потоков колоссальной энергетической мощности и выносом катастрофических объемов вредоносного грунта. Триггером такого развития событий, обычно, служат непредвиденное количество осадков в прилегающем водосборном бассейне или сейсмическая активность. Примерно с середины прошлого века и по настоящее время, во всем мире наблюдается увеличение количества катастроф, связанных с хвостохранилищами. Отчетливо прослеживается тенденция роста интенсивности этого рода событий как в развитых государствах – Англия, США, Япония, Австрия, Канада и т. п., так и в странах третьего мира – Мьянме, Зимбабве, Гвиане и т. п. Так, по данным [*Докукин, 2020*] если за последние 60 лет произошло около 120 подобных аварий, на последние 20 лет пришлось 55 из них, из которых 8 случились в 2019 г.

Количество человеческих жертв в этих случаях зачастую достигает нескольких сотен, ущерб инфраструктуре близлежащих населенных территорий исчисляется миллиардами долларов, а экологический урон окружающей среде, от миллионов кубометров токсичных отходов, которые разносятся на сотни километров водами прилегающих рек, сохраняется десятилетиями. Детальное аналитическое описание большинства из этих эпизодов приводится во многих источниках [*Докукин, 2020; Запорожченко, 2019*], здесь же достаточно будет упомянуть, что некоторые из них входят в перечень крупнейших экологических катастроф мира.

Краткий обзор проблемы

На сегодняшний день, в России насчитывается около 300 хвостохранилищ, из которых более 180 находятся в аварийном состоянии. В настоящий момент, крупнейшее на Северном Кавказе, заброшенное хвостохранилище Тырныаузского горно-обогатительного комбината, является едва ли не самым потенциально опасным объектом такого рода в стране. Изменившиеся, с момента проектировки сооружения, природно-климатические условия создали предпосылки к проявлению опасных русловых и склоновых процессов, ранее не наблюдавшихся в данной местности, что вкупе с плачевным, в настоящий момент, состоянием комплекса гидротехнических сооружений хвостохранилища создает реальную угрозу полномасштабной экологической катастрофы.

Методы

Материалы, представленные в данной работе, получены в результате аналитической проработки данных, полученных в ходе регулярно проводимых ФГБУ

«ВГИ» комплексных обследований хвостохранилища Тырныаузского горно-обогатительного комбината включающих в себя как наземные, так и аэровизуальные (при помощи вертолета и квадрокоптера) обследования гидротехнических сооружений хвостохранилища. Так же были широко использованы разновременные космоснимки различных специализированных сервисов по территории исследуемого объекта и архивные данные.

Данные

Хвостохранилище Тырныаузского горно-обогатительного комбината представляет собой скопление в устье реки Гижгит (приток р. Баксан), осевшей твердой фазы хвостов – отходов обогащения руды в виде мелкозернистой грунтовой массы, содержащей в себе около 30 разновидностей химических соединений, в том числе высокотоксичных, удерживаемых плотиной из каскада насыпных грунтовых дамб. Объем, намытых в период эксплуатации хвостохранилища с 1967 по 1997 гг., отходов составляет 118 млн м^3. Перепад высот между нижним и верхним бьефами плотины равен 168 м., абсолютная высота верхнего гребня – 1245 м. Менее чем в 1 км ниже по противоположному, правому, борту Баксанского ущелья расположено сельское поселение Былым с площадью территории 131 км^2 и населением 2052 чел. (2020 г.).

Обследуемый объект имеет 1-й класс капитальности, что определяет степень ответственности сооружения как особую, авария на котором сопряжена с катастрофическими последствиями для населенных пунктов и предприятий, а также отравлением, загрязнением водоемов и водостоков питьевого назначения.

Анализ

Основной проблемой, наряду с крайней степенью запущенности инфраструктуры в целом, остается адаптация гидротехнических сооружений хвостохранилища к изменившимся природно-климатическим условиям. Так, на момент проектирования объекта институтом «Гипроникель» (г. Ленинград) и проводившихся им же в 1972 и 1989 гг. последующих обследованиях, река Гижгит (длина – 28,7 км., площадь водосбора – 158 км^2), в створе русла которой было запроектировано сооружение, неоднократно отмечается в отчетах как «… не селеносная», исходя из чего и рассчитывались соответствующие водоотводные конструкции. Однако глобальный тренд к потеплению и обводненности климата в корне меняет ситуацию и в 2002, 2014 г. в русле р. Гижгит сходят мощные паводки в селевом режиме [*Запорожченко, 2019*]. То есть на сегодняшний день, р. Гижгит – селевой водоток! Данные обследований показывают наличие значительной массы селевых отложений 2002, 2014 г. в русле реки выше входного портала водоотводного тоннеля № 2, а также отсутствие в русле каких-либо карче удерживающих сооружений и сороудерживающей сетки на входном оголовке тоннеля, к тому же левая сторона бетонного водоприемника входного отверстия тоннеля обрушена. В случае развития негативного сценария оно мгновенно забьется карчами и грунтово-каменными массами. Проектное сечение тоннеля (2.6 × 3 м.) рассчитано на пропуск 65 м^3/с, тогда как расход паводка в селевом режиме, имевшего место в 2002 г., превышал 100 м^3/с [*Запорожченко, 2019*]. С учетом сложности обстановки и высокого уровня потенциальной опасности объекта, расчетными, по оценкам ведущих специалистов, должны приниматься расходы порядка $P_{0,1\%}$ = 270 м^3/с и $P_{0,01\%}$ = 430 м^3/с. [*Запорожченко, 2019; Запорожченко, 2004*]. Перекрытие входного оголовка водоотводного тоннеля 2, неминуемо приведет к переливу воды через отсечную плотину и выходу потока в основной пруд отстойник хвостохранилища.

Внутреннее состояние водоотводного тоннеля № 2 также вызывает опасения. Подземная бетонная конструкция тоннеля общей протяженностью 3600 м уже более 30 лет не только не ремонтировалось, но и не подвергалось сколь-нибудь серьезной инспекции соответствующих структур. По данным многочисленных предыдущих

натурных обследований [*Запорожченко, 2014; Запорожченко, 2015; Гегиев, 2018*], вероятность проседания или разрушения с завалом тоннеля чрезвычайно высока.

С прибытием паводка возможен перелив или разрушение отсечной плотины с выходом потока в водоем-отстойник (1–1,2 млн м^3). Поскольку водоотводные колодцы отстойника в настоящий момент не работают, повышение уровня воды в нем приведет к прорыву потока на пляж хвостохранилища, смыву хвостов и разрушению каскада основной плотины с образованием катастрофического селевого потока из токсичного материала складированных отходов [*Глотов, 2010*]. Во избежание подобного развития событий в 2003 г., по проекту «Севкавгипроводхоз» было начато строительство открытого водоотводного канала справа от тела основной плотины, которое не было завершено.

Входной оголовок аварийного открытого водоотводного канала, в настоящий момент, не имеет явно выраженной конфигурации. Здесь, на выходе с пляжа водоема-отстойника, контуры сечения канала размыты и теряются в естественных формах рельефа, т. е. поток может, минуя входной створ канала, выйти на поверхность пляжа отходов, размывая и переувлажняя складированную массу, и далее направиться к каскаду дамб, составляющих тело основной плотины, так же с последующим их размывом и разрушением самой плотины. Такой вариант развития событий обусловлен, в том числе, отсутствием участка отсечной дамбы, построенной в 2003 г. для отвода воды в случае аварийного переполнения основного водоема – отстойника, справа, при выходе на пляж хвостохранилища, обеспечивающего основательное сопряжение дамбы и русла канала.

Начало канала, около 300 м, пройдено в обвально-оползневых грунтах, что усугубило ситуацию образованием, после подрезки склона, оползневого массива в верхней части канала по его правому борту, перед автомобильной переправой. Рассчитанная, по составленному по материалам обследований 2022 г. ортофотоплану, площадь оползневого массива, развитие которого отчетливо прослеживается на разновременных космоснимках, превышает 30 000 м^2.

Развивающимся оползнем уже завалена значительная часть объема русла канала на протяжении около 75 м. В дальнейшем, при сходе оползня, которому может способствовать как переувлажнение грунта, в случае продолжительных или обильных осадков, так и минимальная сейсмическая активность, завал неизбежно перекроет сечение канала таким образом, что поток выйдет влево на правую оконечность каскада плотины, что в свою очередь приведет к ее размыву в этом месте.

Помимо этого, на всем протяжении водоотводного канала его русло во многих местах частично завалено грунтом и осколочными материалами пород, а высота бортов существенно разнится на различных участках. Поскольку русло открытого аварийного водосброса проходит вплотную к правой оконечности основной плотины такое положение чревато выходом потока, с критическими значениями расходов, из русла канала непосредственно на каскад дамб обвалования основной плотины и их размывом с катастрофическими последствиями. Во избежание размыва плотины отводимым потоком, необходимо существенное повышение и укрепление левого борта канала, непосредственно прилегающего к телу плотины хвостохранилища, либо возведение дополнительного вала, укрепленного по современным технологиям строительства подобных ГТС, отделяющего русло канала от каскада дамб основной плотины.

Многочисленные следы высачивания фильтрационных вод в низовом откосе имеет и сам каскад основной плотины. Это свидетельствует о том, что дренажная система не работает, а гидроизоляция отсутствует, что способствует нарушению целостности поверхности основной плотины. Совокупность таких неблагоприятных фильтрационных и деформационных процессов ведет к понижению устойчивости основания плотины, что вкупе с повышением сейсмической активности в районе расположения хвостохранилища определяет нынешнюю ситуацию как крайне опасную. То есть по своим параметрам и составу, данное основное гидротехническое сооружение хвостохранилища, в настоящий момент, не соответствует современным стандартам безопасности сооружений подобного класса. Если при его проектировании расчетная

сейсмическая активность принималось 6–7 баллов с глубиной эпицентра до 10 км, то современные требования СП 14.13330.2018 предполагают в этом случае расчетное значение не менее 10 баллов при той же глубине.

Выводы

Сложившаяся, под влиянием социально-экономических факторов, тяжелая ситуация на самом горно-обогатительном предприятии и его сателлитах во многом предопределила многие сугубо технические проблемы рассматриваемого объекта. Отсутствие у хвостохранилища собственника и / или профильной курирующей организации, а также комплексного плана по реконструкции его объектов и отлаженной системы постоянного мониторинга, обеспечиваемых поддержкой на государственном уровне, ведет к постоянному увеличению вероятности экологической катастрофы.

На сегодняшний день, ситуацию, сложившуюся на хвостохранилище Тырныаузского ГОК, следует оценивать, как критическую в связи с значительным ухудшением параметров и нынешним состоянием его гидротехнических сооружений. Сравнительный анализ данных, полученных в ходе обработки материалов обследований, со всей очевидностью показывает неуклонный рост рисков катастрофического развития событий [*Докукин, 2013*]. С учетом последствий бразильских событий 2015 г., когда паводок, насыщенный токсичными отходами, после прорыва плотины на хвостохранилище Фундан, вышел на 650 км к Атлантическому океану и отложил отходы на пляже, следует понимать, что последствия прорыва хвостохранилища Тырныаузского ГОК могут оказаться намного тяжелее. Разрушительный эффект паводочной волны будет существенно значительнее в силу намного более густой заселенности долины реки Баксан, а экологический ущерб губительно скажется на экосистемах рек Баксан и Терек вплоть до Каспийского моря [*Бортников, 2013*].

В качестве необходимых мер, направленных на улучшение ситуации или предотвращение дальнейшего ее ухудшения, следует рекомендовать:

- проведение полномасштабной инспекции всех основных элементов комплекса ГТС хвостохранилища Тырныаузского ГОК, в частности состояния водоотводного тоннеля № 2;
- проведение работ по обеспечению полноценного примыкания вала отсечной дамбы к входному створу аварийного открытого водоотводного канала хвостохранилища;
- расчистку аварийного открытого водоотводного канала и проведение противооползневых мероприятий на соответствующем участке;
- проведение работ по укреплению русла водоотводного канала, исключающих негативное воздействие отводимого потока на тело основной плотины;
- мониторинг низового откоса каскада основной плотины с целью контроля неблагоприятных фильтрационных и деформационных процессов.

Список литературы

Бортников Н.С., Богатиков О.А., Карамурзов Б.С., Гурбанов А.Г., Газзеев В.М., Докучаев А.Я., Лексин А.Б., Шаззо Ю.К., Цуканова Л.Е., Шевченко А.В., 2013. Захороненные промышленные отходы Тырныаузского вольфрамово-молибденового комбината. Вестник Владикавказского научного центра, Том 13, № 1, с. 41–53.

Гегиев К.А., Шерхов А.Х., Гергокова З.Ж., Анахаев К.К., 2018. Экологические проблемы Тырныаузского хвостохранилища на реке Гижгит. Вестник МГСУ, Том 13, Вып. 11, с. 1386–1394, https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.11.1386-1394.

Глотов В.Е., Глотова Л.П., Бульбан А.П., Митрофанов И.Д., 2010. Хвостохранилище Карамкенского горно-металлургического комбината: инженерно-геологические проблемы и причины аварийного разрушения. Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук, № 3, с. 31–39.

Докукин М.Д., Запорожченко Э.В., Знаменский Д.В. 2020. Хвостохранилища – объекты повышенной селевой опасности. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», с. 25–38.

Докукин М.Д., Черноморец С.С., Сейнова И. Б., Богаченко Е.М., Савернюк Е.А., Тутубалина О.В., Дробышев В.Н., Феоктистова И.Г., Михайлов В.О., Колычев А.Г. 2013. О селях 2011 года на северном склоне Центрального Кавказа. ГеоРиск, № 2, с. 30–40.

Запорожченко Э.В., Докукин М.Д. 2019. Об угрозе разрушения Тырныаузского хвостохранилища на р. Гижгит в Кабардино-Балкарской Республике. ГеоРиск, Том XIII, 1: с. 72–85.

Запорожченко Э.В., Докукин М.Д. 2019. Хвостохранилище на р. Гижгит в Кабардино-Балкарской Республике (Россия) и его проблемы. IX International scientific and technical conference “Moderin problems of water management, environmental protection, architecture and construction”. Tbilisi, Georgia: pp. 301–310.

Запорожченко Э.В., Докукин М.Д., 2019. Тырныаузское хвостохранилище – объект повышенного экологического риска. Устойчивое развитие горных территорий Кавказа. Коллективная монография. Том II. РАН, Москва: с. 224–237.

Запорожченко Э.В., 2019. Вглядываясь в прошедшее. РИА – КМВ, 212 с.: ил. Пятигорск: с. 30–60.

Запорожченко Э.В., 2004. Река Гижгит — источник паводковой опасности для сооружений Тырныаузского горно-обогатительного комбината (ТГОК). Вопросы повышения эффективности строительства, Сборник трудов конференции, Нальчик, 2004, Вып. 2, с. 159–169.

Запорожченко Э.В., 2004. Новые селевые опасности у г. Тырныауза. Устойчивое развитие горных территорий: проблемы и перспективы интеграции науки и образования, Материалы V Международной конференции, Владикавказ, с. 269–276.

Запорожченко Э.В., 2014. Северный Кавказ: селевые вызовы XXI века. ГеоРиск, № 3, с. 42–57.

Запорожченко Э.В., 2015. Тырныаузское хвостохранилище на р. Гижгит в Кабардино-Балкарской Республики: проблемы сохранности, устойчивости и экологической безопасности. Сборник научных трудов ОАО «Севкавгипроводхоз», Вып. 21, с. 127–38.

Weather background analysis of debris flows in southeastern Guizhou, China

Y. Gou, H.M. Gao, Y.T. Song

Qiannan Meteorological Bureau, Duyun, China, 983733200@qq.com

Abstract. In southeastern Guizhou Province, China, a devastating debris flows occurred on June 18, 2022, where entire house was swept down and washed away. Using a variety of meteorological observation data to analyze the weather background of this process, the results show that: the debris flow disaster was caused by a short period of extraordinary rainstorm. The 24h precipitation of the two heavy rain centers in the southeast of Guizhou Province was 359.2 mm and 312.5 mm, which appeared in Congjiang County and Rongjiang County, where the debris flow occurred. The rainstorm process was convergent frontogenetic rainstorm. 500 hPa short-wave trough with low level shear line and ground convergence line to provide sufficient power conditions. The low-level Southwest jet stream continues to deliver water vapor as it increases instability. The wet layer is deep and the water vapor condition is good. The specific humidity of 500 hPa, 700 hPa and 850 hPa is 6 g/kg, 11 g/kg and 16 g/kg, and the temperature dew point difference is 0–0.3°C. The temperature difference between 700 hPa and 850 hPa and 500 hPa is 15°C and 22°C. Cape is 189 J/kg. Various models, such as European Central, South China Model and Grapes_3km, have captured the rainstorm process. The rainfall forecast for central Europe is northward and the intensity is weak. Grapes_3km forecasts the center of heavy rain in Congjiang County, but the intensity is also weak, which has the best forecast effect on location and intensity.

Key words: *debris flow; weather background; heavy rainfall*

Cite this article: Gou Y., Gao H.M., Song Y.T. Weather background analysis of debris flows in southeastern Guizhou, China. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 140–146.

Анализ погодных условий формирования селевых потоков на юго-востоке Гуйчжоу, Китай

И. Гоу, Х.М. Гао, И.Т. Сун

Метеорологическое бюро Цяньнань, Дуюнь, Гуйчжоу, Китай, 983733200@qq.com

Аннотация. В юго-восточной провинции Гуйчжоу (Китай) 18 июня 2022 г. произошел разрушительный оползень, в результате которого были снесены и смыты все дома. Результаты анализа погодного фона этого процесса по данным метеонаблюдений показывают, что оползневая катастрофа была вызвана интенсивным ливнем. Количество осадков, выпавшее за сутки в двух уездах (Конгцзян и Жунцзян) на юго-востоке провинции Гуйчжоу, составило 359,2 и 312,5 мм. Здесь произошел сход селевых потоков. Ливень носил фронтогенетический характер. Коротковолновая ложбина 500 гПа с линией сдвига на низком уровне и приземной линией конвергенции обеспечивают достаточные условия для питания. Низко расположенное юго-западное струйное течение продолжает подавать водяной пар, увеличивая нестабильность. Влажный слой глубокий, и состояние водяного пара хорошее. Удельная влажность на высотах 500, 700 и 850 гПа составляет 6, 11 и 16 г/кг, а разница температур точки росы составляет 0–0,3°C. Разница температур между 700–850 и 500 гПа составляет 15 и 22°C. Мыс составляет 189 Дж/кг. Различные модели, такие как Европейская центральная, Южно-Китайская модель и Grapes_3km, зафиксировали процесс ливня. Прогноз осадков для центральной Европы – северный, интенсивность слабая. Grapes_3km

прогнозирует центр сильного дождя в уезде Конгцзян, но интенсивность также слабая, что имеет наилучший прогноз по местоположению и интенсивности.

Ключевые слова: *селевой поток, погодный фон, ливень*

Ссылка для цитирования: Гоу И., Гао Х.М., Сун И.Т. Анализ погодных условий формирования селевых потоков на юго-востоке Гуйчжоу, Китай. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 140–146.

Introduction

Guizhou is a mountainous province, the occurrence of geological disasters is especially prominent, it is a high-risk area of geological disasters in our country, the precipitation concentration is the main inducing factor of the formation of major geological disasters, the major types of geological disasters in Guizhou are mainly landslides, small-scale debris flows have occurred in Lewang Town, Wangmo County, Southwest China in the past decade. On September 6, 2017, due to heavy rainfall (186 mm), in the northern Xintun Subdistrict of Wangmo County Xintong seat and in the Jiaotong – Russia area of Lewang Town, a debris flows geological disaster occurred. The loose debris flow accumulation blocked culverts in the local highway and village road, and the traffic in some areas was interrupted, the production and living of the local people caused a serious impact, resulting in varying degrees of property losses. On August 27, 2014, a landslide occurred in the Dabo Mountain opposite the Xiaoba Formation in Yingping village, Daoping Town, Fuquan City, due to rain water immersion, about 1.4 million m^3 rock slides at a speed of 50 m/s towards the phosphate rock at the bottom of the mountain. The pit is about 30 m deep and the water in the pit is about 50,000 m^3, which forms a tsunami-like high-pressure wave and debris flow, the debris flow covered an area of nearly 1 km^2 with an average depth of nearly 5 m and a maximum depth of 50 m, forming a Landslide dam river of nearly 5,000 m^2. On June 6, 2011, in the Yaojiawangou Valley of Xiaomi Valley, Xintun Town, Wangmo County, the slope of the inner wave tree suddenly slipped and disintegrated into a clastic deposit, which was about 200 m long, 50 m wide and 4.0 m thick, the volume of the deposit is about 4.0 x 10 m. Under the action of heavy rainfall, the loose deposits were transformed into debris flows which washed out the gullies, destroyed 7 houses and buried several mu of farmland. Heavy rainfall is an important cause of debris flow in Guizhou province. In this paper, multiple meteorological observations were used to analyze a disastrous debris flow disaster in southeastern Guizhou province on June 18, 2022, the weather background of debris flow is analyzed in order to provide some scientific basis for the prediction and early warning of debris flow in Guizhou province.

Sources of information

The data used in this paper are as follows: 1 the surface data are 24-hour precipitation data and hourly precipitation data from 84 national meteorological stations in Guizhou Province, the time range is from 2000 h on June 17, 2022 to 2000 h on June 18, 2022 (same as other data). The data source is the meteorological big data cloud platform (Tianqing). 2Micaps data are 3-hour sea level pressure field and surface mapping data, 08:00 and 20:00 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa height field, temperature field, high altitude mapping data and T-lnp sounding data, the data source is micaps distributed data. 3 satellite data is the infrared channel data of Fengyun-4 geostationary weather satellite at a time interval of 15 min, and the data source is the national satellite meteorological center.

Actual characteristics of rainfall

On June 18, 2022, there were 145 stations of heavy rain, 88 stations of heavy rain and 12 stations of heavy rain along the east-west line in southern Guizhou province, the heaviest

rainstorm centers were mainly located in Congjiang County and Rongjiang County in the southeastern part of the province. The 24-hour rainfall was 359.2 mm in Qiaoxi County and 312.5 mm in Gaoma County in Congjiang City, Rongjiang Province, 96.7% of the heavy rainfall occurred near the debris flow disaster (Fig. 1).

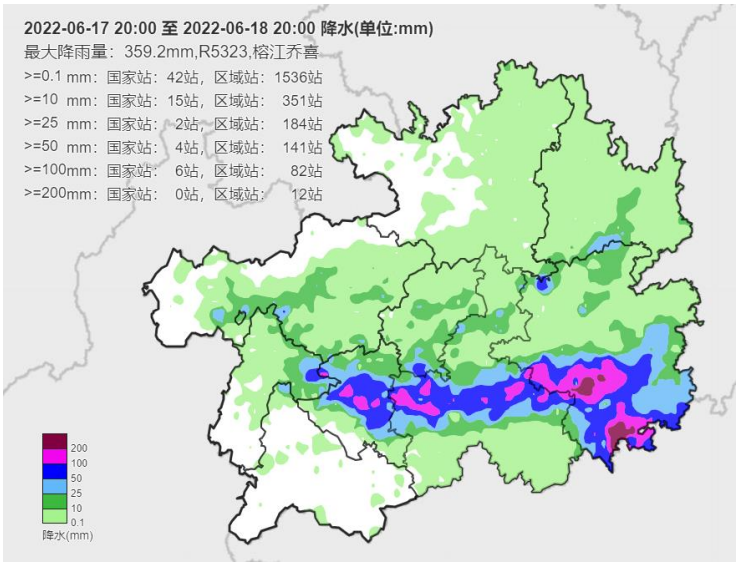


Fig. 1. Rainfall distribution map of Guizhou province on June 18, 2022

According to the hourly rainfall distribution map of the two heavy rainfall centers, the heavy rainfall lasted for a very long time, and the short-term heavy rainfall above 20 mm/h lasted for nearly 10 h, mainly occurred from 02:00 on the 18th to 11:00 on the 18th, the strongest at 05:00 to 08:00. It can be seen that not only the area around the debris flow occurred in a wide range of heavy rainfall, and heavy rainfall for a long time (Fig. 2).

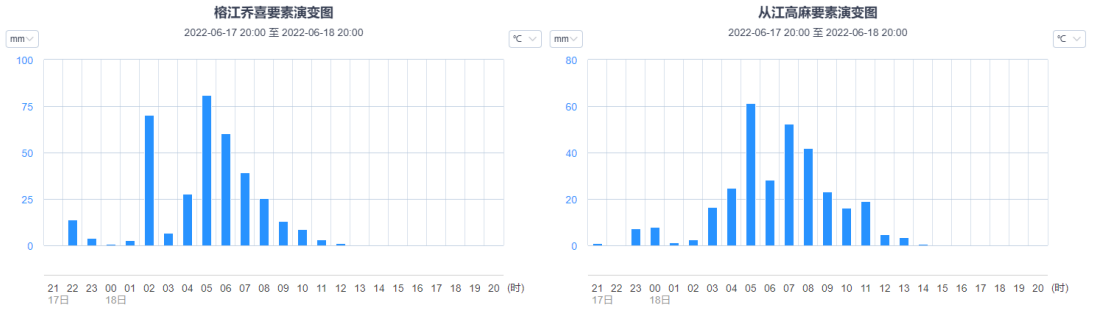


Fig. 2. Hourly rainfall distribution at 2000 h on June 17, 2022 to 2000 h on June 18, 2022

Weather situation analysis

At 20:00 on the 17th, a short-wave trough passed over Guizhou and moved to the eastern part of the province. The debris flow occurred in the updraft area in front of the trough. At 700 hPa, there was a southwest jet from central Guangxi to southern Hunan with a wind speed of 12–20 m/s, there is an 850 hPa shear line in the southeast of Guizhou Province, and a low-level southwest jet with wind speed of 12–16 m/s exists from Guangxi province to Fujian Province. There is an obvious convergence line of stationary front on the ground in the southern part of the province. 700 hPa and 850 hPa in Guizhou province are in the obvious wet area, the water vapor condition is very good, the specific humidity of 500 hPa, 700 hPa and 850 hPa are 6 g/kg, 11 g/kg and 16 g/kg respectively, the difference of temperature and dew point is 0–0.3℃ (Fig. 3).

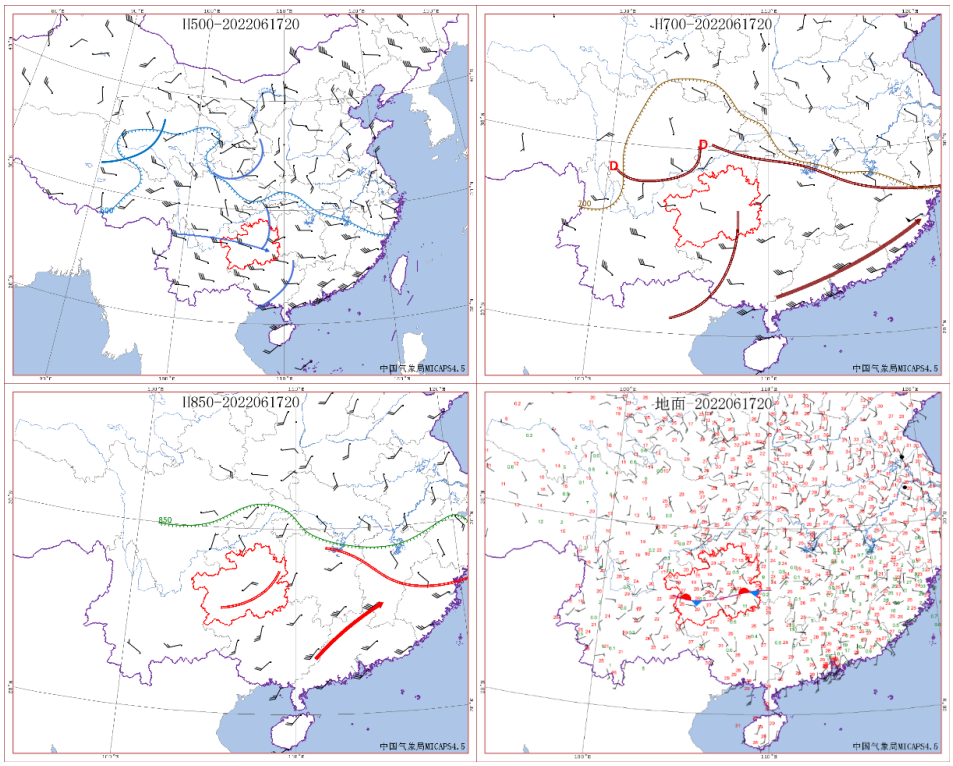


Fig. 3. 500 hPa (a), 700 hPa (b), 850 hPa (c) and ground (d) weather patterns

This process provides sufficient dynamic conditions for the front-type rainstorm of convergence line, 500 hPa short wave trough, low-level shear line and surface convergence line, the low-level southwest jet increases the instability and continuously transports water vapor.

A sounding map of Guiyang and Hechi at 2000 h on 17 June 2022 (Figs. 4 and 5) shows that both Guiyang and Hechi have a deep wet layer, while Guiyang has a deep wet layer from the ground to 550 hPa and Hechi has a deep wet layer from the ground to 350 hPa, the difference of temperature between 700 hPa and 850 hPa and 500 hPa is 15°C and 22°C, respectively. The shape of the sounding map is a narrow and long shape with obvious short-term strong precipitation. Cape in Guiyang is 189 JKG, Cape in river basin is 859 JKG, the conditions of water vapor and unstable stratification are both available. The presence of wind at the lower levels rotating clockwise with altitude and warm advection will further increase the instability of the atmospheric stratification. The height of uplift condensation and free convection is very low, which is very conducive to the occurrence and development of convective storms.

Forecast deviation analysis

The comparison between the forecast and the field shows that the European center is more accurate in predicting the 850 hPa wind field and the ground wind field at 20:00 on the 17th. The southwest jet, the shear line and the wet zone at 850 hPa are all predicted, but the location of the southwest jet was forecast to the north, the strength was forecast to be strong, the shear line was also forecast to the north, the surface front was forecast to the north.

According to the rainfall forecasts made by the European Center for many times for this heavy rain process, there has been a steady forecast of precipitation of more than an order of magnitude in the southeastern part of Guizhou Province, and the scope of the heavy rain has become bigger and bigger. The heavy rain center has continuously pushed northward and westward, has been steadily predicting. The European Center forecast of the heavy rain process is basically accurate and slightly weaker.

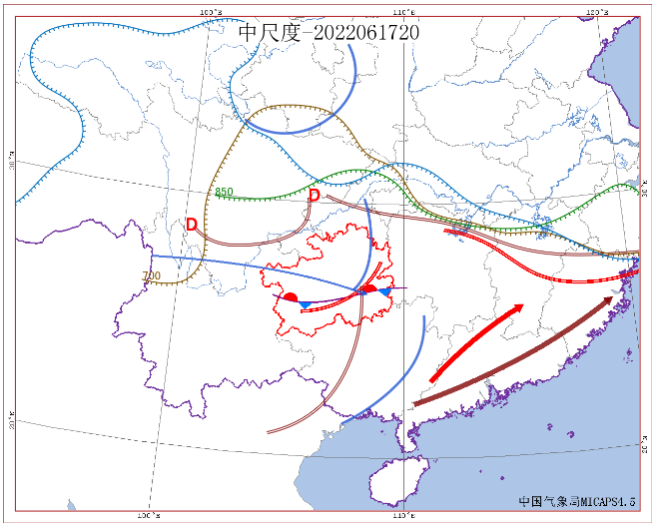


Fig. 4. Analysis at 2000 h on June 17, 2022

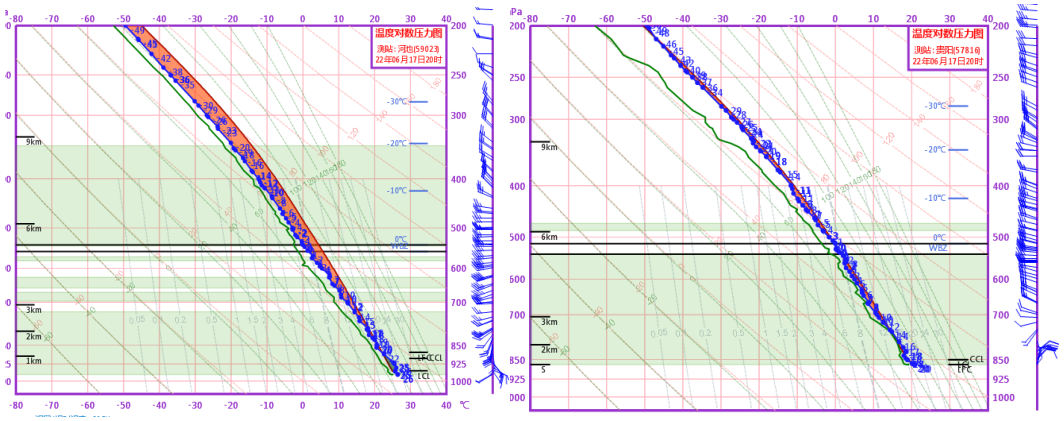


Fig. 5. Radiosonde map of Guiyang and Hechi at 2000 h on 17 June 2022

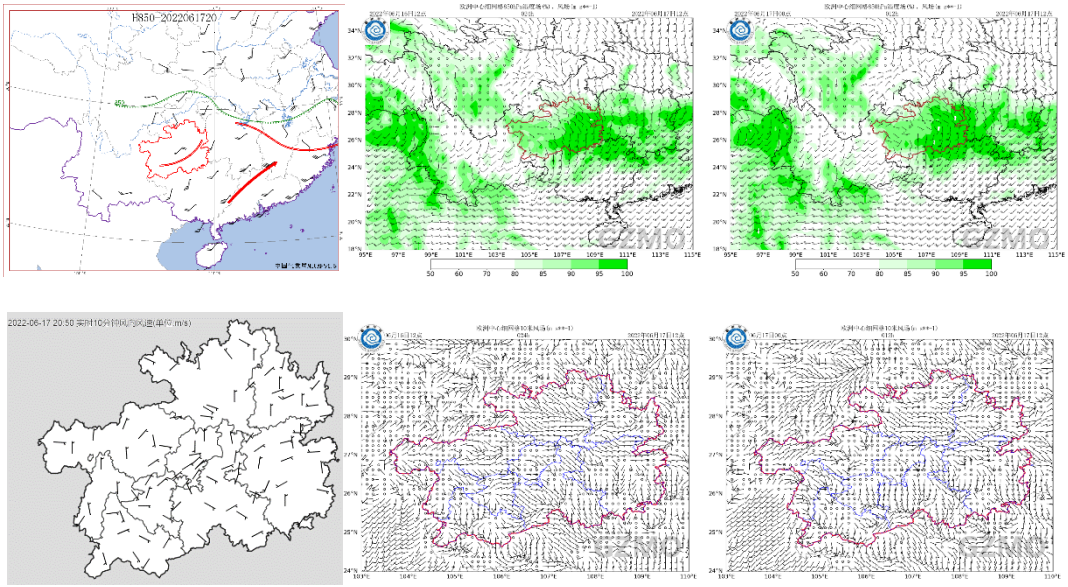


Fig. 6. 162 000 h (b, E-RRB-, 170 800 houCs Fc,Euroe Centrentre 850 hPa and ground forecast field and 172 000 h live field Da, d)

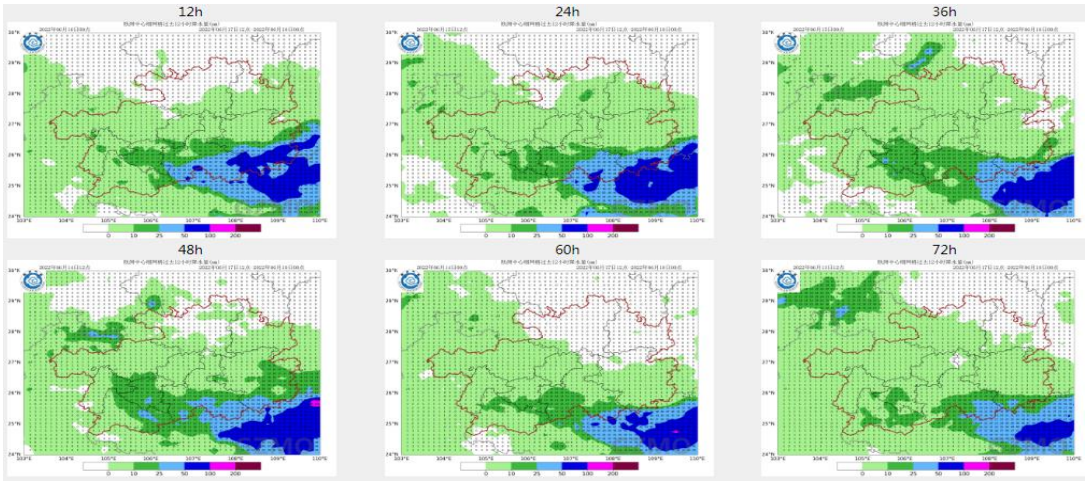


Fig. 7. European Center forecast 17th night rainfall map

The South China model has also forecast heavy rain in the central and southern parts of Guizhou Province, and the heavy rain falling area is generally consistent with the actual situation. In the central and southern parts of Guizhou province, the location of the heavy rain center on the west side is basically consistent with the actual situation, and the forecast of the heavy rain center on the east side is more westward than the actual situation, the forecast of rainstorm intensity is weak, only the magnitude of rainstorm is forecasted, and the actual situation has appeared the extremely heavy rainstorm.

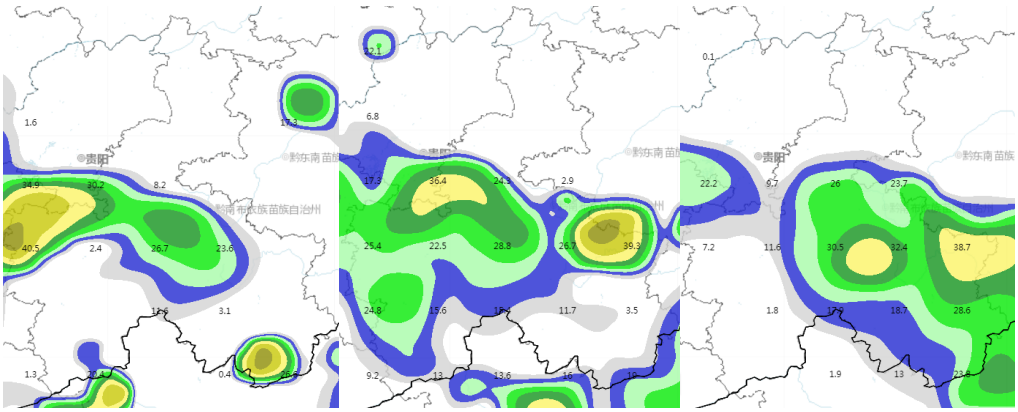


Fig. 8. South China model forecast 17th night rainfall chart

The Grapes radar combination albedo forecast also predicted the convective storm in the area east-south of the central part of the province. The forecast of the strong Echo Center in the eastern part of the province is basically consistent with the actual situation.

The European Central Fine Grid, the South China model, Grapes and other models all captured the heavy rainfall process. The European central fine grid forecasts the northern part of the heavy rainfall area and the intensity is weak. The Grapes location and intensity forecast is the best, in Congjiang County, the center of heavy rain was forecast, but the intensity was also weak.

Conclusion

1. The debris flow disaster was caused by the extremely heavy rainfall in a short time. The 24-hour precipitation of the two extremely heavy rainfall centers in the southeast of Guizhou province were 359.2 mm and 312.5 mm respectively, in Congjiang and Rongjiang counties, where the debris flows occurred.

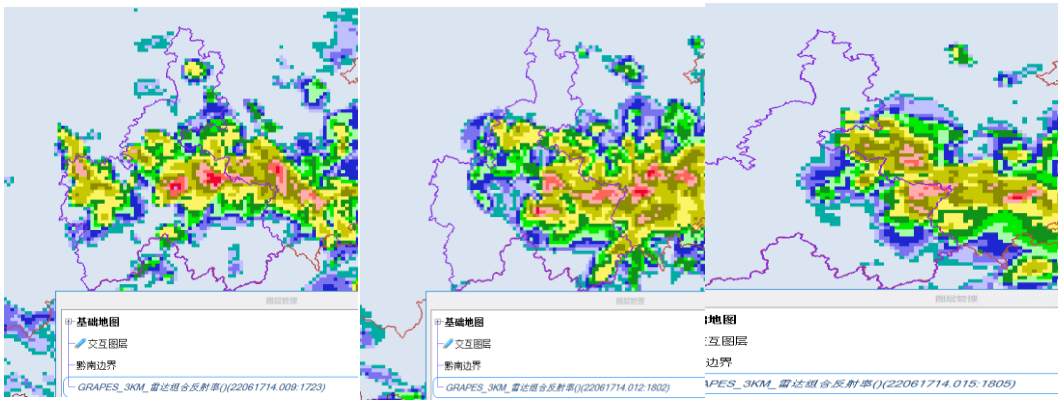


Fig. 9. Grapes Forecast 17-day night radar echo

2. This process provides sufficient dynamic conditions for the front-type rainstorm of convergence line, 500 hPa short wave trough, low-level shear line and surface convergence line, the low-level southwest jet increases the instability and continuously transports water vapor.

3. The wet layer is deep and the water vapor condition is very good. The specific humidity of 500 hPa, 700 hPa and 850 hPa is 6 g/kg, 11 g/kg and 16 g/kg respectively, and the difference of temperature and dew point is 0–0.3°C. The temperature difference between 700 hPa and 850 hPa and 500 hPa are 15°C and 22°C respectively. Cape at 189 J/kg.

4. The European Central Fine Grid, the South China model, Grapes and other models all captured the heavy rainfall process. The forecast of the European central fine grid heavy rainfall area is northward and the intensity is weak, and the location and intensity of Grapes are the best, in Congjiang County, the center of heavy rain was forecast, but the intensity was also weak.

References

LÜ Gang. Analysis of major geological disasters and their influencing factors in Guizhou. Guizhou geology, 2016,33(2): 108–112.

Hou Jiangping, Zhou Jun. Development characteristics and trend of Napa debris flow in lewang town, Wangmo County, Guizhou Province. Geology of Yunnan, 2023,42(2): 244–250.

Chin Ha-Fai, Lau Ching-Ching. Action and Revelation of landslide rescue in Fuquan, Guizhou. Hongshui River, 2022,41(5): 106–108.

Li Caixia, Ma Yu. Formation, mechanical characteristics and vulnerability of debris flow in Yaojiawan Gully, Wangmo County, Guizhou province. Science, technology and engineering, 2019,19(24): 62–67.

AI landslide susceptibility mapping and statistical interpretation in the Mediterranean coastal zone between Oued Laou and El Jebha, Morocco

H. Harmouzi[1], A. Dekayir[1], H.A. Nefeslioglu[2], M. Rouai[1], E.A. Sezer[2], C. Gokceoglu[2]

[1]Moulay Ismail University, Meknes, Morocco, dekayir@yahoo.fr

[2]Hacettepe University, Ankara, Türkiye

Abstract. Effective management of areas prone to mass movement risks, particularly in landslide-prone regions like Morocco's coastal Rif, depends heavily on prior knowledge. Creating a landslide susceptibility map is crucial before risk assessment. This study utilized an artificial neural network (ANN) classifier to analyze relevant physical factors in the Mediterranean Rif coastal zone, producing a reliable susceptibility map.

Traditionally, landslide mapping involves identifying factors contributing to hillslope instability. Despite various Geographic Information System (GIS) approaches, achieving satisfactory outcomes remains challenging due to landslides' intricate nature. This investigation developed landslide susceptibility models using a multilayer perceptron (MLP) ANN. The methodology included creating a landslide inventory map, deriving hillslope factors from geology, geomorphometry, proximity, and thematic data from satellite imagery, and constructing ANN models.

Model validation employed receiver operating characteristic (ROC) curves, with area under the curve (AUC) values surpassing 0.90, indicating high accuracy. Visual comparisons between susceptibility maps and input factor maps highlighted roads and geology's significant influence on various mass movement types (complex, slide, flow, and rockfall). Statistical analysis revealed slope gradient and geology's impact on landslide types, with specific lithologic formations like gneiss-micaschists, peridotites, schists, and flysch playing crucial roles.

The appearance of new lithologic formations not in the training database underscores other influencing factors. This study's success suggests the method's potential applicability to the entire Rif mountains, offering valuable insights for future landslide susceptibility mapping. Utilizing advanced techniques, particularly ANN classifiers, shows promise in enhancing understanding and managing landslide risks in complex terrains.

Key words: *landslide, susceptibility, artificial intelligence, Rif, Morocco*

Cite this article: Harmouzi H., Dekayir A., Nefeslioglu H.A., Rouai M., Sezer E.A., Gokceoglu C. AI landslide susceptibility mapping and statistical interpretation in the Mediterranean coastal zone between Oued Laou and El Jebha, Morocco. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 147–156.

Картографирование оползневой опасности прибрежной зоны Средиземного моря между Уэд-Лау и Эль-Джебхой (Марокко) с помощью ИИ и статистическая интерпретация результатов

Х. Хармоузи[1], А. Декайир[1], Х.А. Нефеслиоглу[2], М. Руаи[1], Э.А. Сезер[3], Дж. Гокджеоглу[2]

[1]Университет Мулая Исмаила, Мекнес, Марокко, dekayir@yahoo.fr

[2]Университет Хаджеттепе, Анкара, Турция

Аннотация. Эффективное управление территориями, подверженными рискам массовых смещений грунтов, особенно в регионах, подверженных оползням, таких

как прибрежный горный район Эр-Риф в Марокко, во многом зависит от предварительного анализа. Создание карты оползневой опасности – первоочередной этап при оценке риска. В этом исследовании использовался классификатор искусственной нейронной сети (ИНС) для анализа соответствующих физических факторов в прибрежной зоне Эр-Рифа, что позволило создать карту оползневой опасности.

Традиционно картографирование оползней предполагает выявление факторов, способствующих нестабильности склонов. Несмотря на различные подходы к использованию географических информационных систем (ГИС), достижение удовлетворительных результатов остается сложной задачей из-за комплексной природы оползней. В ходе этого исследования были разработаны модели оценки подверженности территорий оползням с использованием ИНС многослойного перцептрона (МЛП). Методология включала создание карты оползней, определение коэффициентов уклона склонов на основе их геологического и геоморфологического строения, местоположения, данных спутниковых снимков, а также построение моделей ИНС.

При проверке модели использовались ROC-кривые, при этом значения площади под кривой (AUC) превышали 0,90, что указывает на высокую точность построений. Визуальное сравнение карт оползневой опасности и карт входных факторов выявило значительное влияние дорог и геологического строения на различные типы движения масс (комплекс процессов, оползень, селевой поток и камнепад). Статистический анализ выявил влияние крутизны склонов и их геологического строения на типы оползней, при этом решающую роль играют конкретные литологические образования, такие как гнейсо-слюдистые сланцы, перидотиты, сланцы и флиш.

Появление новых литологических образований, которых нет в обучающей выборке, говорит о наличии других влияющих факторов. Результаты данного исследования позволяют говорить о потенциальной применимости метода ко всем горам Эр-Риф, что дает ценную информацию для будущего картографирования оползневой опасности. Использование передовых методов, в частности классификаторов ИНС, позволяет надеяться на улучшение понимания природы оползневых рисков и управлении ими на сложно устроенных территориях.

Ключевые слова: *оползень, восприимчивость, искусственный интеллект, Эр-Риф, Марокко*

Ссылка для цитирования: Хармоузи Х., Декайир А., Нефеслиоглу Х.А., Руаи М., Сезер Э.А., Гокджеоглу Дж. Картографирование оползневой опасности прибрежной зоны Средиземного моря между Уэд-Лау и Эль-Джебхой (Марокко) с помощью ИИ и статистическая интерпретация результатов. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 147–156.

Introduction

This work addresses the significant threat of landslides in Morocco, particularly in the Rif mountains, El Fellah et al. (1996) coast of the Bokoya between Torrès and Badis (Northern Rif), Faleh and Sadiki (2002) in the central Prerif, and Mansour (1998) in the southeast of Chaouen City, Western Rif, Morocco. Following El Kharim (2012) influenced by factors like rainfall, geology, elevation, and slope gradient. The region experiences various landslide behaviors causing damage to infrastructure and socio-economic activities. Previous studies focused on specific zones but lacked comprehensive landslide susceptibility mapping for future predictions [*Aleotti et al., 1996; Mayoraz et al., 1996*] and landslide susceptibility mapping, with conditioning factors [*Lee et al., 2001; Nefeslioglu et al., 2008*]. The current study introduces artificial neural networks, specifically multilayer perceptron (MLP), to model landslide susceptibility in the coastal area between Oued Laou and El Jebha cities. This region, prone to landslides, is also vulnerable to sea-level rise. The study emphasizes overlay analysis in urban planning, considering topography and predicting changes over time due to natural and

human factors. Land use maps derived from satellite images reveal the impact of urban development on green areas [*Cetin, 2015; Cetin and Sevik, 2016; Cetin, 2016; Cetin et al., 2018; Kaya et al., 2018*]. The research aims to develop a sustainable landscape plan by evaluating various factors like potential visitors, vegetation cover, cultural values, and topography using Geographic Information System (GIS). The study involves four stages: evaluating the study area characteristics, producing data on landslide factors, constructing ANN models for different mass movement types, and evaluating and discussing the results.

Environmental context

The study area extends along the Mediterranean coast between Oued Laou and El Jebha towns, with a width of approximately 8 km parallel to the coast (Fig. 1). Various landslides occur in this zone due to geomorphological factors, especially in areas influenced by human activities such as roads. The region is part of the internal domain of the Rif chain, encompassing the Ghomarids, Septides, and a portion of the Dorsale Calcaire unit. Geological formations, including schists, sandstone, limestone, conglomerates, and phyllites, characterize the area (Fig. 2).

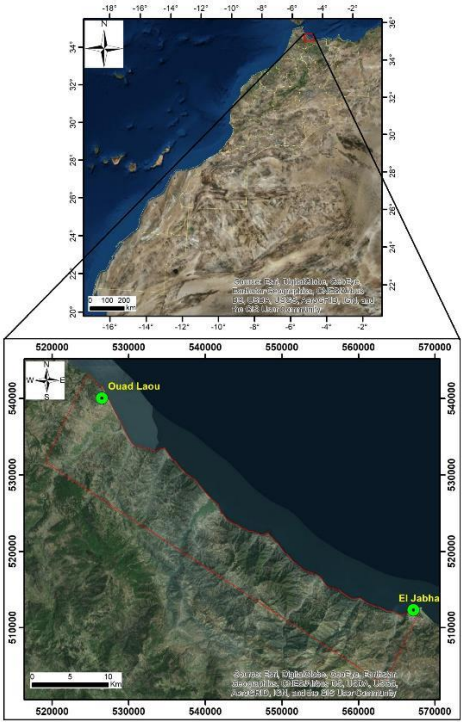


Fig. 1. Location map of the study

The Mediterranean climate in the study area is influenced by altitudes ranging from 0 to 1232 m. Rainfall is primarily caused by Atlantic perturbations (Azores) and occasionally by Mediterranean perturbations. Annual precipitation varies across locations, with Oued Laou receiving 634 mm, El Jebha 349 mm, and Al Hoceima 334.3mm. The rivers in the Rif domain exhibit a torrential regime, with low flows except in limestone regions where delayed flows may occur. Oued Laou River, the main stream, drains a catchment area of 930 km^2, with annual mean inputs directly linked to rainfall patterns.

Other significant streams include Tihissasse, with a catchment area of 622 km^2 and 825 mm mean annual precipitation; Amter, draining 295 km^2 with 805 mm mean annual rainfall; and Oûrînga, covering 510 km^2 with a mean rainfall of 790 mm. These streams exhibit varying specific flows, influenced by geological factors, catchment area characteristics, and

precipitation patterns, with their hydrological regimes explained by the dominance of specific facies and steep slopes in their watersheds.

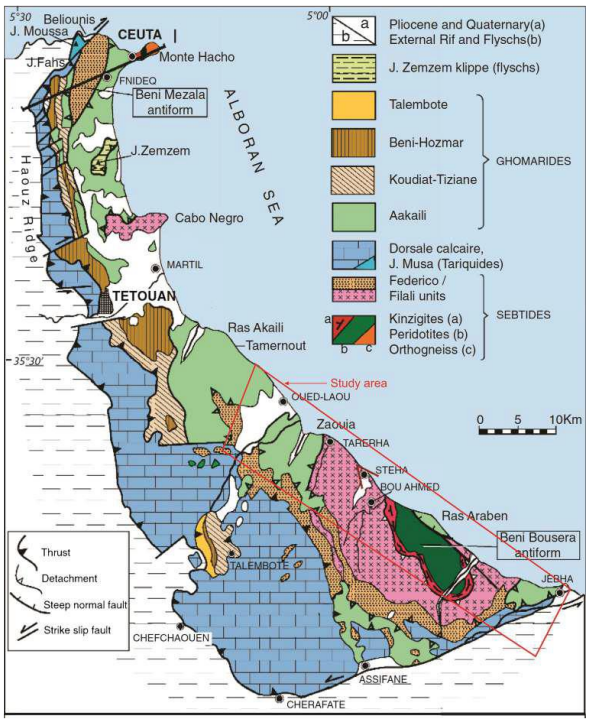


Fig. 2. Geological and structural settings of the study area in the Rif internal zones, modified after Chalouan and Michard (1990)

Method

Various methods have been explored to assess landslides, categorized into three groups: statistical approaches [*Nefeslioglu et al., 2008; Nefeslioglu and Gokceoglu, 2011*], machine learning techniques [*Bedarnik et al., 2010; Pradhan, 2010; Sezer et al., 2011; Nefeslioglu et al., 2012; San, 2014; Ada and San, 2018*], and a combination of index maps [*Turrini and Visintainer, 1998; Ayenew and Barbieri, 2005*]. Despite their differences, these methods share uncertainties stemming from limited knowledge and high variability [*Akgun et al., 2012*].

The Artificial Neural Network (ANN) approach stands out due to its several advantages. Unlike expert systems, ANN doesn't rely on predefined rules but internally identifies patterns within input data to derive output conclusions. The structure of ANN neurons, as depicted in (Fig. 3) [*Hagan et al., 1996*], involves scalar inputs multiplied by weights and offsets, forming the network output. Excitatory and inhibitory connections are determined by the sign of weights, while offsets prevent the network from outputting zero when inputs are zero. The output enters an activation function, determining the transfer rate to the next neuron.

In a Multilayer Perceptron (MLPC), a type of supervised feedforward multilayer network, signals propagate directly between layers and are modified by connection weights. MLPC, often utilizing a sigmoid function in hidden layers, can identify non-linear relationships. The backpropagation learning algorithm adjusts weights by propagating errors from output to inner layers, aiming to minimize errors. The chosen MLPC in this study had specific characteristics: an input database consisting of 20-linear-vector, and 220264 columns and a target of a linear-vector (1 × 2,202,684), Levenberg-Marquardt backpropagation for learning, gradient descent weight with time and Bayesian learning function for learning adaptation, normalized mean square as a performance function, one hidden layer with 30 neurons. The GIS

environment in ArcGIS for Desktop (v 10.6.1) and MATLAB (R2015b) facilitated data preparation and supervised classification execution.

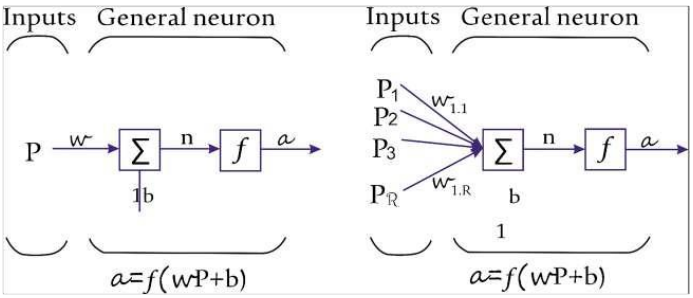


Fig. 3. Schematic model of an individual neuron with an input signal (left) and with multiple signals (right inputs) [*Hagan et al., 1996*]

Analysis and results

The multilayer neural network algorithm processed input and output data, allocating 70% for learning, 15% for testing, and 15% for validation. To assess the reliability of landslide susceptibility models (Figs. 4*a*, 5*a*, 6*a*, 7*a*), performance curves indicating error gradients, regression lines for cross-checking, and ROC curves for spatial model performance were examined. The ROC curve's area under the curve (AUC) served as an indicator of spatial model performance (Figs. 4*d*, 5*d*, 6*d*, 7*d*), with values above 0.90 for all landslide types, confirming acceptable accuracies. Different types of landslide susceptibility models were constructed, each exhibiting normal performance curves (Figs. 4*c*, 5*c*, 6*c*, 7*c*), except for the flow class, suggesting potential overfitting. Regression curves indicated close alignment between outputs and targets, with R values exceeding 0.90 during learning, validation, and testing phases, indicating well-fitted models (Figs. 4*b*, 5*b*, 6*b*, 7*b*). AUC values above 0.90 for all landslide types further validated the models' accuracy.

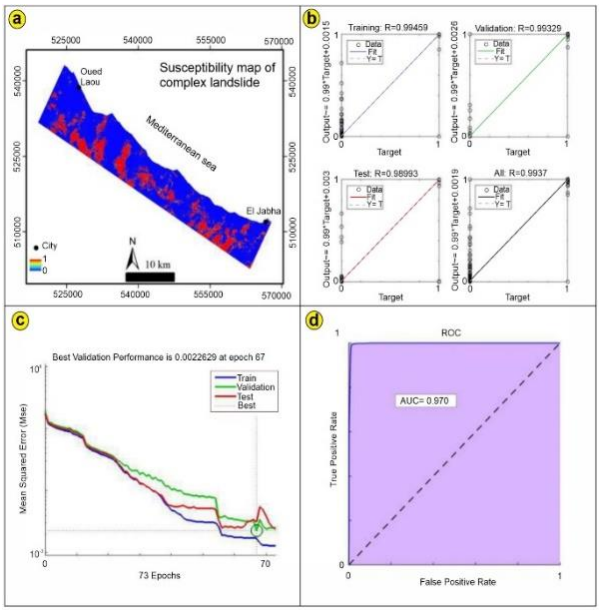


Fig. 4. Susceptibility map of complex landslide (a). Regression error curves (b). Performance curves (c). ROC curve (d)

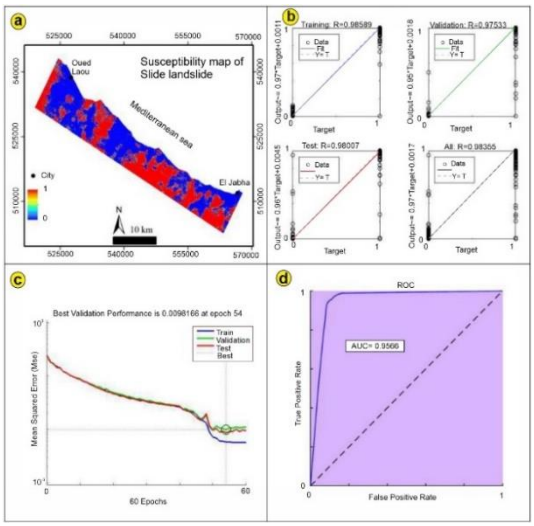


Fig. 5. Susceptibility map of slide (a). Regression error curves (b). Performance curve (c). ROC curve (d)

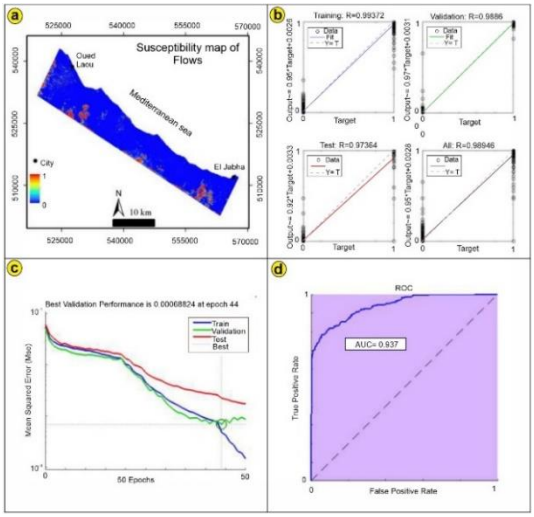


Fig. 1. Susceptibility map of flow (a). Regression error curves (b). Performance curves (c). ROC curve of flows (d)

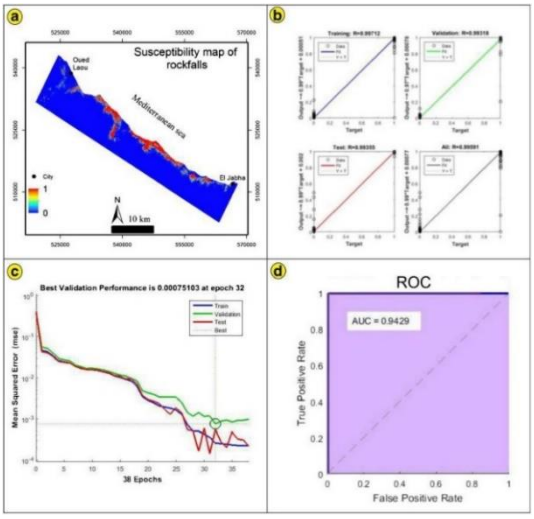


Fig. 2. Susceptibility map of rockfall source area (a). Regression error curves (b). Performance curves (c). ROC curve (d)

Rockfall events in the western part of the Oued Tihissasse valley are linked to the main road's location and steeper slope gradients (Fig. 8*a*). The mean slope gradient is 22° with a standard deviation of 10.4°, and rockfalls generally occur in slopes ranging from 11.6 to 32.4°. The prediction of rockfall source areas indicates a prevalence in gneiss-micaschists (2.9% of the total study area) and peridotites (1.3% of the study area) The landslide susceptibility model focused on rockfall events highlighted areas along the road network, logically linked to increased slope gradients caused by road construction. Landslide susceptibility mapping shows a different distribution, with predicted slides mainly in the middle, southeast, and northwest parts of the study area (Fig. 8*b*), occurring in slopes between 13 and 31°. Complex landslides are predicted at medium and high altitudes, primarily on gneiss-micaschists (6% of the study area) and schists (4.6% of the total area). These findings align with field observations, highlighting gneiss-micaschists as the formations where complex slides predominantly occur. Flows (Fig. 8*d*) are limited and occur in zones with weathered schist, gneiss-micaschists, and flysch with slope gradients between 12.3 and 29.7°.

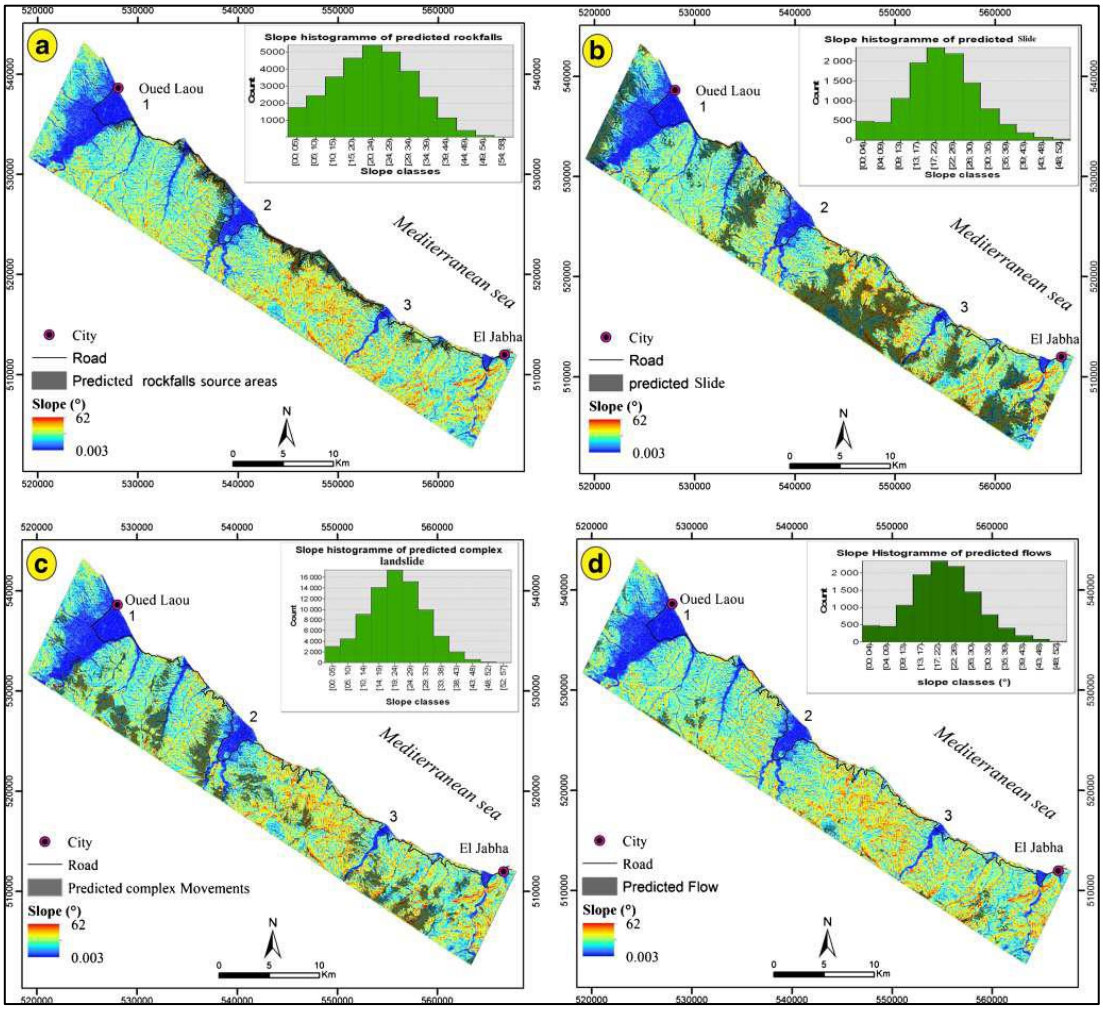


Fig. 8. Map showing the superposition of the predicted maps on the slope gradient map: a – rockfall, b – slides, c – complex slides, d – flow. (1) – Oued Laou valley, (2) – Tihissasse valley, (3) – Amter valley

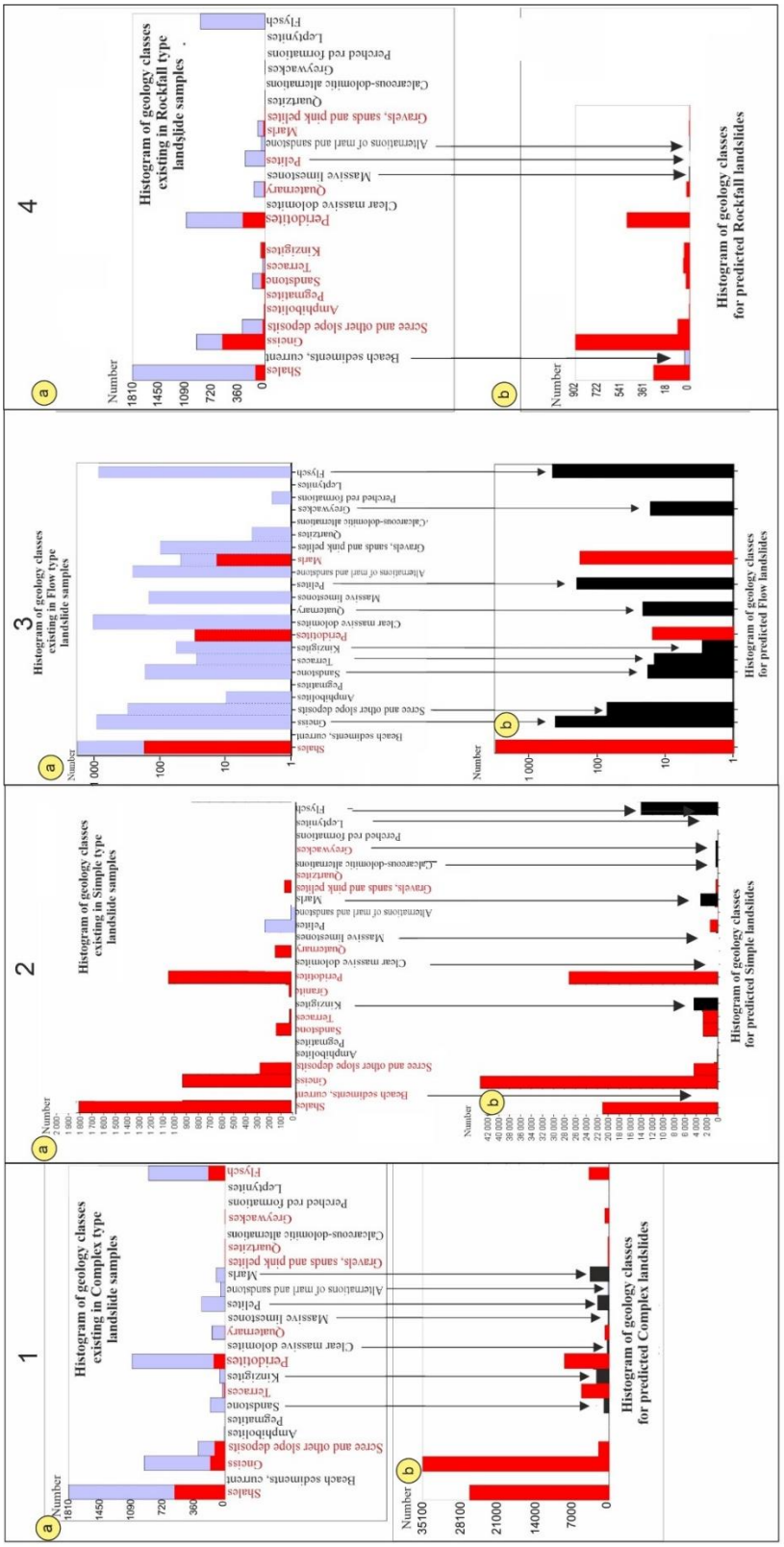


Fig. 3. Map showing the superposition of geological map: 1) complex slides, 2) slide, 3) flow slide, 4) rockfall

Geologically, rockfall source areas mainly occurred in gneiss-micaschists and peridotites (Figs. 9, 4*a*, *b*), emphasizing the impact of hard formations on rockfall occurrences. In contrast, the landslide susceptibility map for slides showed a different spatial distribution, predominantly

located outside valleys in the central, southeast, and northwest parts of the study area. Slides were associated with gneiss-micaschists, peridotites, schists, and flysch (Figs. 9, 2*a*, *b*), and complex slides concentrated in medium- and high-altitude zones, occurring on gneiss-micaschists, schists, and peridotites (Figs. 9, 1*a*, *b*). Flows exhibited a negligible area, limited to weathered schist, gneiss-micaschists, and flysch, associated with specific slope gradients (Figs. 9, 3*a*, *b*). Overall, the study highlighted the influence of slope gradient and geology on landslide types, with gneiss-micaschists, peridotites, schists, and flysch playing crucial roles. The appearance of several lithologic formations which were not in the training database, as new formations of occurrence of predicted landslides especially flow type is a fact there is other factors influencing the occurrence.

The study concluded that the Artificial Neural Network (ANN) method demonstrated high prediction capacity, particularly for data-scarce regions. However, limitations such as the need for extensive databases and model retraining in different regions were acknowledged. Expert systems were considered an alternative, but their prediction capacities were deemed lower than ANN models. The study emphasized the ongoing need to investigate landslide susceptibility models, especially in data-scarce regions, using both data-driven methods and expert systems to enhance prediction capabilities at regional scales.

Conclusion

In conclusion, this study employed morphological analysis, GIS analyses, and fieldwork to create a comprehensive database for implementing an ANN algorithm of the MLPC type. The primary objective was to predict landslide occurrences for various landslide types. Although landslides impact only about 1.22% of the total region, their substantial influence on anthropogenic activities, particularly roads, underscores the necessity for producing landslide susceptibility maps to guide appropriate land use planning. The implementation of the algorithm involved 20 data vectors, and the models demonstrated high predictive accuracy, as indicated by AUC values exceeding 0.90 on the ROC curve. Validation, achieved through a comparison of inventory and susceptibility maps, highlighted a strong correlation between landslides and high susceptibility values. The study identifies the region's heightened susceptibility to slides, complex movements, rockfalls, and a slight vulnerability to flows. The statistical study shows the influence of slope gradient and geology on landslide types, with gneiss-micaschists, peridotites, schists, and flysch playing crucial roles. The appearance of several lithologic formations which were not in the training database, as new formations of occurrence of predicted landslides especially flow type is a fact there is other factors influencing the occurrence.

The landslide susceptibility maps generated through the ANN algorithm offer reliable insights applicable in landscape management, regional risk assessment, and remediation strategies. Effective planning and mitigation measures can be implemented by considering these maps, particularly in relation to main roads and villages. For future endeavors, it is recommended to extend the production of landslide susceptibility maps to cover all Rif mountains, employing the back-propagation ANN algorithm.

References

Ada M, San BT (2018) Comparison of machine-learning techniques for landslide susceptibility mapping using two-level random sampling (2LRS) in Alakir catchment area, Antalya, Turkey. Nat Hazards 90: 237–263

Akgun A, Sezer E, Nefeslioglu HA, Gokceoglu C, Pradhan B (2012) An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm. Comput Geosci 38(1): 23–34

Aleotti P, Balzeli P, De Marchi D (1996) Le reti neurali nella valutazione della suscettibilita' da frana. Geologia tecnica e ambientale 4: 37–47

Ayenew T, Barbieri G (2005) Inventory of landslides and susceptibility mapping in the Dessie area, northern Ethiopia. Eng Geol 77: 1–15

El Fellah B, Azzouz O, Assebriy L (1996) Sikha Asfalou; exemple de glissement de terrain littoral sur la côteméditerranéenne des Bokoya entre Torrès et Badis, Rif, Maroc. – ORSTOM, réseau érosion, 16 p

Cetin M (2015) Evaluation of the sustainable tourism potential of a protected area for landscape planning: a case study of the ancient city of Pompeipolis in Kastamonu. Int J Sust Dev World 22(6): 490–495

Cetin M (2016) Sustainability of urban coastal area management: a case study on Cide. J Sustain For 35(7): 527–541

Cetin M, Sevik H (2016) Evaluating the recreation potential of Ilgaz Mountain National Park in Turkey. Environ Monit Assess 188 (1): 52

Cetin M, Sevik H, Canturk U, Cakir C (2018) Evaluation of the recreational potential of Kutahya urban forest. Fresenius Environ Bull 27(5): 2629–2634

MansourM (1998) Geodynamic processes and cartography of ground movements in the area of Chefchaouen (District of Bouhalla-Amtrass). Application to the stabilization of main road Nb: 39. Western Rif, Morocco. Thèse de doctorat, université Paris-Diderot (Paris 7)

El KharimY (2012) Rasgos geológicos de la inestabilidad de laderas en la región de Tetuán (Rif septentrional, Marruecos). Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección geológica, ISSN 0583-7510, Tomo 106(1): 39–52

Kaya E, Agca M, Adiguzel F, Cetin M (2018) Spatial data analysis with R programming for environment. Hum Ecol Risk Assess. https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1470896

Lee S, Ryu J, Min K, Won J (2001) Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS ’01, IEEE 2001 International 5:2364–2366

Mayoraz F, Cornu T, Vuillet L (1996) Using Neural networks to predict slope movements. Proc. VII Int. Symp. on Landslides, Trondheim, June 1966, 1. Balkema, Rotterdam, pp 295–300

Nefeslioglu HA, Duman TY, Durmaz S (2008) Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). Geomorphology 94 (3–4): 401–418

Nefeslioglu HA, Gokceoglu C (2011) Probabilistic risk assessment in medium scale for rainfall induced earthflows: Catakli catchment area (Cayeli, Rize, Turkey). Mathematical Problems in Engineering Article ID 280431. https://doi.org/10.1155/2011/280431

Nefeslioglu HA, San BT, Gokceoglu C, Duman TY (2012) An assessment on the use of Terra ASTER L3A data in landslide susceptibility mapping. Int J Appl Earth Obs Geoinf 14: 40–60

Nefeslioglu HA, Sezer E, Gokceoglu C, Bozkir AS, Duman TY (2010) Assessment of landslide susceptibility by decision trees in the metropolitan area of Istanbul, Turkey. Mathematical Problems in Engineering Article ID 901095 (https://doi.org/10.1155/2010/901095)

Evaluating earthquake-induced landslide potential under different scenarios using empirical landslide fragility model – A case study on Taiwan

M.H. Hsieh

China University of Technology, Taipei, Taiwan, China, hsiehmh.fcu@gmail.com

Abstract. An earthquake with a magnitude of M_w = 7.0 or greater occurs in Taiwan and its neighboring ocean areas every 2.5 years. Earthquakes may trigger landslides, leading to unstable soil and sand disasters. The study aims to investigate the potential widespread slope landslides that may follow catastrophic earthquakes. The research employs landslide fragility analysis to evaluate the probability and scope of landslides for different earthquake magnitudes. Furthermore, the assessment of slope landslide potential was conducted using the regional slope landslide assessment database, considering 5 distinct scenarios for the protection faults in the study area. The study revealed significant differences in peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV). In areas with high seismic activity, PGV emerges as a more sensitive and indicative factor of slope landslides. Thus, PGV is deemed more appropriate as an indicator of earthquake-induced landslides, aiding in the identification of high-risk zones post-earthquakes. Moreover, earthquake-induced landslides were notably more frequent following earthquakes of magnitude Mw = 7.5. The findings of this research can be utilized for various disaster prevention purposes and can serve as a valuable resource for earthquake disaster prevention and mitigation strategies in watershed regions.

Key words: *earthquake, landslide fragility, probability model, earthquake magnitude, scenario analysis*

Cite this article: Hsieh M.H. Evaluating earthquake-induced landslide potential under different scenarios using empirical landslide fragility model – A case study on Taiwan. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 157–165.

Оценка вероятности схода оползней, вызванных землетрясениями, при различных сценариях с использованием эмпирической модели поведения оползней на примере Тайваня

М.С. Сие

Китайский технологический университет, Тайбэй, Тайвань, Китай, hsiehmh.fcu@gmail.com

Аннотация. Землетрясения с магнитудой M_w = 7,0 или выше происходят на Тайване и в соседних районах каждые 2,5 года. Они могут вызывать оползни, что приводит к нестабильности грунтов. Цель исследования – изучить вероятность формирования оползней, которые могут возникнуть после катастрофических землетрясений. Для этого испльзовался анализ поведения оползней для оценки вероятности их схода и масштабов при различных магнитудах землетрясений. Оценка проводилась с использованием региональной базы данных с учетом пяти различных сценариев для разломов в районе исследования. Были выявлены значительные различия в пиковых ускорениях (PGA) и скоростях (PGV) грунта. В районах с высокой сейсмической активностью PGV оказывается более чувствительным и показательным параметром для оползней на склонах, а потому считается более предпочтительным для исследования сейсмогенных оползней и помогает выявлять зоны повышенного

риска после землетрясений. Более того, установлено, что сейсмогенные оползни происходили значительно чаще после землетрясений с магнитудой M_w = 7,5. Результаты данного исследования могут быть использованы в различных целях для предотвращения стихийных бедствий и послужить ценным ресурсом для стратегий предупреждения и смягчения последствий землетрясений в горных регионах.

Ключевые слова: *землетрясение, потенциал оползней, вероятностная модель, магнитуда землетрясения, анализ сценариев*

Ссылка для цитирования: Сие М.С. Оценка вероятности схода оползней, вызванных землетрясениями, при различных сценариях с использованием эмпирической модели поведения оползней на примере Тайваня. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 157–165.

Introduction

Earthquakes occur frequently in Taiwan due to its location at the convergence of the Philippine Sea and Eurasian plates in a seismically active region. This geographical positioning often leads to severe disasters in mountainous areas. Apart from causing structural damage, strong earthquakes pose a significant risk of slope failure. However, accurately predicting earthquakes using current technology remains a formidable task, and the physical processes that trigger slope failures are highly intricate. Consequently, forecasting, alerting, and assessing the extensive slope hazards directly induced by earthquakes is challenging. The Chi-Chi earthquake on September 21, 1999, with a magnitude of 7.6, activated the Chelongpu faults, destabilizing vulnerable geological formations and resulting in widespread calamities. Given these geohazard complexities, conducting assessments of slope risks is imperative for regions with elevated susceptibility to such hazards.

The analysis of factors that influence landslides triggered by seismic events is notably intricate. Consequently, evaluations of slope hazards associated with earthquakes necessitate the consideration of multiple risk elements. Nevertheless, the complexity and uncertainty stemming from environmental variables, coupled with insufficient data, represent two key limitations impeding the advancement of landslide assessment frameworks [*Ozturk et. al., 2016*]. Traditionally, the evaluation of slope susceptibility relied on models that classified regions based on potential triggers like seismic activity or precipitation [*Dias et. al., 2021; Hodasova and Bednarik, 2021*]. However, empirical post-earthquake studies have revealed instances of diverse geohazards manifesting on slopes with comparable geographical and environmental characteristics. This variability introduces significant uncertainty into slope landslide assessments. Hence, it is imperative to incorporate the diversity of environmental factors into slope vulnerability models to enhance the dependability of assessment outcomes.

This study introduces a methodology for evaluating post-earthquake slope landslides using landslide fragility curves. These curves indicate the probability of landslides occurring after an earthquake and can be applied for landslide assessment and scenario simulation post-earthquake events. The fragility curves are established based on historical data of earthquake-induced landslides, making them more comprehensive, reliable, and realistic for earthquake scenario modeling and evaluation. The research classifies slopes into 12 categories based on key geological factors and utilizes a dataset of 921 earthquakes to develop landslide fragility curves, with PGA and PGV as the triggering factors [*Hsieh et. al., 2023*]. The research employs five earthquake events in Taiwan to replicate post-earthquake landslide scenarios and subsequently compares their characteristics and potential for practical implementation in earthquake assessments. The findings of the research can be utilized for the real-time assessment of prospective seismic occurrences and for scenario modeling in the context of hypothetical earthquakes. As a result, they can serve multiple disaster prevention objectives and provide a basis for earthquake prevention and mitigation strategies in the basin region.

Methods

Landslide fragility analysis

The analysis of landslide fragility is a probabilistic model used for slope risk assessment. It assesses the probability of landslides occurring based on factors such as Peak Ground Acceleration (PGA), Peak Ground Velocity (PGV), Peak Ground Displacement (PGD), and other seismic indicators. Seismologists have assumed that the log-normal distribution of the ground motion factor represents the rate of damage [*Shinozuka et. al., 2000; Hsieh et. al., 2013*]. In this study, the curve representing this distribution is defined by two parameters, the mean (μ) and standard deviation (σ), for a random variable, a. These dual parameters are calculated and then inserted into the cumulative distribution function to determine the probability distribution of earthquake-induced landslides as follows:

$$F_x(a;\mu,\sigma) = \frac{1}{2}\left(1 + erf\left[\frac{\ln a-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right]\right), \quad (1)$$

$F_x(a)$ is the cumulative distribution function of the log-normal distribution, and erf is the Gaussian error function. The parameters (μ, σ) of the fragility function are solved using the MLE method, continuing the work of *Shinozuka et al*., the maximum likelihood function $L(a)$ can be shown as follows:

$$L(a) = \prod_{n=1}^{K}[F(a)]^{x_n} \cdot [1 - F(a)]^{1-x_n}. \quad (2)$$

Here, L(a) is a function of two parameters (μ, σ), where a is a random variable (i.e. seismic indicator), K is the total number of slopes, and the value of x_n is 0 or 1. While a landslides occurred, x_n =1; otherwise, x_n =0. $F(a)$ is the standardized log-normal distribution, as shown as follows:

$$F(a;\mu,\sigma) = \Phi\left[\frac{\ln\left(\frac{a}{\mu}\right)}{\sigma}\right]. \quad (3)$$

To obtain the extreme value of the maximum likelihood function, the two parameters (μ, σ) must satisfy the following equations:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \sigma} = \frac{\partial \ln L}{\partial \mu} = 0. \quad (4)$$

Landslide fragility curves. Slope typologies

The slopes are classified into 12 categories based on their geographic characteristics, such as geology, slope sensitivity, and gradient. Geology, also known as lithology, is divided into two categories: G1 (dense soil and soft rock) and G2 (hard and brittle rock). Slope sensitivity is categorized into two groups: A1 (weak) and A2 (strong). The slope gradient is classified into three categories: S1 (gentle), S2 (medium), and S3 (steep). Each category of slope is characterized by distinct geologic features, which play a role in determining the probability of landslides. Slope sensitivity refers to the susceptibility of the slope surface to collapse, influenced by factors such as the seismic source direction, earthquake wave direction, and slope orientation [*Lin et.al., 2020*].

Fragility curves

Based on the empirical landslide data associated with different slope types during the 921 earthquakes, the dual parameters of the fragility function can be ascertained through Equation (4). The initial phase involves the creation of a seismic event database encompassing

diverse slope categories. Subsequently, utilizing the Maximum Likelihood Estimation (MLE) technique, the median and standard deviation values are computed for each classification cohort. The ultimate outcomes, comprising the mean and standard deviation for individual slope types, are delineated in Tables 1 and 2. These tables present the outcomes concerning PGA and PGV as seismic variables, respectively. The quantity of slope units in the tables denotes the quantity of slopes scrutinized within each slope type of slope database.

Table 1. The dual parameters for 12 groups of slope types for PGA factor

Group number	Number of slope units	Median	Standard deviation	Data range (cm/s^2)	
G1A1S1	261	0.952	0.681	250.00 to	474.48
G1A1S2	131	0.771	0.581	250.00 to	476.34
G1A1S3	116	0.683	0.498	250.00 to	480.94
G1A2S1	262	1.035	0.734	250.00 to	473.17
G1A2S2	67	0.878	0.662	250.00 to	462.68
G1A2S3	63	0.789	0.598	250.00 to	484.24
G2A1S1	1498	0.496	0.128	250.00 to	592.74
G2A1S2	553	0.482	0.118	250.00 to	573.98
G2A1S3	552	0.468	0.112	250.00 to	558.90
G2A2S1	1354	0.525	0.164	250.00 to	601.62
G2A2S2	474	0.521	0.152	250.00 to	595.41
G2A2S3	543	0.518	0.139	250.00 to	585.77

Table 1. The dual parameters for 12 groups of slope types for PGV factor

Group number	Number of slope units	Median	Standard deviation	Data range (cm/s)	
G1A1S1	261	0.836	0.644	50.00 to	88.75
G1A1S2	131	0.700	0.559	50.00 to	94.73
G1A1S3	116	0.573	0.487	50.00 to	101.50
G1A2S1	262	1.061	0.750	50.00 to	88.51
G1A2S2	67	0.926	0.686	50.00 to	92.02
G1A2S3	63	0.855	0.629	50.00 to	102.20
G2A1S1	1498	0.431	0.120	50.00 to	108.59
G2A1S2	553	0.418	0.111	50.00 to	111.87
G2A1S3	552	0.406	0.105	50.00 to	115.67
G2A2S1	1354	0.456	0.154	50.00 to	110.21
G2A2S2	474	0.452	0.143	50.00 to	116.04
G2A2S3	543	0.450	0.131	50.00 to	121.23

The cumulative probability distribution for each slope type can be graphed based on the dual parameters of the 12 typologies of fragility functions. This graphical representation, depicted in Figs. 1 and 2, is commonly referred to as the landslide fragility curve. These curves delineate the probability of landslides occurring on different types of slopes at varying levels of seismic intensity. Within the figures, landslide fragility curves are displayed for four categories of geomorphic factors, categorized by the slope gradient factor, to contrast the probability of landslides under different gradient conditions. The disparity in landslide occurrence rates across different slope types is prominently observable in the figures. Particularly, the discrepancy between geology types G1 and G2 is more pronounced, while the variance in gradient conditions is less notable for the G2 geology type.

Earthquake-induced landslide scenarios

In this study, the changes and effects of post-seismic landslides were discussed at different earthquake magnitudes. Five faults were selected to evaluate the landslide volume in Taiwan: the Shanjiao Fault, the Chelongpu Fault, the Chaozhou Fault, the Chishang Fault, and the Chukou Fault. These five faults are located throughout Taiwan and are representative of the geological characteristics of regional faults. An earthquake with a magnitude of 7.1 to 7.8 was selected for the simulation because the magnitude of earthquake-induced slope failures necessitates a sufficiently strong earthquake.

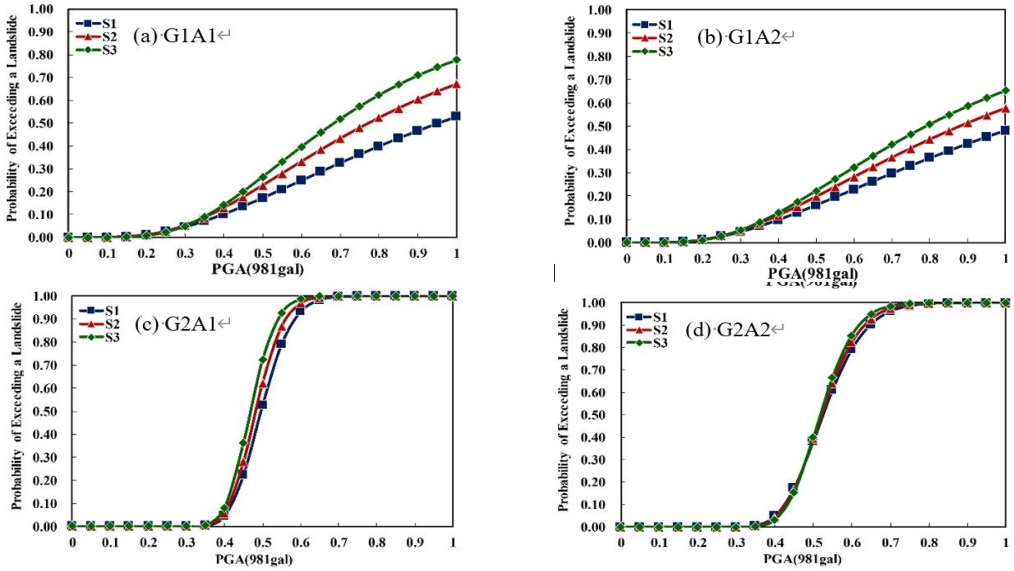


Fig. 1. Landslide fragility curve with (PGA factor) comparison of gradient conditions S1, S2, and S3.

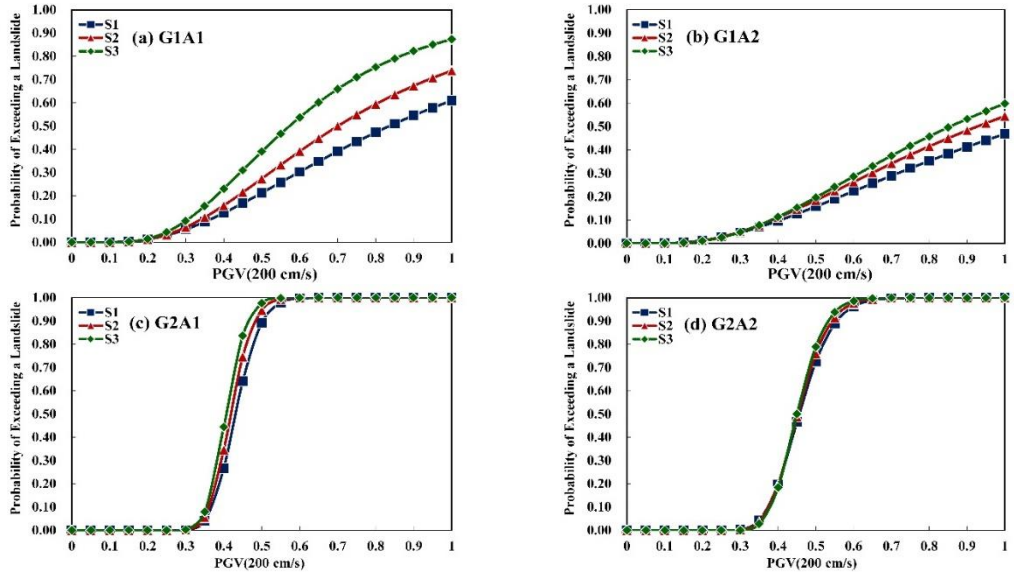


Fig. 2. Landslide fragility curve (PGV factor) comparison of gradient conditions S1, S2, and S3

The slope landslide assessment model utilizes equation (1) to compute the collapse probability value of a specific type of slope under seismic conditions, representing the probability of landslide. In this study, slope landslide is defined as either the failure rate exceeding 5% or the failure extending to a specific horizontal projected area. In such instances, the anticipated collapse loss can be delineated within a defined scope. When the surface seismic

activity surpasses a threshold value (PGA ≥ 250 cm/s2; PGV ≥ 50 cm/s), the minimum achievable collapse area (AL_{min}) for a slope unit is determined.

$$AL_{min} = 0.05 \times A_{su}. \quad (5)$$

In the above equation, A_{su} represents the effective area of the slope unit. The maximum potential collapse area (AL_{max}) is calculated as follows:

$$AL_{max} = \mathrm{V} \times A_{su}. \quad (6)$$

Results and discussion

The results of the landslides assessment with PGA as a factor are shown in Table 3, and the change in landslide area is depicted in Fig. 3 to Fig. 4. Similarly, the results of the collapse assessment with PGV as a factor are presented in Table 4, and the change in landslide area is illustrated in Fig. 5 to Fig. 6. From the table, it can be seen that the landslide area is higher when PGA is the factor, while it is lower when PGV is the factor.

Table 3. The results of PGA as a factor for different earthquake magnitudes

Fault	Shanjiao		Chelongpu		Chaozhou		Chishang		Chukou	
Mag.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
7.1	23	1486	14	3612	54	6260	82	4388	13	2604
7.2	34	1857	22	4623	74	7542	112	5444	19	3161
7.3	50	2335	35	5915	102	8996	155	6718	27	3844
7.4	72	2947	67	7550	143	10682	217	8255	38	4705
7.5	102	3700	110	9602	196	12630	299	10129	53	5753
7.6	135	4610	181	12103	257	14876	409	12383	76	7017
7.7	176	5703	277	15119	338	17375	540	15048	110	8520
7.8	223	6927	410	18703	440	20190	708	18154	153	10257

Unit: hectare.

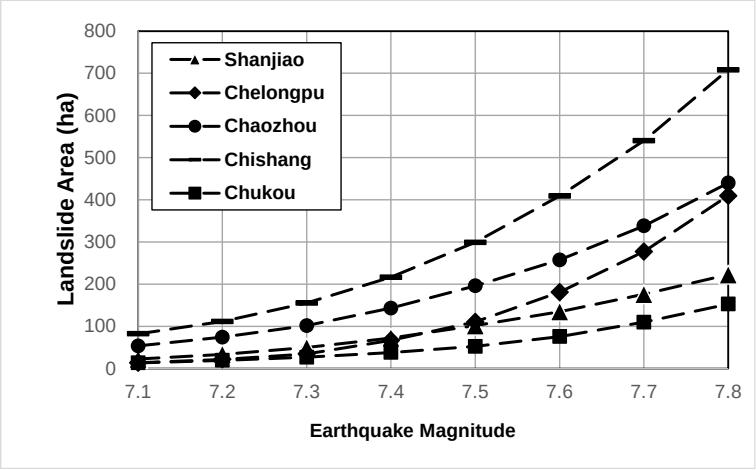


Fig. 3. Minimum landslide area of different magnitudes for PGA factor

For the PGA factor, the minimum landslide area at magnitude 7.1 is less than a hundred hectares, and the maximum landslide area can be several thousand hectares. In contrast, the minimum landslide area at magnitude 7.8 is more than a hundred hectares, and the maximum landslide area is close to 20,000 hectares. Overall, the landslide area increases with the magnitude, and the rate of increase is slower than that of the PGV factor. Specifically, the growth in maximum landslide area is roughly linear. While there are variations in the collapse characteristics of the faults, they typically exhibit similar patterns of increase and trends.

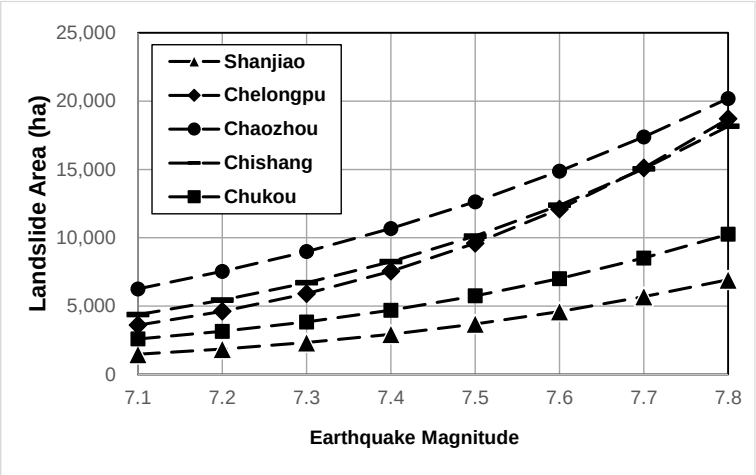


Fig. 4. Maximum landslide area of different magnitudes for PGA factor

Table 4. The results of PGA as a factor for different earthquake magnitudes

Fault	Shanjiao		Chelongpu		Chaozhou		Chishang		Chukou	
Mag.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
7.1	0	259	0	337	0	768	0	389	0	472
7.2	1	351	0	640	1	1588	1	955	0	759
7.3	2	588	1	1299	11	2858	17	1931	2	1222
7.4	6	1067	6	2664	26	4814	47	3473	7	2023
7.5	34	2052	24	5492	70	7827	120	6146	19	3524
7.6	123	3996	169	11227	175	12171	342	10940	67	6272
7.7	282	7155	648	21347	380	18400	825	18899	223	10909
7.8	497	11436	1628	36799	734	26861	1632	30703	521	17944

Unit: hectare.

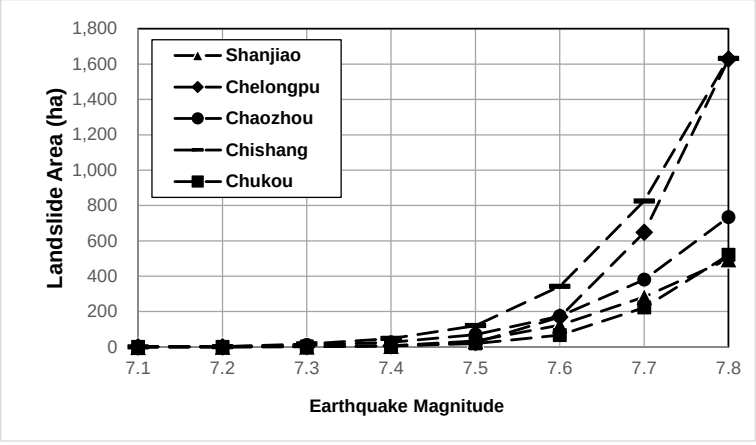


Fig. 5. Minimum landslide area of different magnitudes for PGV factor

For the PGV factor, the minimum landslide area at magnitude 7.1 is almost zero, and the maximum landslide area is under a thousand hectares, while the minimum collapse area at magnitude 7.8 is almost 500 hectares, and the maximum landslide area is close to 37,000 hectares. The area affected by landslides increases sharply and exponentially as the magnitude increases, highlighting the distinction between the PGV factor and the PGA. Similarly, while the collapse characteristics of faults may vary slightly, the magnitude and overall trend are generally similar.

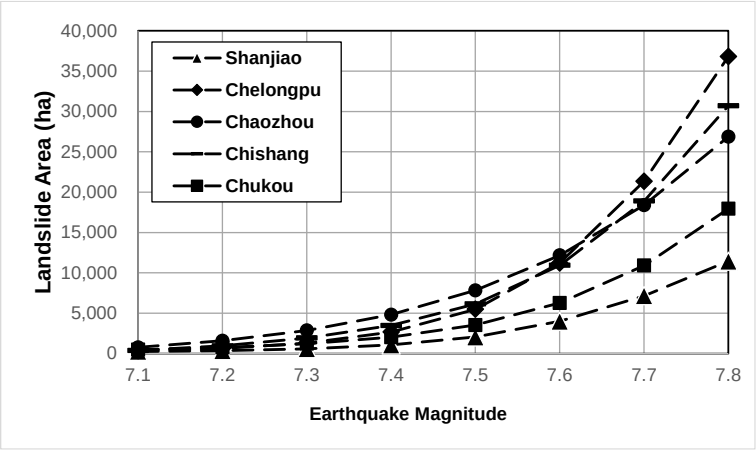


Fig. 6. Maximum landslide area of different magnitudes for PGV factor

In addition, the rate of increase in landslide area is slower before an earthquake magnitude of 7.5 when using PGV as a factor, while larger earthquake magnitudes result in a greater landslide area. This means that using PGV as a seismicity index in high-seismicity regions will better reflect the strong correlation between the magnitude classification and the severity of the actual disaster. In addition, it should be noted that the graphs also indicate that the landslide area of the PGA is higher than that of the PGV for smaller earthquake magnitudes, and vice versa for larger earthquake magnitudes.

Conclusions

Based on the aforementioned analysis of the impacts of earthquakes of varying magnitudes, the following four points can be summarized:

- the assessment of PGA exhibits lower sensitivity compared to PGV in relation to landslide risk associated with different earthquake magnitudes. This is due to the nearly linear outcomes, indicating that the risk of slope failures for varying earthquake magnitudes remains relatively consistent for a given seismic event source. Conversely, PGV demonstrates higher sensitivity, leading to varying risks of slope failure across different earthquake magnitudes;
- based on the data provided by PGV, earthquake magnitudes can be divided into two segments using 7.5 as the threshold. Magnitudes below 7.5 demonstrate a nearly linear pattern, while magnitudes equal to or exceeding 7.5 exhibit a sharp rise. A multinomial fitting approach is employed by aggregating the assessments of individual faults;
- in this study, multinomial fitting was conducted by averaging the outcomes of each cross-sectional evaluation. The minimum landslide area was identified to exhibit four times more curvature, rendering it more responsive in contrast to the maximum landslide area. This highlights the sensitivity of the minimum landslide area that aligns with the landslide definition in this research, emphasizing a clear differentiation among different slope unit categorizations. The maximum landslide area represents a pessimistic approximation that assumes the total collapse of the slope; however, it is, in fact, a highly conservative estimation;
- the findings of the results of PGV analysis, it can be seen that the energy release associated with an escalation in earthquake magnitude results in a notable increase in the projected collapse value. In contrast to the PGA, which assesses the anticipated amplification of gradual collapse, utilizing PGV as a parameter for essential characterization in disaster readiness is deemed more rational and efficient.

Acknowledgements

This study was funded by the Soil and Water Conservation Bureau in Taiwan, with support provided under grant numbers SWCB-111-051 and SWCB-112-062.

References

Dias, H.C., Gramani, M.F., Grohmann, C.H., Bateira, C., Vieira, B.C. (2021). Statistical-based shallow landslide susceptibility assessment for a tropical environment: a case study in the southeastern Brazilian coast. Natural Hazards, 108: 205–223.

Hodasova, K., Bednarik, M. (2021). Effect of using various weighting methods in a process of landslide susceptibility assessment. Natural Hazards, 105: 481–499.

Hsieh, M.H., Lee, B.J., Lei, T.C., Lin, J.Y. (2013). Development empirical fragility curves of RC building based on the Chi–Chi Earthquake data. Nat Hazards 69(1), 695–728.

Hsieh, M.H., Lin, B.S., Lin, L.W. (2023). Development of Earthquake-induced Landslide Fragility Analysis Based on Earthquake Data. Mediterranean Geosciences Union-23, Istanbul, Turkey.

Lin, J.W., Hsieh, M.H., Li, Y.J. (2020). Factor analysis for the statistical modeling of earthquake-induced landslides. Front Struct Civ Eng 14(1), 123–126.

Ozturk, U., Tarakegn, Y.A., Longoni, L., Brambilla, D., Papini, M., Jensen, J. (2016). A simplified early-warning system for imminent landslide prediction based on failure index fragility curves developed through numerical analysis. Geom Nat Hazards Risk 7(4), 1406–1425.

Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J., Naganuma, T. (2000). Statistical analysis of fragility curves. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 126(12): 1224–1231.

Effects of structure conservation implementation on landslide and debris flow hazards: A case study in Chenyulan watershed, Taiwan

W.S. Huang[1,2], J.C. Chen[2], J.Q. Fan[2], X.Z. Lai[2], F.B. Li[2], G.L. Li[2]

[1]National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, China, n8894103@gmail.com, hws_0928@qq.com

[2]Fujian College of Water Conservancy and Electric Power, Yongan, China

Abstract. In this study, the records of landslide and debris flow hazards were collected from 1996 to 2022 in Chenyulan watershed in Nantou County, central Taiwan. The data of engineering conservation, such as engineering structures, costs, locations, contents, creeks remediation and landslide improvements, etc., was collected by the engineering system of SWCB (Soil and Water Conservation Bureau, Taiwan) between 1998 and 2022. The satellite images and aerial photographs were collected to compare the variations of debris flow deposited areas and the areas of landslides after heavy rainfalls and Chi-Chi earthquake in Chenyulan watershed from 1996 to 2022. In addition to the representative rainfall events, the suspended sediment discharges in downstream of the watershed were collected from 1972 to 2022 for further verifying the variations after variations of rainfalls and conservation implementation. The relationship among the variations of debris flows and the areas of landslide events were analyzed. The characteristics of each effective rainfall and the yearly costs of engineering conservation were analyzed as well. The analyzed results show that the yearly costs of engineering conservation after Chi-Chi earthquake within 5 years was higher than the other periods, and the frequency of debris flow events, landslides and the river suspended sediment discharges were higher than the other periods too. The yearly costs of engineering conservation, the frequency of debris flow events, landslide areas and the river suspended sediment discharges gradually decreased in the last decade. The causes of decreasing costs of engineering conservation in the last decade are preliminarily analyzed as follows: 1. The hazards of debris flows and landslides have already declined, thus the required conservation treatments were decreased in the last decade. 2. The conservation engineering has been built in the creeks to trap the loose soil on slopes and prevent the sediments from running into rivers in the watershed caused by Chi-Chi earthquake and subsequent rainfall events. 3. The main conservation structures were completely established at the creeks with higher potential of debris flows and landslides in upstream; therefore, there are no more conservation requirements now; 4. The decline in suspended sediment discharges shows the conservation works have obviously controlled soil and adjusted slopes through the implementation of structure conservation in the watershed in the last decade.

Key words: *Chenyulan watershed, conservation structures, debris flows, landslides, Chi-Chi earthquake*

Cite this article: Huang W.S., Chen J.C., Fan J.Q., Lai X.Z., Li F.B., Li G.L. Effects of structure conservation implementation on landslide and debris flow hazards: A case study in Chenyulan watershed, Taiwan. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 166–178.

Влияние инженерных мероприятий на опасность оползней и селей на примере бассейна Чэньюлан, Тайвань

В.С. Хуан[1], Ц.Ч. Чэнь[2], С.Ч. Лай[2], Ф.Б. Ли[2], Г.Л. Ли[2]

[1]Национальный тайваньский университет Чэн Кун, Тайнань, Тайвань, Китай, n8894103@gmail.com; hws_0928@qq.com

[2]Фуцзянский колледж водного хозяйства и энергетики, Юнъань, Китай

Аннотация. В этом исследовании собраны данные об опасностях оползней и селей с 1996 по 2022 г. в бассейне Чэньюлань в уезде Наньтоу (центральный Тайвань). Характеристики инженерных мероприятий (тип защитных сооружений, их стоимость, местоположение и т.д.) были собраны инженерной системой SWCB (Центр экологии почв и водосбережения, Тайвань) в период с 1998 по 2022 г. Использовались также спутниковые и аэрофотоснимки для сравнения изменений площадей селевых и оползневых отложений после сильных дождей и землетрясения Чи-Чи в бассейне Чэньюлань с 1996 по 2022 г. Проанализирована связь между вариациями селевых потоков и площадями оползневых событий. Также были проанализированы характеристики эффективного количества осадков и годовые затраты на инженерные мероприятия. Полученные результаты показывают, что ежегодные затраты на инженерную защиту после землетрясения Чи-Чи в течение 5 лет были выше, чем в другие периоды, как и частота селей, оползней и наносоводных паводков. Ежегодные затраты на инженерные мероприятия, частота селевых потоков, оползней и наносоводных паводков за последнее десятилетие постепенно снизились. Анализ причин снижения затрат на инженерные мероприятия в последнее десятилетие позволил сделать следующие выводы: 1) опасность селей и оползней уменьшилась, поэтому снизилась потребность в защитных мероприятиях. 2) в долинах ручьев были построены защитные сооружения для улавливания рыхлого материала со склонов, накопившегося после землетрясения Чи-Чи и последующих дождей, и предотвращения его попадания в реки бассейна; 3) основные защитные сооружения уже размещаются в долинах ручьев с повышенным риском формирования селей и оползней в верхнем течении, поэтому в настоящее время нет необходимости в дополнительной защите; 4) снижение стока взвешенных наносов свидетельствует о том, что уже реализованные меры показали свою эффективность.

Ключевые слова: *бассейн Чэньюлань, инженерные сооружения, селевые потоки, оползни, землетрясение Чи-Чи*

Ссылка для цитирования: Хуан В.С., Чэнь Ц.Ч., Лай С.Ч., Ли Ф.Б., Ли Г.Л. Влияние инженерных мероприятий на опасность оползней и селей на примере бассейна Чэньюлан, Тайвань. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 166–178.

Introduction

Taiwan island results from collision of the tectonic plate. It is famed for its young and weak geologic conditions, steep slopes, rugged mountains, and frequent earthquakes. All these factors above attribute to the process of the orogenesis. Besides, because Taiwan is on the migration path of typhoons, there are 3 to 4 typhoons striking Taiwan island each year. They usually bring high winds, torrential rainfalls and suddenly rising floods, and cause landslides, debris flows and soil loss. The Chenyoulan stream watershed, located in Nantou County in central Taiwan, has a catchment area of 449 km^2, a main stream length of 42 km, a mean stream gradient of 4°, and elevations between 295 and 3952 m. as shown in Fig. 1. The Chenyoulan stream follows the Chenyoulan Fault, a boundary fault dividing two major geological zones of Taiwan. In addition to the main boundary fault, the Chenyoulan stream watershed also contains many other faults accompanied by fracture zones, which indicated that the rock mass on the hillslopes was considerably fractured in the Chenyoulan stream watershed. Consequently, fractured rock masses prevail within the study area, accounting for enormous landslides and providing an abundant source of rock debris for debris flows and soil loss [*Lin and Jeng, 2000*]. The annual rainfall in the watershed ranges from 2000 mm to 5000 mm with an average value of approximately 3500 mm. Approximately 80% of the annual rainfall in the watershed occurs between May and October, especially during typhoons. Debris-flow and landslide hazards are common within the watershed due to the combination of weak geological conditions, heavy rainfall, and accompanying frequent earthquakes. Several debris-flow events in this watershed

have been studied or documented [*Lin and Jeng, 2000; Chang et al., 2001; Cheng et al., 2005; Jan and Chen, 2005; Chen and Jan, 2008; Chen et al., 2009; Chen, 2011; Chen et al., 2011b*]. Besides the 1999 Chi-Chi earthquake with a moment magnitude M_W =7.6, on September 21, 1999, was the largest in Taiwan for 70 yr and the largest on the Chelungpu thrust fault in 300–620 yr [*Shin and Teng, 2001, Chen et al., 2001, Dadson et al., 2004, Huang et al., 2001*] and it caused significant effects in the Chenyoulan watershed. After the Chi-Chi earthquake, the extremely heavy rains brought by Typhoon Toraji and Nali in 2001 caused numerous debris-flow and landslide events in central Taiwan [*Cheng et al., 2005*], and resulted in over 100 people dead or missing and destructive damage to houses, roads, bridges, and dikes. In August 2009, Typhoon Morakot brought heavy rainfall with an hourly rainfall up to 123 mm and a 48-h cumulative rainfall up to 2361 mm, as measured at Alisan rainfall station. It caused many debris-flows, landslides and other destructions. Based on the safety of people property and soil disaster prevention, the Taiwan government has invested a large amount money to carry out conservation projects for creeks and to control soil loss in the Chenyoulan watershed.

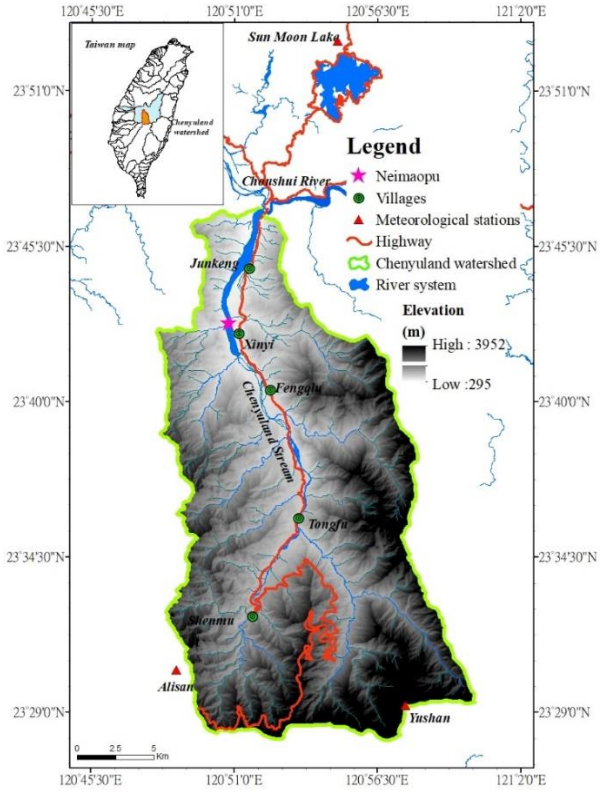


Fig. 1. Locations of Neimaopu and meteorological stations in Chenyulan stream watershed

This study utilized hydroclimatic data of rainfall events triggering debris flows from 1985 to the end of 2019. These debris-flow and landslide events, triggered by rainstorms and typhoons between 1985 and 2019, along with the collection of rivers suspended sediment discharges at downstream of Chenyoulan stream, provide an opportunity to study the variability in the number of specified rainfall events and costs of engineering conservation associated with the variations of suspended sediment discharges in the last decades in the Chenyoulan stream watershed.

Therefore, this study aims to explore: 1. The impact of long-term rainfall variability on debris-flow and landslide disasters in Chenyoulan stream watershed. 2. Changes in debris-flows and landslides after extreme rainfall variability, as well as the investment amount of SWCB in the last decades. 3. Changes in downstream suspended sediment discharges after SWCB investment. 4. Clarify the impacts of rainfall changes and engineering conservation on downstream suspended sediment discharges.

Rainfall events in the study area

Jan and Lee (2004) suggested an estimating method of rainfall that is Neihaus suitable to assess the debris-flow and landslide occurrences, especially concerning the pattern of continuous and concentrated rainfall events. For triggering debris-flow and landslide occurrences, an effective rainfall event is defined as an hourly rainfall depth greater than 4 mm, marking the beginning of a rainfall event. And when hourly rainfall depth is less than 4 mm for 6 consecutive hours, it is the end of that rainfall event. The estimating method of rainfall is practiced for issuing debris-flow and landslide warnings in Taiwan, and is extensively adopted by Lee (2006), and Chang et al. (2011).

To investigate the variation in rainfall characteristics in the Chenyulan watershed, rainfall data from three meteorological stations – Sun Moon Lake, Yushan, and Alisan – located nearby or within the Chenyulan watershed, as shown in Fig. 1, were collected from the long-term records spanning 1985–2022. The three meteorological stations were used to estimate the regional average rainfall in the Chenyulan watershed employing the reciprocal-distance-squared method [*Chow et al., 1988*]. The estimated point using this method was located at the centroid of the watershed area, and it was used to determine rainfall characteristics, such as hourly rainfall, cumulative rainfall, rainfall duration, etc. [*Chen et al., 2012*].

Extreme rainfall may result in high hourly rainfall, high cumulative rainfall, or both. Debris flows caused by a rainfall event in the Chenyulan watershed generally occur within the period of maximum 24-h rainfall R_d [*Chen et al., 2012*]; the maximum hourly rainfall I_m is closely related to the occurrence of debris flows [*Chen et al., 2011*]. Moreover, I_m and R_d are rainfall indexes generally used to determine the rainfall conditions for debris-flow occurrence in an extreme rainfall event [*Cheng et al., 2005*]. Therefore, I_m and R_d, determined from regional average rainfall for hourly rainfall in the Chenyulan watershed for each rainfall event, were collected, calculated, and analyzed in Fig. 2. To respond rainfall events by both high hourly rainfall and high cumulative rainfall, an extreme rainfall index RI defined as $RI = R_d I_m$, was also calculated in Fig. 2. It shows the date and rainfall event, as well as the rainfall characteristics of each rainfall event in the watershed, including the maximum hourly rainfall I_m, the maximum 24-h rainfall R_d, and the extreme rainfall index RI. The five rainfall events, Typhoon Herb (TH) in 1996, Typhoon Toraji (TT) in 2001, Typhoon Mindulle (TMi) in 2004, Heavy rainstorm (HR) in 2006, and Typhoon Morakot (TM) in 2009, induced numerous debris flows with number$N \geq 10$ have R_d> 580 mm or I_m> 54 mm/h. Maximum R_d and maximum I_m in historical rainfall events (1963–2009), reaching as high as 1193 mm and 86 mm/h, respectively, were both caused by Typhoon Morakot in 2009.

Debris-flows and landslides in the study area

Thirty-seven rainfall events, including 18 rainstorms and 19 typhoon-induced heavy rainfall events, have caused debris flows in the Chenyulan stream watershed [*Chen et al., 2012*], as shown in Fig. 3. Notably among these, heavy rainfall events were associated with Typhoon Herb in 1996, Typhoon Toraji in 2001, and Typhoon Morakot in 2009. Over the period from July 31 to August 1, 1996, Typhoon Herb hit Taiwan, bringing unexpectedly high cumulative rainfall (up to 1,994 mm within 2 days at the Alishan rainfall station near the headwater of the Chenyulan watershed), leading to 27 people dead and 14 missing [*Jan and Chen, 2005*]. The Chi-Chi earthquake of September 21, 1999 (moment magnitude 7.6) was the largest in Taiwan for hundred years [*Shin and Teng, 2001*]. The combination of the Chi-Chi earthquake in 1999 and extremely heavy rain associated with Typhoon Toraji in 2001 caused numerous large debris flows. In 2001, numerous debris flows occurred in central Taiwan, resulting in over 100 people dead or missing, and great damage to houses, roads, bridges, and dikes. In August 2009, Typhoon Morakot brought heavy rainfall, with maximum hourly rainfall of 123 mm and maximum cumulative rainfall of 2361 mm in 48 h recorded at the Alishan rainfall station. The typhoon damaged several river embankments, buried houses, caused bridge failures, and damaged numerous sections along Highway Route 21. In Shenmu and Tongfu villages, Xinyi

Township, over 20 houses were buried by debris flows or washed away by floods [*Chen et al., 2011*].

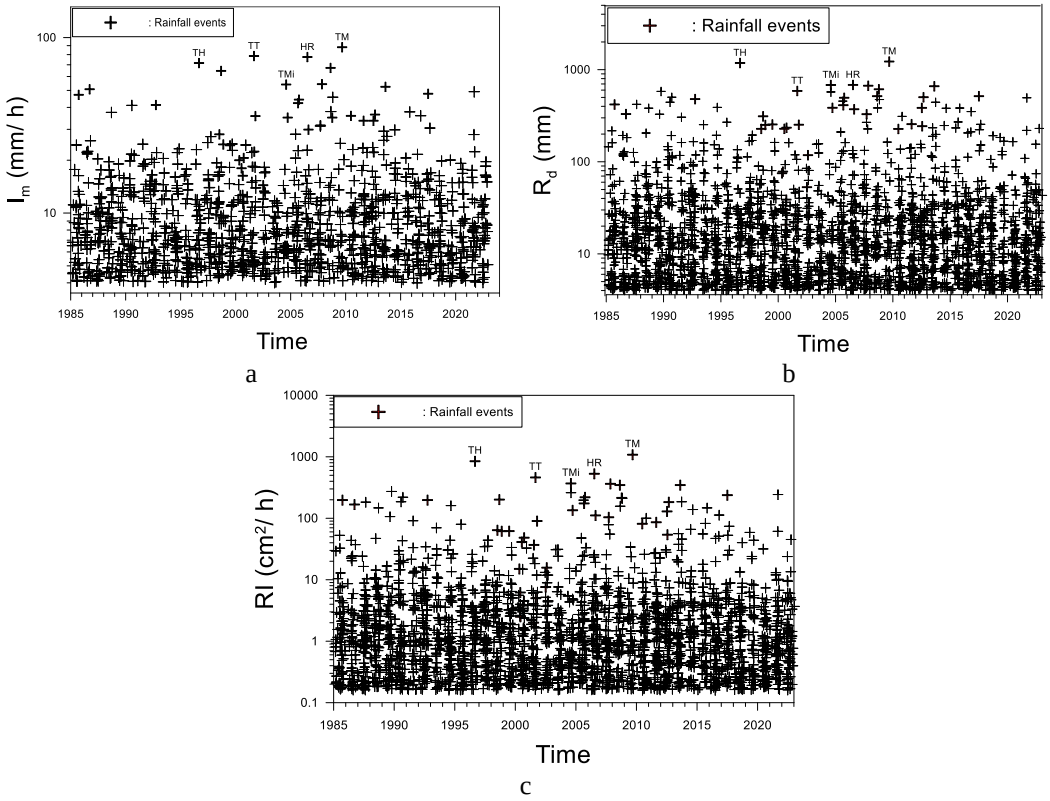


Fig. 2. Variability in the rainfall index I_m between 1985 and 2022 (a). Variability in the rainfall index R_d between 1985 and 2022 (b). Variability in the rainfall index *RI* between 1985 and 2022 (c)

The number of debris-flow events N for each rainfall event and the locations of debris-flow events in the entire Chenyulan watershed from 1985 to 2022 were indicated in Fig. 3. Prior to 1996, the number of debris flows was determined from papers at local spots without covering the whole watershed because of lacking data from field investigations. After 1996, the number of debris flows N used in this work was identified through interpretation of maps and field investigations. Fig. 3 showed that the five rainfall events, Typhoon Herb (TH) in 1996, Typhoon Toraji (TT) in 2001, Typhoon Mindulle (TMi) in 2004, Heavy rainstorm (HR) in 2006, and Typhoon Morakot (TM) in 2009, induced numerous debris flows with number $N \geq 10$. The maximum N is 78 resulted by TT. The more severe debris flow events were caused by TH, TT and TM with number $N > 30$.

In the Chenyulan watershed, the hazardous earthquakes and rainstorms are main factors to trigger the landslides. Many researchers [*Lin et al., 2003; Cheng et al., 2005; Lin et al., 2006; Chiou et al., 2007; Lin et al., 2008; Chen, 2008; Chuang et al., 2009; Shou et al., 2011; Chang et al., 2011*] have studied the variation in the landslide areas before and after the Chi-Chi earthquake as well as the variation in the landslide areas caused by the consequent rainfall events after the earthquake. Among these studies, the analyzed results presented by Lin et al. (2003) and Chen (2008) are adopted in this study. To compare the studies offered by Lin et al. (2003) and Chen (2008), five SPOT images, six FORMOSAT-II images, and two PLEIADES 1A 7 images are adopted to analyze the earthquake-induced landslides and rainfall-induced landslides that took place before and after the Chi-Chi earthquake between 1988 and 2014. The images taken after typhoons with accumulated rainfall ranging from 229 mm to 2,472mm were analyzed. Besides, this study collects the landslides analysis results published by the SWCB, and presents the landslides analysis of the Chenyulan watershed from 2014 to 2016.

Before Typhoon Herb, the landslides areas only reached to 563.0 ha [*Yang et al., 2009*], which is regarded as the primary areas of landslide before the Typhoon Herb in the Chenyoulan watershed. Identification and calculation of landslide areas from the images are shown in Fig. 4. There is an obvious increasing trend in the landslide areas from 1988 to 2009. Before the 1999 Chi-Chi earthquake, the landslide areas have a slight increasing trend, the landslide areas increased slightly from 563.0 ha to 713.4 ha after the Typhoon Herb, and it is reasonably considered that rainfall events triggered these landslide areas. The landslide areas have been sharply amplified after the Chi-Chi earthquake, the landslide areas were greatly amplified and reached to 2084.1 ha, which is nearly tripled to 713.4 ha caused by Typhoon Herb. That is, after the 1999 Chi-Chi earthquake, there is a great increasing trend in the landslides area. Lin et al. (2006) indicated that the Chi-Chi earthquake not only triggered serious coseismic landslides itself but also extensively disturbed surface strata around the epicentral area, which may cause numerous landslides during the consequent rainfall events. Due to there was no significantly high precipitation after the Chi-Chi earthquake, the abrupt increase in landslide areas was most likely attributed to the Chi-Chi earthquake. Image measurement showed that the landslide area further expanded to 2749.7 ha in August 2001 after Typhoon Toraji, 2622 ha in July 2004, 1212 ha in June 2005, 950.59 ha in June 2008, and 1964.8 ha in June 2010, respectively. After 2009 Typhoon Morakot, the landslides area showed a noticeable decreasing trend, reducing to 1312.95 ha by September 2016 due to the diminishing effect of earthquakes and the significant investment by the SWCB in building the conservation works in the Chenyoulan watershed.

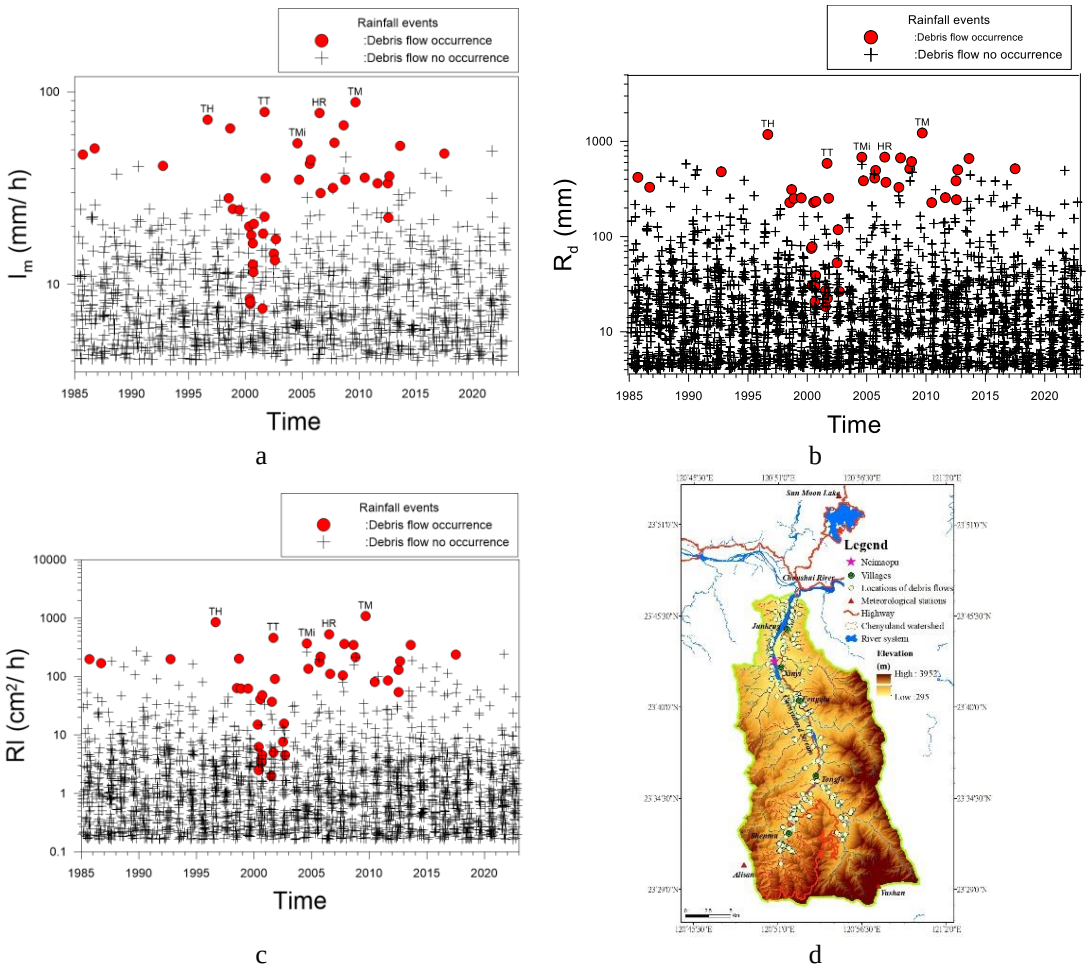


Fig. 3. Variability in the rainfall index I_m related to debris-flow occurrences between 1985 and 2022 (a). Variability in the rainfall index R_d related to debris-flow occurrences between 1985 and 2022 (b). Variability in the rainfall index *RI* related to debris-flow occurrences between 1985 and 2022 (c). Locations of debris flows in Chenyulan stream watershed between 1985 and 2022 (d)

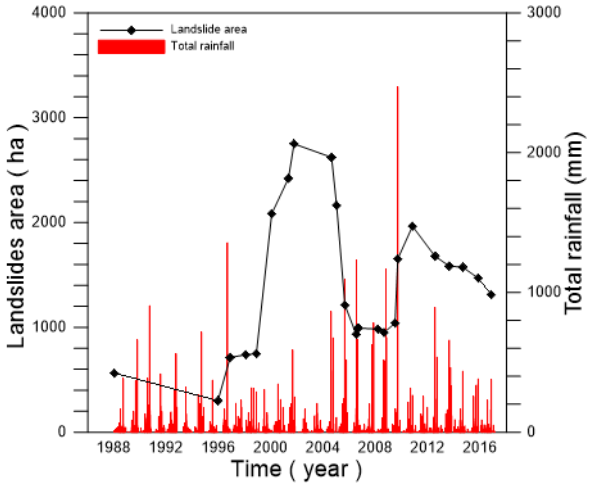


Fig. 4. Variability in the rainfalls related to different periods landslides in Chenyulan stream watershed between 1986 and 2016

Conservation structures in the study area

Kauki et al. (1988) indicated the sediment control and deposit effect of Sabo dam, conservation works, are obviously, different configurations will produce different amounts of inhibition, including the outflow of sediment, suppression (sand storage corresponding to existing space and planned facilities) and the amount of regulation. In general, the planned riverbed slope can be set to half of the original riverbed slope, and the adjusted slope is set to 2/3–3/4 of the original riverbed slope. Lien and Tsai (2013) showed sediment control is quantifiable in soil and water conservation engineering. For example, Sabo Dam not only prevents stream bed erosion but also stores sediment. Sabo Dam can stabilize a foundation part of the slope and can stabilize the entire slope as well, as shown in Fig. 5. The method for calculating the stability of slope effect for soil and water conservation engineering is used to calculate the sediment control of the Sabo Dam and bank revetment under three kinds of soil and water conservation engineering. The structures of conservation can effectively control or reduce the outflow of sediment from the creeks.

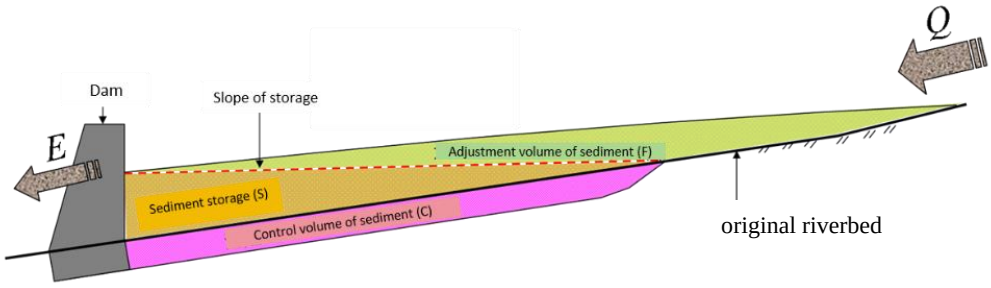


Fig. 5. The indication of sediment control of Sabo dam

The sediment control capabilities of Sabo Dam can be expressed as follows:

1. Sediment storage (*S*): To prevent the outflow of sediment from the riverbed upstream of the sand dam (or the original upstream of the dam). Based on the sediment of the riverbed, the amount of sediment storage and its volume can be calculated according to the equation:

$$V = \frac{1}{2}\frac{m \cdot n}{m-n} \cdot b \cdot h^2, \quad (1)$$

where V – the amount of sediment storage; m: target siltation slope reciprocal; n – the reciprocal of the original riverbed slope; b – average siltation width; h – the height of dam.

2. Adjustment volume of sediment (F): The adjustment of target riverbed slope is based on the original river. The riverbed slope is set at 2/3, but when the riverbed slope is steep and there is a presence of large sand particles and gravel leading to substantial outflow, it can be assumed to be adjusted to 2/3 to 3/4 of the original riverbed slope.

3. Control volume of sediment (C): The sediment control basically refers to the amount of sedimentation that the riverbed can regenerate. Therefore, sedimentation deposited in upstream of the dam within the control range can achieve sedimentation production to prevent riverbed erosion. The length of silt (L) can be calculated according to equation:

$$L = \frac{m \cdot n}{m - n} \cdot h. \tag{2}$$

Besides, Chen and Zhang (1996) referenced Japanese sedimentation control structures to define formula and calculate the prevention of sedimentation volume in various longitudinal and horizontal conservation structures in rivers. Therefore, conservation structures can indeed effectively control the soil and downward movement of sediment in riverbanks.

$$S_2 = 2h_2 \cdot L_2, \tag{3}$$

where S_2 – the amount of sediment control for revetment; h_2 – effective height of revetment; L_2 – the length of the revetment.

To further understand the effects of implementing conservation structures, the data on these structures, including engineering names, costs, locations, engineering contents, and landslide improvements, etc., was collected through the engineering system of SWCB between 2001 and 2022. Due to the large number of categories of conservation structures that are difficult to quantify directly, this study only analyzes the annual government investment funds. It combines rainfall events, which cause conservation needs, to provide variation in conservation projects over the last few decades. The variations of rainfall events and conservation funds are shown in Fig. 3. It shows that Typhoon Toraji in 2001 resulted in widespread landslides and numerous debris flows after the 1999 Chi-Chi earthquake. The government invested a significant amount of engineering funds, totaling NT 140,004,000, after Typhoon Toraji in 2001. After Typhoon Minduli in 2004, the government once again invested funds, totalng NT 124,617,000. Typhoon Morakot In 2009 brought high-intensity rainfall and record-breaking cumulative rainfall, resulting in the most severe landslides and debris-flow disasters on record in the Chenyulan stream watershed. As a respond, the government invested a record-high amount of funds in engineering conservation, with a total budget of NT 540,183,000. Due to continuous investment in conservation projects and governance engineering funds, coupled with a relatively gradual decrease in high-intensity rainfall in recent years, government engineering funds have been decreasing year by year. Since 2010, SWCB engineering funds have shown a decreasing trend. Additionally, after engineering conservation of landslide and debris flow in the last decades, the amount of suspended sediment discharges in river channels has significantly slowed down. This gradual improvement has led to sediment levels gradually approaching the standards observed before Typhoon Toraji. This indicates that the investment in conservation projects in recent years has had significant engineering benefits, resulting in a decrease in soil disasters such as landslides and debris flows. Moreover, changes in the suspended sediment discharges at the Neimaopu hydrology gauging station downstream of the Chenyulan stream watershed reflect this positive trend. These findings will be further elaborated in the next section.

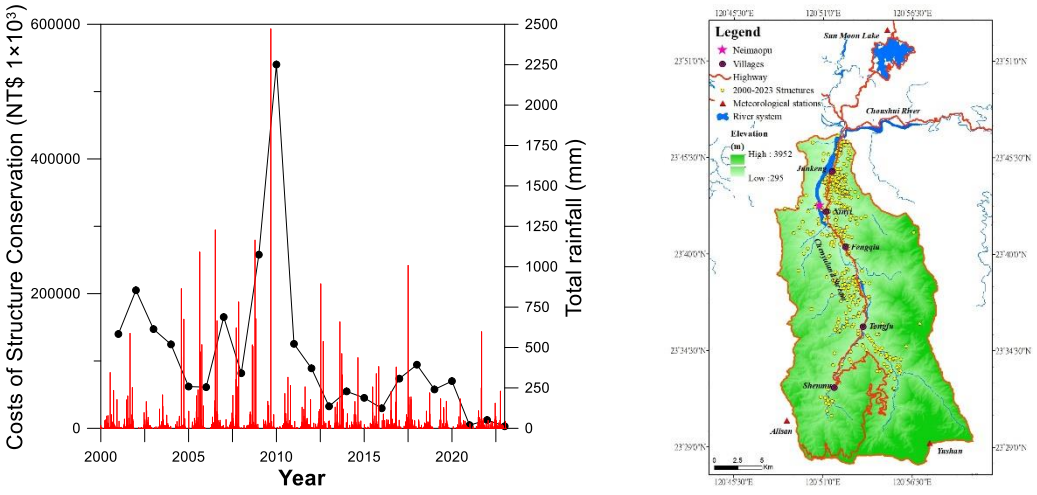


Fig. 6. Variability in the rainfall depth related to costs of conservation constructions between 2001 and 2022 (a). Locations of conservation constructions in the Chenyulan stream watershed between 2001 and 2022 (b)

Suspended sediment discharges in the study area

The data of suspended sediment discharges are also collected based on the Neimaopu hydrology gauging station during the period from 1972 to 2019. The Rating Curve Method [*Walling, 1977; Crawford, 1991; Lin, 2005; Lin et al, 2008*] is adopted to estimate sediment discharges during the rainy events. The Rating Curve Method is useful when an empirically calibrated power-law relationship between the flow discharge and the sediment concentration can be defined. The empirical formula is as follows:

$$Q_s = aQ^b, \tag{4}$$

where Q_s is suspended sediment discharge (t/day) and Q is daily average discharge (cm/s). The formula is evaluated by taking the logarithm of each coordinate axis. The parameters, a and b, are determined by using least-square regression. By mean of established empirical formula, the Q_s can be obtained by given discharge Q. The relationship between the daily average discharge Q and the suspended sediment discharge Q_s is established. Likewise, the collected hydrometric data is divided into six parts to understand the variations in suspended sediment discharges in the Chenyoulan stream over recent decades (Fig. 7).

Fig. 7 presents the relationship between the daily average discharge Q and the suspended sediment discharge Q_s between 1972 and 2019. It is observed that the higher daily average discharge Q corresponds to a suspended sediment discharge Q_s is different from the lower Q corresponding to Q_s in Fig. 7. Additionally, the correspondence between Q and Q_s varies for each decade. Therefore, the observed data in this study is not only divided into six periods, namely 1970–1979, 1980–1989, 1990–1999, 2000–2004, 2000–2009, and 2010–2019 respectively, but also into two conditions, $Q > 50$ cm/s and $Q < 50$ cm/s. This division allows for a deeper understanding of the variations in Q_s under different conditions of Q, as shown in Fig. 7.

In Fig. 7, the bold black line represents the regression line obtained by the data of Q and Q_s between 1972 and 2019 under conditions where $Q < 50$ cm/s. The power regression formula describes the line in the form of $Q_s = 0.19Q^{2.70}$. The holly triangles represent the data between 1972 and 1979 and the bold orange line represents their regression line obtained by data of Q and Q_s; the power regression formula describes the line in the form of $Q_s = 0.10Q^{2.70}$. The bold green line represents the data obtained between 1980 and 1989; the power regression formula is in the form of $Q_s = 0.16Q^{2.70}$. The bold blue line represents the data obtained between 1990 and 1999; the power regression formula describing the line takes the form as $Q_s = 0.40Q^{2.70}$. The

bold red line represents the data obtained between 2000 and 2009; the power regression formula describing the line is in the form of $Q_s = 0.60Q^{2.70}$. The bold light blue line represents the data obtained between 2010 and 2019; the power regression formula describing the line is in the form of $Q_s = 0.58Q^{2.70}$. Besides, the relationship between Q and Q_s during the period affected by the Chi-Chi earthquake (2000–2004) is discussed separately. The dotted black line represents the data obtained between 2000 and 2004; the power regression formula describing the line is in the form of $Q_s = 1.10Q^{2.70}$.

Fig. 7, the suspended sediment discharge obtained in 1972–1979 and 1980–1989 is 1 to 2 times smaller than that in 1972–2019 when $Q < 50$ cm/s; while that obtained in 1972–1979 and 1980–1989 is 1 to 3 times smaller than that in 1972–2019 when $Q > 50$ cm/s. The suspended sediment discharge acquired in 1990–1999 is 2 to 3 times more than that in 1972–2019 when $Q < 50$ cm/s; while that acquired in 1990–1999 is 1 to 2 times more than that in 1972–2019 when $Q > 50$ cm/s. The suspended sediment discharge gained in 2000–2009 is 3 to 4 times more than that in 1972–2019 when $Q < 50$ cm/s; while that gained in 2000–2009 is 1 to 2 times more than that in 1972–2019 when $Q > 50$ cm/s. The suspended sediment discharge gained in 2000–2004 is 5 to 6 times more than that in 1972–2019 when $Q < 50$ cm/s; while that gained in 2000–2004 is 4 to 5 times more than that in 1972–2019 when $Q > 50$ cm/s. The reason why the suspended sediment discharges in 1990–1999 and 2000–2009 are greater than those in 1972–1979 and 1980–1989 can be reasonably attributed to the variability in rainfall during those decades. The cause that the suspended sediment discharge in 2000–2009 is greater than that in 1972–1979, 1980–1989, 1990–1999 and 2010–2019 can be ascribed not only to the rainfall variability during this decade but also to the effects of the Chi-Chi earthquake.

The earthquake caused numerous landslides and increased the number of crakes on the hill slopes of creeks. After the Chi-Chi earthquake, a large number of debris rocks were deposited, providing the conditions necessary for triggering debris flows and enhancing the rate of soil erosion in the entire watershed during subsequent rainy events. In Fig. 8, the suspended sediment discharge obtained during 2000–2009 is significantly larger than that in the other periods, both when $Q < 50$ cm/s and when $Q > 50$ cm/s. The small discharges can deliver high suspended sediment discharges which attribute to the loose debris materials caused by the Chi-Chi earthquake. Due to the variation in sediment yields have violently changed in each creek, the variations in the suspended sediment discharges are analyzed before and after the Chi-Chi earthquake.

In addition, since the 2001 Typhoon Toraji, the SWCB has continued to invest in conservation funds, especially after the 2009 Typhoon Morakot. A significant number of conservation projects were constructed, and creeks were reorganized, resulting in a gradual decrease in the suspended sediment discharge of the river year by year. The suspended sediment discharge between 2010 and 2019 has been close to the suspended sediment discharge observed before Typhoon Toraji in 2001. This indicates that the conservation projects invested by the SWCB have likely achieved the expected results.

Table 1. Empirical coefficients of *a* and *b* for the six studied periods

Period (when $Q < 50$ cms)	*a*	*b*	Period (when $Q > 50$ cms)	*a*	*b*
1972–1979	0.10	2.70	1972–1979	0.25	2.27
II. 1980–1989	0.16	2.70	II. 1980–1989	0.55	2.27
1990–1999	0.40	2.70	1990–1999	0.90	2.27
IV. 2000–2004	1.10	2.70	IV. 2000–2004	3.00	2.27
V. 2000–2009	0.60	2.7	V. 2000–2009	1.2	2.27
VI.2010–2019	0.58	2.7	VI.2010–2019	0.75	2.27
VII.1972–2019	0.19	2.7	VII.1972–2019	0.65	2.27

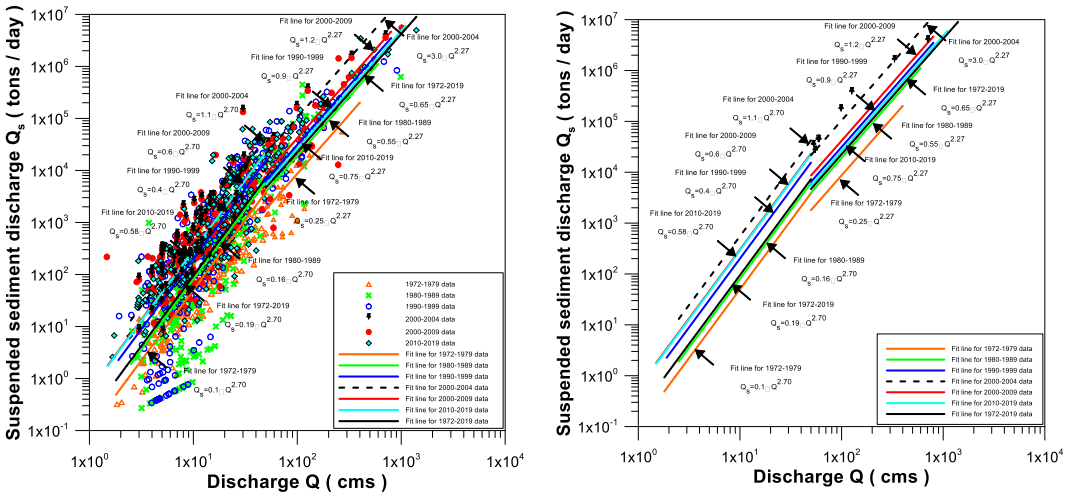


Fig. 7. Variations of Q and Q_s during different decades at the Neimaopu hydrology gauging station (1972–2019) (a). Variations of the rating curves estimated by Q and Q_s during different decades at the Neimaopu hydrology gauging station (1972–2019) (b)

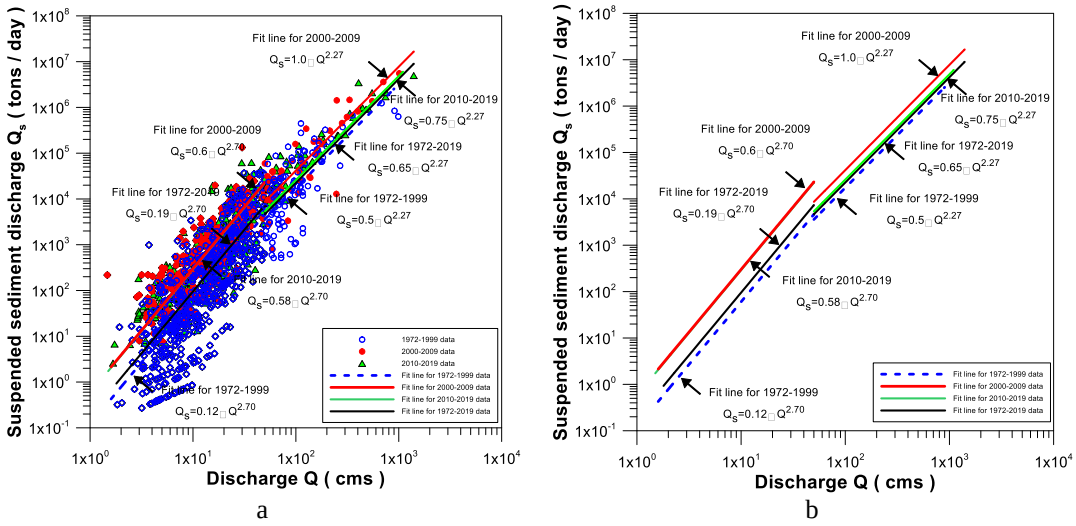


Fig. 8. Variations of Q and Q_s before and after Chi-Chi earthquake at the Neimaopu hydrology gauging station (1972–2019) (a). Variations of the rating curves estimated by Q and Q_s before and after Chi-Chi earthquake at the Neimaopu hydrology gauging station (1972–2019) (b)

Conclusions

The conservation investment funds for debris-flow and landslide disasters in the past decade have shown a tendency to slow down. Due to the reduction in disasters, the SWCB had no funds to invest in 2022, indicating that the situation of slopes in the Chenyulan Watershed has stabilized and the impact of the Chi-Chi earthquake has been alleviated.

The engineering conservation measures have been implemented to trap the loose soil on slopes of creeks, such as the control and deposit effect of dams. This includes the storage of outflow sediment, suppression and regulation of the amount, control of the loose sediment in the upstream. All these effectively reduce suspended sediment discharges.

SWCB continuous investment in engineering and funding since 2001 Typhoon Toraji has led to the establishment of the main conservation structures at the creeks with higher potential for debris flows and landslides in upstream. Therefore, there are currently no further conservation requirements.

The decrease in debris-flow events, landslides, and suspended sediment discharges demonstrates that the continuous conservation works have effectively controlled soil erosion

on slopes through the implementation of structure conservation in the watershed over the last decade.

The suspended sediment discharges between 2010 and 2019 have returned to levels similar to those observed before Typhoon Toraji in 2001. This indicates that the conservation projects invested by the SWCB have likely achieved the expected results.

References

Chang, J.C., Shen, S.M., and Liu, Y.S. A study on the occurrence of landslides and debris flows in four small catchments of the Chenyoulan river, Geog. Res., 34, 63–83, 2001 (in Chinese)

Chang, C.W., Lin, P.S., and Tsai, C.L.: Estimation of sediment volume of debris flow caused by extreme rainfall in Taiwan, Eng. Geol., 123, 83–90, 2011.

Chen, Z.Y., and Zhang, S. L.: Simulation on the Flow Hydrograph for Detention Structures, Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 27(3), 235–244, 1996. (in Chinese)

Chen, W.S., Chen, Y.G., Chang, H.C., Lee, Y.H., and Lee, J.C.: Palaeoseismic study of the Chelungpu fault in the Wan-Fong area, West. Pacific Earth Sci., 1, 499–506, 2001.

Cheng, J.D., Huang, Y.C., Wu, H.L., Yeh, J.L., and Chang, C.H. Hydrometeorological and landuse attributes of debris flows and debris floods during Typhoon Toraji, July 29–30, 2001 in Central Taiwan, J. Hydrol., 306, 161–173, 2005.

Chen, J.C., and Jan, C.D. Probabilistic analysis of landslide potential of an inclined uniform soil layer of infinite length – application. Environ Geol., 54(6), 1175–1183, 2008.

Chen, J.C., Lin, C.W., and Wang, L.C. Geomorphic characteristics of hillslope and channelized debris flows- A case study in the Shitou area of central Taiwan, J Mt. Sci., 6(3), 266–273, 2009.

Chen, J.C.: Variability of impact of earthquake on debris-flow triggering conditions: case study of Chen-Yu-Lan Watershed, Taiwan, Environ. Earth Sci., 64(7), 1787–1794, 2011.

Chen, J.C., Huang, W.S., Jan, C.D., and Tsai, Y.F. Rainfall conditions for the initiation of debris flows during Typhoon Morakot in the Chen-Yu-Lan watershed in central Taiwan, Proceedings of the 5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Padua, Italy. Genevois, R., Hamilton, D.L., & Prestininzi, A. (eds), 31–36, 2011b.

Chen, J.C., Huang, W.S., Jan, C.D., and Yang, Y.H.: Recent changes in the number of rainfall events related to debris-flow occurrence in the Chenyulan Stream Watershed, Taiwan, Nat. Hazards Earth. Syst. Sci., 12, 1539–1549, 2012.

Chiou, S.J., Cheng, C.T., Hsu, S.M., Lin, Y.H., and Chi, S.Y. Evaluating landslides and sediment yields induced by the Chi-Chi earthquake and followed heavy rainfalls along the Ta-Chia River, J. GeoEngineering, 2, 73–82, 2007.

Chuang, S. C., Chen, H., Lin, G. W., Lin, C. W., and Chang, C. P.: Increase in basin sediment yield from landslides in storms following major seismic disturbance, Eng. Geol., 103, 59–65, 2009.

Dadson, S., Hovius, N., Chen, H., Dade, W.B., Lin, J.C., Hsu, M.L., Lin, C.W., Horng, M.J., Chen, T.C., Miliman, J., and Stark, C.P.: Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt, Geol., 32(8), 373–376, 2004.

Huang, C.C., Lee, Y.H., Liu, H.P., Keefer, D.K., and Jibson, R.W. Influence of surface-normal ground acceleration on the initiation of the Jih-Feng-Erh-Shan landslide during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 91(5), 953–958, 2001.

Jan, C.D. and Lee, M.H. A debris-flow rainfall-based warning model, J. Chin. Soil Water Conserv., 35, 3, 275–285, 2004 (in Chinese).

Jan, C.D. and Chen, C.L. Debris flow caused by Typhoon Herb in Taiwan, in Jakob, M. and Hungr, O. (eds.), Debris-flow hazards and related phenomena, Praxis, UK, 539–563, 2005.

Kazuki, M., Akito, N., and Kimio, I. Soil and Sand Disaster Survey. "Kajima Institute Publishing Co., Japan, 88–92, 1988. (in Japanese)

Lee, M.H. A rainfall-based debris-flow warming analysis and its application, Doctoral Dissertation, Tainan, 2006 (in Chinese).

Lin, M.L. and Jeng, F.S. Characteristics of hazards induced by extremely heavy rainfall in central Taiwan—Typhoon Herb, Eng. Geol., 58, 191–207, 2000.

Lin, C.W., Shieh, C.L., Yuan, B.D., Shieh, Y.C., Liu, S.H., and Lee, S.Y. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: Example from the Chenyoulan River watershed, Nantou, Taiwan, Eng. Geol., 71, 49–61, 2003.

Lin, C.W., Lin, S.H., Lee, S.Y., Lin, C.C. Impacts of Chi-Chi earthquake on subsequent rainfall-induced landslides in central Taiwan, Eng. Geo., 86, 87–101, 2006.

Lin, G.W., Chen, H., Chen, Y.H., and Horng, M.J. Influence of typhoons and earthquakes on rainfall-induced landslides and suspended sediments discharge, Eng. Geol., 97, 32–41, 2008.

Lien, H.P., and Tsai, I.D. (2013). A Computational Model of Sediment Control for Soil and Water Conservation Engineering." Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 44(4), 351–362, 2013. (in Chinese)

Shin, T.C. and Teng, T.L.: An overview of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 91, 895–913, 2001.

Shou, K.J., Hong, C.Y, Wu, H.Y., Hsu, H.Y., Fei, L.Y. Lee, J.F., and Wei, C.Y. Spatial and temporal analysis of landslides in central Taiwan after 1999 Chi-Chi earthquake, Eng. Geo, 123, 122–128, 2011.

Yang, M.D., Lin, J.Y., Lin, W.J., Huang, K.S., and Wu, D.Y. Disaster investigation in Chenyulan river basin during Typhoon Morakot, J. Chin. Soil Water Conserv., 40, 4, 345–358, 2009 (in Chinese).

Characteristics of the debris-flow-triggering rainfalls recorded in the Shenmu area of Central Taiwan: An update

Y.M. Huang[1], S.L. Chen[2], Y.M. Fang[2]

[1]National Kaohsiung University of Science and Technology, Kaohsiung, Taiwan, China, ninerh@nkust.edu.tw

[2]Feng Chia University, Taichung, Taiwan, China

Abstract. The geological conditions are unstable in the mountain areas, so debris flows and landslides are common geohazards in Taiwan. To protect people from the threats of debris flows, the local government has set up monitoring stations at locations prone to debris flows and applied rainfall thresholds in response to debris-flow disasters. The Shenmu area is a famous location for debris flows in central Taiwan. Previous studies have shown that the debris flow occurred almost once per year between 2004 and 2021. The rainfall thresholds from the observed events are determined by the rainfall indices, the maximum hourly rainfall, Imax, and the 24-hour accumulated rainfall, R_{24}. Based on the data collected by the Shenmu Debris Flow Monitoring Station, the rainfall thresholds of 9 and 23 mm of I_{max} and R_{24} were proposed for the area. To better understand the rainfall thresholds in Shenmu, this study collected data from the nearby rainfall station operated by the Central Weather Bureau Taiwan and compared the rainfall characteristics with the previous study in the Shenmu area. The analysis implied that using $I_{max,24}$, the maximum hourly rainfall, and R_{24}, the accumulated rainfall, both calculated in the 24 h before the debris flow occurrence, are considerably better than other rainfall indices for debris-flow warning thresholds in the Shenmu area. The rainfall thresholds $I_{max,24}$, and R_{24} of 10 and 100 mm revealed a debris-flow capture percentage of 55.6%, and 4 and 10 mm revealed a 43.8% debris-flow capture percentage, based on the total of 52 recorded rainfall events.

Key words: *debris flow, rainfall thresholds, maximum hourly rainfall, accumulated rainfall*

Cite this article: Huang Y.M., Chen S.L., Fang Y.M. Characteristics of the debris-flow-triggering rainfalls recorded in the Shenmu area of Central Taiwan: An update. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 179–188.

Характеристики дождей, вызвавших селевые потоки, зарегистрированные в районе Шэньму в Центральном Тайване: новые данные

И.М. Хуан[1], С.Л. Чэнь[2], И.М. Фан[2]

[1]Национальный Гаосюнский университет науки и технологий, Гаосюн, Тайвань, Китай, ninerh@nkust.edu.tw

[2]Университет Фэн Чиа, Тайчжун, Тайвань, Китай

Аннотация. Геологические условия в горных районах нестабильны, поэтому селевые потоки и оползни являются распространенными геологическими опасностями на Тайване. Чтобы защитить людей от угроз селевых потоков, местные власти установили станции мониторинга в местах, подверженных сходу селей, и пороговые значения количества осадков, превышение которых свидетельствует об опасности. Район Шэньму – один из наиболее селеопасных в Центральном Тайване. Предыдущие исследования показали, что селевые потоки происходили почти один раз в год в период с 2004 по 2021 г.

Пороговые значения количества осадков в результате наблюдаемых событий определяются индексами осадков, максимальным количеством осадков за час I_{max} и накопленным за 24 ч R_{24}. На основании данных, собранных станцией мониторинга селевых потоков Шэньму, для этого района были предложены пороговые значения осадков I_{max} = 9 и R_{24} = 23 мм. Для этого в рамках исследования были собраны данные с близлежащей осадкомерной станции, управляемой Центральным метеорологическим бюро Тайваня, и полученные значения сравнены с величиной осадков, определенной в ходе предыдущих исследований в районе Шэньму. Анализ показал, что использование $I_{max,24}$ (максимального почасового количества осадков) и R_{24} (суммарного количества осадков, рассчитанных за 24 ч до возникновения селевого потока) дает более релевантные результаты, чем другие индексы осадков, для установления пороговых значений в целях предупреждения о селевых потоках в районе Шэньму. Использование пороговых значений количества осадков $I_{max,24}$ и R_{24}, равных 10 и 100 мм, дало положительный результат: удалось спрогнозировать 55,6% селевых потоков, а значения 4 и 10 мм – 43,8% из общего числа зарегистрированных случаев выпадения осадков, равного 52.

Ключевые слова: *селевые потоки, пороговые значения осадков, максимальные часовые осадки, накопленные осадки*

Ссылка для цитирования: Хуан И.М., Чэнь С.Л., Фан И.М. Характеристики дождей, вызвавших селевые потоки, зарегистрированные в районе Шэньму в Центральном Тайване: новые данные. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 179–188.

Introduction

Taiwan is located in the path of monsoons and typhoons and is prone to earthquakes. The fragile geology conditions, due to the frequent heavy rainfalls and earthquakes, contribute to the various geo-hazards in the mountain areas. Therefore, the debris flow has become a common geo-hazard in Taiwan in the past two decades [*Huang et al., 2013; Huang et al., 2017; Huang, 2023*]. The disaster of debris flow had caused serious damage to the public facilities and personal properties from the case history. In order to monitor the debris flows and better understand the characteristics of the triggering conditions, The Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation (ARDSWC) in Taiwan has established debris-flow monitoring stations since 2002 and operates a national debris-flow disaster warning system at present.

To analyze the triggering factors of debris flows, monitoring devices were installed in areas prone to debris flows. Instruments of rain gauges, water level meters, wire sensors, soil water moisture sensors, and CCD cameras are used in most monitoring stations. Full-scale experimental data is difficult to obtain for debris-flow research. Therefore, the observation data from the monitoring sites provides valuable information for debris-flow studies [*Huang et al., 2013; Hürlimann et al, 2019; Huang, 2023*].

In a potential area, the debris flows usually occur in a low frequency and are considered uncommon events when compared to other natural hazards, e.g., heavy rainfalls. But at some locations, the occurrence frequency of debris flow is higher than in other locations [*Marchi et al., 2021*]. The Shenmu area in Taiwan is the "hot spot" where debris flows have occurred more often than in other locations and almost once every year in the past 18 years.

Rainfall thresholds are commonly applied for debris-flow early warning and are currently used by the ARDSWC. A rainfall dataset of debris flows recorded in the Shenmu area between 2004 and 2021 is presented in this study [*Huang, 2023*]. The event data were collected from the Shenmu Village rainfall station (23°31.9645’N, 120°50.62’E) maintained by the Central Weather Administration (CWA) and from the Shenmu debris flow monitoring station (23°31.6938’N, 120°51.3927’E) maintained by the ARDSWC. The data prepared in this study is an update to the previous study [*Huang, 2023*] to complete the event data mainly obtained

from the CWA rainfall station. The data include the date of events, time of debris flow occurrence (whenever available), and the triggering rainfalls (rainfall intensity, accumulated rainfall, and duration).

Analysis of debris-flow rainfall triggering factors, the maximum hourly rainfall, and accumulated rainfall of a period are discussed and analyzed from different approaches. The rainfall indices that reflect the characteristics of debris flows in Shenmu are described here and compared with those in the previous study.

Study area and database

The study area is close to the Shenmu Village, located in the watershed of the Chen-Yu-Lan River in central Taiwan. Chen-Yu-Lan River has a length of 42.4 km with an average declination slope of 5%, and its watershed area is about 450 km^2. This area was fragile after the Chi-Chi Earthquake (occurred on September 21, 1999). According to Chen et al. (2012), the landslide ratio (landslide projected area/total catchment area) of this catchment area is about 12% ~ 34.2% (from 1996 to 2009), and there is a trend of increasing year by year. A great percentage of the watershed was affected by significant landslides [*Huang, 2023*].

Based on the recorded rainfall data from June 1987 to February 2017, obtained from the Shenmu Village Station of Taiwan's Central Weather Administration (CWA), the average annual rainfall in the Aiyuzi Stream watershed area is about 3,054.7 mm, of which the average total accumulated rainfall in the rainy season (from April to October each year) is 2,644.5 mm [*Wei et al., 2018*]. The slope angle in the upper stream areas of Aiyuzi Stream is about 39.3^o on average [*Wei et al., 2018*].

The three potential debris-flow torrents, Aiyuzi Stream (DF226), Huosa Stream (DF227), and Chusuei Stream (DF199), join into Heshe Stream around the entrance of the village and the entire basic area is about 72.2 km^2 [*Huang et al., 2013; Hürlimann et al., 2019; Huang 2023*]. The terrain and landslide areas of streams and the basic info are shown in Fig. 1 and Table 1, respectively. Because of its shorter length, larger landslide areas upstream, and heavy rainfalls, debris flows frequently occurred in the downstream section of the Aiyuzi Stream since Typhoon Morakot in 2009 [*Huang et al., 2013*]. The debris flows in the Shenmu area are classified as granular flows.

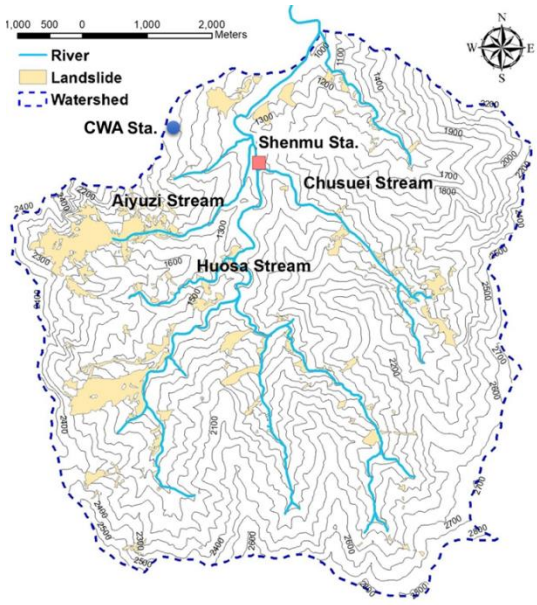


Fig. 1. The maps of terrain and the landslide areas (after 2009) of Shenmu area. (after [*Huang et al., 2019*])

Table 1. The total landslide area in Shenmu after 2009 [*Huang et al., 2013*]

Debris flow No.	Stream	Length, km	Catchment area, m^2	Total landslide area, m^2
DF199	Chusuei Stream	7.16	8,615,600	332,900
DF227	Huosa Stream	17.66	26,200,000	1,493,200
DF226	Aiyuzi Stream	3.30	4,006,400	998,500

Tables 2 and 3 show the events collected for this study, in which the rainfall data were obtained from the Shenmu Village Station of CWA. Fig. 2 shows the definition of a rainfall event. The previous study showed that the debris flows occurred almost every year from 2009 to 2014 [*Huang, 2023*]. From 2014 until 2021, there is only one record of debris flow in Shenmu (Table 2). The occurrence frequency seems to have reduced to very few in the past 7 years (from 2015 to 2021). Comparatively, the average frequency of debris flow occurrence is 1.83 times per year from 2004 to 2009 (11 debris-flow events in 6 years) and is 0.75 times per year after 2009 (9 debris-flow events in 12 years) [*Huang, 2023*].

Table 2. Debris flow events in the Shenmu area (rainfall data obtained from the CWA Rainfall Station)

No	Date (Y/M/D)	Event	Location (stream)	Time of occurrence	Hazard type	Date/time	Rainfall, mm				Duration, h
							I_{max}	$I_{max,24}$	R_{24}	R_{bt}	D_{bt}
1	2004/5/20	0520 Heavy Rainfall	Aiyuzi	14:53	*DF*	5/20/13:00~ 16:00	13.5	13.5	25.5	12	1
2	2004/5/21	0521 Heavy Rainfall	Aiyuzi	16:08	*DF*	5/21/16:00~ 21:00	45.0	13.5	36	13.5	0.13
3	2004/5/29	0529 Heavy Rainfall	Aiyuzi	16:19	*DF*	5/29/16:00~ 17:00	6.5	6.5	6.5	6.5	0.32
4	2004/6/11	-	Aiyuzi	16:42	*DF*	6/11/16:00~ 19:00	15.5	15.5	3	15.5	0.7
5	2004/7/02	Typhoon Mindulle	Aiyuzi	09:16	*DF*	7/2/08:00~ 7/5/6:00	72.5	27.5	53	27.5	0.3
6	2004/7/02	Typhoon Mindulle	Aiyuzi	16:41	*DF*	7/2/08:00~ 7/5/6:00	72.5	36	236	148.5	6
7	2006/6/09	0609 Rainfall	Chusueim, Aiyuzi	08:32 (at Aiyuzi)	*DF*	6/8/11:00~ 6/11/12:00	73	36	285	73	0.5
8	2007/8/13	0809 Rainfall	Chusuei	-	*DF, FLD*	8/12/12:00~ 8/13/13:00	29.5	23.5	183	46.5	3.0
9	2007/8/18	Typhoon Sepat	Chusuei	-	*DF, FLD*	8/18/00:00~ 8/20/17:00	23.5	17.5	93.5	20	1
10	2007/10/06	Typhoon Krosa	Aiyuzi	-	*DF*	10/6/09:00~ 10/7/19:00	74.5	66.5	270	74.5	1
11	2008/7/17	Typhoon Kalmaegi	Chusuei, Aiyuzi	-	*DF, FLD*	7/17/21:00~ 7/18/10:00	77	18	34	60	1
12	2009/8/08	Typhoon Morakot	Chusuei, Huosa, Aiyuzi	04:39 (at Aiyuzi)	*DF, LS*	8/7/1:00~ 8/10/18:00	95	27	217	-	0.67
13	2009/8/08	Typhoon Morakot	Aiyuzi	16:57	*DF*	8/7/1:00~ 8/10/18:00	95	33.5	453.5	76	2
14	2011/7/13	0713 Heavy Rainfall	Aiyuzi	14:33	*DF*	7/13/15:00~ 17:00	15.5	4.5	11	10	1
15	2011/7/19	0719 Heavy Rainfall	Aiyuzi	03:19	*DF*	7/18/23:00~ 7/19/17:00	45	30	105.5	27.5	0.55
16	2011/11/10	1110 Heavy Rainfall	Aiyuzi	13:29	*DF*	11/10/2:00~ 11/11/2:00	16.5	9.5	66.5	46	10
17	2012/5/04	0504 Heavy Rainfall	Aiyuzi	15:56	*DF*	5/4 12:00~ 16:00	17	19	85.5	66.5	23
18	2012/6/10	0610 Rainfall	Aiyuzi	10:34	*DF*	6/10 4:00~ 6/12 21:00	39.5	10	60.5	39.5	14.57
19	2012/6/10	0610 Rainfall	Aiyuzi	15:14	*DF*	6/10 4:00~ 6/12 21:00	39.5	33	179.5	37	2.23
20	2013/5/17	0517 Heavy Rainfall	Aiyuzi	07:02, 5/19	*DF*	5/19 6:00~ 13:00	48	17.5	51.5	-	0.03
21	2013/7/11	Typhoon Soulik	Aiyuzi	06:54, 7/13	*DF*	7/12 20:00~ 7/13 16:00	60.5	60	271.5	134	4.9
22	2014/5/20	0520 Heavy Rainfall	Aiyuzi	12:53	*DF*	5/20 13:00~ 22:00	35.5	7.5	28	9.5	19.88
23	2017/6/01	0601 Heavy Rainfall	Aiyuzi	11:40, 6/02	*DF*	6/1 15:00~ 6/4 19:00	62.5	41	196.5	18	1.73

I_{max} – the maximum hourly rainfall (mm/h) of the whole event; $I_{max,24}$ – the maximum hourly rainfall in the 24 h before the occurrence of the debris flow; R_{24} – the cumulative rainfall in the 24 h before the occurrence of the debris flow; R_{bt} – the cumulative rainfall between $I_{max,24}$ and the occurrence of the debris flow; D_{bt} – the time elapsed between $I_{max,24}$ and the occurrence of the debris flow; *DF* – debris flow; *FLD* – flood; *LS* – landslide. "-"– not available.

Table 3. Non-debris flow events in the Shenmu area (rainfall data obtained from the CWA Rainfall Station)

No	Date (Y/M/D)	Event	Date/Time	Rainfall, mm				Duration, h
				I_{max}	$I_{max,24}$	R_{24}	R_{bt}	D_{bt}
1	2008/7/18	Typhoon Kalmaegi	7/17 21:00 – 7/18 10:00	77	67.5	267	250	4
2	2008/7/28	Typhoon Fungwong	7/28 6:00 – 7/29 15:00	40	16	51	16	2
3	2008/9/14	Typhoon Sinlaku	9/13 5:00 – 9/15 17:00	41	32	326.5	67.5	2
4	2009/6/20	Typhoon Linfa	6/20 18:00 – 6/21 8:00	9.5	2.5	4	1.5	23
5	2009/10/5	Typhoon Parma	10/5 13:00 – 23:00	11.5	7.5	17	11	1
6	2010/5/23	0523 Heavy Rainfall	5/23 10:00 – 5/24 1:00	42	36.5	54.5	42	1
7	2010/5/31	0523 Heavy Rainfall	5/30 22:00 – 24:00	12	12	47	1	1
8	2010/7/28	0726 Heavy Rainfall	7/26 24:00 – 7/28 10:00	11.5	11.5	98	57	10
9	2010/9/1	Typhoon Namtheum-Lionrock	9/1 14:00 – 17:00	5.5	3.5	8.5	5.5	1
10	2010/9/19	Typhoon Fanapi	9/19 5:00 – 16:00	20.5	11	17	17.5	1
11	2011/6/25	Typhoon Meari	6/24 20:00 – 6/25 7:00	21	21	64	61.5	8
12	2011/8/30	Typhoon Nanmadol	8/30 11:00 – 13:00	8.5	5	40	36.5	19
13	2011/10/3	1001 Heavy Rainfall	10/3 3:00 – 6:00	7	6	19	6.5	1
14	2012/5/20	0520 Heavy Rainfall	5/20 2:00 – 10:00	28.5	28.5	74.5	28.5	1
15	2014/6/7	0606 Heavy Rainfall	6/6 14:00 – 23:00	14	9.5	40	14	1
16	2014/6/14	Typhoon Hagibis	6/13 15:00 – 18:00	13	12	29.5	13	1
17	2014/7/21	Typhoon Matmo	7/22 20:0 – 7/23 24:00	30.5	25.5	189	137	9
18	2015/5/23	0520 Heavy Rainfall	5/23 14:00 – 23:00	17.5	7.5	25	34.5	23
19	2015/7/9	Typhoon Chanhorm	7/10 18:00 – 7/11 8:00	19	9.5	78.5	27	2
20	2015/8/6	Typhoon Soudelor	8/8 7:00 -8/9 5:00	29	26	109.5	60.5	4
21	2016/6/11	0611 Heavy Rainfall	6/11 3:00 – 18:00	18	6.5	23.5	18	1
22	2016/9/14	Typhoon Meranti	9/14 10:00 – 13:00	9	8.5	38	16	2
23	2016/9/16	Typhoon Malakas	9/17 5:00 – 13:00	47	13.5	30.5	58	3
24	2016/9/26	Typhoon Megi	9/27 10:00 – 9/28 8:00	31	26.5	158	120.5	8
25	2017/6/14	0613 Heavy Rainfall	6/14 7:00 -20:00	21	17	108.5	83	8
26	2017/6/15	0613 Heavy Rainfall	6/15 10:00 – 21:00	11	21	118	72	19
27	2017/6/17	0613 Heavy Rainfall	6/17 2:00 -15:00	25.5	11.5	42	39.5	3
28	2017/7/29	Typhoon Neast-Haitang	7/29 17:00 – 7/30 2:00	50	20.5	103.5	50	1
29	2017/7/30	Typhoon Neast-Haitang	7/30 19:00 – 7/31 14:00	15.5	11	76	23.5	2

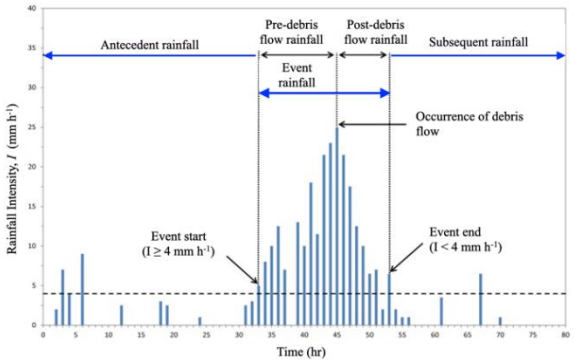


Fig. 2. Schematic diagram of the definition of a rainfall event

From the number of debris-flow events in Table 2, the geological environment of the Shenmu area seemed to reach a balance from 1999 to 2009. After 2009, the environmental conditions greatly changed due to the extremely heavy rainfalls caused by Typhoon Morakot, and the local environmental conditions seemed to reach another balance from 2009 to 2014. Until now, the Shenmu has been threatened by debris flow during typhoons and heavy rainfalls.

Analysis of rainfall characteristics of debris flows in the study area

Based on the event records in Tables 2 and 3, the rainfall indices of the debris-flow events and the rainfall events in which no debris flow occurred are shown on Figs. 3–7. The rainfall distribution of debris-flow and non-debris-flow events are shown on Figs. 3 and 4, respectively. The rainfall indices used in this study are I_{max}, the maximum hourly rainfall of the event, $I_{max,24}$, the maximum hourly rainfall in the 24 h before the occurrence of the debris flow, R_{24}, the cumulative rainfall in the 24 h before the occurrence of the debris flow, R_{bt}, the cumulative rainfall between $I_{max,24}$ and the occurrence of the debris flow, and D_{bt}, the time elapsed (in hour) between $I_{max,24}$ and the occurrence of the debris flow.

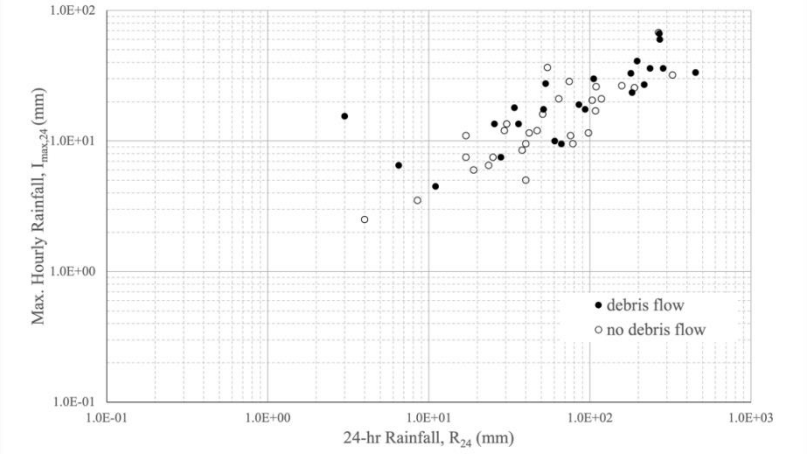


Fig. 3. The rainfall indices of R_{24} and $I_{max,24}$ of observed events between 2004 and 2021

Fig. 3 shows the results of R_{24} and $I_{max,24}$ of events, and Fig. 4 shows the results of R_{24} and I_{max}. For comparison, it is noted that the distribution in Fig. 3 is less scattered than that in Fig. 4 when R_{24} is greater than 10 mm. The distribution difference in Figs. 3 and 4 implies that the rainfall index, $I_{max,24}$, is more suitable to describe the rainfall characteristics of debris flows. Both Figs. 3 and 4 show a similar trend of increasing accumulated rainfall with increasing hourly rainfall.

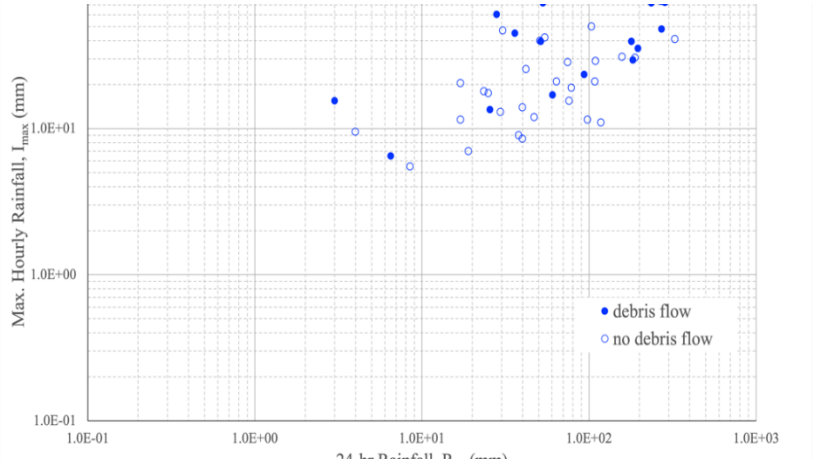


Fig. 4. The rainfall indices of $R_{24}$and I_{max} of observed events between 2004 and 2021

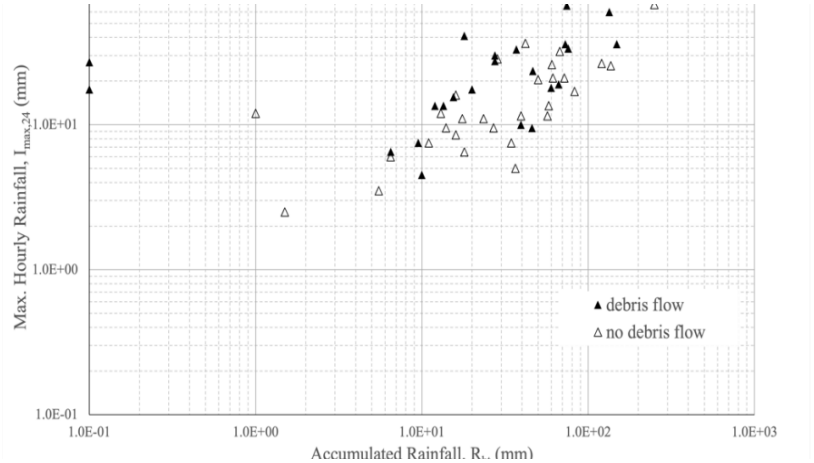


Fig. 5. The rainfall indices of R_{bt} and $I_{max,24}$ of observed events between 2004 and 2021

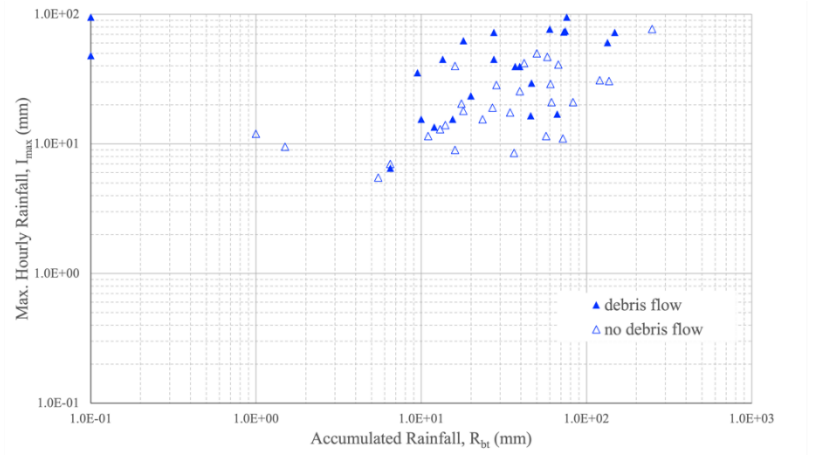
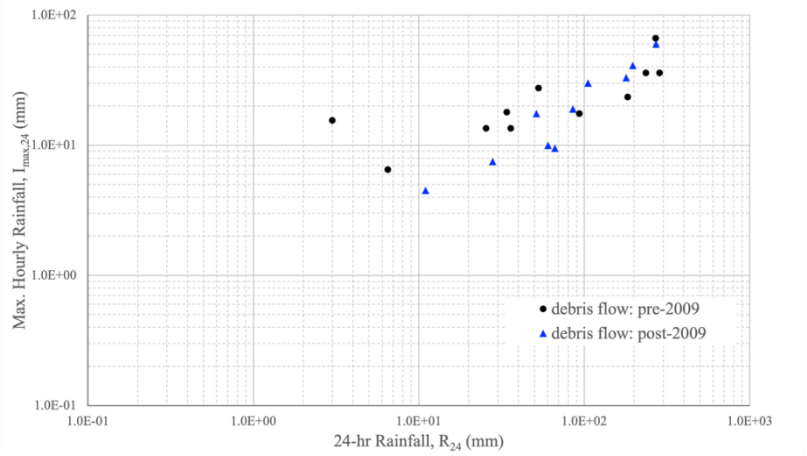


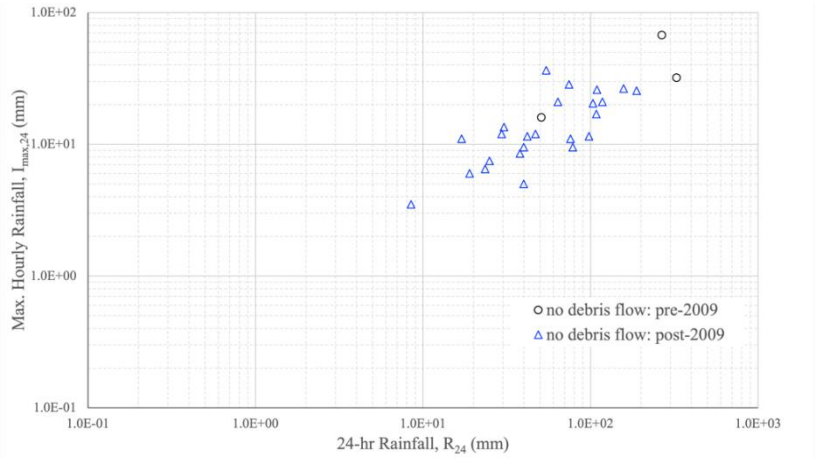
Fig. 6. The rainfall indices of R_{bt} and I_{max} of observed events between 2004 and 2021

Another comparison was made by plotting the indices of R_{bt}, $I_{max,24}$, and I_{max} of events, as shown on Figs. 5 and 6. Both Figs. 5 and 6 represent more scattered data than those in Figs. 3 and 4, which implies that the use of R_{24} is considerably better than R_{bt}. The index performance difference between R_{24} and R_{bt} is possibly due to the likely random time elapsed between the $I_{max,24}$, and the occurrence of debris flow. Typhoon Morakot in 2009 was a major event that significantly impacted the Shenmu area. From Fig. 7, however, the rainfall-index distribution

of debris-flow and non-debris-flow events are not quite different before and after 2009. The data shows that the debris flow usually occurs when the R_{24} is greater than 10 mm from previous figures.



a



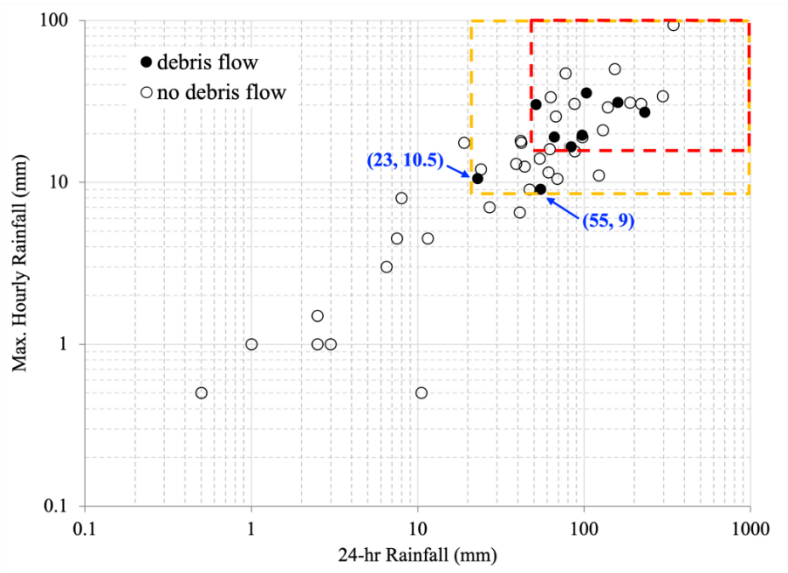
b

Fig. 7. The rainfall indices, R_{24} and $I_{max,24}$, of events before and after 2009 (a) debris flows (b) no debris flows

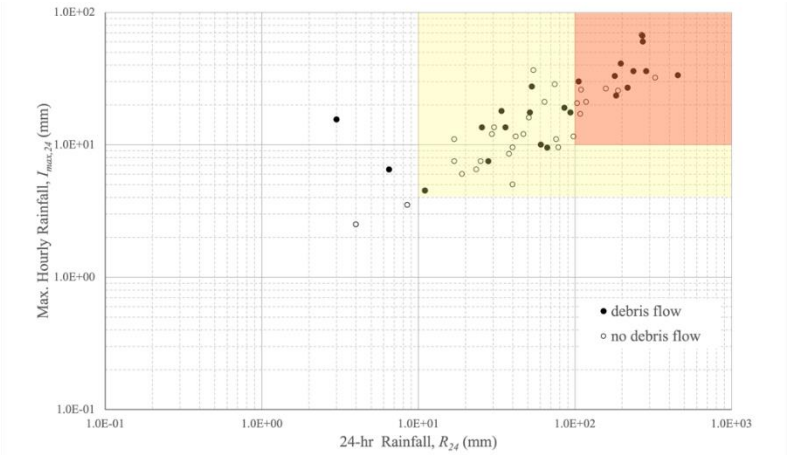
Based on these data in Tables 2 and 3, and the comparison results, the rainfall thresholds for the Shenmu area were proposed as shown in Fig. 8. Fig. 8*a* shows the thresholds of R_{24}, 9 mm, and I_{max}, 23 mm, about 30% capture rate of debris flows (10 debris flows and 23 non-debris flows), based on the rainfall data obtained from the Shenmu Debris Flow Monitoring Station [*Huang, 2023*]. In Fig. 8*b*, rainfall thresholds of R_{24} greater than 100 mm and $I_{max,24}$ greater than 10 mm imply about 55.6% capture rate of debris flows (10 debris flows and 8 non-debris flows), and thresholds of R_{24} greater than 10 mm and $I_{max,24}$ greater than 4 mm resulting in the capture rate of debris flows of 43.8% (21 debris flows and 27 non-debris flows). Different rainfall index pairs of R_{24} and $I_{max,24}$ thus were proposed to be applied to debris flow warning, with different levels (Yellow and Orange) of possibility, as shown in Fig. 8*b*.

The results from Fig. 8 indicate that the rainfall indices of R_{24} and $I_{max,24}$ are more suitable for debris-flow rainfall thresholds using the data from CWA Rainfall Station. Overall, the rainfall data from the Shenmu Monitoring Station and CWA are reliable for determining the rainfall thresholds, with an acceptable capture rate of debris flow of around 30% to 50%. Although a capture rate higher than 50% or more is desirable for debris-flow disaster warnings

in practice, the proposed rainfall thresholds of this study are still useful for disaster response for current conditions in Shenmu.



a



b

Fig. 8. The rainfall thresholds: a – R_{24} and I_{max} [*Huang, 2023*]; b – the proposed R_{24} and $I_{max,24}$ for debris-flow events

Conclusions

Based on the collected data and case history of debris-flow events in this study, the analysis of rainfall characteristics and rainfall indices led to the following conclusions.

1. The main rainfall characteristics of debris flow in Shenmu area were appropriately described as the 24-hour accumulated rainfall, R_{24}, and the maximum hourly rainfall in the 24 h before the debris flow occurrence, $I_{max,24}$.
2. The thresholds of rainfall indices, R_{24} and Imax,24, are 10 mm and 4 mm, and 100 mm and 10 mm for different levels of capture rate and disaster concerns. These values are considerably useful for debris flow disaster monitoring.
3. Another perspective of rainfall in Shenmu is that the debris flows usually occur during the rainy season, especially during May to August of the year in this area. Debris flows are more likely to occur during heavy rainfalls or intense typhoons.

4. The dataset prepared in this study is useful for further analysis regarding the mechanism and characteristics of debris flows in Taiwan and advantageous to the global debris-flow dataset.

Acknowledgments

The author thanks the colleagues from GIS Research Center of Feng Chia University who established the debris-flow monitoring system in Taiwan and have maintained the system for about two decades.

References

Chen, S.C., Chen, S.C., and Wu, C.H.: Characteristics of the landslides in Shenmu watershed in Nantou County, J. Chin. Soil Water Conserv. (in Chinese), 43(3), 214–226, https://doi.org/10.29417/JCSWC.201209_43(3).0003, 2012.

Huang, Y.M., Chen, W. C., Fang, Y.M., Lee, B.J., Chou, T.Y., and Yin, H.Y.: Debris Flow Monitoring – A Case Study of Shenmu Area in Taiwan, Disasters Adv., 6, 1–9, 2013.

Huang, Y.M., Fang, Y.M., Chou, T.Y., Lee, C.Y., and Yin, H.Y.: The Vibration Signal Analysis of Debris Flow in Taiwan, in: Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, Taipei, Taiwan, 13–14 September 2017, 149–161, https://doi.org/10.6140/9789864371419.201710.0013, 2017.

Huang, Y.M., Fang, Y. M., and Yin, H. Y.: The Vibrational Characteristics of Debris Flow in Taiwan, in: Proceedings of the 7th International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation, Golden, Colorado, USA, 10–13 June 2019, 8 pp., http://dx.doi.org/10.25676/11124/173229, 2019.

Huang, Y.M., Lei, T. C., Lee, B. J., and Hsieh, M. H.: Landslide Potential Evaluation Using Fragility Curve Model, in: Landslides – Investigation and Monitoring, edited by: Ray, R. and Lazzari, M., IntechOpen, London, United Kingdom, DOI: 10.5772/intechopen.89183, 2019.

Huang, Y.M. Characteristics of debris flows recorded in the Shenmu area of central Taiwan between 2004 and 2021, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 2649–2662, https://doi.org/10.5194/nhess-23-2649–2023, 2023

Hürlimann, M., Coviello, V., Bel, C., Guo, X., Berti, M., Graf, C., Hübl, J., Miyata S., Smith, J.B., Yin, H.Y.: Debris-flow monitoring and warning: review and examples, Earth-Science Reviews, 199, 52 pp., https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102981, 2019.

Marchi, L., Cazorzi, F., Arattano, M., Cucchiaro, S., Cavalli, M., and Crema, S.: Debris flows recorded in the Moscardo catchment (Italian Alps) between 1990 and 2019, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 21, 87–97, https://doi.org/10.5194/nhess-21-87-2021, 2021.

Wei, S.C., Liu, K.F., Huang, Y.M., Fang, Y.M., Yin, H.Y., Huang, H.Y., and Lin, C.L.: Characteristics and Warning Methods of Ground Vibrations Generated by Debris Flows at Ai-Yu-Zi Creek, J. Chin. Soil Water Conserv. (in Chinese), 49(2), 77–88, DOI: 10.29417/JCSWC.201806_49(2).0002, 2018.

Detecting the debris flow frontal velocity by the mud droplets impinging on rigid surfaces

K.L. Huang, H.T. Chou

National Central University, Jhongli, Taiwan, China, profhtchou@gmail.com

Abstract. The surging front of the debris flow is fatal and may cause tremendous damage for buildings. The splashed mud droplets on the damaged buildings provide useful information to reconstruct the fontal velocity of the debris flow. This study examines the spreading process that occurs and the splatter patterns that form when a mud droplet impacts a solid surface at various angles and velocities. The impact velocities of the droplet and the impact angles were between 2.16–7.10 m/s and 15°–90°, respectively. MATLAB software, imaging software, and a high-speed camera were used to analyze the geometric properties of the resulting splatter. When the droplet impacted the surface at a higher impact angle, the lamella expanded in an almost circular fashion (W/L ≈ 1), and the spreading velocity decayed exponentially. By contrast, the aspect ratio decayed with time at lower impact angles. The aspect ratio (W/L) of the elliptic fingerprint of the impact droplet was close to the sine value of the impact angle, and the larger the impact angle, the more splatter were observed. The Area spreading ratio of the impact droplet on the surface is a function of Weber number and Reynolds number for different solid surfaces, and roughly independent of the impact angle. The result of the present study could contribute to understanding the impact condition of the debris-flow surges on structure surfaces.

Key words: *mud droplets, debris flow, frontal velocity, splatters, impact angle*

Cite this article: Huang K.L., Chou H.T. Detecting the debris flow frontal velocity by the mud droplets impinging on rigid surfaces. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 189–199.

Определение скорости фронтальной части селевого потока по каплям грязи, ударяющимся о твердые поверхности

К.Л. Хуан, Х.Т. Чоу

Национальный центральный университет, Чжунли, Тайвань, Китай,
profhtchou@gmail.com

Аннотация. Надвигающийся фронт селевого потока смертельно опасен и может нанести огромный ущерб зданиям. Капли грязи, разбрызгиваемые на поврежденные здания, дают полезную информацию для определения скорости Чуни фронтальной части селя. В данном исследовании рассматривается процесс распространения селевой волны и брызги, образующиеся при ударе капель грязи о твердую поверхность под разными углами и с разной скоростью. Скорость удара капли и углы удара составляли 2,16–7,10 м/с и 15°–90°, соответственно. Для анализа геометрических свойств образовавшихся брызг использовались пакет MATLAB, программное обеспечение для создания изображений и высокоскоростная камера. Когда капля ударялась о поверхность под большим углом, она расширялась почти по кругу ($W/L \approx 1$), а скорость распространения затухала по экспоненте. Напротив, при меньших углах подхода к зданию соотношение сторон уменьшалось со временем. Аспектное соотношение (W/L) эллиптического отпечатка капли было близко к синусу угла удара, и чем угол больше, тем больше наблюдалось брызг. Коэффициент распространения ударной капли по поверхности зависит от числа Вебера и числа Рейнольдса для различных твердых поверхностей и практически не

зависит от угла удара. Результаты настоящего исследования могут способствовать пониманию условий удара селевой волны о поверхности конструкций.

Ключевые слова: *капли грязи, селевый поток, фронтальная скорость, брызги, угол падения*

Ссылка для цитирования: Хуан К.Л., Чоу Х.Т. Определение скорости фронтальной части селевого потока по каплям грязи, ударяющимся о твердые поверхности. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 189–199.

Introduction

Due to its destructive velocity and thickness, the debris-flow front accompanying giant boulders may be fatal for people and cause tremendous damage for buildings as shown in Fig. 1*a* [*Chou et al, 2023*]. The mud splatters left on the damaged building ceiling (Fig. 1*b*) depict the powerful surging front of the catastrophic debris flow in Nansalu Village, Kaoshiung City of Taiwan during Typhoon Morakot (2009/08/09). Those mud splatters left on the ceiling after the impact of droplets indicate that the inertial force dominates the spreading of the mud droplets rather than the gravity force. The trajectories and patterns of the splashed droplets provide useful information to reconstruct the fontal velocity of the debris flow.

a b

Fig. 1. The debris-flow front caused badly damage to a building in Nansula Village during Typhoon Morakot on 08/09/2009 (picture taken on 06/06/2013): a – the debris-flow front with boulders caused severe damage to the building during Typhoon Morakot (08/09/2009); b – the mud splatters remained on the inside ceiling of the damaged building

The concept of droplets spreading on the dry surface is widely applied in industrial and nonindustrial processes. The process of a droplet impacting on a dry surface exhibits several flow patterns such as spreading, splashing, receding and rebound due to the surface and fluid properties [*Riboo et al, 2001*]. Brochard and De Gennes [*1984*] observed the profile of spreading polymer as a spherical cap with a projecting macroscopic “foot”. [*Pasandideh-Fard et al, 1996*] used surfactants to investigate the capillary effect on the spreading lamella. Šikalo et al. [*2005*] investigated the effect of the impact parameters on the time evolution of the spreading factor and apex height of the spreading lamella on horizontal and inclined surfaces. Wildeman et al. [*2016*] showed that with high velocity and free-slip condition, one-half of the initial kinetic energy can be transformed into surface energy in the spreading process, independent of the impact parameters. Furthermore, Gordillo et al. [*2019*] derived an analytical solution to predict the unsteady flow in the thin film which expands outwards. Garcia-Geijo et al. [*2021*] derived a theoretical model to predict the time-evolving asymmetric shape of the thin liquid film spreading on the substrate. For larger values of the inclination angle, the thin film

has an elliptical shape during the spreading process. MacDonell [*1971*] related the impact angle to the ratio of minor length to the major length with sine function. Harmanis and Thoroddsen [*1996*] introduced the Impact Reynolds number, $Re_I = V(\pi^2\rho D^3/16\sigma)^{1/4}/\nu^{1/2}$ to scale the maximum spreading diameter and the number of fingers, where ν is the kinematic viscosity, D the droplet diameter, σ the surface tension and ρ the fluid density.

Lee et al. [*2005*] developed a simple model to estimate impact velocity and droplet diameter via bloodstain diameters and the number of spines around the rim of a bloodstain. The model was compared to the experiment result under different surface roughness, impact inertia, and droplet size. Kang and Ng [*2006*], Kang et l. [*2011*] studied the effect of impact angle on splat morphology of spraying plasma and spreading behavior by analyzing the aspect ratio (Ψ) and the spread factor of elliptical-shaped splats. However, the spreading processes of the mud droplets upon different surfaces are still not fully understood because of the complexity of their multiphase characteristics. The geometric features in both the dynamic, earlier stage and the final stage of the spreading process are explored in this study. The mud droplets are mixtures of water, flour and poster paint. The effect of surface inclined angle, impact velocity, and surface roughness are examined by experiments. Surfaces with different roughness and material properties such as brick, mirror and Teflon are used.

Experimental setup

The experimental setup is shown in Fig. 2. The droplet is manually discharged from a syringe and falls onto the substrate by gravity. The impact velocity V is determined by the falling height and was calculated by the formula which Lighthill [*1978*] suggested:

$$H = \frac{1}{2}\left(\ln\frac{B}{A_u} - \ln\left(\frac{B}{A_u} - V^2\right)\right)/A_u, \quad (1)$$

where H is the falling distance, $B = g\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right)$, $A_u = 0.33\frac{\rho_a}{\rho}/D$, ρ is the density of droplet, ρ_a is the density of air. Here the Reynolds number, $Re = \rho_a V D/\mu_a$, and μ_a is the dynamic viscosity of the air. Eq. (1) has been validified by Chen [*2003*] as shown in Fig. 3, and it is valid when $Re \leqq 2\times10^5$.

In the experiment, the impinging and spreading process were observed from both top and side view with a high-speed camera (IDT, XS-3 model, with the frame rates from 3352–9954 fps, and resolution 10–20 pixels/mm). The initial time t =0 is defined as the drop first contacted with the surface (time error is under 0.3 ms). The spreading process and final pattern of the spatters were photographed vertically to the solid plane. At each drop height, the tests repeat six times, to reduce the error (about 7%). The splatter images taken from the high-speed camera were further analyzed by the Matlab built-in algorithm, "Sobel", which can detect the edge of each splatter and record their coordinates in every image. After the edge detection process, the characteristic feature of the spreading drop/splatters (drop height, splatter width, and length) can be calculated by simple discriminant loops written in Matlab language.

Table 1 shows the surface properties of two surfaces. The standard deviation (Stdev) of surface roughness R_a implies the high irregularity of the mirror and brisk surface, and the equilibrium contact angle shows the wettability characteristic of the mirror and brisk surface. The test fluids include decane and a mixture of water, poster paint, and flour as shown in Table 2. Flour was chosen to be the suspended particles in the water since it can be distributed more uniformly than clay or other soil materials. Moreover, the droplet impact sequences of the clay-contained droplet are too blurred to be analyzed by the Matlab program. The surface tension and viscosity of the test fluid were measured by the du Nouy Ring method and rheometer (Anton Paar, MCR 51).

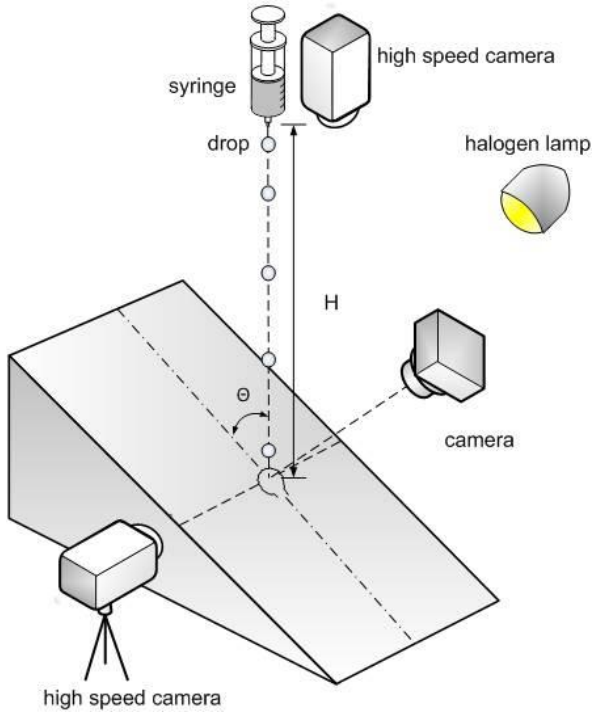


Fig. 2. Experimental setup

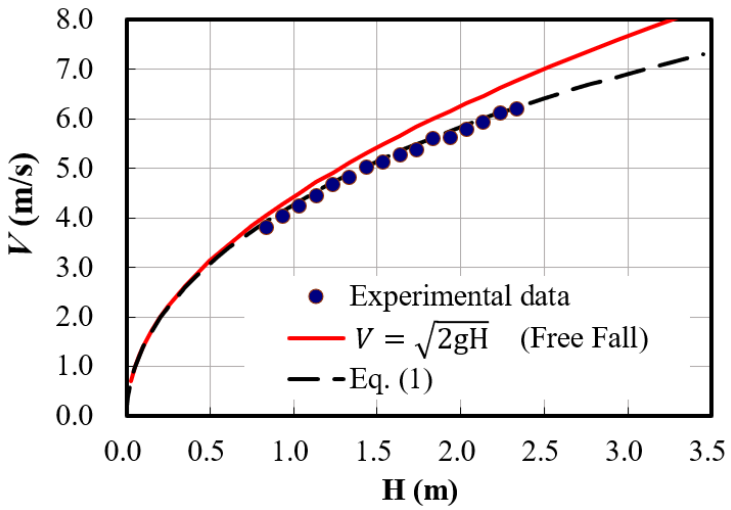


Fig. 3. The comparison between Eq. (1) and the experimental data from [*Chen, 2003*]

Table 1. Surface properties of impact surfaces

	R_a(μm)/Stdev	Receding contact angle, θ_r	Advancing contact angle, θ_a
Mirror	0.022/0.015	40∘	48∘
Brisk	25.8/8.03	34∘	44∘

Table 2. Liquid properties of tested fluid

Fluid	ρ (kg/m^3)	σ (dyne/cm)	μ (mPa·s)	D (mm)
Mixture	1170	51.3	11.0	4.71 ± 0.3
Decane	730	23.4	0.92	2.45 ± 0.15

Results and discussion

Morphology in the spreading process. Profile property of perpendicular impact droplet

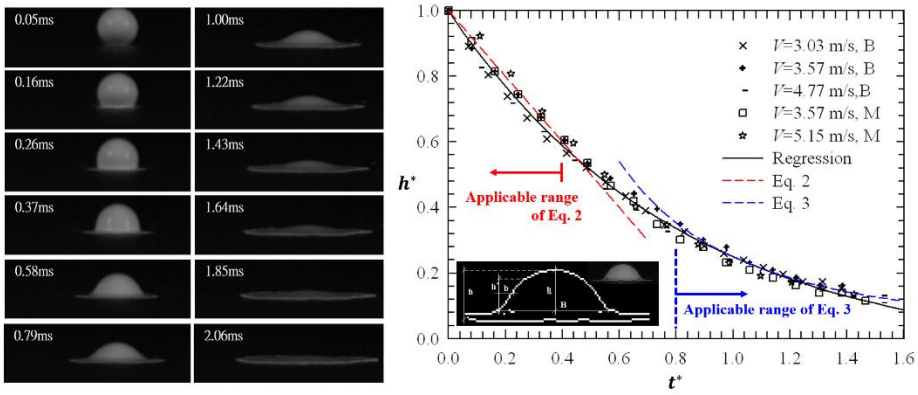
Šikalo et al. [*2002*] showed how surface material, impact velocity, viscosity, surface tension, and droplet size affect the time evolution of apex height and spread factor. The result demonstrated surface property only affects the apex height in the recoil phase. The difference between the advancing and receding static contact angle of the test surface change from 0° to 105°, while the range of surface roughness, R_a is between 0.003 to 3.6 μm. Fig. 4*a* shows the side-view sequence when a droplet impacts the surface, and only deposition and splash were found under the present experiment condition. In the present study, drop height h was also normalized by droplet diameter D to h*=h/D, and time was normalized by (D/*V*) to t* = t*V*/D. Fig. 4*b* shows that impact velocity and surface did not affect the apex height evolution significantly, which gives the same result to Šikalos' study. The equation of fitting curve on mirror and brick is h*=-0.059+1.059exp(-1.23t*). The data is also compared with Roisman's [*2009*] approximation:

$$h^* \approx 1 - t^* \text{ at } t^* < 0.4, \tag{2}$$

which expresses the drop deposit almost as a rigid body at the beginning of spreading, and,

$$h^* \approx \frac{0.39}{(0.25+t^*)^2} \text{ at } 0.7 < t^* < t^*_{\text{viscous}}, \tag{3}$$

which ignores the near-wall boundary effect. The comparison shows the approximation fits well with experiment data after t* =0.8.



a b

Fig. 4. Sequence of photographs when the droplet impinging on the brisk surface (a). The evolution of dimensionless apex height during droplet spreading on different surfaces (×, +, -: brick surface; □, ☆: mirror surface), and with different impact velocities. The experiment data is compared with predicted equation suggested by Roisman et al. [*2009*]. Inset: Coordinate system of drop "hat" (b)

Because of the complicated interaction on the solid-liquid interface, a new analytical method was suggested in the study. The film region was ignored and the "hat" part was focused on. After the built-in edge detection function of Matlab, the contour coordinate was normalized by the central height of the droplet and the width of the "hat" part, which can be expressed as $h'^* = h'/h = f(x)$ and $b^* = \frac{b}{B} = x$ as defined in the inset of Fig. 4*b*. The results were compared with symmetric Beta distribution, which could be expressed as:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^a(1-x)^a}{0.5^{2a}} & 0 \le x \le 1 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (4)$$

The experiment data fit well with Beta distribution, but the low resolution of the flatten hat makes contour data deviate from the function curve when t*>1. The parameter in Eq. (4) increases almost linearly with the dimensionless time t* (Fig. 5), showing the validity of Beta function in the velocity range of 2.41–5.15 m/s.

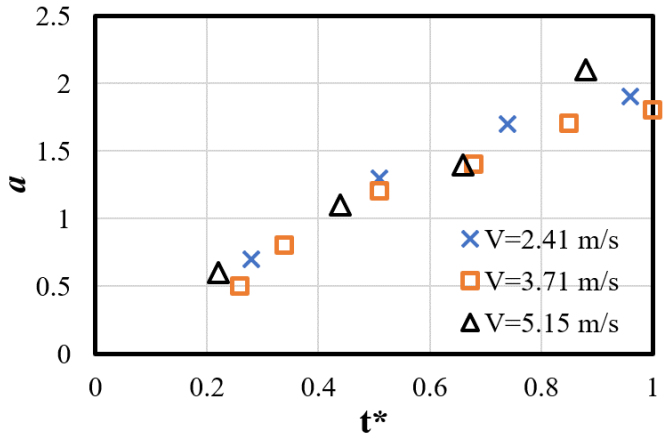


Fig. 5. The variation of parameter a in Beta function (Eq. 4) with t* at different impact velocity

Effect of impact angle on top-view contours

The time evolution of the spreading droplet contours on the inclined mirror with the impact velocity V =2.61m/s and different impact angles are shown in Fig. 6. During the spreading process, the expanding lamellas were elongated and gradually approached an elliptical shape. Ultimately, the liquid was accumulated by its own weight on the downside of the lamella. If the surface tension couldn't hold the accumulated liquid, it will flow down along the surface. Fig. 6 also shows upward spreading only occurs in θ =45°, 60°cases, and no receding occurs in four different impact angle conditions.

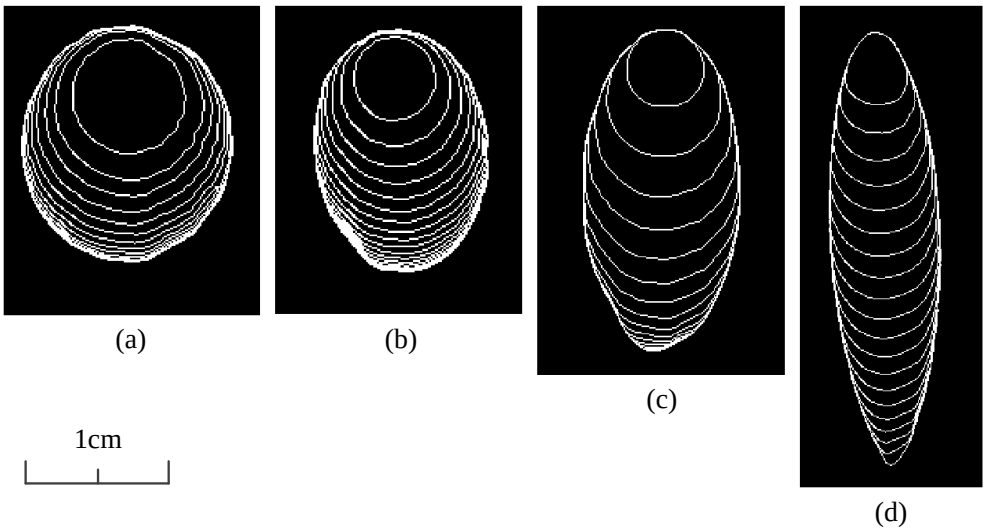


Fig. 6. Time evolution of expanding lamella contours with different impact angles at the impact velocity of V =2.61 m/s. The impact angles in (a) – (d) are 60°, 45°, 30°, 15°, respectively. The time intervals of neighboring contours in figures (a) – (d) are 0.54, 0.50, 0.53, 0.77 ms, respectively

In order to describe the contour evolution quantitatively, the major (L) and minor (W) axis of the contours were measured to define the aspect ratio, $I_f = 1/\Psi = W/L$ as Fig. 7*a* shown. Fig. 7*b* shows the effect of the impact angle on the aspect ratio of an expanding lamella. In cases $\theta = 45°, 60°$, the lamella first expanded circularly (W/L~1) in the initial state of the spreading process, then the aspect ratio decayed to a constant. In cases of lower impact angles such as $\theta = 15°, 30°$, the aspect ratio decayed from the very beginning of the spreading process. Ultimately, the aspect ratio of each splat approaches *sin*θ of the impact angle at different impact velocities.

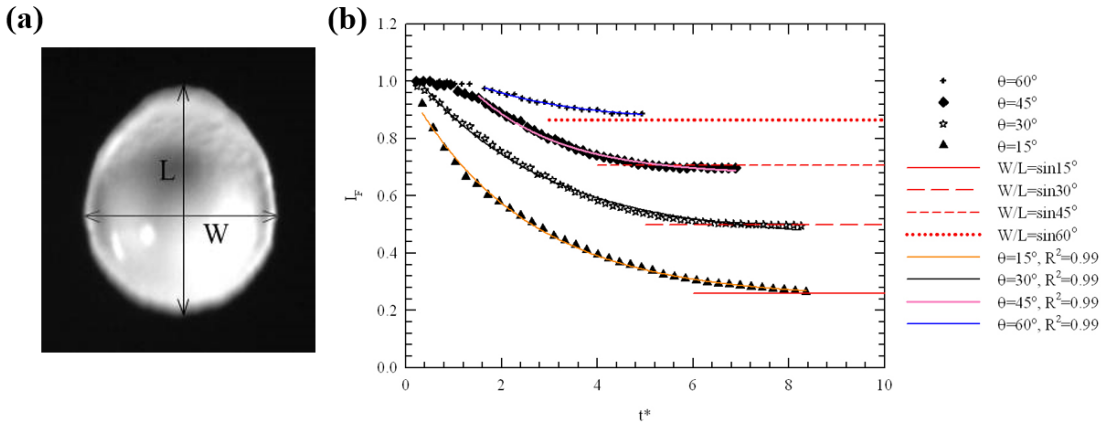


Fig. 7. Transience of a droplet spreading on an inclined mirror surface ($\theta = 30°$) (a). Time evolution of aspect ratio of expanding lamellas at different impact angles (V = 2.61m/s) (b)

Morphology of splatters

Fig. 8 shows the example of splatters left on both brick and mirror surfaces after impacting and spreading under different scenarios. Rough surface such as brick causes various splatter forms at different velocities, while splatters on mirror surfaces are more regular than that on brick. The sequence of the pictures as shown in Fig. 8*k* to Fig. 8*o* reveals the impact-angle effect on the development of splatters. Fingers are more active in the upper part of splatters than the lower part, and leakage occurs when the impact angle below 30° due to gravity effect.

The relationships between impact angles and number of fingers at different velocities are shown in Fig. 9. The number of fingers tends to increase linearly with *sin*θ, and the fitting equation for impact velocities of 2.41 m/s, 5.15 m/s and 6.70 m/s are $N_f = 24.5\ sin\theta - 7.5$, $N_f = 41.0\ sin\theta - 9.4$, and $N_f = 42.3\ sin\theta - 4.8$, respectively.

The geometric properties of splatters with fingers were based on their fingertips and the valleys, and the least-square method was applied to fit with an oval curve. The ultimate aspect ratio $I_{F(u)}$ was thus defined as W_u / L_u, where W_u and L_u are the minor and the major axis of the oval curve. Figs. 10*a–d* show the oval curve fits well with the splatters of lower impact angles, i.e., less the number of fingers. The splatter depicts an ellipse shape if all fingers were truncated. Fig. 10*e* shows ultimate transverse spread factor will increase linearly with *sin*θ, and the fitting equations of *V* =2.61 m/s and 5.15 m/s are $W_u/D = 1.67 + 3.34 sin\theta$ and $W_u/D = 1.32 + 2.02 sin\theta$, respectively.

The dimensionless splatter area A*, i.e. the ultimate spatter area ratio with respect to the droplet cross area ($A^* = \frac{splatter\ area}{\pi D^2/4}$), is a function of droplet inertia, surface tension, surface contact angle and liquid viscosity. A phenomenological model based on energy conservation was proposed by Pasandideh-Fard et al. [*1996*] as follows:

$$\frac{D_{splatter}{}^2}{D^2} = A^* = \frac{12+We}{3(1-cos\theta_a)+C(We/\sqrt{Re})}. \quad (5)$$

Fig. 8. Splatters left on different surfaces under different impact conditions. (a)~(e) represent on brick surface, V = 2.41 m/s, θ = 75°, 60°, 45°, 30°, 15°. (f)~(j) represent on brick surface, V = 5.15 m/s, θ = 75°, 60°, 45°, 30°, 15°. (k)~(o) represent on brick surface, V = 6.70 m/s, θ = 75°, 60°, 45°, 30°, 15°. (p)~(s) represent on mirror surface, V = 5.15 m/s, θ = 60°, 45°, 30°, 15°

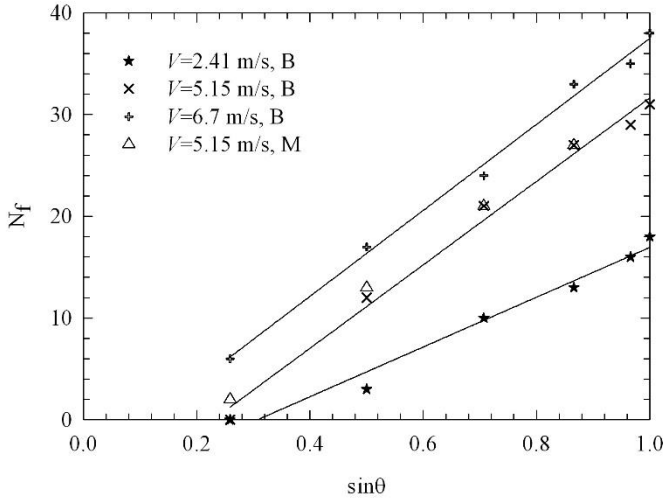


Fig. 9. The relationship between the impact angle and the number of fingers. Where ★, × – are brick surface; △ – mirror surface

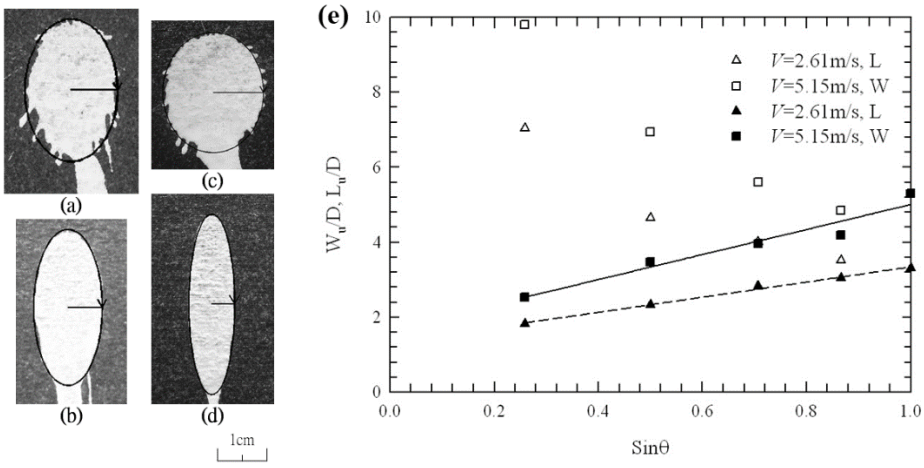


Fig. 10. The morphologic parameters of splatters under different impact conditions: a – H = 278 cm, θ = 45°; b – H = 150 cm, θ = 30°; c – H = 278 cm, θ = 60°; d – H = 29 cm, θ =15°; e – ultimate transverse spread factor of splatters on mirror surface as a function of the impact angle

In eq. (5), C is a constant representing the viscous dissipation and C= 4 was proposed in Pasandideh-Fard's et al. [*1996*] work.

By employing eq. (5) with the rheological properties and surface properties shown in Tables 1 and 2 (We $= \frac{\rho V^2 D}{\sigma}$, Re $= \frac{\rho V D}{\mu}$), one can predict the dimensionless splatter area A* with a constant C. The prediction with C = 2.7 in eq. (5) depicts better agreement with experimental data A^*_{exp} than the prediction with C = 4.0. The effect of surface roughness on A* seems negligible as shown in Fig. 11. Capillary effects tend to be negligible during droplet impact when We $\gg \sqrt{\text{Re}}$.

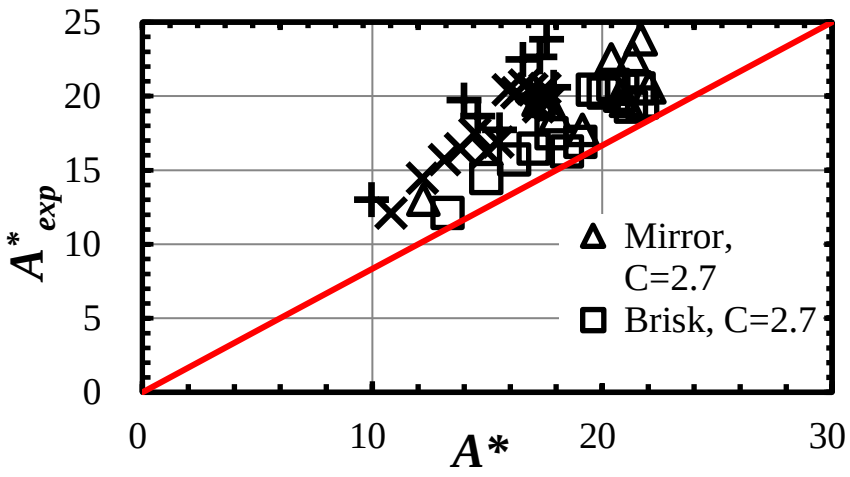


Fig. 11. The variation of dimensionless splatter areas (A^*) with Weber number (We) when droplets vertically impact brick and mirror surfaces

Fig. 12 shows the influence of impact angle on the splatter area of a pure liquid(decane). The influence of impact angle on dimensionless splatter area can be neglected for surfaces with larger equilibrium contact angles (θ_{eq}), thus the splatter area is mainly determined by the impact velocity corespondingly. However, the A^* values of smaller impact angles are larger than those of the normal impact cases ($\theta = 90^o$) for surafces with lower contact angles. The

corresponding mechanism for the conatct angles and liquid properties on the splatter spreading at different impact angles deserves further analysis.

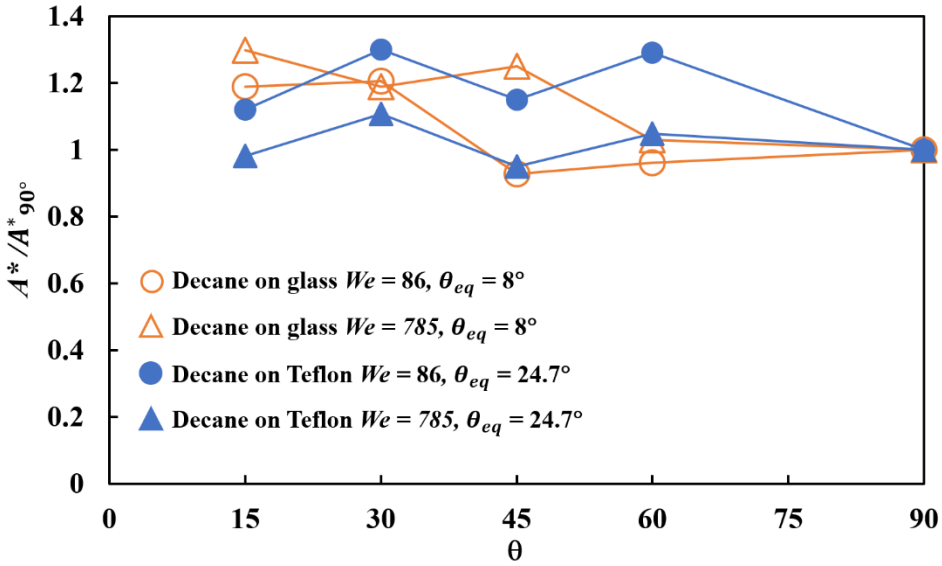


Fig. 12. The variation of the splatter area normalized by the that of normal impact ($A/A_{90°}$) with impact angle (θ) at different We and equilibrium contact angles

During the field investigation after the debris flow event, the dried splatter left on the building surface with its remained averaged thickness hf and the final spreading diameter D_{max}, which is correlated to the dimensionless splatter area A* as follows:

$$\frac{h_f/k}{D_{max}} = \frac{2}{3}\left(\frac{D}{D_{max}}\right)^3 = \frac{2}{3}A^{*\frac{3}{2}}. \quad (6)$$

In eq. (6), k denotes the solid volume concentration of the mud droplet prior to the inpingement. By employing eqs. (5) and (6) with the aspect ratio of the mud splatter remained on the surface and the droplet trajectory analysis, one can estimate the impact point and the corresponding debris-flow frontal velocity during its impingement on building surfaces.

Conclusion

The morphology of splatters and the spreading process were experimentally explored in this study, and the contribution of surface inclined angle, impact velocity and surface roughness to these features was investigated. In the initial state (t*<1) of the spreading process, the “hat” part of the droplet profile is closely fitted by the Beta function for perpendicular impact cases. When a droplet impacts an inclined surface, the lamella expands circularly in the initial state, then the aspect ratio(W/L) decays for cases of θ =45°, 60°; while the aspect ratio decays from the beginning of the spreading process for cases of θ =15°, 30°.The number of fingers and ultimate transverse spread factor of splatters increased linearly with *sin*θ. The aspect ratio for the elliptic fingerprint of the impact droplet is close to the sine value of the impact angle. The average length of fingers on the brick surface is larger than those on the mirror, and increasing impact velocity may wider the range of finger length in the brick surface case. The length distribution of fingers depicts a Maxwell-like distribution. The cohesion effect of the droplet on the splatter morphology could be studied further by using the clay droplet or larger concentrations of the added particles. The result of the present study could contribute to understanding the impact condition of the debris-flow surges on structure surfaces. The impact point and velocity of the debris flow on buildings could be estimated by the impact angles and splatter areas.

Acknowledgement

This research was partially funded by National Science Council, Taiwan, China (project numbers: 110-2625-M-008-008; 111-2222-E-008-007-MY2). The writers are grateful to Mr. Y.H. Chen and Ms. S.C. Hsieh for their help of performing droplet measurements.

References

Brochard, F. and de Gennes, P.G. [1984]. Spreading laws for liquid polymer droplets: interpretation of the <foot>. Journal of Physique Letters, 45, 597–602.

Bakshi, S., Roisman, I.V. and Tropea, C. [2007]. Investigations on the impact of a drop onto a small spherical target. Physics of Fluids, 19, 032102.

Chen, Y.H. [2003], On the relationship between geometric characteristics of mud splatters and the debris-flow front, Report of summer research project, National Science Council, Taiwan, R.O.C.)

Chou, H.T., Tsao, T.T., Hsu, C.H., Lee, C.F and Hwang, J.H., H.L., Lee, C.F. and Hwang, J.H. [2023]. Vulnerability assessment of buildings and residents for the catastrophic debris flow in Nansalu Village during Typhoon Morakot. Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 54(1):72–81. (in Chinese)).

García-Geijo, P., Riboux, G. & Gordillo, J. M. [2020]. Inclined impact of drops", J. Fluid Mech., 897, A12.

Gordillo, J.M., Riboux, G., & Quintero, E. S. [2019]. A theory on the spreading of impacting droplets. Journal of Fluid Mechanics, 866, 298–315.

Kang, C.W. and Ng, H.W. [2006]. Splat morphology and spreading behavior due to oblique impact of droplets onto substrates in plasma spray coating process. Surface Coating Technology, 200(18–19), 5462–5477.

Kang C.W., Tan, J.K., Pan L., Lowb, C.Y., & Jaffar, A. [2011]. Numerical and experimental investigations of splat geometric characteristics during oblique impact of plasma spraying. Applied Surface Science, 257, 10363–10372.

Kannan, R. and Sivakumar, A. D. [2008]. Impact of liquid drops on a rough surface comprising microgrooves. Experiment of Fluids, 44, 927–938.

Lee, H.S., Mehdizadeh, N.Z. and Chandra, S. [2005]. Deducing drop size and impact velocity from circular bloodstains. Journal of Forensic Science 50(1), 54–63.

Lighthill, J. [1978], Waves in Fluids, Cambridge University Press, Cambridge, pp.226.

MacDonell, H.L. [1971]. Interpretation of bloodstains: Physical considerations. Legal Medicine Annual, C. Wecht, Ed., Appleton-century Crofts, New York.

Marmanis, H., and Thoroddsen, S.T. [1996]. Scaling of the fingering pattern of an impacting drop. Physics of Fluids, 8(6), 1344–1346.

Pasandideh-Fard, M., Qiao, Y. M., Chandra, S. & Mostaghimi, J. [1996]. Capillary effects during droplet impact on a solid surface. Phys. Fluids, 8(3), 650–659.

Rioboo, R., Marengo, M. & Tropea, C. [2001]. Outcomes from a drop impact on solid surfaces. Atomizatoin. Sprays, 11. 155–166.

Roisman, I.V., Berberović, E., & Tropea C. [2009]. Inertia dominated drop collisions. I. On the universal flow in the lamella. Physics of Fluids, 21, 052103.

Šikalo, Š., Marengo, M., Tropea, C. & Gani´c, E. N. [2002]. Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces. Experimental Thermal and Fluid Science, 25, 503–510.

Wildeman, S., Visser, C. W., Sun C. & Lohse D. [2016]. On the spreading of impacting drops. Journal of Fluid Mechanics, 805, 636–655.

Реконструкция селевого потока в октябре 2022 г. в долине реки Султан-Гара-Су (бассейн реки Малка, гора Эльбрус)

В.А. Юдина, Е.А. Савернюк, К.С. Висхаджиева, Е.Г. Харьковец, С.С. Черноморец

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, savernyuk@geogr.msu.ru

Аннотация. 4–5 октября 2022 г. в долине реки Султан-Гара-Су (урочище Кала-Кулак) в Северном Приэльбрусье (Кабардино-Балкарская Республика), сошла серия селевых потоков, в результате чего была повреждена дорога и частично занесены грязью прилегающие строения. Селевой очаг образовался в моренном комплексе с мерзлыми породами и погребенными льдами на высоте 3700 м н.у.м. после выпадения ливневых осадков в виде снега и дождя. Приведены результаты реконструкции и оценки количественных характеристик селевого потока с использованием математического моделирования с применением пакета FLO-2D. В качестве базовых входных данных для анализа использована спутниковая информация, цифровые модели рельефа и ортофотопланы, полученные путем стереофотограмметрической обработки космической съемки, выполненной аппаратами Pleiades до схода селевого потока 8 сентября 2017 г., и съемки с беспилотного летательного аппарата, выполненной 7 октября 2022 г.

Ключевые слова: *селевой поток, моделирование, FLO-2D, Джилысу, Эльбрус, БПЛА*

Ссылка для цитирования: Юдина В.А., Савернюк Е.А., Висхаджиева К.С., Харьковец Е.Г., Черноморец С.С. Реконструкция селевого потока в октябре 2022 г. в долине реки Султан-Гара-Су (бассейн реки Малка, гора Эльбрус). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 200–211.

Reconstruction of the October 2022 debris flow in the Sultan-Gara-Su River valley (Malka River basin, Elbrus Mountain)

V.A. Iudina, E.A. Savernyuk, K.S. Viskhadzhieva, E.G. Khar'kovets, S.S. Chernomorets

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, savernyuk@geogr.msu.ru

Abstract. On October 4–5, 2022, in the Sultan-Gara-Su River valley (Kala-Kulak tract) in the Northern Elbrus region (Kabardino-Balkarian Republic), a series of debris flows occurred, as a result of which the road was damaged and adjacent buildings were partially covered with mud. The debris flow origination site formed in a moraine complex with frozen soils and buried ice at an altitude of 3700 m a.s.l. after showery precipitation such as snow and rain. The paper presents the results of debris flow reconstruction and assessment of the quantitative characteristics using mathematical modeling in the FLO-2D package. As basic input data for the analysis, satellite information, digital elevation models and orthophotomaps were used, obtained by stereophotogrammetric processing of space imagery, done by the Pleiades satellite before the debris flow on September 8, 2017, and imagery from an unmanned aerial vehicle, completed on October 7, 2022.

Key words: *debris flow, modeling, FLO-2D, Dzhilysu, Elbrus, UAV*

Cite this article: Iudina V.A., Savernyuk E.A., Viskhadzhieva K.S., Khar'kovets E.G., Chernomorets S.S. Reconstruction of the October 2022 debris flow in the Sultan-Gara-Su River valley (Malka River basin, Elbrus Mountain). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 200–211.

Введение

Во второй половине XX – первой четверти XXI в. на северном склоне Эльбруса произошел ряд селевых событий [*Черноморец и др., 2007; Докукин и др., 2022; Запорожченко, 2008; Мальнева и др., 2022*]. Эти случаи являются следствием современного этапа деградации ледников, сопровождающегося естественным разрушением озерно-ледниковых и моренных комплексов.

В работе [*Докукин и др., 2022*], посвященной оценке развития ледниковых озер и механизмам их прорыва в районе ледников Бирджалычиран и Джикиуганкез, собрана сводка прорывов ледниковых озер и случаев формирования селевых потоков за период с 1957 по 2021 гг. Сели, связанные с прорывами ледниковых озер, считаются наиболее опасными для района минеральных источников Джилысу и дороги через р. Каракая-Су.

Сход селя по р. Султан-Гара-Су в октябре 2022 г. [*Сход…, 2022*] показывает другие механизмы формирования селевых потоков, связанные с изменениями в полигенетических моренных комплексах с погребенными льдами и проявлением солифлюкционных процессов. Это делает актуальными исследования процессов формирования потенциальных и активных селевых очагов, находящихся в районах деградации современного оледенения, но напрямую не связанных с ледниками, ледниковыми озерами и активными каменными глетчерами.

Основными задачами представленной статьи являются реконструкция селевого потока 2022 г. с использованием анализа рельефа до и после его схода, а также сравнение полученных результатов с данными численного моделирование селя. Рассмотрен один из вариантов оценки количественных параметров с применением двух сценариев моделирования с разным разрешением цифровых моделей рельефа (ЦМР) до схода селевого потока, полученных с применением разных программных пакетов.

Объект исследования и его особенности

Река Султан-Гара-Су является правым притоком р. Малка. Бассейн реки в настоящее время обособлен от влияния талых ледниковых вод, т.к. основная река Бирджалы-Су уходит левее в сторону минеральных источников Джилысу, а существовавший ранее рукав реки Бирджалы-Су, по которому сходили селевые потоки, в настоящее время стекает в р. Кара-Кая-Су, расположенную восточнее. Площадь водосбора р. Султан-Гара-Су составляет 2,6 км^2. Исток поверхностного водотока находится на отметке 3070 м н.у.м., устье – 2365 м н.у.м. Средний уклон поверхностного русла р. Султан-Гара-Су составляет 9,9°. До выхода на поверхность вода проходит через разветвленную сеть подземных каналов стока с чередованием небольших озерцов. С учетом этой подземной сети каналов длина основного водотока составляет 5,3 км, а ее исток находится в районе отметок 3110 м н.у.м., около небольшого озерка. Длина поверхностного водотока в результате селевого процесса изменилась с 4 км (на 2017 г.) до 4,5 км (2022 г.). На топографической карте из Атласа ледников Эльбруса (съемка 1958 г.) [*Гляциогеоморфологическая карта…, 1964*] с отметки 3110 м н.у.м. отмечен поверхностный водоток.

Водосбор всего сработавшего селевого очага имеет площадь около 0,44 км^2 с учетом левой части прилегающего справа к очагу лавового потока, воды которого стекают по ложбинам и трещинам в сторону моренного массива. Однако водосбор верхнего очага, с которого начался селевой поток, имеет площадь всего 0,018 км^2.

Моренный массив в долине р. Султан-Гара-Су, с которого сошел селевой поток в 2022 г., расположен на отметках 2960–3070 м н.у.м., что гиспсометрически ниже рассматривавшегося ранее района активного формирования приледниковых озер в работах [*Запорожченко, 2008; Черноморец и др., 2018*].

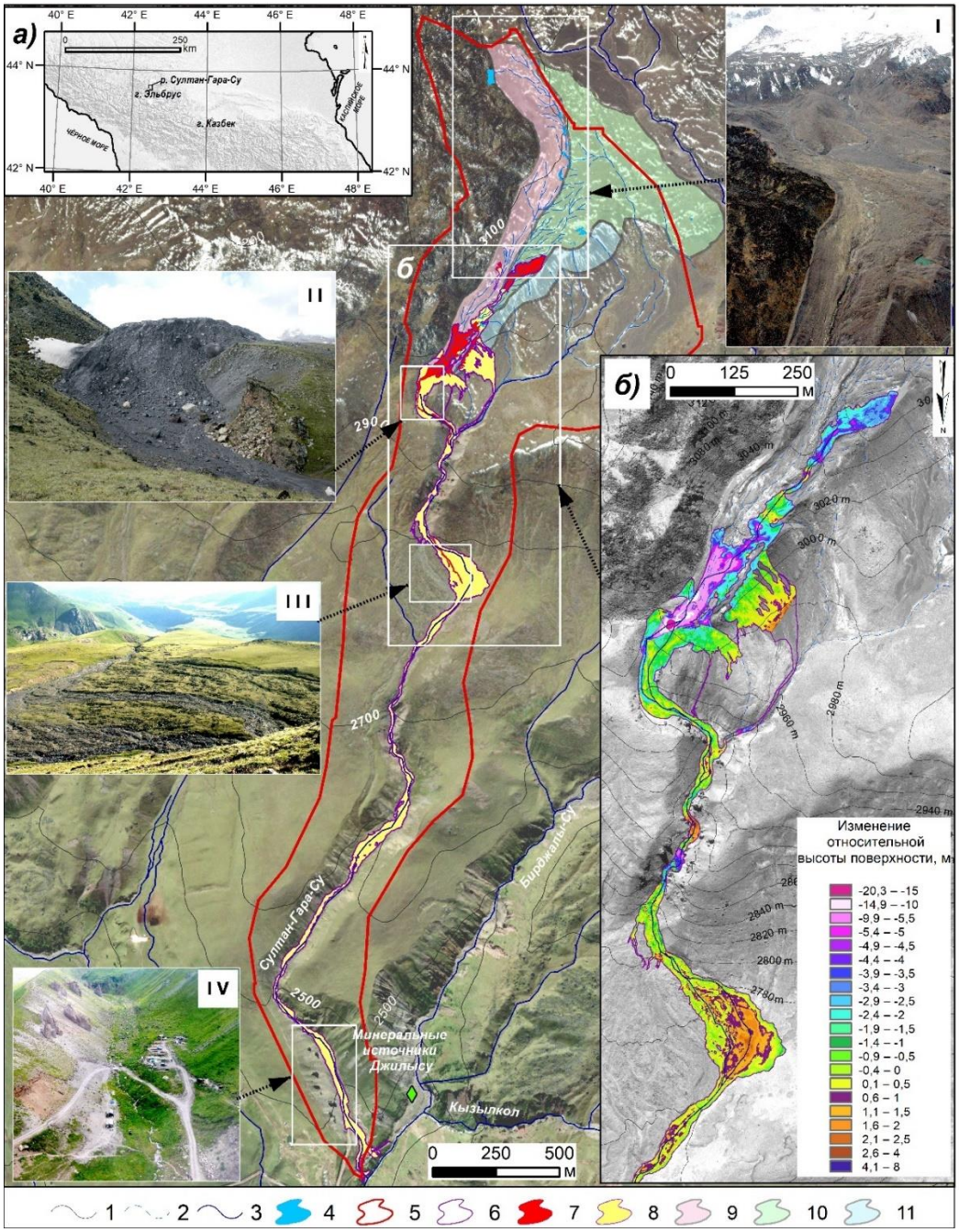


Рис. 1. Обзорная схема района: а – участок схода селевого потока 4–5 октября 2022 г. по р. Султан-Гара-Су; б – изменение относительной поверхности после прохождения селя (по результатам вычитания ЦМР 2017 и 2022 г.: 1 – изогипсы через 100 м; 2 – пути фильтрации талых и атмосферных вод в районе моренного массива; 3 – основные водотоки; 4 – места формирования временных водоемов при снеготаянии и ливнях, а также существующие небольшие озерки; 5 – граница водосборного бассейна; 6 – граница селевого процесса; 7 – селевые очаги; 8 – зоны транзита и аккумуляции селевых масс; моренные комплексы середины XIX в. (согласно легенде к [*Гляциогеоморфологическая карта…, 1964*]): 9 – валы боковых, срединных и конечных морен стадии оледенения середины XIX в. с поверхностью, сильно преобразованной последующими процессами; 10 – холмисто-западинные и выровненные поверхности основных морен, сильно преобразованные последующими процессами; 11 – внешний склон левой береговой морены. Фотографии: I – верхняя часть моренного массива с очагом зарождения 2022 г. (фото К. Давыдова 29.06.2006); II – состояние уступа моренного массива с ледяным ядром (фото С.С. Черноморца 18.07.2005); III – селевой конус выноса на высотах 2755–2820 м (фото С.С. Черноморца 18.07.2005); IV – зона выхода селевого потока на дорогу в устье р. Султан-Гара-Су (ур. Кала Кулак) до строительства дороги (фото М.Д. Докукина 23.07.2009)

Моренный комплекс является полигенетическим массивом, что нашло отражение на карте С.М. Мягкова [*Гляциогеоморфологическая карта…, 1964*], составленной по материалам дешифрирования аэрофотоснимков 1957 г. с использованием полевых материалов. Правая часть массива отнесена к валам боковых, срединных и конечных морен стадии оледенения середины XIX в. с поверхностью, сильно преобразованной последующими процессами; левая часть массива – холмисто-западинные и выровненные поверхности основных морен, сильно преобразованные последующими процессами; на всем массиве отмечены следы обвального-солифлюкционного сноса (согласно легенде к карте).

В нижней части комплекса на отметках 2960–3020 м н.у.м. расположен массив с погребенным ледяным ядром, уступ которого с 1997 по 2017 гг. продвинулся вперед на 20 м. Происхождение ледяного ядра моренного массива, на наш взгляд, остается открытым, поскольку его генезис может быть разным. Версия о том, что массив погребенного льда является остатками ледника Бирджалычиран, а точнее гряды его срединой морены, тянувшейся от пика Калицкого, наиболее вероятна. Но нельзя исключать слияние нескольких гряд срединных морен и их бронирование в условиях оплывания правой береговой морены на остатки ледника Бирджалычиран, или занос флювиогляциальными отложениями, а также образование подземного льда во влажных и легко проницаемых для воды моренных накоплениях.

В центральной и правой части на поверхности моренного комплекса отмечаются светлые гранитные глыбы, которые в данном районе могли быть принесены ледником только с массива пика Калицкого. Светлые следы морены, сложенной из гранитных обломков [*Государственная геологическая карта…, 2004*], отличаются от темноцветных морен из вулканических пород и легко прослеживаются на большое расстояние. Изменение положения гранитных глыб в совокупности с изменением форм моренных валов позволило установить изменение скоростей движения материала на поверхности моренного массива в работе [*Мальнева и др., 2022*]. Можно предположить, что наличие гранитной составляющей в этих моренах дополнительно способствует более активному их движению. Дополнительным фактором на этом участке выступают также особенности коренного вулканического рельефа, имеющего сужения и ступени, которые играют роль стремнины для моренных масс, содержащих значительное количество льда и хорошо проницаемых для воды.

Выше отметки 3020 м н.у.м. вдоль левого края моренного массива расположена выположенная зандровая площадка, на которой в разное время года возникают небольшие озера. В этом же месте имеется эрозионная форма, напоминающая крупную оплывину шириной до 70 м. На карте 1958 г. здесь был поверхностный водоток, который уходил с моренного массива влево.

Верхняя часть селевого очага между отметками 3070 и 3040 м н.у.м. испытывала меньшие по скорости движения материала. Для нее также характерны оплывины с гребня в обе стороны, движение светлых глыб, изменение формы и глубины ложбин вдоль границы селевого очага.

После выхода с участка моренного массива воды р. Сулан-Гара-Су попадают в русло в вулканических породах между отметками 2960–2820 м н.у.м. протяженностью 650 м. На этом участке в р. Султан-Гара-Су в районе отметки 2910 м н.у.м. впадает левый приток, также берущий начало с моренного массива, но расположенный западнее. Ниже слияния река течет в извилистом каньоне глубиной 30–40 м. После выхода из каньона вода попадает на селевой конус выноса с многочисленными валами и неглубокими руслами. Ширина конуса до селя 2022 г. была 390 м, площадь – 0,11 км^2. После схода селевого потока максимальная ширина конуса составила 410 м, а основное русло сместилось на 50 м вправо. Далее с отметки 2730 м н.у.м. русло снова попадает в извилистый каньон длиной 250 м, который на отметке 2640 м н.у.м. сменяется участком промежуточной аккумуляции протяженностью 570 м до отметки 2570 м н.у.м. Следующие 700 м до отметки 2490 м н.у.м. русло находится в каньоне глубиной до 40 м и шириной 15–20 м, выходя на последнее поле аккумуляции в Долине Замков в районе отметки 2440 м н.у.м. и далее до дороги, ныряя в трубу под ней.

Методы и материалы

В работе в качестве базовой использована космическая стереосъемка, выполненная аппаратом Pleiades 8 сентября 2017 г. в рамках проекта Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) «Assessing the impact of climate change and its effects on soil and water resources in polar and mountainous regions». Снимки имеют разрешение 0,5 м. Точность определения высот с использованием фотограмметрической RPC-модели для стереопары с данного спутника составляет около 1,5 м/пиксел измеряемого параллакса. По измерениям стереопары были построены две ЦМР, с разрешением 2,0 и 0,5 м. Первая ЦМР получена путем измерений по пикетам, набранным вручную и автоматически, по характерным точкам рельефа и по регулярной сетке соответственно, в фотограмметрической системе PHOTOMOD с визуальным стереоскопическим контролем результатов измерений. Ошибка автоматических измерений, основанных на определении коэффициента взаимной корреляции, для имеющегося изображения объекта исследования, характеризующегося малой детальностью и невысоким контрастом, в среднем составила порядка 1 пиксела, что дает среднюю ошибку определения высот 1,5 м.

Далее была предпринята попытка уменьшить ошибку определения высот путем измерения параллаксов на субпиксельном уровне – использован свободно распространяемый пакет фотограмметрического и картографического программного обеспечения NASA Ames Stereo Pipeline (ASP) [*Shen D.E. et al, 2016; Alexandrov et al., 2024*]. В ASP реализован большой набор алгоритмов сопоставления изображений стереопары и последующего субпиксельного уточнения измерений, с многочисленными настройками параметров, что дает возможность подобрать оптимальный режим работы программного обеспечения для конкретного вида изображений. В работе был выбран вариант, предусматривающий использование менее детальной ЦМР как начального приближения измерений. Ранее построенная ЦМР с двухметровым разрешением хорошо подошла для этой цели. Контроль качества построенной ASP ЦМР с разрешением 0,5 м проводился в среде PHOTOMOD путем визуального стереоскопического измерения расхождений высот контрольных пикетов, сгенерированных из ЦМР, и поверхности стереомодели. По нашей оценке, средняя ошибка высот вновь полученной ЦМР не превышает 0,5 м.

Вторым этапом стала стереофотограмметрическая обработка в программном комплексе Agisoft Metashape Professional v. 2.1.1 съемки с квадрокоптера DJI Mavic Air 2 от 7 октября 2022 г. Съемка была выполнена сотрудниками ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» при полевом анализе следов сошедшего селевого потока и предоставлена авторам для работы. Для привязки съемки использованы 144 опорные точки, координаты и высоты которых были получены со стереопары космического аппарата Pleiades 8 сентября 2017 г. В результате стандартных процедур обработки построена ЦМР разрешением 0,05 м/пиксел с ошибкой по высоте 0,4 м и общей ошибкой 0,16 м. Эта ЦМР использовалась при построении ортофотоплана. Полученные материалы применялись для определения особенностей селевого потока, построения карт разности рельефа и поперечных профилей, а также для сравнения следов воздействия селевого потока с результатами моделирования по ЦМР с Pleiades.

Построение карты разности рельефа проводилось в среде ArcMap с помощью инструмента Raster Math Minus с вырезанием по контуру границы селевого потока и без вырезания. В целом по массиву расхождение в высотах ЦМР 2017 и 2022 гг. на территориях, примыкающих к границе селевого потока, лежит в пределах ±0,5 м, возрастая в местах сужений до 1–2 м. По краям ЦМР, построенной по результатам съемки с БПЛА, искажения довольно велики, но эти области не попадают в область исследования.

Для дополнительного анализа бвли использованы разновременные съемки, представленные в Google Earth: за 10.09.2013, 15.02.2014, 22.08.2019, 20.11.2020, космические снимки Sentinel-2 за период июль – октябрь 2019–2022 г., наземные

фотографии коллег и вертолетные фотографии из архива Главного управления МЧС России по Кабардино-Балкарской Республике.

По данным метеостанции «Ледник Гарабаши», с 21 по 25 сентября выпало 113 мм осадков. Это подтверждается снимком Sentinel-2 от 26.09.2022, на котором нижняя граница залегания снежного покрова на склонах северной экспозиции отмечена на высоте 2800 м н.у.м. Под снегом был полностью скрыт будущий селевой очаг и его водосбор. Ситуация резко изменилась к 01.10.2022, когда на снимке Sentinel-2 снежный покров остался в небольшом количестве в ложбинах солифлюкционного рельефа на поверхности моренного массива. Нужно отметить, что как такового поверхностного стока по этим ложбинам в обычное время не выражено, что связано с хорошей проницаемостью вулканогенных пород.

На космическом снимке Sentinel-2 от 04.10.2022 свежий снег лежит на отметке 2950 м н.у.м., т.е. у подошвы моренного массива, а на снимке от 10.11.2022 в верховьях одного из притоков р. Кара-Кая-Су видны следы селевого потока, сошедшего до высоты 2570 м н.у.м., что может косвенно указывать на очень локальный интенсивный ливень, сопровождавшийся снеготаянием.

На рис. 2 приведены суточный ход срочных температур и осадки по метеостанциям «Терскол» (высота 2140 м н.у.м.), «Чегет» (3040 м н.у.м.) и «Ледник Гарабаши» (2326 м н.у.м.).

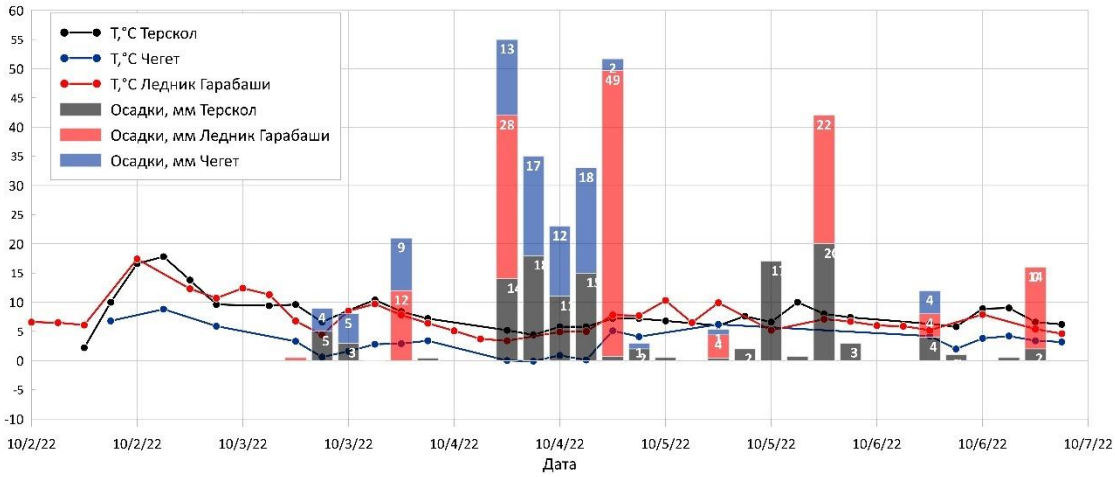


Рис. 2. Суточный ход осадков и температуры по метеорологическим станциям «Ледник Гарабаши», «Терскол» и «Чегет» за период 02.10–07.10.2022[3]

Расчет потока в зоне транзита и аккумуляции осуществлялся с помощью двумерной гидродинамической модели FLO-2D [*O'Brien et al., 1993*]. В основе модели лежит решение уравнений Сен-Венана [*Кюнж, 1985; O'Brien et al., 1993*]. Схематизация в модели осуществляется с помощью регулярной прямоугольной расчетной сетки. Важной особенностью модели FLO-2D является наличие селевого блока. Расчет селевого потока осуществляется с помощью реологической модели Бингама [*O'Brien et al., 1993*].

В качестве входных данных рельефа использовались две ЦМР, полученные при обработке космической стереосъемки с аппарата Pleiades 8 сентября 2017 г. разрешением 2 и 0,5 м/пиксел, соответствующие сценариям I и II. Обе ЦМР интерполированы на расчетную сетку с шагом 2 × 2 м. Район выхода селевого потока на дорогу был отредактирован, т.к. на момент съемки 2017 г. дорога отсутствовала.

[3] Данные по станции «Ледник Гарабаши» взяты с сайта https://ru4.rp5.ru/download/files.synop/37/37207.01.10.2022.07.10.2022.1.0.0.ru.utf8.00000000.xls.gz, «Терскол» – https://ru4.rp5.ru/download/files.synop/37/37204.01.10.2022.07.10.2022.1.0.0.ru.utf8.00000000.xls.gz, «Чегет» – http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=37205&bday=1&fday=6&amonth=10&ayear=2022&bot=2

Реконструкция селевого потока

Селевой поток 4–5 октября 2022 г. начался с поверхностного оползневого процесса глубиной в среднем 3 м с отметки 3070 м н.у.м. в обводненном массиве морены, разбитом трещинами (таблица 1, очаг № 1). В районе отметки 2995 м н.у.м. в процесс было вовлечено небольшое озерко, существовавшее на зандровой площадке в левой части массива. На снимке Sentinel-2 от 01.10.2022 в искусственных цветах оно едва заметно.

В верхней части долины высокие уклоны способствовали набору потоком высокой скорости. Ниже зандровой площадки начинается участок, в котором средняя толщина сноса составила 6 м (таблица 1, очаг № 2). Здесь мы наблюдаем многочисленные цирки, вероятно, приуроченные к небольшим линзам льда в массиве. Но не наблюдаем крутых стенок со льдом, что говорит о том, что основной массив ледяного ядра на этом участке затронут не был. При этом ширина водного потока на поверхности после схода селя здесь составляет 1 м, а на участке с отметкой 2990 м н.у.м. в районе выхода потока из-под ледяного ядра уже около 2 м.

Таблица 1. Параметры основных селевых очагов по результатам определения разницы рельефа 2017 и 2022 гг.

№ очага	Площадь, тыс. м^2	Разница объемов 2017 и 2022 гг., м^3	Средняя толщина слоя, м	Максимальная отметка высоты, м н.у.м.	Минимальная отметка высоты, м н.у.м.	Превышение, м	Горизонтальное проложение, м	Угол наклона, °	Тангенс угла наклона
1	7,1	22 250	3	3070	3030	40	210	10,8	0,19
2	11,2	61 250	6	3020	2980	40	215	9,2	0,19
3	1,5	14 100	9	2990	2955	35	70	29,7	0,50
4	2	3600	2	2960	2900	60	340	10,0	0,18
Сумма	**21,8**	**101 200**	–	–	–	–	–	–	–
Зона воздей-ствия селя	161,3		0,6±2,3	3 070	2 335	735	4 400	9,4	0,16

Для уступа ледяного ядра моренного массива (таблица 1, очаг № 3) характерны очень крутые стенки. На ортофотоплане 2017 г. эта часть массива имеет выпуклую форму. Здесь же образовался наиболее глубокий эрозионный врез при селевом процессе 2022 г. Ранее на космических снимках на уступе отмечались процессы образования оплывин и небольших врезов. Эта часть является также наиболее динамичной в плане изменения характера поверхности. Максимальное повышение поверхности за период 2017–2022 гг. на данном участке составило 4 м, а максимальное понижение (на 20 м) произошло в глубокой части селевого вреза.

После выхода с моренного массива в свежих селевых отложениях наблюдается протяженный селевой врез шириной 5–10 м и глубиной до 2 м, что говорит о возможном прохождении водного потока после выноса основных масс с моренного массива.

Вероятно, это происходило в тот момент, когда на метеостанции «Гарабаши» было зафиксировано 49 мм осадков. Нужно отметить, что при анализе следов прохождения селя на этом участка и в каньоне ниже не наблюдается участков заплеска или виражей на поворотах. Поток прекрасно «адаптировался» к подстилающей поверхности, проходил транзитом в узких местах, не задерживаясь и не подпруживая сам себя. Скорее всего, это связано с особенностями вулканогенных пород.

При выходе на промежуточный конус выноса сель выплеснулся на наиболее пологую его часть, обходя возвышенный участок и затекая в левую сторону. Здесь мы наблюдаем наиболее тонкие отложения, вероятно, за счет большого содержания песка в селевых массах. В центральной части этого конуса имеется свежее селевое русло глубиной до 1,5 м и шириной до 7 м, вероятно, тоже как результат второй фазы после интенсивных осадков.

Далее оставшийся путь селевой поток проследовал так же легко, адаптируясь к условиям рельефа: то расширяясь на более пологих участках до 60 м, то сужаясь в каньонах до 7 м. Подойдя к дороге, он забил трубу, заполнил выемку перед дорогой и далее пошел поверх нее, затапливая дорогу и прилегающую территорию вплоть до стоянки с сервисными зданиями, занося их грязью с небольшим содержанием крупных валунов. На дороге находились несколько припаркованных автомобилей, они были незначительно повреждены.

Полученные значения объемов материала для селевых очагов (таблица 1), нужно воспринимать как ориентировочные, поскольку массив к моменту схода селевого потока претерпел изменения за счет движения морен и деградации льда, а также во время схода небольших оплывин с уступа в период до 22.08.2019.

В ходе селевого процесса по результатам вычислений при вычитании ЦМР в среде ГИС до и после события объем выемок составил 181,5 тыс. м^3, объем насыпей – 68,5 тыс. м^3. Общий объем материала, вынесенного за период 2017–2022 гг., достиг 113 тыс. м^3.

При таких параметрах можно подсчитать, что при площади 0,16 км^2 мы получаем среднюю толщину отложений 0,7 м. Эти значения хорошо согласуются с данными анализа поперечных профилей, на которых, за исключением района селевых очагов на моренном массиве в верховьях, отмечаются изменения глубин от –1,5 до 2 м.

Однако не стоит забывать, что в моренном массиве в большом количестве имелся погребенный лед. Поэтому не наблюдается больших скоплений перемещенного или переотложенного твердого материала на снимках с БПЛА. Более характерны размывы вследствие боковой и глубинной эрозии. Ушедший в результате селя объем материала включает как рыхлообломочные отложения, так и ледовую массу. Если учесть, что лед занимал примерно 1/3 от объема селевого очага № 2 и 2/3 от объема очага № 3, то, следовательно, мы имеем приблизительно 73 500 м^3 твердого материала, вынесенного с моренного массива и из вреза у его подножия за 2017–2022 гг.

При этом объем льда составил около 30 000 м^3. Таким образом, с учетом общего количества вещества, вынесенного за указанный выше период, и объема насыпей, по разнице получается не более 10 000 м^3 твердого материала, вынесенного за пределы селевого бассейна.

Результаты моделирования

Скорость потока оценивалась с использованием данных видеосъемки, выполненной свидетелями, на основе методики [*Соколова и др., 2019; Arattano, Marchi, 2000*]. Средняя скорость составила около 1,5–2 м/с. Глубина потока в районе выхода на дорогу согласно видеоматериалам [*Джилысу..., 2022; Сель…, 2022*] варьировалась от 0,6 до 1 м. Таким образом, при средней ширине потока в 20 м значения расходов могли составлять от 18 до 40 м/с.

В описываемом исследовании принято значение расхода селевого потока, равное 24 м^3/с.

По результатам моделирования селевого потока глубина в долине для сценариев I и II в среднем составляла около 1,5 м, при максимальной в 2,4 м. Наибольшие скорости в местах сужения для сценария I достигали 9,5 м/с, для сценария II – 9,9 м/с.

До селевого потока 2022 г. основное русло реки на промежуточном конусе выноса располагалось примерно в 50 м западнее, чем после селевого потока. По результатам моделирования можно сделать вывод, что по сценарию I русло селевого потока лишь частично оказывается в зоне затопления. При этом глубина потока в основном русле достигает 1,4 м, а в русле селевого потока – 0,5 м (рис. 3*а*). По сценарию II зона затопления на данном участке оказывается больше. Глубина в русле селевого потока достигает 0,5 м (рис. 3*б*). Несмотря на это, селевое русло не становится основным. В русле реки, которое наблюдалось до прохождения селя, глубина достигает 1,5 м.

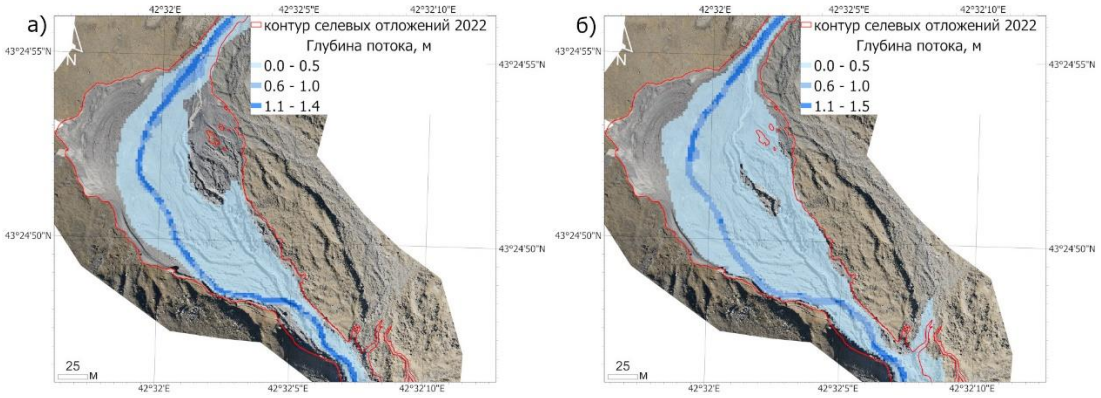


Рис. 3. Результаты математического моделирования селевого потока на основе программного комплекса FLO-2D на участок промежуточного конуса выноса: а) сценарий I (ЦМР 2017 г. 2 м/пиксел); б) сценарий II (ЦМР 2017 г. 0,5 м/пиксел). Подложка – ортофотоплан 07.10.2022

Положение русла на участках аккумуляции нестабильно, и может меняться при прохождении паводка или селевого потока. В гидродинамической модели FLO-2D не учитываются эрозионные процессы, поэтому в случае прохождения катастрофического паводка картина зоны затопления может значительно измениться. При этом изначально такая территория может не выделяться как потенциально опасная при моделировании с использованием ЦМР высокого разрешения. Таким образом, увеличение детальности ЦМР в сценарии II, которая была получена по данным 2017 г., не отражает формирование нового русла при прохождении селевого потока.

Согласно результатам моделирования по сценарию I глубина на конусе выноса селевого потока будет варьироваться в среднем от 0,3 до 1 м (рис. 4*а*). Скорость потока на большей части будет составлять около 3 м/с. В сценарии II площадь затопления увеличивается, при этом наблюдается меньшее растекание потока выше по дороге. Происходит также перелив потока через дорогу, что наблюдалось в видеоматериалах [*Сель…, 2022*]. В зоне затопления оказываются постройки, которые пострадали при прохождении селя в 2022 г. Глубина потока при этом варьировалась в среднем от 0,3 до 1 м (рис. 4*б*). Скорости потока на большей части территории достигали 2–3 м/с. Расход селевого потока на вершине конуса выноса составил для обоих сценариев около 16 м^3/с (по модели, составленной по материалам съемки со спутника Pleiades разрешением 0,5 м/пиксел – 16,3 м^3/с, по модели разрешением 2 м/пиксел – 16,5 м^3/с).

Полученные результаты моделирования по сценарию II в целом соотносятся с данными видеоматериалов. Однако на участках аккумуляции, а также на антропогенно не измененных конусах выноса использование ЦМР, полученных до селевого потока, даже с высокой детальностью, для гидродинамической модели FLO-2D может не отражать реальную картину при прохождении селевого потока.

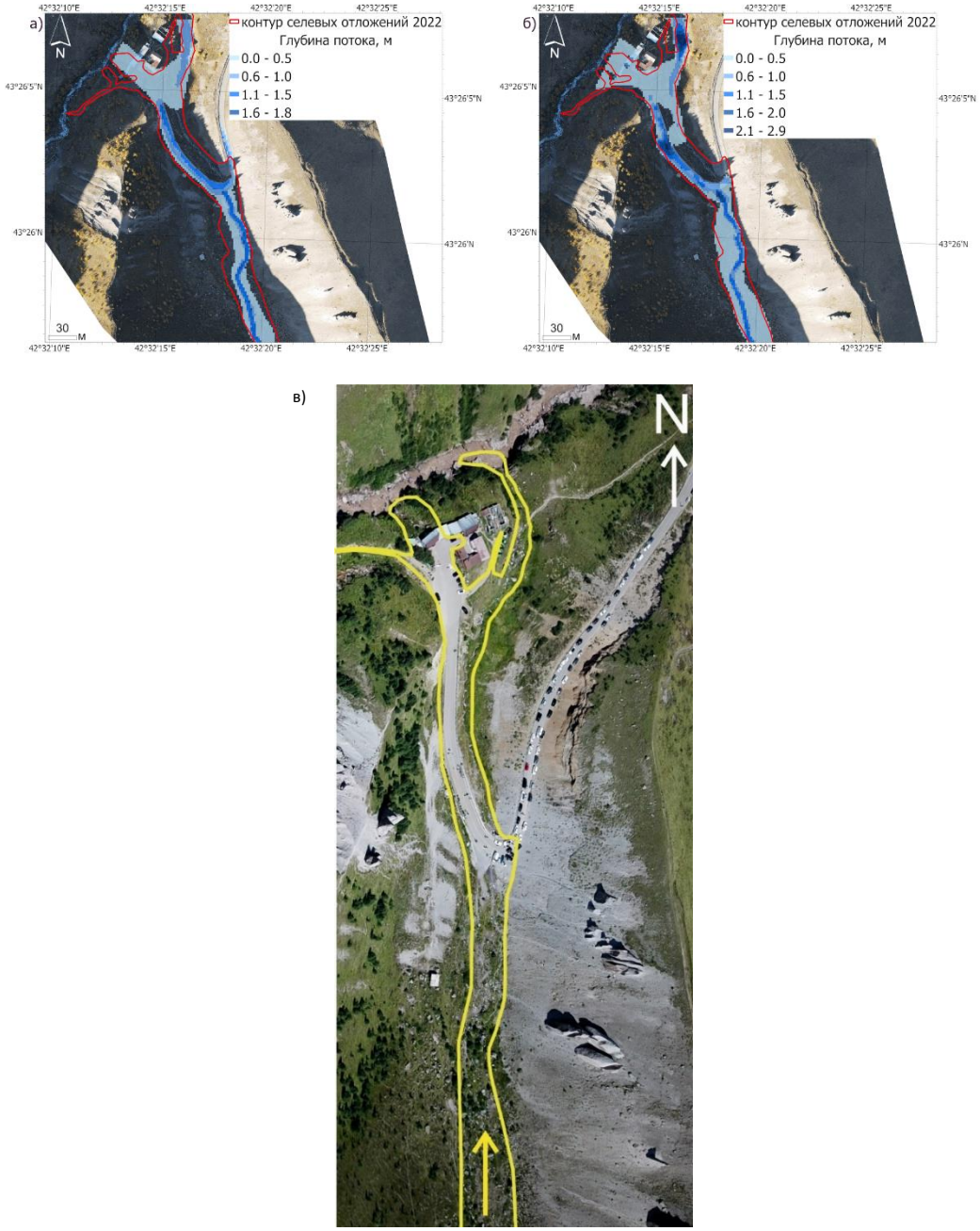


Рис. 4. Зона воздействия селевого потока на дорогу в устье р. Султан-Гара-Су по результатам математического моделирования селевого потока на основе программного комплекса FLO-2D: а – по сценарию I (ЦМР 2017 г., разрешение – 2 м/пиксел), б – по сценарию II (ЦМР 2017 г., разрешение – 0,5 м/пиксел), подложка – ортофотоплан по результатам съемки 07.10.2022; в) фактическая (по видео и съемке с БПЛА). Фото С.С. Черноморца 12.08.2021

Выводы

Актуальность исследования, результаты которого представлены в данной статье, продиктована необходимостью изучения и учета современных изменений в моренных массивах и их возможностью генерировать селевые потоки, которые достигают объектов инфраструктуры в рекреационном районе Северного Приэльбрусья.

Использование разновременных съемок подтвердило движение материала в моренном массиве. Последнее играет важную роль при формировании активных участков (для вовлечения их в селевой процесс и трансформации гидрологического

режима) и путей фильтрации внутри массива. Открытым остается вопрос о том, насколько возобновляем на данном этапе селевой очаг с ледяным ядром, т.е. является ли он «одноразовым», либо будет работать в качестве селевого очага и в будущем.

При оценке количества вынесенного вещества на участках с активным движением, включающих лед и горные породы, наиболее точную оценку объемов твердого материала можно осуществить только при использовании ЦМР, построенных по данным, полученным в даты, наиболее близкие к случаям схода селевых потоков. В современных условиях деградации многолетнемерзлых массивов и погребенных льдов разница в 5 лет может быть существенной. Это выражается в различии в оценках объемов селевых потоков. При этом разница может достигать 100%.

На участке перехода русла с дорожной насыпью и дренажной трубой довольно сложно смоделировать рельеф, чтобы получить адекватные скорости и глубины потока. Частично это связано с тем, что в реальности дренажные трубы быстро забиваются селевым материалом, а в дополнение к крупным валунам на пути встречаются низкие дорожные ограждения, сопоставимые с глубиной самого селевого потока, что является для него дополнительным тормозящим фактором, способствующим растеканию.

На участках дорог в районах распространения селевых отложений, подобных переходу р. Султан-Гара-Су, рекомендуется устанавливать однопролетные мосты и сохранять естественный уклон русла без отсыпки дорожной насыпи. При пересечении селевых водотоков следует избегать использования дренажных труб малого диаметра, чтобы селевые потоки малых расходов свободно проходили в естественном русле без растекания по дороге.

Благодарности

Авторы признательны коллективу ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» – А.Р. Акаеву, М.Д. Докукину, Р.Х. Калову и М.Ю. Беккиеву – за предоставленные материалы съемки от 07.10.2022, возможность их использования в исследованиях и участие в обсуждениях причин возникновения селя.

Работа выполнена в рамках темы 1.7 121051300175-4 «Опасность и риск природных процессов и явлений» (ГЗ) и проекта IAEA INT5153 «Assessing the impact of climate change and its effects on soil and water resources in polar and mountainous regions».

Список литературы

Гляциогеоморфологическая карта северного и северо-восточного склона Эльбруса. Масштаб 1:25 000 // Атлас ледников Эльбруса. Ч. 2. Специальные карты / сост. С.М. Мягковым. – 1964.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Кавказская. Лист K-38-I, VII (Кисловодск) / А.Н. Письменный, М.А. Зарубина – 2004.

Джилы-Су. После селя. 2022 г. URL: https://youtu.be/v-O6zYnOg48.

Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Хаткутов А.В. Эволюция озер у ледника Джикиуганкез (Северное Приэльбрусье) в 1957–2020 гг. с учетом подземных каналов стока // Лед и Снег. – 2022. – Т. 62. – № 1. – С. 47–62.

Запорожченко Э.В. Селевые потоки по рр. Кара-Кая-Су и Бирджалы-Су в Кабардино-Балкарии: сравнительный анализ прошлой и новейшей истории // Вестник Владикавказского научного центра. – 2008. – Т. 8. – №. 1. – С. 33–43.

Кюнж Ж. Численные методы в задачах речной гидравлики / Ж. Кюнж, Ф. Холли, Ф. Вервей. М.: Энергоатомиздат, 1985. 255 с.

Лебедева Л.С., Капица В.П., Такибаев Ж.Д., Гончаренко В.В., Лыткин В.М., Камалбекова А.Н. О влиянии динамики каменных глетчеров на сток в бассейне р. Улкен Алматы (Большая Алматинка), Северный Тянь-Шань // Лед и Снег. – 2024. – Т. 64. – № 1. – С. 54–65. https://doi.org/10.31857/S2076673424010041.

Мальнева И.В., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Акаев А.Р. Селевой поток в урочище Джилы-Су (Северное Приэльбрусье) 4 октября 2022 г.: причины и факторы // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях: материалы

Общероссийской научно-практической конференции. М.: ООО «Геомаркетинг», 2023. – С. 111–118.

Сель сошел в северном Приэльбрусье 05 октября 2022 года. URL: https://youtu.be/S_PNQf7H0YM.

Соколова Д.П., Куровская В.А., Осташов А.А., Казаков Н.А. Оценка динамических характеристик селевого потока по видеоматериалам // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2019. – Т. 1. – Вып. 1. – С. 31–51.

Сход сели в Зольском районе. 2022. URL: https://07.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/operativnaya-informaciya/4854192.

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В. Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне г. Эльбрус 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия // Материалы гляциологических исследований. – 2007. – № 102. – С. 225–229.

Arattano M., Marchi L. Video-derived velocity distribution along a debris flow surge // Physics and Chemistry of the Earth. Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. 2000. – Vol. 25. – Issue 9. – P. 781–784.

O'Brien J.S., Julien P.Y. Laboratory analysis of mudflow properties // J. Hydraulic Eng. 1988. Vol. CXIV. – No. 8. – P. 877– 887.

O'Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton W.T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation // J. Hydraulic Eng. 1993. – Vol. CXIX. – No. 2. – P. 244–261.

Alexandrov O., McMichael S., Broxton M., Lundy M., Beyer R., Husmann K., Edwards L., Nefian A., Smith B, Shean D., Smith T., Annex A., Moratto Z., Dehecq A., Nodjoumi G., Aravkin A., Purinton B., … Laura J. NeoGeographyToolkit/StereoPipeline: 2024-03-23-daily-build (2024-03-23-daily-build). Zenodo. URL: https://doi.org/10.5281/zenodo.10864208.

Shean D.E., O. Alexandrov, Z. Moratto, B. E. Smith, I. R. Joughin, C. C. Porter, Morin, P. J. An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very high-resolution commercial stereo satellite imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. – Vo. 116. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012.

Особенности комплексного мониторинга селевой опасности для обоснования инженерной защиты (на примере юго-восточного Крыма)

Т.А. Иваненко, Н.М. Ветрова, А.А. Гайсарова

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия, sapronovat@mail.ru

Аннотация. В публикации рассмотрены территориальные особенности формирования селевых процессов Республики Крым. Описаны факторы формирования селевой опасности, приведена характеристика селевых потоков, формирующихся в Крыму. Цель работы – обоснование эколого-инженерных решений реконструкции противоселевых гидротехнических сооружений селеопасных бассейнов рек Крыма. Объект исследований – Юго-Восточный селевой район. Задачи исследования: изучить условия формирования селей Крыма; рассмотреть существующие методы исследования селевой опасности; охарактеризовать современное состояние противоселевых сооружений и разработать рекомендации по их восстановлению.

Ключевые слова: *селевой поток, наблюдения, твердая составляющая*

Ссылка для цитирования: Иваненко Т.А., Ветрова Н.М., Гайсарова А.А. Особенности комплексного мониторинга селевой опасности для обоснования инженерной защиты (на примере юго-восточного Крыма). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 212–223.

Features of integrated monitoring of debris flows hazard to justification for engineering protection (a case study of South-Eastern Crimea)

T.A. Ivanenko, N.M. Vetrova, A.A. Gaysarova

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia, sapronovat@mail.ru

Abstract. The publication examines the territorial features of the formation of debris flow processes in the Republic of Crimea. The factors for the formation of debris flow hazard are described, and the characteristics of debris flows forming in Crimea are given. The purpose of the work is to substantiate environmental and engineering solutions for the reconstruction of anti-debris flow hydraulic structures in debris flow-prone river basins of Crimea. The object of research is the South-Eastern debris flow area. Research objectives: to study the conditions for the formation of debris flows in Crimea; consider existing methods for studying debris flow hazards; characterize the current state of anti-debris flow structures and develop recommendations for their restoration.

Key words: *debris flow, observations, solid component*

Cite this article: Ivanenko T.A., Vetrova N.M., Gaysarova A.A. Features of integrated monitoring of debris flows hazard to justification for engineering protection (a case study of South-Eastern Crimea). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 212–223.

Введение

Реконструкция и строительство объектов инженерной защиты на территории Республики Крым являются одним из приоритетов программ развития, поскольку научные исследования по проектам, проведенные на протяжении многих лет, показали, что эта территория все больше подвержена влиянию природных факторов окружающей среды и техногенной деятельности человека. Правильное инженерное решение должно выбираться с учетом природных характеристик территории, ее использования человеком или потребностями и доступностью материалов. Также важно уменьшить любые неблагоприятные последствия, вызванные выполнением работ при осуществлении инженерной защиты.

В связи с экологической нагрузкой на прибрежные территории со стороны как хозяйственной деятельности, так и экзогенных процессов, протекающих на данной территории, особую актуальность приобретают комплексные исследования состояния прибрежной зоны и способов эффективной инженерной защиты и сохранения береговой линии. При этом инженерные сооружения оказывают значительное воздействие на природную среду с одной стороны, а, с другой – их состояние влияет на рекреационное использование территорий, поскольку если инженерные сооружения разработаны и эксплуатируются в соответствии с объективно существующими закономерностями природных комплексов, то они оказывают стабилизирующее воздействие на экологическое состояние территории и способствуют эффективной рекреации.

В рассматриваемом регионе – Республика Крым – проявляется комплекс природных факторов экологии побережья, к которым относятся и селевые процессы.

Водные потоки, насыщенные грязекаменным материалом (селевые потоки), как один из видов опасных экзогенных процессов, являются результатом сочетания следующих факторов – рыхлообломочного материала (раздробленные частицы осадочных пород, накопления техногенного грунта, размещенного на участках склонов притоков и в руслах селеопасных водотоков) и ливневых вод и талых осадков. Поэтому актуальным и необходимым для прогнозирования селевой опасности является получение одновременно данных о накоплении и перемещении обоих составляющих в пространстве и времени, поскольку постоянно меняется состояние притоков и главного русла селеопасных рек в результате ослабления и разрушения противоселевых инженерных объектов, изменение местоположения и объема рахлообломочного материала на всей протяженности русла, значительные деформации склонов, берегов и русла, и прочие процессы. Данные явления являются основой для продолжения наблюдений и проведения дополнительных исследований с целью конкретизации и углубления знаний об условиях формирования и особенностях движения селевых потоков. При этом условия и факторы накопления рыхлообломочного материала являются второй главной составляющей формирования селевых потоков, поэтому требуют особого внимания. Дополнительно требуется провести инвентаризацию состояния селезащитных сооружений, являющихся одним из основных мероприятий по снижению неблагоприятных последствий и улучшению обстановки на территории исследуемого региона. Поэтому систему комплексного экологического мониторинга необходимо дополнить показателями накопления рыхлообломочного материала (твердой составляющей) селевых потоков.

Краткий обзор проблемы

Комплексные наблюдения и анализ селевых процессов на территории Российской Федерации имеют более короткий период, чем на территории Европы и Азии. Гидрометеорологическая служба (ГМС) СССР была первой организацией, начавшей организованные и систематические исследования селевых процессов, начатые в 1954 г., в рамках выполнения различных работ Министерством геологии (МГ) СССР комплексные исследования начаты с 1964 г. Уже в 1971 г. вышли первые публикации методических указаний по исследованию селевых процессов, а в 1976 г. вышло

«Методическое руководство по комплексному изучению селей» и «Руководство по изучению селевых потоков» соответственно под редакцией М.В. Чуринова, А.И. Шеко и Ю.Б. Виноградова, в которых рассматривались гидрологические, метеорологические, геологические особенности формирования селей и методические положения по их изучению. В 1970 г. и 1981 г. опубликованы обобщающие труды по динамике селевых процессов («Сели» под ред. С.М. Флейшмана) и работа, посвященная закономерностям и прогнозу селей («Закономерности формирования и прогноз селей» под ред. А.И. Шеко). Вопросы формирования селей, методики режимных наблюдений, прогнозирования активизации селевых процессов рассматриваются в теоретических и методических работах В.С. Круподерова, А.И. Шеко и др. [*Лущик, 2017*].

Основные параметры и показатели комплексного экологического мониторинга селевых районов представлены на рис. 1.

Показатели по которым ведутся исследования:

- количество осадков (норма дождевых осадков);
- уклон склонов и водотока;
- наличие продуктов разрушения горных пород на склонах селеопасного бассейна.

Основные параметры селя	Диапазон возможных значений
Объем или мощность селя, м^3	От 1,0 тыс. до 100 млн и более
Максимальный расход селевого потока, м^3/с	От нескольких десятков до 2000
Скорость движения селя, м/с	От 2 до 10
Продолжительность селя, ч	От 1 до 8
Высота вала «головы селя», м	От 2 до 25м
Структурный состав селя (доля твердого материала в объеме потока), %	От 10 до 70
Плотность селевого потока, т/м^3	От 1,1 до 2,5
Ширина селевого потока, м	От 3 до 150
Глубина селевого потока, м	От 1,5 до 15
Длина русла селей	От нескольких десятков метров до нескольких десятков км
Максимальная сила удара селевого потока, т/м^2	От 5 до 12
Повторяемость селя	От нескольких раз в году до одного раза в 30–50 лет
Максимальные размеры в поперечнике крупнообло-мочных включений, м	От 1 до 10 м
Вязкость селевых потоков (связных), П	От 3 до нескольких сотен
Предельная крутизна прекращения движения	2–5°

Рис. 1. Параметры комплексного экологического мониторинга селевых районов

Крымское гидрометеобюро под руководством Б.М. Гольдина начало систематические исследования селеопасных районов Крыма с 1955 г. Параллельно начаты исследования и Крымской горнолесной опытной станцией под руководством А.Н. Олиферова и Крымским филиалом АН УССР под руководством Б.И. Иванова. В конце 1950-х – 1960-х гг. работами Н.М. Горшенина, А.Ф. Полякова, А.Н. Олиферова. М.М. Айзенберга, О.В. Чубатого. П.И. Молоткова подтверждена эффективность внедрения защитных противоэрозионных лесонасаждений и влияние сплошной рубки кустарников на активизацию процессов селеобразования. Непрерывные исследования условий формирования селей и разработка селезащитных мероприятий в Крыму начались после принятия Постановления от 7 октября 1963 г. «О мерах борьбы с селевыми потоками и паводками в горных районах Украинской ССР», в соответствии с которым обобщены и систематизированы сведения о формировании селей и разработан первый кадастр селей. В основу кадастра были положены сведения о селевых реках и временных водотоках горных районов Крыма и Карпат Украины, реках Украины.

Большой вклад в изучение формирования селей в Крыму внесли обобщения и систематические наблюдения за возникновением и прохождением паводков, особенно на малых реках, результаты прогнозирования, которые были опубликованы в разные годы Б.М. Гольдиным, Б.И. Ивановым, А.Н. Олиферовым, З.В.Тимченко и другими учеными.

В пределах селевых районов Крыма (Юго-Западного, Юго-Восточного, Восточного и Северного) гидрометеорологической службой, в конце 1960-х гг., были организованы стационарные наблюдения за формированием водной составляющей и прохождением селей. Работы выполнялись Институтом минеральных ресурсов и производственными организациями до начала 1980-х гг. Результаты этих работ и анализ состояния режимной сети наблюдений за ЭГП, в том числе и селями, приводились в публикациях и других работах [*Лущик, 2017*].

За последние 30 лет, в связи с полным разрушением противоселевых сооружений, накоплением и перемещением твердого рыхлообломочного материала, значительными деформациями склонов и др. явлениями, необходима обновленная комплексная оценка факторов формирования селей и состояния селезащитных сооружений, являющихся показателями уровня целесообразности применения определенного их вида [*Иваненко, 2017*].

Продолжение изучения изменений условий формирования селей под влиянием природных и техногенных факторов, позволяет обосновать возможность применения методического подхода вероятностной оценки селевой опасности, создания картографической модели селевой опасности по условиям накопления твердой составляющей селей, для выбора мест расположения пунктов наблюдения при развитии сети комплексного экологического мониторинга на примере Юго-Восточного селевого района Крыма.

Обзор исследования и результаты

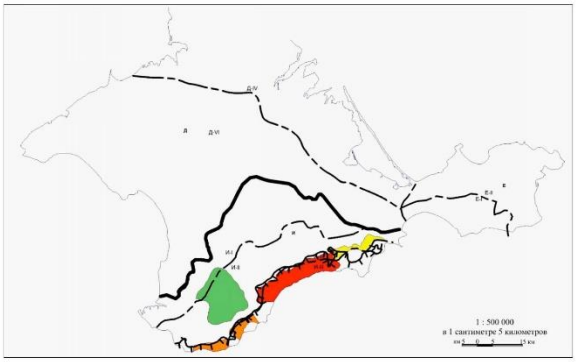
В Горном Крыму существуют четыре селевых района, с различными условиями формирования селевых потоков (рис. 2). Поскольку горная часть Республики Крым является одним из основных рекреационно привлекательных регионов с интенсивным инженерным освоением береговой зоны, поэтому актуальным и необходимым для предотвращения селевой опасности является одновременно получение данных о накоплении и перемещении селей и восстановлении противоселевых сооружений.

На актуальность исследований селей указывают результаты анализа паводков и состояния мероприятий по противоселевой защите в Юго-Восточном селевом районе. В исследуемом регионе последний мощный селевой паводок прошел по р. Ворон в 1998 г. По результатам проведенного обследования установлено, что он является достаточно характерным. В результате прохождения селевого паводка был разрушен водомерный пост. Рассчитанные расходы, определенные сотрудниками Крымского центра по гидрометеорологии, достигали 70 $м^3/с$. Особенностью прошедшего селевого потока была переменная концентрация наносов – поток то превращался в типичный сель, то двигался как водный паводок [*Олиферов, 2005*].

Основным критерием деления на подрайоны по степени селевой опасности было соотношение количества селевых и неселевых русел, объем селевых выносов и повторяемость селей.

Наиболее активным является Юго-Восточный селевой район это низкогорная, очень расчлененная, засушливая, маловодная часть южного склона Главной гряды, занимающая территорию от Алушты до Судака [*Иваненко, 2017*].

К числу наиболее селеопасных рек района относятся Ускут, Арпат, Шелен, Ворон и Ай-Серез, в каждый из водотоков впадает от 4 до 14 селеопасных балок (рис. 3). Частота прохождения селей в Юго-Восточном селевом районе самая высокая в Крыму от 3 до 10 лет. Преобладают водно-каменные сели, которые заносили виноградники, сады, огороды, разрушали мосты, дороги, деформировали берега, создавали угрозу рекреационным объектам и даже являлись причинами гибели людей [*Иваненко, 2017*]. Сели не только нарушают состояние окружающей среды, но и опосредованно, повышают существующую 8–9 балльную сейсмическую опасность. Поэтому селезащитным мероприятиям постоянно уделялось много внимания.



Индекс уровня селевой опасности	Инженерно-геологические области, их номера / Селевой район	Тип селей	Горные породы, образующие твердую составляющую селей, возраст	Частота, прохождения селей в бассейнах главных рек (селевая опасность)	Максимальная скорость линейной денудации, мм/год	Объем одного селевого конуса выноса, тыс. м3	Интенсивность селеопасности, б/р
1 - минимальный	И-1; И-2, северо-западные части областей Северный	Водокаменные, реже грязекаменные	Флиш таврический, делювиально-пролювиальные четвертичные	Через 9-12 лет (слабоселевая)	0,75-6	3-5	менее 0,2
2 - умеренно-повышенный	И-2, восточная часть Восточный	Водокаменные, реже грязекаменные	Делювиально-пролювиальные четвертичные, флиш средней юры	Через 5-7 лет (среднеселевая)	3-22	5-15	0,1-0,3
3 - повышенный	И-2; И-3, юго-западные части областей Юго-Западный	Водокаменные, реже грязекаменные и грязевые	Флиш таврический, делювиально-пролювиальные четвертичные	Через 4-10 лет (среднеселевая)	6-15	9-10	0,7-0,9
4 - высокий	И-2; И-3, юго-восточные части областей Юго-Восточный	Водокаменные, грязекаменные реже грязевые	Флиш таврический, верхней юры, делювиально-пролювиальные четвертичные	Через 2-5 лет (сильноселевая)	20-25	10-20	0,5 до 1,0

Границы:

Д / И — Инженерно-геологических регионов

Д-IV / Д-VI — Инженерно-геологических областей

Южнобережного склона

Рис. 2. Картографическая модель селевой опасности Республики Крым

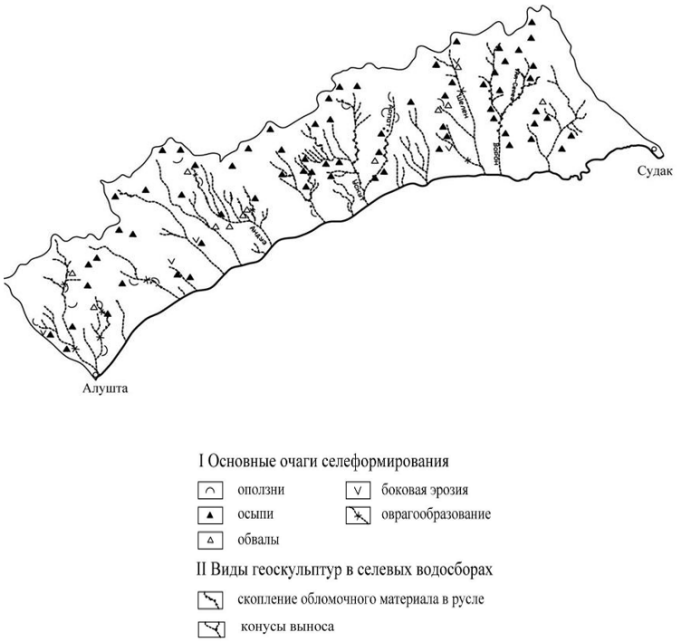


Рис. 3. Карта-схема селеопасных водотоков юго-восточного района Республики Крым

Отсутствие временной синхронности между наблюдениями за жидкой и твердой составляющей селей затрудняет их прогнозирование. На необходимость оценки селевой опасности указывают состояние защитных сооружений, эрозионные процессы в бассейнах рек Ускут, Ворон, Ай-Серез и др., а также паводок на р. Суук-Су в августе 2017 г., где скорость водного потока достигала селевой. Это хорошо прослеживается по фотоснимкам (различные фрагменты результатов паводка, разрушения, вызванных им). Несмотря на то, что паводок этот не был селевым, в устье реки Суук-Су произошли разрушения пляжных сооружений и образовался конус выноса (таблица 1).

Таблица 1. Краткая характеристика последствий селевых потоков в юго-восточном селевом районе

№ п/п	Реки	Количество селевых притоков, шт.	Тип прошедших селей	Количество зафиксированных селей, шт.	Последствия прохождения селевого потока
1	р. Арпат (приток р. Ускут)	14	Водно-каменный	2	Смыв и покрытие рыхлообломочным материалом виноградников и табачных плантаций
2	р. Шелен	11	Водно-каменный	6	Смыв и покрытие рыхлообломочным материалом виноградников и табачных плантаций
3	р. Ускут	10	Водно-каменный	4	Смыв и покрытие рыхлообломочным материалом виноградников и табачных плантаций
4	р. Ворон	10	Водно-каменный	3	Смыв и покрытие рыхлообломочным материалом виноградников, садов, разрушение ГТС
5	р. Ай-Серез приток р. Ворон	4	Водно-каменный	6	Смыв и покрытие рыхлообломочным материалом виноградников, садов, приусадебных участков, глубокие эрозионные врезы водотока
6	р. Суук-Су	4	Водно-каменный	1	Накопление и покрытие рыхлообломочным материалом дороги, территории жилой застройки, пляжных сооружений

Исследования и расчеты, проведенные авторами, еще раз подтверждают данные А.Н. Олиферова и др., что в Горном Крыму преобладают водо-каменные сели, грязекаменные и грязевые возникают редко. Объемная масса селевого потока достигает 1,1 кг/м^3 и более. Средняя скорость потока составляет, как правило, 2–4 м/с и лишь в единичных случаях 5 м/с. Преобладают в Крыму сели малой мощности, со средним объемом выноса за один сель не более 10–20 тыс. м^3. Обычно они проходят одним валом, внезапно и в большинстве случаев сопровождаются заторами.

В таблице 2 приводится частота проявления селей в бассейнах водотоков исследуемой территории.

Таблица 2. Частота проявления селей исследуемой территории

Реки и балки, по которым проходят сели	Максимальный межселевой период, годы
Реки	
Кутлак	2
Шелен	3
Ускут, Арпат, Семидворье (Едыфлер)	4
Ай-Серез, Таракташ (Суук-Су)	5
Андуз, Ворон	6
Улу-Узень (Биюк-Узень)	7
Демерджи	16
Орта-Узень	28
Узень (Аян-Дере)	33
Таракташ (Суук-Су)	100
Балки и овраги	
б. Туакская, овр. Ставлухар, б. Алака (Сотера), б. Канака	2
Куркулет (Черреке-Узень, Подгорная)	3–4
б/н (Вереси, Кастель)	7

Юго-восточный район бассейнов рек и овражно-балочной сети восточной части южнобережного склона Главной горной гряды отличается развитием более крупных водосборов с разветвленной сетью притоков и овражно-балочных систем в широком верхнем и среднем поясах склона, сложенных флишевыми, главным образом таврическими отложениями и конгломератами верхней юры. Большая разработанность долинно-балочной сети, отсутствие резких перепадов тальвегов, почти полное обезлесение водосборов, фрагментарность почвенного покрова способствуют интенсивному выветриванию дислоцированных, трещиноватых, тонкослоистых песчаниково-сланцевых отложений и систематическому поступлению мелкоглыбовой и щебнистой фракций в пролювий и аллювии, заполняющий широкие днища долин и балок.

Бассейны, отнесенные к селеопасным, имеют следующие характерные признаки:

- небольшая площадь водосбора;
- значительные уклоны тальвегов, крутые склоны;
- изреженность растительного покрова;
- легко поддающиеся выветриванию горные породы;
- скопление обломочного материала на склонах и в русле, конусы выноса.

Отличительной особенностью селевого потока является заторный характер его движения. В этом случае при прорыве заторов максимальные расходы могут многократно возрастать. Заторы на селевых водотоках в Крыму могут возрастать в результате нагромождения камней в местах крутых поворотов, резких сужений и изменений русла. Достаточно часто заторы возникают при загромождении русла оползнями, как это было в овраге Ставлухар (приток р. Ускут), осыпями и конусами выноса из боковых притоков [*Титоренко, 2011*]. Для района типична большая пестрота в размещении локальных участков формирования транзита и отложения селевых наносов в связи со значительным расчленением, местами доходящим до стадии бедленда («дурные земли»). Местные базисы эрозии на участках впадения овражно-балочных систем в долины главных рек обычно перекрыты отложениями конусов селевых выносов. В связи с этим в ряде долин отмечается периодическое переотложение аллювиально-пролювиальных отложений, мигрирующих во время локальных селевых паводков вниз по долинам, а во время выпадения значительных осадков — до самого взморья.

Так же одним из ведущих факторов, влияющих на селеопасность бассейнов рек, является растительность, которая играет стабилизирующую роль. Значительная вырубка леса активизирует селевые процессы. Исследования различных лет показывают, что

вокруг населенных пунктов в бассейнах наиболее селеопасных рек, в том числе в бассейне реки Шелен, ведется стихийная интенсивная заготовка дров для отопления.

Так же важным аспектом является активная хозяйственная деятельность на склонах водосборных бассейнов селеопасных рек. К главным негативным факторам – рубке редких древесно-кустарниковых насаждений и неконтролируемому выпасу коз и овец, добавляется вовлечение и захват водными потоками вскрышных пород и продукции карьеров. Дополнительный риск представляют неустойчивые грунтовые плотины, неправильно спроектированные или выполненные из неплотного материала или селевой поток заполняя мостовой переход, создает дополнительный затор.

Главная задача при обосновании и подборе противоселевых сооружений, их протяженности и местоположения — это расчет и определение максимальных величин модуля твердого стока, $м^3/км^2$. В основу расчета положены результаты наблюдений: максимального модуля стока, определенного на основе суточного максимума осадков, при интенсивном ливне и установленной площади водосбора, рассчитанный коэффициент рельефа и индекс покрытия растительностью. Так же, для обоснования противоселевых сооружений необходимы сведения о характерных параметрах водосборного бассейна, количестве и интенсивности ливневых осадков, типе растительности в пределах исследуемого бассейна. Модуль твердого стока является одним из основных критериев для оценки уровня селевой опасности на определенный период и совместно с показателями пораженности ЭГП, исследуемого бассейна, входит в состав критериев оценки эколого-геологических условий в его пределах. Важнейшим показателем для расчетов противоселевых сооружений являются данные о параметрах селей, которые трудно определить даже на оборудованных специальных пунктах. Объемы селевых выносов изменяются в широком диапазоне. Например, в бассейне р. Ай-Серез объемы выносов из балок составляли 553,8–2930 $м^3$ (по данным таблицы 3).

Таблица 3. Краткая характеристика основных селеопасных водотоков в Юго-Восточном селевом районе*

Параметры селеопасных водотоков	р. Ускут	р. Арпат	р. Шелен	р. Ворон	р. Ай-Серез	Прим.
1.Природные						
1.1. Практически, не изменяющиеся во времени и пространстве – геологические:						
Литология	+	+	+	+	+	–
Условия залегания (стратиграфия)	+	+	+	+	+	–
Структурно-тектонические условия	+	+	+	+	+	–
1.2. Слабо изменяющиеся во времени и пространстве – геоморфологические:						
Характерные для района Максимальные/ минимальные отметки – 500/0,4 м	+	+	+	+	+	–
Характерное для района горизонтальное расчленение рельефа составляет 4,0–5,5 $км/км^2$	+	+	+	+	+	–

Параметры селеопасных водотоков	р. Ускут	р. Арпат	р. Шелен	р. Ворон	р. Ай-Серез	Прим.
Характерная для района глубина расчленения рельефа достигает 25–400 м	+	+	+	+	+	–
1.3.1. Слабо изменяющиеся во времени и пространстве – гидрологические параметры рек:						
Общая длина русла (от истоков до устья), L / от верховья до контрольного поста, L_1, км	11,0/7,8	10,0/1,3	10,0/3,0	16,0/7,6	9,4/6,5	–
Падение, от истока до устья, H / до контрольного поста, H_1, м	500,0/ 430,0	483,0/ 160,0	350,0/ 190,0	750,0/ 530,0	280,0/ 200,0	–
Средний уклон от истоков – $i_{ср.}$ до устья / $i_{ср.1}$ до контрольного поста, м/км	45,5/ 55,1	48,3/ 12,3	35,0/ 63,3	46,9/ 69,7	29,8/ 30,8	–
Извилистость	1,1	–	–	–	–	–
1.3.2. Слабо изменяющиеся во времени и пространстве – гидрологические параметры водосборных бассейнов:						
Площадь всего бассейна F, км^2	75,7	28,1	42,0	52,0	20,6	–
Средняя высота водосбора $H_{ср}$, м	390,0	720,0	560,0	500,0	480,0	–
Площадь до контрольного водопоста F_1, км^2	Приветное, 42,3	Зеленогорье, 7,1	Громовка, 16,2	Ворон, 10,3	Междуречье, 12,8	–
Количество селевых притоков, шт.	10	14	11	10	4	–
Местостоположение истока /впадения	Караби яйла, ЮВ склон, высота ~ 500 м / Черное море в 3 км от с. Приветное	Источник Филин-Чокрак в 2,5 км СЗ с. Зеленогорье / р. Ускут в 1,8 км от устья	Главная гряда Крымских гор, Ю склон, высота – 650 м, 4 км от с. Громовка / Черное море в 1,5 км Ю с. Морское	Из родника на ЮВ склоне горы Ливаз-Кая на высоте 650 м, впадает в Черное море в 2 км ЮЗ с. Морское	р. Ворон, левый приток, впадает в 6 км от устья, Ю склон хребта Хамбал на высоте 600 м	–
Превышение уклона в верховьях над уклоном в нижним течении	3,3	–	8,3	6,7	–	–
1.4. Изменяющиеся в пространстве и времени:						
1.4.1. Климатические – осадки (более 50 мм в летний период)	+	+	+	+	+	–

Параметры селеопасных водотоков	р. Ускут	р. Арпат	р. Шелен	р. Ворон	р. Ай-Серез	Прим.
Периоды наблюдений, годы/ количество прохождения селей, шт.	1905–1955/4	1948–1956/2	1948–1964/6	1948–1958/3	1948–1964/6	Скорость селей 1–4 м/с
Тип селей	водно-каменные	водно-каменные	водно-каменные	водно-каменные	водно-каменные	–
1.4.2. Гидравлические – среднемноголетний расход воды, Q на посту / Q_1 в устье, $м^3/с$	0,11/ 0,09	0,03/ 0,04	0,042/ 0,05	0.028/ 0,06	0,015/ 0,04	–
Обобщенные максимальные сточные расходы в холодный период $Q_х$ / $Q_т$ в теплый период на постах, $м^3/с$	3,8/17,3	0,67/ 3,57	2,48/ 9,52	1,26/ 15,7	3,18/ 25,7	–
Модули стока М (Ммак. /Ммин.) на постах, $дм^3/с·км^2$	2,6 / (11,1–0,026)	5,88/ (29,5–1,34)	2,59/ (9,5–0,337)	2,72/ (12,6–0)	1,17/ (4,68–0)	–
Обеспеченность максимальных сточных расходов в холодный период $Р_х$ / $Р_т$ в теплый период на постах, %	11,1/ 10,0	14,3/ 16,7	7,7/7,7	9,1/10,0	9.1/7,7	–
2. Продолжительность расчетных периодов наблюдений N, лет	31 (1964–дейст-вует)	20 (1965–1988)	22 (1965–1988)	31 (1964–действует)	35 (1964–дейст-вует)	–
3. Годы максимальных/ *минимальных* среднегодовых расходов рек ЮБК	1950, 1953, 1956, 1959, 1962, 1965, 1968, 1970, 1973, 1977, 1981, 1988, 1992, 1997/ *1949, 1951, 1954, 1957, 1961, 1964, 1966, 1969, 1972,*	1950, 1953, 1956, 1959, 1962, 1965, 1968, 1970, 1973, 1977, 1981, 1988, 1992, 1997/ *1949, 1951, 1954, 1957, 1961, 1964, 1966, 1969, 1972,*	1950, 1953, 1956, 1959, 1962, 1965, 1968, 1970, 1973, 1977, 1981, 1988, 1992, 1997/ *1949, 1951, 1954, 1957, 1961, 1964, 1966, 1969, 1972,*	1950, 1953, 1956, 1959, 1962, 1965, 1968, 1970, 1973, 1977, 1981, 1988, 1992, 1997/ *1949, 1951, 1954, 1957, 1961, 1964, 1966, 1969, 1972,*	1950, 1953, 1956, 1959, 1962, 1965, 1968, 1970, 1973, 1977, 1981, 1988, 1992, 1997/ *1949, 1951, 1954, 1957, 1961, 1964, 1966, 1969, 1972,*	–

Параметры селеопасных водотоков	р. Ускут	р. Арпат	р. Шелен	р. Ворон	р. Ай-Серез	Прим.
	1976, 1978, 1989, 1991, 1994, 1999	*1976, 1978, 1989, 1991, 1994, 1999*	*1976, 1978, 1989, 1991, 1994, 1999*	*1976, 1978, 1989, 1991, 1994, 1999*	*1976, 1978, 1989, 1991, 1994, 1999*	
Последствия селя	Смыв и покрытие рыхло-обломочным материалом виноградников и табачных плантаций	Смыв и покрытие рыхло-обломочным материалом виноградников и табачных плантаций	Смыв и покрытие рыхло-обломочным материалом виноградников	Смыв и покрытие рыхло-обломочным материалом виноградников, садов, разрушение ГТС	Смыв и покрытие рыхло-обломочным материалом виноградников, садов и приусадебных участков, сильный эрозионный врез водотока	–

*Выполнено авторами по материалам [*Олиферов, 2007; Тимченко, 2012 и др.*].

Выводы

Обобщая теоретические материалы и проведенные исследования, можно сделать вывод что, одной из главных целей организации наблюдений в селеопасных районах является создание пунктов для получения необходимых расчетных параметров.

На основании выполненных исследований установлено следующее.

1. Противоселевая система, созданная в 1960–1970-х гг. в Крыму, преимущественно состоящая из гидротехнических сооружений, практически повсеместно требует переоборудования, с учетом изменений условий формирования селей за последние четверть века.
2. Все это требует организации изучения селей и состояния селезащитных мероприятий (сооружений) с учетом произошедших изменений.
3. При обосновании заложения наблюдательных пунктов за накоплением твердой составляющей селей, необходимо учитывать все факторы их формирования как природные, так и техногенные.

Список литературы

Ветрова, Н.М. Обеспечение экологической безопасности рекреационного региона [Текст] / Н.М. Ветрова, С.И. Федоркин. – Симферополь.: ИТ «АРИАЛ». – 2012. – 294 с.

Виноградов, Ю.Б. Этюды о селевых потоках. / Ю.Б. Виноградов -Ленинград: Гидрометеоиздат.1980.– 144 с.

Власов, А.Ю. Селевые явления и противоселевые мероприятия в США / А.Ю. Власов // Обзорная информация № 15. – М., ЦБНТИ Минводхоз СССР, 1976. – 43 с.

Круподеров, В.С. Региональное изучение и прогнозирование изменений геологической среды /В.С. Круподеров //Методы регионального инженерно-геологического прогнозирования. Сб. научн. тр. ВСЕГИНГЕО. – М., ВСЕГИНГЕО. – 1989 – С. 8–16.

Круподеров, В.С., Экологическая опасность экзогенных геологических процессов /В.С. Круподеров, А.И. Шеко // Международная конференция на пороге XX1 века. Тезисы докладов. – Санкт-Петербург: РАН. – 1999. – С. 213–214.

Круподеров, В.С., Экологическое состояние геологической среды России. / В.С. Круподеров, Г.С. Вартанян, В.В. Куренной, А.М. Лыгини и др. // Геоэкологические исследования и охрана недр. Научно-технический информационный сборник. – М., АО «Геоинформмарк». – 1994, Вып. 2. – С. 3–15.

Лущик, А. В. Мировой и Крымский опыт противоселевой защиты / А. В. Лущик, М. А. Лущик, Т. А. Иваненко // Экономика строительства и природопользования. – 2017. – № 1(62). – С. 50–56. – EDN ZFVTDL.

Лущик, М.А. Состояние мониторинга геологической среды в Крыму и основные направления его развития / А.В. Лущик, Н.В. Горбатюк, Т.А. Иваненко, М.А. Лущик, Г.Э. Садыкова // Актуальные вопросы современной науки: Материалы Международной научно-практической конференции (30 мая 2015 г.). – Казань: Изд-во «Браг». 2015. – С.15–28

Олиферов А.Н. О селевых паводках в Крыму / А.Н. Олиферов // Геополитика и экогеодинамика регионов –2005. – Вып.2. – С. 67–72

Тимченко, З.В. Определение гидрологических характеристик стока рек восточной части Южного берега Крыма при отсутствии гидрометеорологических наблюдений. / З.В. Тимченко //Сб. научных трудов «Строительство и техногенная безопасность». – Вып. 23. – Симферополь НАПКС, 2008. – С.83–22. Тимченко З.В. Гидрография и гидрология рек Крыма: монография /З.В. Тимченко – Симферополь: ИТ «АРИАЛ». – 2012. – 290 с.

Титоренко, А.И. Противоселевые мероприятия и эффективность из применения в бассейнах черноморского побережья / А.И. Титоренко //Вестник ДГТУ. – 2011. – Т. 11, № 6(57). – С. 850–856

Техносферная безопасность рекреационного региона: теоретические основы, инженерные подходы / Н.М. Ветрова, Э.Э. Меннанов, А.И. Пашенцев [и др.]. – Симферополь: ПОЛИПРИНТ, 2023. – 136 с. – ISBN 978-5-605-10312-7. – EDN RGUTMB.

Шеко, А.И. Закономерности формирования и прогноз селей / А.И. Шеко – М.: Недра – 1981. – 282с.

Яковлев, Е.А. Методические основы оценки изменения инженерно-геологических условий в районах интенсивного хозяйственного освоения / Яковлев Е.А., Кухар В.В., Лущик А.В., Кюнтцель В.В // Инженерно-геологические и геокриологические исследования в геоэкологии: Сб. научных докладов. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1991. С. 19–26.

Investigating the influence of groundsill array density on debris flow behavior using numerical simulations

C.-D. Jan, Y.-C. Zeng, L. Dey

National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, China, Litanwre@gmail.com

Abstract. Debris flows propagating in natural environments often encounter irregular terrain features, such as bottom roughness and man-made structures like groundsills. These irregularities significantly influence the flow behavior and dynamics. In this study, we recreated these natural irregularities by introducing a beam-type array of groundsills and investigated their impact on the flow behavior of sediment mixtures in an inclined channel using numerical methods. Numerical simulations were conducted on sediment mixtures following the Bingham rheological model flowing over an array of beam-type groundsills with varying array densities. The groundsill array density, represented by the ratio of spacing to height (d/h), ranges from 2 (high array density) to 10 (low array density). The results revealed that upon interacting with the groundsills, the sediment mixture exhibited a hydraulic jump-like flow reaching a height approximately 2.2 times the approach flow depth for various groundsill array densities. Higher array densities ($d/h \leq 4$) obstructed flow propagation significantly, reducing front velocities but causing sediment accumulation behind the groundsills. In contrast, lower array densities ($d/h \geq 6$) allow smoother propagation but with higher velocities. By understanding the effects of array density on flow dynamics, velocity, and sediment trapping, the design of groundsill arrays can be optimized to effectively reduce debris flow mobility and mitigate the risks associated with it.

Key words: *groundsills, groundsill array density, sediment mixtures, flow behavior, numerical simulation*

Cite this article: Jan C.-D., Zeng Y.-C., Dey L. Investigating the influence of groundsill array density on debris flow behavior using numerical simulations. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 224–225.

Исследование влияния плотности фундаментов на поведение селевых потоков с помощью численного моделирования

Ч.Д. Цзань, И.Ч. Цзэн, Л. Дэй

Национальный тайваньский университет Чэн Кун, Тайнань, Тайвань, Китай, Litanwre@gmail.com

Аннотация. Селевые потоки, распространяющиеся в естественной среде, часто сталкиваются с особенностями рельефа, такими как неровности дна долины и искусственные образования (например, фундаменты). Эти неоднородности существенно влияют на поведение и динамику потока. В ходе исследования мы воссоздали эти естественные неровности путем введения массива балок и исследовали их влияние на поведение потока наносов в наклонном канале с помощью численных методов. Численное моделирование проводилось для смесей осадочных пород в соответствии с реологической моделью Бингхема, протекающих по массиву фундаментных балок с различной плотностью. Плотность массива балок, представленная отношением расстояния между ними к высоте (d/h), варьировалась от 2 (высокая плотность) до 10 (низкая плотность). Результаты показали, что при взаимодействии с балками осадочная смесь ведет себя как гидравлический скачкообразный поток, достигающий высоты, примерно в 2,2 раза превышающей глубину подхода потока при различной плотности массива балок. Более высокая плотность массивов ($d/h \leq 4$) значительно препятствовала

распространению потока, снижая скорость фронта, но вызывая накопление материала за балками. Напротив, более низкая плотность ($d/h \geq 6$) обеспечивает более плавное распространение потока, но с более высокими скоростями. Понимание влияния плотности массива на динамику потока, скорость и задержание осадочного материала позволяет оптимизировать конструкцию массивов балок для эффективного снижения подвижности селевых потоков и уменьшения связанных с ними рисков.

Ключевые слова: *балки, плотность массива балок, смеси осадочных пород, поведение потока, численное моделирование*

Ссылка для цитирования: Цзань Ч.Д., Цзэн И.Ч., Дэй Л. Исследование влияния плотности фундаментов на поведение селевых потоков с помощью численного моделирования. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 224–225.

The full text of the article will be published in the Journal of Mountain Science.

Сель как завершающий процесс в цикле экстремальных экзогенных процессов в горных ландшафтах

В.А. Караваев[1], А.С. Горбунов[2], А.В. Воскова[3], С.А. Буланов[1], А.Н. Гуня[1], С.С. Семиноженко[4], М.Н. Петрушина[5]

[1]Институт географии РАН, Москва, Россия, vadimka_ig@mail.ru
[2]Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия
[3]Институт Генплана Москвы, Москва, Россия
[4]Рослесинфорг, Москва, Россия
[5]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. Проводя анализ вклада различных факторов в активизацию или ослабление процессов, связанных с накоплением и перемещением обломочного материала, мы предположили, что они подчиняются цикличности и подвержены комплексному воздействию нескольких факторов. Схема цикла: после схода крупных селей в горном ландшафте в результате обвально-осыпных, русловых процессов, сходов лавин начинает накапливаться обломочный материал. В качестве отправной точки был выбран именно сход крупного селя, поскольку он является наиболее комплексным процессом, по отношению к которому другие выступают как подготовительные. Основные факторы: осадки, температура воздуха, сейсмичность, морозное выветривание, свойства горных пород – микроморфология и химический состав обломочного материала – влияющие на его вовлечение в экзогенные процессы. Новизной является совместное рассмотрение этих факторов. Цикл экзогенных процессов, в ходе которого одни обуславливают другие, способен длиться в течение ряда лет. После накопления критической массы обломочного материала для схода селя и завершения цикла достаточно даже слабого воздействия одного из факторов или сложения воздействий нескольких факторов.
На исследуемой территории, расположенной в горах Центрального Кавказа – в долинах рек Карасу, Черек Балкарский и их притоков – крупные сели сошли летом 2012 г., а после – в июле 2017 г. Цикл экстремальных процессов, таким образом, продлился 5 лет. Предпосылками завершения как этого, так и предыдущего циклов послужило совместное воздействие нескольких факторов, причем, в значительной степени, не непосредственное, а заблаговременное. Расчеты показывают, что наиболее вероятным «спусковым механизмом» в обоих случаях послужили слабые трехбалльные землетрясения.

Ключевые слова: *цикл, сель, экзогенные процессы, факторы, совместное воздействие, Центральный Кавказ*

Ссылка для цитирования: Караваев В.А., Горбунов А.С., Воскова А.В., Буланов С.А., Гуня А.Н., Семиноженко С.С., Петрушина М.Н. Сель как завершающий процесс в цикле экстремальных экзогенных процессов в горных ландшафтах. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 226–231.

Debris flow as the final process in the cycle of extreme exogenous processes in mountain landscapes

V.A. Karavaev[1], A.S. Gorbunov[2], A.V. Voskova[3], S.A. Bulanov[1], A.N. Gunya[1], S.S. Seminozhenko[4], M.N. Petrushina[5]

[1]Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, vadimka_ig@mail.ru
[2]Voronezh State University, Voronezh, Russia
[3]Moscow General Planning Research and Project Institute, Moscow, Russia

[4]Roslesinforg, Moscow, Russia
[5]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. By analyzing the contribution of various factors to the activation or weakening of processes associated with the accumulation and movement of debris, we assumed that they are subject to cyclicity and are subject to the complex influence of several factors.
Scheme of the cycle: after large debris flows in the mountain landscape, as a result of landslide-talus, channel processes, and avalanches, debris material begins to accumulate. It was the collapse of a large debris flow that was chosen as the starting point, since it is the most complex process, in relation to which others act as preparatory ones. The main factors: precipitation, air temperature, seismicity, frost weathering, rock properties – micromorphology and chemical composition of clastic material – influencing its involvement in exogenous processes. The novelty is the joint consideration of these factors. The cycle of exogenous processes, during which some cause others, can last for a number of years. After the accumulation of a critical mass of clastic material, even a weak impact of one of the factors or the addition of the effects of several factors is sufficient for the debris flow to flow and complete the cycle.
In the study area, located in the mountains of the Central Caucasus – in the valleys of the Karasu, Cherek Balkarsky rivers and their tributaries – large debris flows occurred in the summer of 2012, and then in July 2017. The cycle of extreme processes thus lasted 5 years. The prerequisites for the completion of both this and the previous cycle were the combined influence of several factors, and, to a large extent, not immediate, but in advance. Calculations show that the most likely "trigger mechanism" in both cases was weak 3-magnitude earthquakes.

Key words: *cycle, debris flow, exogenous processes, factors, joint impact, Central Caucasus*

Cite this article: Karavaev V.A., Gorbunov A.S., Voskova A.V., Bulanov S.A., Gunya A.N., Seminozhenko S.S., Petrushina M.N. Debris flow as the final process in the cycle of extreme exogenous processes in mountain landscapes. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 226–231.

Введение

С 2009 г. с целью изучения специфики экзогенных процессов Центрального Кавказа нами проводились исследования на репрезентативной для всего региона территории – в бассейне верховьев р. Черека Балкарского, выше села Верхняя Балкария, и бассейнах его истоков – Карасу и Дыхсу – и притоков (рис. 1). Были выявлены ключевые участки, где разнообразные экзогенные процессы – обвалы, осыпи, оползни и т.д. – проявляются наиболее ярко: селе-лавинных комплексов Тютюн-Су (в среднем течении р. Черека Балкарского), Метиан-Суу (в верховьях р. Черека Балкарского), Ортозюрек и Ахсу (в верховьях р. Карасу) и безымянного ручья в среднем течении р. Лькези, оползень в среднем течении р. Карасу, очаги развития обвально-осыпных процессов в среднем течении р. Лькези и на приледниковых участках около ледников Штулу Западный и Штулу Восточный, осыпь в верховьях р. Черека Балкарского. Мы составили карту-схему ландшафтных местностей и участков интенсивного проявления экзогенных процессов (рис. 2). Особое место в их ряду заняли сели в силу своей комплексности как по разнообразию факторов формирования и разнородности природных компонентов, которые они изменяют, так и по длительности подготовительного периода, и тяжести последствий[4].

[4] Так, 12.05.2008 на юго-западе Китая произошло Вэньчуаньское землетрясение магнитудой 7,9–8,0, само по себе принесшее многочисленные жертвы и большие разрушения. Однако другие масштабные его последствия были отсрочены на два года – 08.08.2010 после обильных ливневых дождей в провинции Ганьсу сошли крупные сели с участием подготовленного землетрясением обломочного материала [*Horton et al., 2019; Tang et al., 2018; Pasquale et al., 2022*].

Рис. 1. Территория исследования

Со временем нами была отмечена тенденция в периодичности сходов селей на территории исследования, когда они не соответствовали традиционному представлению об их непосредственному следованию обильным осадкам и (или) бурному таянию снежников и ледников в высокогорье. В итоге возникла гипотеза о том, что экстремальные экзогенные процессы, связанные с накоплением и перемещением обломочного материала, образуют цикл.

Схема цикла видится так: после схода крупных селей в горном ландшафте в результате обвально-осыпных, русловых процессов, сходов лавин начинает накапливаться обломочный материал. По достижении критической массы, даже при слабом воздействии любого из факторов происходит следующий сход.

Мы предполагаем, что опасные (экстремальные) экзогенные процессы, связанные с накоплением и перемещением обломочного материала – обвально-осыпные процессы и сели – образуют цикл. Схема цикла: после схода крупных селей в горном ландшафте в результате обвально-осыпных, русловых процессов, сходов лавин начинает накапливаться обломочный материал. По достижении критической массы, даже при слабом воздействии любого из факторов, случается следующий сход. Основные факторы формирования цикла: осадки, температура воздуха, сейсмичность, морозное выветривание, морфометрические показатели рельефа, состав обломочного материала и его морфологические особенности.

Новизной подхода является совместный анализ различных факторов, который позволил выявлять «кумулятивный эффект», при котором складываются даже слабые их проявления, способные вызвать финальный сход селя, завершающий цикл. Стабильному его течению способствует соответствие средним многолетним трендам как абсолютных показателей факторов, меняющихся во времени – температуры воздуха, осадков, морозного выветривания, сейсмичности, – так и их временного хода – суточного, недельного, месячного и т.д.

В исследуемом районе, как показали наблюдения, цикл составляет 3–7 лет.

Проблема исследования, которая освещается в статье, заключается в выявлении фактора или факторов, которые определили сход селя и, соответственно, – завершение очередного цикла экстремальных экзогенных процессов.

Методика предполагает совместный анализ главных факторов формирования экзогенных процессов. Для удобства анализа графики факторов, изменяющихся со временем, помещены друг над другом в едином масштабе. Они отображают температуру воздуха, осадки, землетрясения и морозное выветривание, отраженное в количестве переходов температуры воздуха через точку замерзания – ноль градусов по Цельсию,

что способствует разрушению горных пород. Чтобы избежать перегрузки статьи иллюстрациями, здесь приведены совмещенные графики за период 2016…2021 гг. (рис. 3).

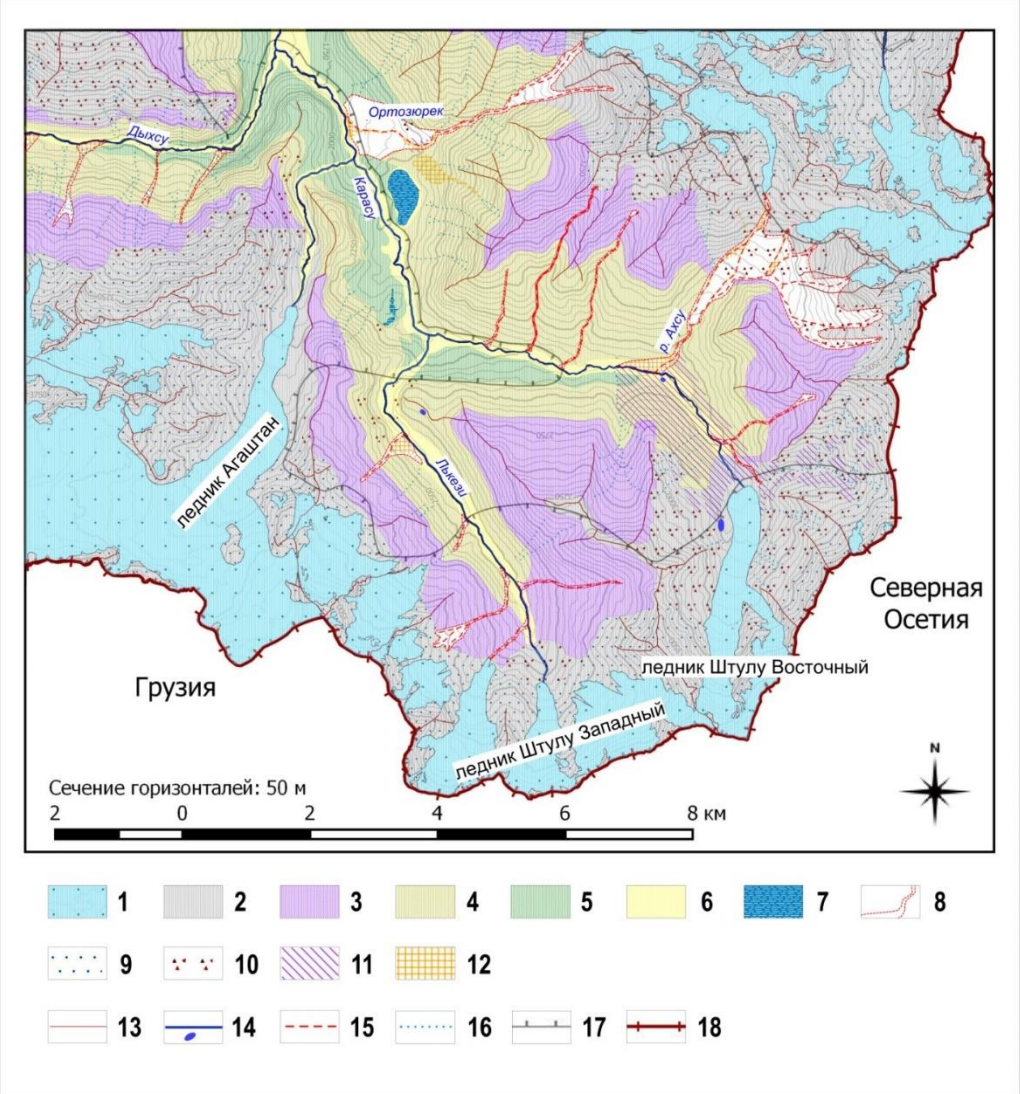


Рис. 2. Ландшафтные местности и участки интенсивного проявления экзогенных процессов [*Караваев и др., 2020*]. *Типы ландшафтных местностей:* 1 – нивальные, 2 – субнивальные, 3 – альпийские, 4 – субальпийские, 5 – горно-лесные, 6 – речных долин, 7 – болотные, 8 – селевые и селево-лавинные. *Участки интенсивного проявления экзогенных процессов:* 9 – нивально-гравитационных, 10 – гравитационных, 11 – оползневых, 12 – пролювиальных. *Линии развития экзогенных процессов:* 13– гребни горных хребтов, 14 – водные объекты, 15 – селеносные русла, 16 – лавинные лотки. *Границы:* 17 – Кабардино-Балкарского высокогорного заповедника, 18 – исследуемой территории.

Данные и анализ

С первых лет изучения территории – с 2008 г. по июль 2012 г., когда завершился первый из отмеченных нами циклов экстремальных экзогенных процессов, в долинах р. Черека Балкарского, его истоков и притоков, произошло 14 землетрясений силой от 3,1 до 6,6 баллов[5]. Однако «спусковым механизмом» послужило землетрясение в 3,1 балла –

[5] https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/ (дата обращения 21.12.2021)

температура воздуха следовала многолетнему тренду, а осадки сильно отставали от него. Во время следующего цикла было отмечено также 14 землетрясений, силой от 3 до 4,8 баллов (см. рис. 3*г*). Серия крупных селей сошла в исследуемом районе в июле 2017 г., что мы принимаем за окончание очередного цикла. Заметим, что осадки в этом месяце были скудными по местным июльским меркам – всего 67 мм, что больше, чем на 20 мм отстает от нормы (см. рис. 3*б*).

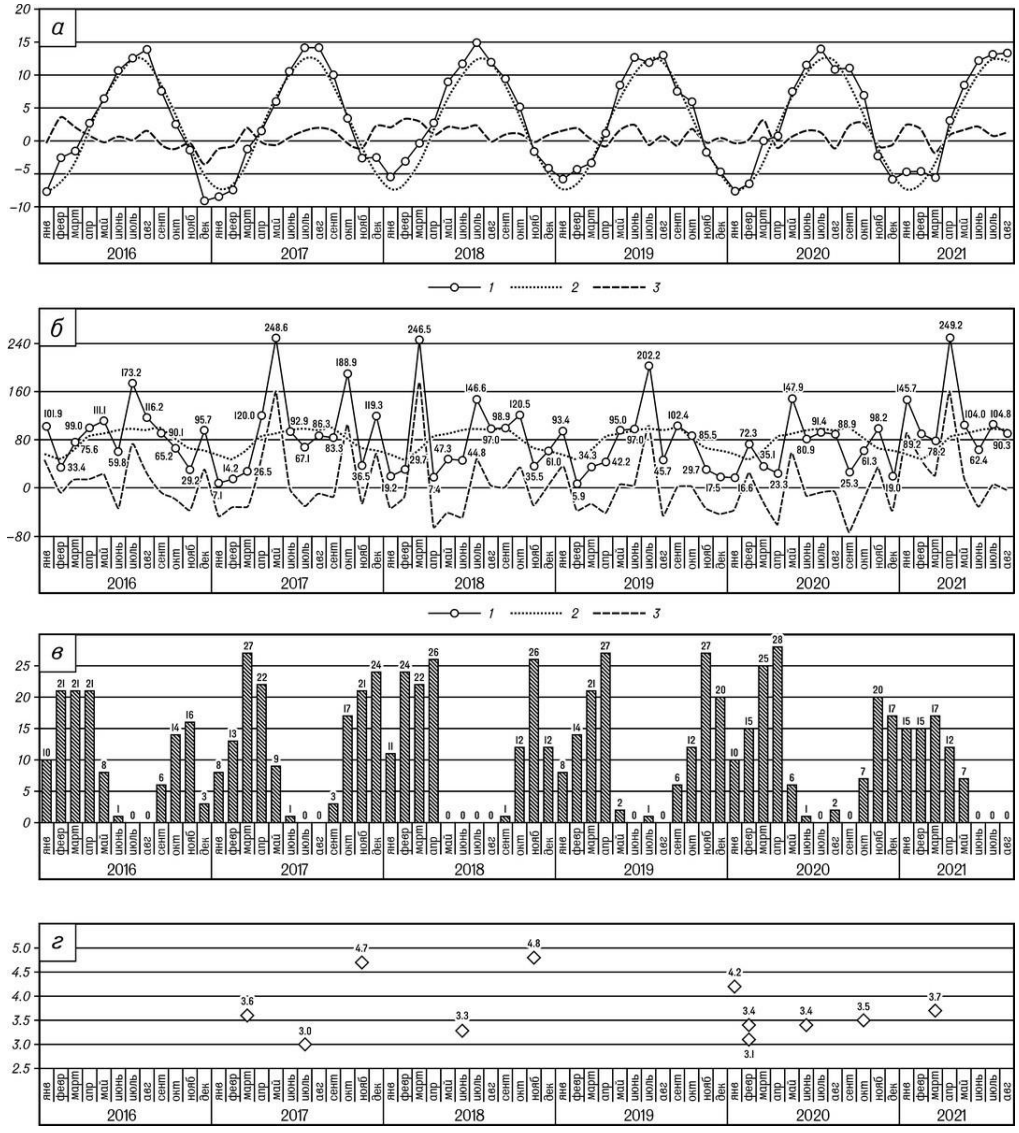


Рис. 3. Факторы формирования экстремальных экзогенных процессов в 2016–21 гг. [*Караваев и др., 2022*]: а – температура воздуха, ºС, б – осадки, мм, в – количество дней с переходами температуры воздуха через 0 ºС, г – землетрясения, интенсивность в баллах; 1 – среднемесячные значения за год, 2 – среднемесячные значения за 1951–2013 гг., 3 – отклонения среднемесячных значений за год (1) от среднемесячных значений за 1951–2013 гг. (2)

С морозным выветриванием ситуация была стандартной – в июне наблюдался один переход температуры воздуха через точку замерзания воды, в июле – ни одного. Наиболее активным морозное выветривание было в марте – 27 переходов и апреле – 22 перехода, что соответствовало многолетнему тренду (см. рис. 3*в*).

Превышение среднемесячной температуры воздуха над средней многолетней температурой июля в этих местах было невелико – около 2°. Однако, это усилило таяние ледников в высокогорье, увеличив приток воды в селеносные русла (см. рис. 3*а*). Вместе с тем, главную роль в завершении цикла, как и пятью годами ранее, сыграло также слабое

трехбалльное землетрясение (см. рис. 3*г*). Такой вывод нам позволяет делать ситуация с осадками. По графикам видно, что их максимальные годовые значения приходятся на разные весенние и летние месяцы. Кроме того, в отличие от температуры воздуха, ход которой стабилен и предсказуем, наибольшие значения осадков сильно отличаются друг от друга (см. рис. 3*а, б*). Так, в 2016 г. максимум пришелся на июль и составил 173 мм, в 2018 г. – на март – 247 мм, в 2019 г. – на июль – 202 мм, в 2020 г. – на май – 148 мм и в 2021 г. – на апрель – 249 мм. Исходя из этого, именно обильные осадки, выпавшие за короткое время, могут спровоцировать сходы селей и завершить цикл. В 2017 г. наибольшее их значение было отмечено в мае и составило максимальную для рассматриваемых 6 лет, как и в 2021 г., величину – 249 мм. Причем максимум, в отличие от других лет, случился в месяце, когда грунт оттаял. Тем не менее, несмотря на уже накопленный обломочный материал, сходов крупных селей не произошло. Они случились в июле после упомянутого землетрясения. Так, один из самых крупных селей сошел по реке Метиан-Суу, долина которой является одним из ключевых объектов мониторинга экзогенных процессов, размыл автомобильную дорогу и разрушил мост. Река в нижнем течении пробила новое русло.

Выводы

В июле 2012 г. и июле 2017 г., когда сошли крупные сели, завершив, таким образом, на исследуемой территории очередные циклы экстремальных экзогенных процессов, «спусковым механизмом» в обоих случаях послужили слабые трехбалльные землетрясения и, во втором случае в значительно меньшей степени, – небольшое превышение температуры воздуха, вызвавшее таяние ледников в высокогорье.

Список литературы

Караваев В.А., Горбунов А.С., Семиноженко С.С. Роль слабых землетрясений в цикле экстремальных экзогенных процессов в горах Центрального Кавказа // Геология и геофизика Юга России. 2022. Т. 12. № 4. С. 6–18.

Караваев В.А., Федин А.В., Семиноженко С.С. Новый цикл опасных процессов в высокогорье Центрального Кавказа // Жизнь Земли, 2020. Т. 42. № 2. С. 136–142.

Horton A.J., HalesaT.C., Ouyang C., Xuanmei F. Identifying post-earthquake debris flow hazard using Massflow // Engineering Geology, vol. 258, 14 August 2019, 105134.

Pasquale M., Srikrishnan S. S., Xuanmei F., Greco R. Changes in debris-flow susceptibility after the Wenchuan earthquake revealed by meteorological and hydro-meteorological thresholds // Catena, vol. 210, March 2022, 105929.

Tang C., van Vesten C.J. 2018. Atlas of Wenchuan-Earthquake Geohazards. Science Press, Beijing, 96 p.

Об основных природных угрозах и рисках в Таджикистане

Ф.А. Кариева, А.А. Гулахмадов

Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан, karaeva-27@mail.ru

Аннотация. Наиболее опасные природные процессы в Таджикистане – землетрясения, камнепады, оползни, сели, быстрые подвижки ледников и эрозия почв, которые можно назвать общим термином «геологические угрозы». Кроме того, Таджикистан подвержен «гидрологическим угрозам», таким как засухи и наводнения, а также снежные бури и лавины. Они могут возникать как независимо друг от друга, так и во взаимосвязи: одно из них может повлечь за собой другое. Некоторые из них часто возникают в результате не всегда разумной деятельности человека.

Сели – это паводки с очень большой концентрацией минеральных частиц, камней и обломков горных пород (от 15 до 75% объема потока), возникающие в бассейнах небольших горных рек и сухих логов и вызванные, как правило, ливневыми осадками, реже интенсивным таянием снега, а также прорывами горнх озер, обвалами, оползнями, землетрясениями.

По составу переносимого твердого материала селевые потоки могут быть грязевыми (смесь воды с мелкоземом при небольшой концентрации камней, объемный вес ν = 1 т/м^3), грязекаменными (смесь воды, гальки, гравия, небольших валунов, ν = 2,1–2,5 т/м^3) и водокаменные (смесь воды с преимущественно крупными валунами, ν = 1,1–1,5 т/м^3). Скорость селевого потока обычно составляет 2,5 м/с, но при прорыве заторов она может достигать 8–10 м/с и более.

Формирование селевых потоков в Таджикистане связано со скоплением большого количества рыхлообломочного материала на склонах и в руслах водотоков обильным выпадением осадков, запруживанием рек, деятельностью современных ледников. В некоторых случаях причиной формирования селей могут одновременно стать несколько факторов. Так, например, в разные периоды времени из-за обильного выпадения осадков, подвижек старых оползней, подпруживания ручьев и рек прошли очень мощные селевые потоки в Гармском (1969 и 1998 гг., кишлаки Ялдамич и Навди), Тавильдаринском (1998 г., кишлак Лангар) районах и г. Нурек (1998 г., кишлак Навдех). Каждому горному району свойственны свои причины возникновения селей. В последние годы к естественным причинам формирования селей добавились техногенные факторы: нарушение правил и норм работы горнодобывающих предприятий, взрывы при прокладке дорог и строительстве других сооружений, рубки леса, неправильное ведение сельхозработ и нарушение почвенно-растительного покрова.

Ключевые слова: *сели, природные угрозы, риски, землетрясения, оползни, обвалы, техногенные факторы, геологические угрозы, гидрологические угрозы, засухи, наводнения, ледники, эрозия почв, горные районы*

Ссылка для цитирования: Кариева Ф.А., Гулахмадов А.А. Об основных природных угрозах и рисках в Таджикистане. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 232–237.

About the main natural threats and risks in Tajikistan

F.A. Karieva, A.A. Gulakhmadov

Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, karaeva-27@mail.ru

Abstract. The most dangerous natural processes in Tajikistan are earthquakes, rockfalls, landslides, debris flows, glacier surges, and soil erosion, which can be called by the general term geohazards. In addition, Tajikistan is subject to hydrological hazards, such as droughts and floods, as well as snowstorms and avalanches. They can occur both independently of each other and in conjunction: one of them can lead to another. Some of them often occur as a result of not always reasonable human activity. Debris flows are floods with a very high concentration of mineral particles, stones, and rock fragments (from 15 to 75% of the flow volume), occurring in the basins of small mountain rivers and dry ravines and caused, as a rule, by heavy rainfall, less often by intense snowmelt, as well as outbursts of mountain lakes, avalanches, landslides, earthquakes. According to the composition of the transported solid material, debris flows can be mud (a mixture of water with fine earth with a small concentration of stones, bulk density v = 1 t/m^3), mud-stone (a mixture of water, pebbles, gravel, and small boulders, v = 2.1-2.5 t/m^3) and water-stone (a mixture of water with predominantly large boulders, v = 1.1-1.5 t/m^3). The speed of a debris flow is usually 2.5 m/s, but when breaking through jams it can reach 8–10 m/s or more. The formation of debris flows in Tajikistan is associated with the accumulation of a large amount of loose debris on slopes and in the beds of watercourses, heavy precipitation, damming of rivers, and the activity of modern glaciers. In some cases, several factors can simultaneously cause the formation of debris flows. For example, in different periods of time, due to heavy precipitation, the movement of old landslides, and the damming of streams and rivers, high-magnitude debris flows occurred in the Garm (1969 and 1998, Yaldamich and Navdi villages), Tavildara (1998, Langar village) districts and the city of Nurek (1998, Navdekh village). Each mountainous region has its own causes of debris flows. In recent years, man-made factors have been added to the natural causes of debris flows: violation of rules and regulations for the operation of mining enterprises, explosions during road construction and the construction of other structures, logging, improper agricultural work, and disturbance of the soil and vegetation cover.

Key words: *debris flows, natural hazards, risks, earthquakes, landslides, avalanches, man-made factors, geological hazards, hydrological hazards, droughts, floods, glaciers, soil erosion, mountainous areas*

Cite this article: Karieva F.A., Gulakhmadov A.A. About the main natural threats and risks in Tajikistan. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 232–237.

Как известно, Республика Таджикистан – это горная страна, 93% территории которой покрыто горами, достигающими максимальной высоты в 7495 м н.у.м. Климат варьируется от субтропического и континентального до полярного и зависит от региона и высоты. Высокогорные районы, как правило, подвержены различным угрозам.

Наиболее опасными для людей являются землетрясения, камнепады, оползни, сели, быстрые подвижки ледников и эрозия почв, которые можно назвать общим термином «геологические угрозы». Кроме того, Таджикистан подвержен «гидрологическим угрозам», таким как засухи и наводнения, а также снежные бури и лавины. Они могут возникать как независимо друг от друга, так и во взаимосвязи: одно из них может повлечь за собой другое. Некоторые из них часто возникают в результате не всегда разумной деятельности человека.

Под землетрясениями понимают подземные толчки и колебания земной поверхности, возникающие в результате внезапных смещений и разрывов в земной коре или верхней части мантии Земли и передающиеся на большие расстояния в виде упругих колебаний. Они возникают внезапно и распространяются быстро. За это время невозможно провести подготовительные и эвакуационные мероприятия, поэтому последствия землетрясений связаны с огромными экономическими потерями и многочисленными человеческими жертвами.

Число пострадавших зависит от силы и места землетрясения, плотности населения, высотности и сейсмостойкости строений, времени суток, вероятности

возникновения вторичных поражающих факторов, уровня подготовки населения, сил и средств ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Разрушительная сила землетрясения огромна, но не безгранична. При соответствующих мерах по прогнозированию, предотвращению, своевременному оповещению населения о приближении момента их возникновения, своевременному принятию мер защиты и губительных последствий вполне можно избежать или свести к минимуму.

Землетрясения антропогенного характера возникают в результате деятельности человека и являются следствием взрывов большой мощности, обрушения подземных инженерных сооружений, продавливания верхнего слоя земной поверхности при сооружении искусственных водохранилищ с большим объемом содержания воды, возведения городов с высокой плотностью застройки многоэтажными зданиями. Наиболее разрушительные и часто повторяющиеся из перечисленных выше землетрясений тектонические. Они являются результатом внезапного разрыва сплошного вещества Земли и смещения отдельных участков коры.

Предполагается, что земная кора состоит из прочных участков (блоков), расположенных относительно друг друга под разными углами, которые соединены между собой участками меньшей прочности. В зонах сочленения развиваются большие скользящие напряжения, что вызывает движение блоков и приводит к возникновению землетрясений. Такие зоны называются сейсмическими швами, а область возникновения подземного удара – очагом землетрясения. Он может находиться на глубине до сотен километров. Центр очага землетрясения называется гипоцентром. В зависимости от глубины гипоцентра землетрясения подразделяются на нормальные (при глубине до 70 км), промежуточные (от 70 до 300 км) и глубокофокусные (более 300 км).

Землетрясения, в зависимости от интенсивности колебаний поверхности земли, разделяются на следующие группы: слабые (1–3 балла); умеренные (4 балла); довольно сильные (5 баллов); сильные (6 баллов); очень сильные (7 баллов); разрушительные (8 баллов); опустошительные (9 баллов); уничтожающие (10 баллов); катастрофические (11 баллов); сильно катастрофические (12 баллов).

При 1 балле землетрясение незаметное, отмечается только сейсмическими приборами. 2 балла – очень слабое, ощущается отдельными людьми. 5 баллов – довольно сильное, ощущается общее сотрясение зданий, колебание мебели. 7 баллов – очень сильное, трещины в стенах каменных зданий. Антисейсмические и деревянные здания остаются. При 8 баллах появляются разрушительные трещины на крутых склонах гор и сырой почве. 9 баллов – опустошительное и сильное повреждение. При 10 баллах – уничтожающее, крупные трещины в почве, оползни и обвалы, при 12 баллах – сильная катастрофа. Последствия землетрясений многообразны и чрезвычайно опасны.

Территория Таджикистана расположена в зоне взаимодействия трех крупных горных структур: Памирской, Гиндукушской и Южно-Тяньшаньской. Здесь ежегодно регистрируется более 5000 землетрясений. Хотя землетрясения катастрофического масштаба случаются редко, Таджикистан в 20 в. испытал воздействие нескольких разрушительных сейсмогенных событий. К ним относится, например, Каратагское землетрясение 1907 г.

Часто землетрясения не вызывают непосредственно возникновения опасных склоновых явлений: они ускоряют развитие опасных процессов, которые могут проявиться через достаточно долгое время после самого землетрясения.

23 января 1989 г. в 25–30 км западнее Душанбе, в кишлаке Шарора, произошло землетрясение. Сила подземного толчка в эпицентре достигла 7 баллов. Сами по себе землетрясения силой 7 баллов для Таджикистана не так уж страшны и разрушительны. Однако подобные события, как правило, приводят к вторичным негативным явлениям: образованию завалов в руслах рек и водоемов, угрожающих затоплением нижележащим населенным пунктом, оползневым явлениям, сходу снежных лавин, камнепадам и другим явлениям.

Не стало исключением и Гиссарское землетрясение. Оно привело к образованию огромных оползней, которые, в конечном итоге, и явились основной причиной человеческих жертв и большого материального ущерба. Всего погибло 277 человек, из

них трое умерло в больницах, из-под завалов было извлечено 87 погибших. В общей сложности пострадало 5235 дворов с семьями (33 251 человек).

Погибло 816 голов скота, разрушено около 40 км автомобильных дорог, 6 км междугородних и 15 км местных кабельных и воздушных линий связи, общая протяженность пострадавших линий электропередач составила 120 км.

Оползни – это смещение масс горных пород вниз по склону, возникающее из-за нарушения равновесия, вызываемого различными причинами. Они бывают как естественными, так и искусственными (антропогенными).

К естественным причинам относятся:

- увеличение крутизны склонов;
- размыв их оснований речными водами;
- сейсмические толчки.

Искусственными причинами являются:

- разрушение склонов дорожными выемками;
- чрезмерным выносом грунта;
- вырубкой леса;
- неразумным ведением сельского хозяйства на склонах.

Согласно международной статистике до 80% современных оползней связанно с деятельностью человека. Подавляющее большинство оползней (90%) происходит в горах на высоте от 1000 до 1700 м н.у.м.

Оползни могут происходить на всех склонах, начиная с крутизны 19°. Однако на глинистых грунтах они случаются и при крутизне склона 5–7°. Для этого достаточно избыточного увлажнения пород. По масштабам оползни подразделяются на крупные, средние и мелкие. Крупные вызываются, как правило, естественными причинами и образуются вдоль склонов на сотни метров. Их толщина достигает 10–20 м и более. Оползневое тело часто сохраняет свою монолитность. Средние и мелкомасштабные оползни имеют меньшие размеры и обычно являются следствием антропогенной деятельности.

Масштаб оползней часто характеризуется площадью, вовлеченной в процесс. В этом случае они подразделяются на грандиозные (400 га и более), очень крупные (200–400 га), крупные (100–200 га), средние (50–100 га), мелкие (5–50 га) и очень мелкие (до 5 га). По скорости движения оползни весьма разнообразны.

На территории Таджикистана отмечено более 50 тыс. оползней. Они группируются в сейсмогенные и несейсмогенные. Основной причиной сейсмогенных оползней являются сильнейшие землетрясения. Объемы таких оползней во много (10–15) раз больше, чем у обычных и перемещаются они в отдельных случаях на расстояние несколько километров от стенки отрыва. Примером может быть оползень, возникший после 9–10-балльного Хаитского землетрясения. Двигаясь с высокой скоростью, он опустошил большое количество кишлаков, погребая под собой 28 тыс. человеческих жизней. Наряду с главным оползнем, одновременно на большой площади образовались сотни других, нанесших огромный ущерб в Хаитском, Таджикабадском, Гармском и Джиргатальском районах.

В качестве другого примера можно привести оползень-обвал, возникший после Сарезского землетрясения 1911 г., происшедшего на Центральном Памире. Под обломками глыб обвала был полностью погребен кишлак Усой со всеми его жителями. Перегороженная оползнем река Мургаб вскоре затопила крупный кишлак Сарез. Образовавшееся озеро было названо Сарезским. В настоящее время площадь озера составляет 80 км^2, а длина около 70 км.

Не сейсмогенные оползни и обвалы связаны в основном с известными факторами. Наиболее существенными из них являются подмыв основания склона гор реками, овражная эрозия, гидрогеологическое и техногенное воздействие. Сейсмический фактор при таких оползнях может быть подчиненным. Примером может быть оползень, полностью уничтоживший часть кишлака Шарора в Гиссарском районе. Основной причиной формирования оползня был чрезмерно активный полив, постоянная утечка

воды из проложенного вдоль склона ирригационного канала и насыщение его верхней части этими водами. Спусковым механизмом, было землетрясение 23 января 1989 г. Под этим оползнем было погребено более 200 жителей кишлаков Шарора, Оккули Боло, Оккули Поен Гиссарского района.

Сели – это паводки с очень большой концентрацией минеральных частиц, камней и обломков горных пород (от 15 до 75% объема потока), возникающие в бассейнах небольших горных рек и сухих логов и вызванные, как правило, ливневыми осадками, реже – интенсивным таянием снегов, а также прорывами горных озер, обвалами, оползнями, землетрясениями.

По составу переносимого твердого материала селевые потоки могут быть грязевыми (смесь воды с мелкоземом при небольшой концентрации камней, объемный вес $\nu = 1$ т/м^3), грязекаменными (смесь воды, гальки, гравия, небольших камней, $\nu = 2{,}1$–$2{,}5$ т/м^3) и водокаменные (смесь воды с преимущественно крупными камнями, $\nu = 1{,}1$–$1{,}5$ т/м^3). Скорость течения селевого потока обычно составляет 2,5 м/с, но при прорыве заторов она может достигать 8–10 м/с и более.

Формирование селевых потоков в Таджикистане связано со скоплением большого количества рыхлообломочного материала на склонах и в руслах водотоков, обильным выпадением осадков, запруживанием рек, деятельностью современных ледников. В некоторых случаях причиной формирования селей могут одновременно стать несколько факторов. Так например, в разные периоды времени из-за обильного выпадения осадков, реализации старых оползней, подпруживания ручьев и рек прошли очень мощные грязевые потоки в Гармском (1969 и 1998 гг., кишлаки Ялдамич и Навди), Тавильдаринском (1998 г., кишлак Лангар) районах и г. Нурек (1998 г, кишлак Навдех).

Каждому горному району свойственны свои причины возникновения селей.

В последние годы к естественным причинам формирования селей добавились техногенные факторы: нарушение правил и норм работы горнодобывающих предприятий, взрывы при прокладке дорог и строительстве других сооружений, рубки леса, неправильное ведение сельхозработ и нарушение почвенно-растительного покрова.

Внезапные паводки в узких долинах рек в холмистой и горной местности особенно разрушительны. На равнинах юга страны и в широких речных долинах масштабные наводнения случаются, когда реки выходят из берегов, прорывают дамбу или переливаются через нее и иногда меняют свое русло. Обильные снегопады в 2004 г. и жаркое лето 2005 г. стали причиной резкого таяния снегов и ледников, и в июне-августе 2005 г. многие регионы страны подверглись наводнениям. В районе Хамадони паводок полностью разрушил 136 домов; более 2000 человек лишились своих домов и более 6,5 тыс. человек пришлось эвакуировать.

Аналогичное бедствие произошло в Пенджикентском районе, где паводок разрушил 466 домов и нанес ущерб 3 тыс. жителей.

7 августа в результате стихийного бедствия сошле селевой поток в кишлаке Дашт Рошткалинского района. Погибло 24 человека и более 500 семей остались без жилья.

Анализ Государственной службы наблюдений Управления «Таджикглавгеология» выявил следующие долины рек в качестве наиболее подверженных паводкам и селям:

- Могиендара, Шинг, Фороб, Кштут в Пенджикентском Фондарья и Ягноб в Айнинском районе;
- Зеравшан в Пенджикентском и Айнинском районах;
- Понгаз, Ошоба и Шаидон в Аштском районе;
- Ванч, Язгулем, Бартанг, Гунт, Шохдара в Горно-Бадахшанской автономной области;
- Пяндж, Кафирниган, Яхсу, Тоирсу и Кызылсу в Хатлонской области.

Почти 50% всех паводков и селей происходит в Гиссарской и Каратегинской долинах т.е. в районах республиканского подчинения, где было выявлено в общей сложности 466 населенных пунктов, подверженных селевым потокам и наводнениям.

По данным КЧС и ГО ПРТ в 2020 г. зарегистрированы 213 чрезвычайных случаев природного характера, в том числе 95 случаев схода лавин, 36 случаев селей, 30 случаев

землетрясений, 21 случаев сильных ветров, 9 случаев проливных дождей, 9 случаев камнепадов, 6 случаев оползней, 4 случая подъема уровня воды в водохранилищах и 2 случая гроз [*Сафаров, Фазылов, Гулаезов, 2021*]. В 2021 г. на территории республики зарегистрировано 359 стихийных бедствий, в том числе: 153 схода лавин, 53 селя, 42 камнепада, 40 сильных ветров, 33 землетрясения, 19 подъемов уровня воды в водохранилищах, 8 проливных дождей, 7 оползней, 1 случай эрозии почвы с обрушением, 1 случая сильного холода и 2 – грома и молний. Количество опасных природных явлений за период 2017–2021 гг. представлено в таблице 1.

Таблица 1. Опасные природные явления за 2017–2021 гг.

Виды стихийных бедствий	Год				
	2017	2018	2019	2020	2021
Землетрясения	33	30	25	30	33
Лавины	720	8	445	95	153
Сели	41	48	80	36	53
Камнепады	21	44	37	9	42
Сильный ветер	13	7	18	21	40
Повышение уровня воды	32	11	32	4	19
Гром и молния	–	3	1	2	2
Оползни	23	8	13	6	7

В 2020 г. в результате стихийных бедствий погибло 8 человек, 4из которых – в результате схода селевого потока. Сумма ущерба по стихийным бедствиям и катастрофам за 2020 г. составила 58 911 400 сомони, из которых 20 289 300 сомони – от последствий схода селей. В 2021 г. в результате стихийных бедствий погибло 42 человека. Сумма ущерба по стихийным бедствиям за 2021 г. составила около 142 млн сомони, из которых 104 млн сомони – от последствий схода селевых потоков (около 73%) [*Сафаров, Фазылов, Гулаезов, 2021*].

Для оценки риска стихийных бедствий и решения задач по предотвращению и управлению стихийными бедствиями необходимо использовать современные геоинформационные технологии. В частности, фотограмметрию и дистанционное зондирование, наиболее эффективные при управлении рисками стихийных бедствий, а также, в частности, при мониторинге и картографировании.

В настоящее время для картографирования и мониторинга районов, пострадавших от стихийных бедствий, все чаще используются небольшие системы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Мониторинг осуществляется путем захвата отдельных аэрофотоснимков или видеопотоков и передачи изображения в режиме реального времени непосредственно на землю. Опыт зарубежных стран показывает, что использование БПЛА для экстренного расследования локации чрезвыйчайных ситуаций значительно сокращает время, расходы и риски, связанные с работой на месте, и обеспечивает ценную, высокоточную информацию с высоким разрешением, которая приводит к эффективному решению возникших проблем.

Засуха – это комплекс метеорологических факторов в виде продолжительного отсутствия осадков в сочетании с высокой температурой и понижением влажности воздуха, приводящих к нарушению водного баланса растений и вызывающий их угнетение или гибель.

Засуха в Таджикистане явление редкое. За последние годы на территории страны это явление наблюдались в 2000–2001 гг. Засуха была очень высокой, в общей сложности по республике пострадало 3 млн человек.

Список литературы

Сафаров М.С., Фазылов А.Р., Гулаезов М.Ш. Оперативный мониторинг и картирование в общей системе управления рисками стихийных бедствий. С. 111–112.

Анализ механизмов пульсаций ледника Медвежьего на Памире

Ф.Х. Каримов

Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан, farshed_karimov@rambler.ru

Аннотация. В настоящей статье представлено физическое моделирование пульсаций ледника Медвежьего. Получены общие условия для нарушения устойчивости ледника, рассмотрены частные случаи различных форм его тела, представлены оценки для влияния давления, температуры на состояние вещества ледника. На основании оценок влияния давления представлена трехслойная модель активной части ледника: верхний жесткий слой, промежуточный – вязко пластический, нижний – вязко пластичный, на границе с ложем. Применено уравнение Навье-Стокса для описания регулярного движения ледника. Модель пульсаций ледника основана на наблюдаемом факте накопления ледником критической массы, при превышении которой нарушается устойчивость. Рассмотрены механизмы пульсаций: механизм роста объемного фактора, основную роль которого выполняют масса активной части и гравитация, и его превалирование над поверхностным, в виде сопротивления трения и сцепления, механизм вязко пластического течения, механизмы гидроразрыва резервуара и обрушения структурных связей в основании активной части ледника. Показана принципиальная возможность возникновения ледовых землетрясений и резонансного влияния сейсмичности на возникновение пульсаций.

Ключевые слова: *ледник Медвежий, устойчивость ледника, моделирование пульсаций, механизмы пульсаций, вязко пластичность, вязкость льда, ложе, граничные условия, коэффициент трения, сцепление, таяние льда, гидравлические эффекты*

Ссылка для цитирования: Каримов Ф.Х. Анализ механизмов пульсаций ледника Медвежьего на Памире. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 238–251.

Analysis of the surging of the Medvezhiy Glacier on Pamirs

F.H. Karimov

Institute of geology, earthquake engineering and seismology, National academy of sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, farshed_karimov@rambler.ru

Abstract. This article presents physical modeling of the surging of the Medvezhiy glacier on Pamirs in Tajikistan. General conditions for breaking the stability of a glacier are obtained, special cases of various forms of its body are considered, and estimates are presented for the influence of pressure and temperature on the state of the glacier's substance. Based on estimates of the influence of pressure, a three-layer model of the active part of the glacier is presented: the upper rigid layer, the intermediate visco-plastic one, the visco-plastic in bottom, at the border with the bed. The Navier-Stokes equation is used to describe the regular movement of the glacier. The glacier surge model is based on the observed fact that the glacier accumulates a critical mass, above which stability is disrupted. The mechanisms of surges are considered: the mechanism of growth of the volume factor, the main role of which is played by the mass of the active part and gravity, and its prevalence over the surface one, in the form of friction and adhesion resistance, the mechanism of visco-plastic flow, the mechanisms of hydraulic fracturing of the reservoir and the collapse of structural connections at the base of the active part of the glacier. The fundamental possibility of the occurrence of ice earthquakes and the resonant influence of seismicity on the occurrence of pulsations is shown.

Key words: *Medvezhiy Glacier, glacier stability, surge modelling, surge mechanisms, visco plasticity, ice viscosity, bed rocks, boundary conditions, friction coefficient, cohesion, ice thawing, hydraulic effects*

Cite this article: Karimov F.H. Analysis of the surging of the Medvezhiy Glacier on Pamirs. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 238–251.

Введение

Ледник Медвежий, расположенный в долине р. Ванч в северо-западной части Памира, на высотах от 3000 м до 5000 м н.у.м., привлекает пристальное внимание исследователей с середины XX в., прежде всего, как активно пульсирующий. Его пульсации, и особенно крупные из них со смещениями на расстояния 1,5 км и более со скоростями до 100 м/сут по порядку величины, приносят масштабные стихийные бедствия для населения и территорий Ванчской долины и р. Пяндж: перегораживается русло р. Абдукагор и образуется запрудное озеро с объемом до 20 млн м^3, и последующий прорыв образовавшейся дамбы приводит к паводкам и селям (рис. 1). Пульсации происходят в среднем с повторяемостью 10–14 лет [*Котляков и др., 2021, Осипова, 2015*]. Последняя крупная пульсация произошла в 2011 г. и поэтому можно ожидать очередной его пульсации в период 2021–2025 гг. Действительно, активизация ледника в настоящее время подтверждается данными космической съемки, сделанной в 2020 г. – фронтальная часть продвигается со скоростью около 1 м/сут и уже произошло частичное перегораживание русла р. Абдукагор, вода которой пробивается через придонную часть запруды [*Котляков и др., 2021*].

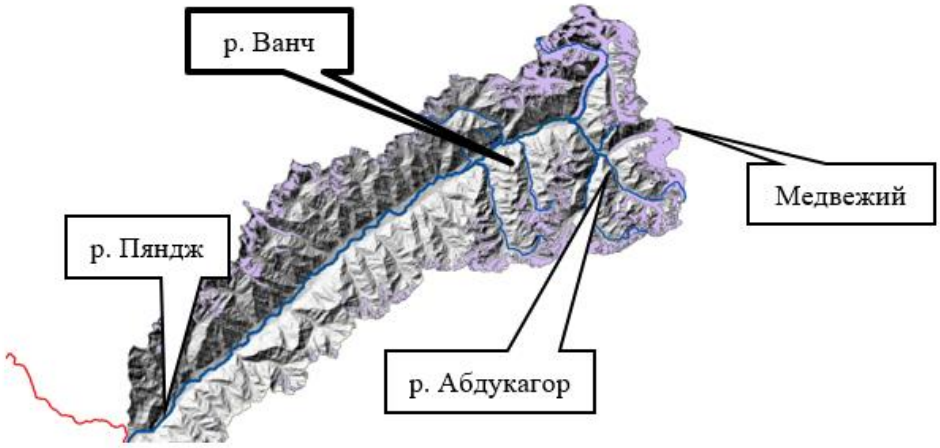


Рис. 1. Долины р. Ванч, р. Абдукагор и ледник Медвежий (топооснова Google)

Полевые наблюдения 2021 г. также показали, что р. Абдукагор перегорожена и вода реки просачивается через основание образовавшейся запруды (рис. 2, 3) [*Каримов, 2022*].

В прогнозировании селей, которые могут быть вызваны прорывом подпруженных пульсирующим ледником водоемов, наряду с учетом уровня воды в них важное место отводится мониторингу состояния ледников на стадии подготовки, до наступления активной фазы пульсации [*Перов, 2012*]. Поэтому для снижения риска пульсаций и проведения соответствующих мероприятий по защите населения и территории необходимо знать морфологию ледника и механизм подвижек. В ряде работ представлены качественные заключения о причинах этих пульсаций. В работе [*Рототаев, 1966*] в качестве главной причины выделяется фактор накопления льда перед

различного рода препятствиями на пути движения ледника: «крутыми перегибами ложа, скальными порогами, сужениями канала стока, поворотами». С увеличением ледовой мощности увеличивается давление на придонную часть ледника. Выдвигается предположение, что рост этого давления перед препятствием и увеличивающееся поглощение геотермического тепла приводят к повышению температуры и плавлению льда. Образуется водная смазка и при критической нагрузке скорость течения ледовой массы резко возрастает – происходит пульсация. При этом роли увеличения атмосферных осадков и землетрясениям в наступлениях ледников отводится вторстепенная, триггерная роль.

Рис. 2. Язык ледника Медвежьего в августе 2021 г.

Рис. 3. Подпруживание р. Абдукагор по состоянию на август 2021 г.

В работе [*Долгушин и др., 1978*] на основании полевых наблюдений в районе ледника Медвежий обнаружена важная роль в возникновении его пульсаций накопления критической ледовой массы, примерно равной 175 млн т. Это значение согласуется с объемом 200 млн м^3, определенного в работе [*Яблоков, 2012*]. Действительно, это можно обнаружить, если принять для плотности ледовой массы характерное значение 875 кг/м^3 [*Cuffey et al., 2010*]. Отмечена также важная роль скорости роста высоты и увеличения уклона поверхности ледника, изменения скорости движения льда по продольному профилю, скорости активизации фронтальной части, скорости накопления критической массы. Сравнительно частая повторяемость и высокая интенсивность пульсаций ледника Медвежьего объясняется особенностями его морфологического строения: обширная пологая фирновая область переходит в очень крутой ледопад высотой около 700 м, и далее спускается вниз полого расположенный семикилометровый язык [*Осипова, 2015*]

(рис. 4). В результате у подножия ледопада в тылу языка скапливается главная, огромная масса льда, которая подпружена сужением в ущелье и порогом языка. В этой работе предполагается, что на возникновение пульсаций наиболее сильное влияние оказывает мощное линзообразное тело ледника. При достижении линзой критических размеров «происходит ее резкая подвижка, возникает волна вздутия и затем сильно выдвигается язык». Кроме того, под линзой может происходить скопление воды вследствие выпадения дождей и потепления воздуха.

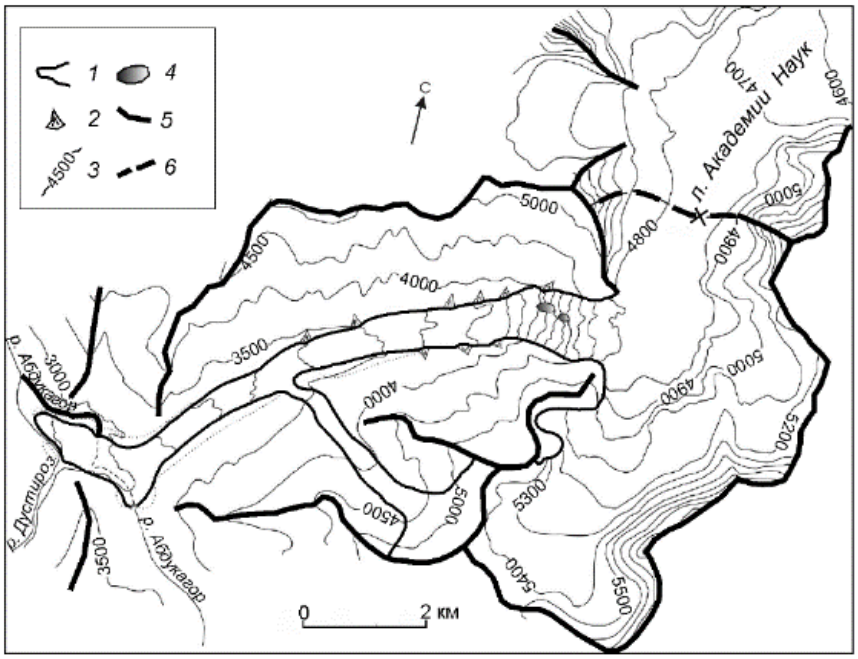


Рис. 4. Топографический план ледника Медвежьего: 1 – границы ледника, 2 – лавинные конусы, 3 – горизонтали, 4 – нунатаки, 5 – хребты, 6 – ледораздел

В работе [*Каримов, 2019*] даны количественные оценки для критических условий пульсации ледника Медвежьего на основе представлений о законе «куб-квадрат», позволяющем объяснить почему при малых объемах ледника пульсаций не происходит, а при достижении им критических размеров – происходит. Суть закона состоит в том, что при малых размерах тел, расположенных на наклонной поверхности, гравитационная сила, которая пропорциональна объему тела и обусловливает скольжение вниз по этой поверхности, мала по сравнению с силами сцепления и трения, действующими на тело. Для равноразмерных тел объем пропорционален кубу среднего радиуса, а площадь поверхности сепления – его квадрату. Соответственно, при малых радиусах превалирует роль площади, а при больших – объема, и поэтому при достижении критических размеров состояние покоя тела нарушается.

В настоящей статье представлено физическое моделирование условий пульсации ледника Медвежьего. Рассмотрены общие условия для нарушения устойчивости ледника, рассмотрены частные случаи различных форм его тела и геометрических размеров, представлены оценки для влияния давления, температуры на сцепление и коэффициент трения ложа, коэффициента динамической вязкости ледникового льды, внутреннего давления резервуара с водой или водного глинистого раствора в основании на границе с вмещающими породами ложа на возникновение пульсаций. Проведены расчеты и оценки для регулярного движения ледника на основе применения уравнения Навье-Стокса для вязко пластического течения. Анализируются механизмы возникновения пульсаций ледника, в основе каждого из которых лежит фактор накопления его критической массы. Обсуждается роль землетрясений в нарушении устойчивости ледника и возникновении пульсаций.

Физическая модель ледника Медвежьего и методы расчетов

Так же, как в работе [*Каримов, 2022*], модель пульсирующей части ледника Медвежьего будем рассматривать в рамках представлений о теле, расположенном на наклонной плоскости с углом откоса α. Угол склона ложа в месте аккумуляции льда, как можно определить на основании отношения перепада высот местности по данным рис. 4, отказывается равным около 6° при среднем уклоне ступенеобразного ложа 6° [Котляков и др., 2018].

Для выбора модели и расчетов пульсаций будем исходить, согласно работе [*Долгушин и др., 1978*], из следующих фактов. В регулярном состоянии ледник движется со скоростью около 1 м/сут. Ледовая масса движется вниз по склону в области аккумуляции и после основного ледопада утолщает язык. Постепенно фронт этого утолщения смещается вниз вдоль языка и в результате сжатия со стороны узкого ущелья, из-за малого уклона поверхности скольжения и подпруживания краевой мореной он оказывается сжатым в направлении движения. Перед пульсацией нижняя часть языка приподнимается примерно на 100 м, а верхняя на столько же опускается, происходит вспучивание тела языка и далее – подвижка в виде быстрого скольжение глыб.

Для определения особенностей движения ледника сделаем некоторые заключения относительно формы и геометрических размеров наиболее активной его части, принимающей главное участие в пульсациях. В критическом состоянии, когда наступает нарушение устойчивого равновесия и начинается пульсация, масса этой части языка может составлять 175 млн т [*Долгушин и др., 1978*], объем – 200 млн м^3 [*Яблоков, 2012*], максимальная толщина ледника – 400 м, ее прирост – 175 м, во фронтальной части ледника его ширина равна 700 м [*Рототаев, 1966*]. Выше по склону ширина ущелья примерно в 1,5 раза уже, средняя ширина активной части языка равна 500 м – представим в качестве 1-го приближения, что она имеет форму полу эллипсоида с высотой h, шириной w, длиной вдоль склона l (рис. 5).

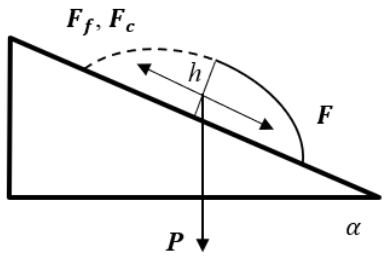


Рис. 5. Схема расположения пульсирующего тела ледника на склоне в ложе

Тогда, согласно данным о геометрических характеристиках правильной формы [*Котляков и др., 2018*], половинный объем тела, имеющего форму полу эллипсоида, можно представить в виде:

$$V = \frac{1}{3}\pi hwl, \tag{1}$$

откуда находим, что l = 1000 м. Таким образом, действительно, активная часть языка должна иметь имеет вытянутую вдоль склона форму.

Площадь основания этого тела имеет выражение –

$$S = \frac{1}{4}\pi wl. \tag{2}$$

Для определения состояний, в которых находятся слои ледника примем во внимание критические значения давлений переходя из упругого состояния в вязкопластическое и далее – к нарушению сплошности тела ледника. Согласно работам

[*Федынский, 1978, Hooke, 2005, Cuffey et al., 2010*] предел упругости при сжатии составляет около 1 МПа. Предел твердости льда при квазистатических деформациях оценивается в 4,5–5,0 МПа [*Cuffey et al., 2010, McCarthy et al, 2017*], для ледникового льда предел пластичности – 2,5–3,0 МПа [*Пфаффенгольц, 1993*]. Из сравнения ледниковой массы с мерзлыми грунтами следует, что при мгновенном или предельно длительном сжатии последних при температурах от 1 до 10^0C – сопротивление составляет около 1 МПа, а на разрыв – в 2–6 раз меньше [*Цытович, 1973*]. Из формулы для литостатического давления p слоя с плотностью ρ и толщиной h

$$p = \rho g h, \tag{3}$$

следует, что переход от упругого состояния в вязкопластическое должен происходить при толщине верхнего слоя ледника, равной 120 м, а из вязкопластического – к состоянию с нарушенной сплошности при толщине тела 300–360 м.

По данным глубинного зондирования максимальная толщина языка ледника Медвежьего перед подвижкой 1973 г. составила 400 м, а прирост – 175 м [*Рототаев, 1966, Долгушин и др., 1978*]. Если учесть, что предел упругости ледникового льда составляет 2,5–3,0 МПа [*Пфаффенгольц, 1993*], то расчет на основании (3) показывает, что критические давления для разрушения льда в нижних частях ледника должны соответствовать толщине 300–360 м. Таким образом, можно также ожидать, что наряду с пластическими деформациями могут иметь место процессы разрушения льда в самых нижних частях ледника на границе с ложем.

Таким образом, при толщинах от 120 до 300 м активную часть языка ледника можно рассматривать как двухслойный – верхний слой толщиной 120 м в виде твердой пластины, а нижний – вязкопластической. При накоплении массы ледник здесь утолщается и при толщинах более 300 м в нижнем слое на контакте с ложем резко падает прочность пород –происходит нарушение сплошности тела ледника. Состояние регулярного движения ледника со скоростью 1 м/сут [*Котляков и др., 2021, Долгушин и др., 1982*] качественно подтверждает, что нижний слой находится в вязкопластическом состоянии и толщина его действительно может находиться в пределах от 120 до 300 м.

Согласно современным представлениям в нарушении устойчивости части тела ледника, принимающего участие в пульсациях, большую роль играют сцепление и коэффициент трения тела на границе с подстилающими породами ложа. Как уже отмечалось в работах [*Долгушин и др., 1978, Осипова, 2015*], на снижение сцепления и коэффициента трения сильно влияют повышенные температуры в этой зоне, создающие таяние льда и смазку для скольжения. В качестве источников повышенных температур здесь называются повышенные давления и геотермическое тепло. Действительно в таких термодинамических процессах как, например, адиабатических, при которых в результате быстрого сжатия вещества при экранировании теплопередачи, происходит его нагревание [*Hooke, 2005*]. Но в случае ледников резкое возрастание давления может происходить не непосредственно от роста приращения массы, а в результате перехода льда от упругого к пластическому состоянию, для которого характерно действие внутреннего трения с соответствующим выделением тепла. При пластических деформациях, также как и при трещинообразовании во льду, происходит активация атомно-молекулярных колебаний и нагревание.

Роль геотермического, в частности, радиогенного тепла в повышенных температурах в районе ледника Медвежьего также высока, что обусловлено активными тектоническими процессами, сочетаниями гетерогенных, сильно дислоцированных герцинскиих, альпийских и новейших структур, что выражено в значительных перепадах поверхности Мохо – от 40–50 км в Таджикской Депрессии до 70–75 км на Памире [*Баратов и др., 1981*]. Тепловой поток на Памире, также как в Альпийских зонах складчатости, относительно высокий, до 150 мВт/м^2, и, например, он почти в 2 раза выше, чем в Таджикской депрессии [*Фузайлов и др., 1982*]. Породы ледника в средней, нижней и языковой частях находятся в зоне от 2850 до 4000 м н.у.м., т.е. ниже высот распространения вечномерзлых пород (рис. 4), и, следовательно в бóльшей степени

подвержены агрегатным переходам. Рост ледовой массы способствует росту литостатического давления и бóльшей экранизации теплового потока земной коры от выхода через ледник. Поэтому повышенный тепловой поток на Памире и приращения ледовой массы действительно могут играть важную роль в таянии льда в нижних частях ледника.

Большая роль температурного режима для условий скольжения ледника подтверждается лабораторными экспериментами [*Hooke, 2005, Cuffey et al., 2010, Zoet et al., 2013*]. Было найдено, в частности, что рост температуры льда от -20^{0}C до 0^{0}C при действующем нормальном давлении 100 кРа и скорости деформации 10 мк/с приводит к снижению коэффициентра трения между льдом и подстилающими породами ложа от 0,5 до 0,15. Снижение коэффициента трения от 0,35 до 0,2 при росте температуры от -6^{0}C до -3^{0}C также обнаружено и при давлениях 2 МПа [*Zoet et al., 2013*].

В существующих публикациях, посвященных исследованиям процессов деформаций льда, наблюдается большой разброс данных относительно пределов упругости, пластичности, прочности, коэффициентов трения, сцепления. Непосредственные измерения коэффициентов трения и сцепления в основании ледников весьма затруднительны из-за труднодоступности этой зоны для непосредственного изучения *in situ*, например, посредством бурения скважин или проходкой туннелей. В некоторых работах, например [*Jones, 1979, Fowler et al., 1987, Kamb, 1987, Cuffey et al., 2010*], подчеркивается, что эта зона остается самой малоизученной в гляциологии, остаются мало изученными такие процессы как плавные скольжения, подвижки, замедления или остановки в движении льда. Осложнения с этими определениями происходят от многозначности генезиса и строения ледовых масс, их зависимости от температур, неоднородностей структуры и текстуры, скорости нагружения, изменениями структуры в процессе деформирования, таяния или режеляции, анизотропии деформационных и реологических свойств. Поэтому многие исследования свойств льда в этой зоне ведутся косвенными, лабораторными, методами, и необходимо учитывать существующие неопределенности в расчетах и моделировании динамики ледников.

Исходя из изложенного, можно следующим образом в целом охарактеризовать модели и механизмы динамики ледника Медвежьего. Накопление ледовой массы играет ключевую роль в возникновении пульсаций, однако конкретные механизмы могут быть при этом разные. В одном случае пульсация вызвана ростом вклада объемного фактора, обусловленного гравитацией, который становится бóльшим, чем вклад фактора поверхностного, обусловленного трением и сцеплением на границе тела и ложа. В другом механизме – рост массы до критических значений приводит к разрушению в нижней части ледника и тем самым к потере ею несущей способности. В третьем – в результате роста ледовой массы происходит таяние льда на границе с ложем, и при этом возникает смазка к скольжению тела как целого, либо, если талая вода зажата в некотором объеме внутри этой границы телом ледника, то действует гидростатическое давление, отрывающие тело ледника от ложа, что приводит к нарушению его устойчивости и пульсации. Эти механизмы могут действовать и одновременно в сочетаниях друг с другом.

Механизм нарушения предельного равновесия

Рассмотрим механизм нарушения равновесия активной части ледника, обусловленный ростом объемного фактора до критического состояния, когда он начинает превалировать над поверхностным. Объемный фактор обусловлен массой и силами гравитации, а поверхностный – силами сухого трения, сцеплением и вязкостью на границе ледника и ложа. Проекция силы гравитации P на направление вниз по склону F способствует спуску тела в этом направлении, а силы трения F_f и сцепления F_c – удерживанию тела от скольжения (рис. 5). Согласно закону механики [*Хайкин, 1971, Кравченко, 2016*] в состоянии равновесия векторная сумма действующих на тело сил равна нулю:

$$\boldsymbol{F} + \boldsymbol{F_f} + \boldsymbol{F_c} = 0. \quad (4)$$

Для общего случая ледника, имеющего сложную форму тела, условие предельного равновесия (4) представим в виде:

$$\rho V g \sin\alpha = k\rho V g \cos\alpha + cS, \quad (5)$$

где V – объем тела, S – поверхность сцепления тела с ложем, ρ – плотность льда тела, k и c – коэффициент трения и сцепление, соотвественно, между телом и ложем.

В приближении однородности тела по его высоте h его объем можно записать в виде интеграла по слоям высоты:

$$V = \int_0^h S(h)dh,$$

где $S(h)$ – площадь поверхности слоя толщиной dh, расположенного на высоте h от основания.

Выражение (5) приводится к квадратному уравнению относительно синуса угла откоса, решая которое, получим

$$\sin\alpha = \frac{A \pm k\sqrt{1+k^2-A^2}}{1+k^2}, \quad (6)$$

где введено обозначение

$$A = \frac{cS}{\rho g V}. \quad (7)$$

С учетом (1) и (2) выражение (7) представим после сокращений в виде:

$$A = \frac{c}{\rho g h}. \quad (8)$$

В выражении (6) в результате решения соотношении (5) относительно синуса имеет место неоднозначность, вызванная двумя знаками перед квадратным корнем. Поскольку равенство (6) должно выполняться при всех значениях коэффициентов k и с, так, чтобы выполнялось условие $0 \le \sin\alpha \le 1$, в том числе при предельно малых и равных нулю с, то можно заключить, что верен только положительный знак.

Фазовое состояние для нарушения устойчивости тела ледника как целого на наклонной плоскости с уклоном 6^0, синус которого равен 0,1, как вытекает из (6), (8), определяется условием

$$\frac{A+k\sqrt{1+k^2-A^2}}{1+k^2} \ge 0{,}1,$$

откуда следует, что между критическими значениями k и с должно выполняться равенство:

$$k \approx 0{,}1 - \frac{c}{\rho g h}, \quad (9)$$

и наибольшее значение k, при котором принципиально возможно нарушение утойчивости тела как целого, равно 0,1. Представим условие фазового равновесия с помощью графика зависмости k от с (рис. 6). Затемненная область показывает область значений k в зависимости от с, в которой возможно нарушение рассматриваемой устойчивости.

Физический смысл фазовой зависимости очевиден – чем больше коэффициент трения, тем при меньших сцеплениях может быть нарушение устойчивости, и –

наоборот. Наибольшее значение сцепления, c_m, в состоянии устойчивости имеет место при нулевом трении, и оно согласно (9) должно быть равно 0,27–0,32 МПа соответственно для толщин ледника 300 и 360 м.

Оценим возможные значения сцеплений для некоторых характерных значений коэффициентов трения скольжения – 0,02 и 0,05 [*Каримов, 2019; Мячкин и др., 1975; Хайкин, 1971*]. В регулярном состоянии движения ледника, которое согласно выбранной в настоящей работе модели должно происходить при толщинах менее 300–360 м, согласно (6) и (8) для случая k = 0,02 для нарушения устойчивости сцепление в первом случае должно быть менее 0,22–0,26 МПа, во втором – менее 0.39–0,46 МПа. Такие значения для сцепления характерны для ледникового льда [*Zoet et al., 2013*].

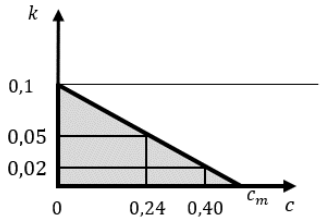


Рис. 6. Фазовая зависимость k от c

Рассмотренный механизм нарушения предельного равновесия активной части языка ледника аналогичен процессу скольжения капли воды на гладкой наклонной плоскости.

Механизм вязкопластического течения

Рассмотрим регулярное движение ледника, обусловленное вязкопластическим течением, а затем – переход к фазе пульсации. Как отмечено в настоящей статье, при толщинах ледника H до 300–360 м его можно рассматривать в рамках двухслойной модели – нижний вязкопластический слой толщиной h и верхняя недеформированная плита толщиной $H - h$ = 120 м и в некоторых случаях, когда существенную роль играют эффекты на границе ледника с ложем, целесообразно добавить такую граничную прослойку (рис. 7). Если учесть, что температура с глубиной слоя возрастает, и что «подавляющая часть талых вод стеной стекает внутри ледника и под ним» (цит. по [*Осипова, 2015*]), то в модели необходимо ввести граничный слой между языком ледника и ложем. Обозначим толщину этого граничного слоя символом h_0 (рис. 7). Для таких ледников с «теплым» дном в основании, как показано в работе [*Каримов, 2019*], решение уравнения Навье-Стокса для вязкопластического течения слоя, расположенного на высоте z от наклонной плоскости, в установившемся режиме приводит к следующему выражению:

$$v = \frac{\rho g \cdot \sin\alpha}{\mu} \cdot \left\{ \left(Hh - \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\mu}{2\mu_0} \cdot h_0^2 \right\},$$

где μ и μ_0 – коэффициенты динамической вязкости для ледникового льда и граничного слоя, соответственно [*Cuffey et al., 2010, Пфаффенгольц, 1993*].

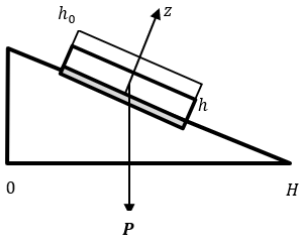


Рис. 7. Двухслойная модель ледника

Как показывает выражение (11), скорость в вязкопластическом слое возрастает по мере роста высоты его расположения по параболическому закону. Оценим по порядку величин, какие значения параметров μ, μ_0 и h_0 могут приводить к наблюдаемой скорости верхнего поверхностного слоя, равной 1 м/с. Подставим в (11) значения 1 м/с для скорости, $\rho \approx 900$ кг/м^3 [*Осипова, 2015*], $\alpha = 6^0$, $H = 300$ м, $h = 200$ м. Тогда из (11) следует, что μ может быть значимым, если он равен 10^{13} Па·с по порядку величины. Чтобы μ_0 был значимым, необходимо, чтобы он был равным 10^9 Па·с для толщины граничного слоя 1 м и 10^{11} Па·с для толщины граничного слоя 10 м. Для вязкопластического состояния льда $\mu = 10^{13}$ Па·с – характерное значение [*Войтковский, 1960, Пфаффенгольц, 1993, Цытович, 1973, Cuffey et al., 2010, Fowler et. al, 1987*]. В работе [*Cuffey et al., 2010*] отмечается, что динамическая вязкость льда может понижаться почти в 7 раз при его потеплении от -10^{0}C до 0^{0}C, т.е. на порядок величины, но не на 4 порядка, как должно было быть согласно оценке. Поэтому можно полагать, что граничный слой находится в промежуточном состоянии между вязкопластическим и талом – в виде желе, создающего смазку для скольжения ледника, например, водного глиняного раствора, на который указывается в работе [*Hooke, 2005*].

Механизм гидростатического разрыва резервуара на границе ледника с ложем

На важную роль воды и обводнения на границе с ледниковым ложем в динамике ледников и ледника Медвежьего, в частности, указывается в ряде работ [*Осипова, 2015, Cuffey et al., 2010*]. При этом глиняному водному раствору [*McCarthy et al., 2017*], либо водной прослойке [*Jones, 1979*], как смазке на границе ледника с ложем, отводится определенная роль в возникновении пульсации, анализируется гидравлический эффект воды [*Fowler et al., 1987*] и вклад порового давления [*Kamb, 1987*]. Гидравлический эффект возникает из-за вытеснения объема воды в замкнутом пространстве объема воды между телом ледника и ложем и, следовательно, за счет сил взвешивания, а избыточное поровое давление действует за счет сжатия этого объема воды. По-видимому, разрыв этого объема воды может приводить к разрушению и откалыванию большой части ледника с последующим возникновением лавины из ледниковых осколков – промежуточного состояния между регулярно движущимися ледниками и пульсирующими [*Cuffey et al., 2010*]. Однако, как отмечается в этой работе, остается неопределенным «сколько воды на ложе имеется в каждый данный момент, где она скапливается и как вытекает». А от этого в большой степени зависит насколько важны силы порового давления и взвешивания, которые могут действовать на активную часть ледника.

Оценим эффект гидроразрыва замкнутого объема воды на границе ледника с ложем, на который действует давление p от веса выше расположенной ледниковой массы или гидростатического давления от каналов вертикального дренажа талых вод, аналогичного давлению в опыте с бочкой Паскаля [*Кравченко, 2016*]. Обозначим символом d ширину замкнутого резервуара, показанного темным цветом на рис 8, Δh_0 – толщина резервуара, Δd – ширина контура длиной L, по которому происходит контакт между ложем и ледником и где действуют напряжения растяжения – распора (рис. 8). С ростом нагрузки от ледника растет напряжение растяжения, распора, действующего на разрыв резервуара по контуру контакта.

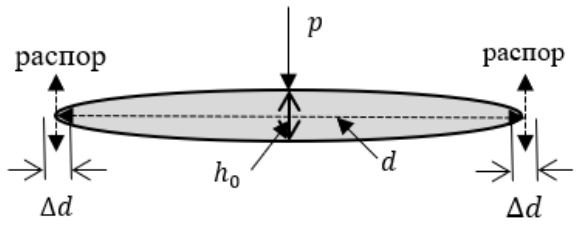


Рис. 8. Замкнутый резервуар воды на границе ледника с ложем

Примем во внимание, что контур в рассматриваемом случае имеет форму эллипса с длинной полуосью, равной $l/2$, и короткой – $d/2$ и учтем, что толщина резервуара много меньше его полуосей $h_0 \ll d/2 < l/2$. В состоянии покоя напряжение распора σ уравновешивает поровое давление p:

$$(1/8)p\pi dl = \sigma L \Delta d. \quad (12)$$

Периметр эллипса L есть $L = 4lE(e)$, где $E(e, \pi/2)$ – полный эллиптический интеграл 2-го рода, e – эксцентриситет [*Котляков и др., 2018*].

Для приближенного вычисления периметра существуют несколько формул, воспользуемся следующей – для оценки пределов значений:

$$4\sqrt{(d/2)^2 + (l/2)^2} \le L \le \pi\sqrt{2((d/2)^2 + (l/2)^2)},$$

где $l/2$ – длинная полуось эллипса, в обозначениях настоящей статьи, $d/2$ – короткая [*Jameson, 2014*].

Из выражения (12) следует условие для критического напряжения разрыва резервуара по контуру:

$$\sigma = p\frac{\pi dl}{8L\Delta d}, \quad (13)$$

при превышении значения которого он произойдет.

Как видно из условия (13), напряжение разрыва по модулю может быть очень большим по сравнению со значениями давления p за счет узости ширины контакта Δd. Кроме того, известно, что прочность льда, как и мерзлых пород, на разрыв в несколько раз меньше, чем на сжатие [*Пфаффенгольц, 1993, Цытович, 1973*]. Подстановка значений для величин, входящих в (13), при высоте пульсирующей части ледника 200 м и ширине контура контакта 1 м приводит к оценке для напряжения $\sigma = 0{,}25$ МПа, и для случая ширины контакта 10 м – 0,025 МПа, которые сопоставимы с оценками прочности льда на разрыв по порядку величины, разными в зависимости от температуры, размеров образца, генезиса и других факторов.

Механизм лавинного обрушения основания ледника

В гляциологии придается большое значение зоне ледников в окрестности контакта с ложем поскольку там действуют наибольшие напряжения от нагрузки выше расположенных пород и высока степень обводнения из-за дренажа талых вод с приповерхностных слоев и талых вод собственно этой зоны, где может быть наибольшая температуру – в ледниках с «теплым дном», или действовать большие гидростатические давления в заполненных водой или желеобразной массой полостях. Высокие напряжения переводят лед в перенапряженное состояние с разрушениями сплошности, к глыбовости и высокой пластичности. Тем самым понижается прочность льда в этой зоне. На многие порядки величин понижаются сцепление, коэффициент вязкого трения льда по сравнению с состоянием неразрушенной структуры. Если такая трансформация происходит постепенно, например, при сезонных изменениях температур окружающей среды, то можно ожидать изменений скорости движения ледника, которые действительно широко наблюдаются. Если происходит лавинное нарушение сплошности, как это описывается в модели лавинного нарастания трещин – ЛНТ [*Мячкин и др., 1975*], то можно ожидать резкой потери устойчивости активной части ледника с переходом к пульсации или к ледниковой лавине с глыбовым характером движения.

Если предположить, что произошло резкое опускание массива ледника Медвежьего, объем активной части около 200 млн т [*Яблоков, 2012*] и средняя высота опускания 1 м, то из оценки для потенциальной энергии в соответствии с известными формулами [*Хайкин, 1971, Кравченко, 2016*] следует, что выделившаяся энергия W будет

равна около $2 \cdot 10^9$ Дж. Если перейти к магнитуде землетрясения M_S, определенной по поверхностным волнам [*Захаров и др., 2021*]:

$$\log W = 4{,}8 + 1{,}5\, M_S, \tag{14}$$

то можно найти, что $M_S \approx 3$. Землетрясения с такой магнитудой надежно регистрируются с помощью современной сейсмологической аппаратуры в ближней эпицентральной зоне. Землетрясения с магнитудами до 5, происходящие в результате подвижек в ледниках, действительно регистрируются, и они получили название ледниковых [*Tsai et al., 2008*].

Не только подвижки в ледниках могут вызывать землетрясения, но, по-видимому, возможно, что наоборот, – на перенапряженное состояние зоны контакта ледника с ложем при определенных условиях может оказывать влияние сейсмичность. На Памире, который относится к высокогорным районам мира и где расположены большинство крупных ледников Таджикистана, в том числе Медвежий, очень высокая сейсмическая активность – здесь возможны землетрясения с магнитудой до 7,5 [*Мирзоев, 1982*]. Оценим напряжения, которые возникают в этой зоне контакта при сейсмических колебаниях в предположении, что тело ледника находится на упругом основании этой зоны, которая заполнена водой или водном глиняным желе в замкнутой полости (рис. 8). Уравнение для ускорения массы активной ледника M в вертикальном направлении z, согласно законам механики [*Хайкин, 1971, Кравченко, 2016*], представим в виде:

$$M\ddot{z} = -E\frac{z}{h_0}S, \tag{15}$$

где E – модуль всестороннего сжатия, упругости для жидкого наполнителя резервуара, S – площадь наибольшего сечения в горизонтальной плоскости резервуара, z – отклонение толщины резервуара от равновесного состояния, определяемого по равенству веса этой части ледника силе упругости согласно закону Гука:

$$Mg = -E\frac{\Delta h_0}{h_0}S, \tag{16}$$

где Δh_0 – упругое сжатие, определяющее положение, относительно которого совершаются колебания.

Решение уравнения колебаний (15) с учетом соотношения (16) приводит к следующему выражению для частоты колебаний ν:

$$\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{E}{\rho h_0 H}}. \tag{17}$$

Из (17) видно, что частота колебаний в принятом приближении не зависит от площади горизонтального сечения S. Модуль всестороннего сжатия для жидкостей обычно составляет 10^9, 10^{10} Па по порядку величины, для воды он равен $2{,}21 \cdot 10^9$ Па [*Кикоин и др., 1976*]. Подставив в (17) характерные значения физических величин, для толщины резервуара 1 м получим, что частоты собственных колебаний массы ледника M составляют 10 Гц по порядку величины. Такие частоты колебаний характерны для объемных сейсмических волн [*Жарков, 1983*]. Отсюда можно ожидать, что отклик наполненных резервуаров в основании ледника на сейсмические волны данных частот будет существенным и в случае резонанса колебания могут быть значительными по амплитуде, с последствиями в виде коллапса льда в граничной зоне основания ледника с последующей его пульсацией.

По-видимому, рассмотренный механизм влияния сейсмичности может быть одним из ответов на вопрос о сейсмической природе «ледниковых серджей», поставленный в работе [*Cuffey et al., 2010*].

Выводы

Физическое моделирование динамики ледника Медвежьего, которое выполнено в настоящей работе, подтверждает ведущую роль накопления массы активной части ледника в возникновении пульсации, однако конкретные механизмы пульсации могут быть разными.

Действие механизма роста объемного фактора, основную роль которого выполняют масса активной части и гравитация, и его превалирование над поверхностным, в виде сопротивления трения и сцепления, при достижении критических условий для нарушения равновесия приводит к потере устойчивости и пульсации ледника.

Механизм пластического течения основан на представлении о переходе ледниковой массы достаточно большой толщины в вязкопластическое состояние, при котором в результате трения, выделения тепла и резкого понижения коэффициента вязкости на границе ледника с ложем происходит его пульсация.

Механизм гидроразрыва резервуара, наполненного талой водой или водным глиняным желе в основании ледника, при достижении критических давлений внутри него приводит к резкому нарушению структурных связей на границе ледника с ложем и пульсации ледника.

Механизм обрушения активной части ледника Медвежьего в процессе увеличения ее массы в результате нарушения структурных связей в зоне его контакта с ложем под действием критических гравитационных нагрузок основан на мгновенной потере прочности основания ледника с последующим резким его оседанием, потерей устойчивости и развитием пульсации.

Сейсмичность может играть некоторую роль в возникновениях пульсаций ледника Медвежьего. Например, в рамках модели резервуара, наполненного талой водой или водным глиняным желе в основании ледника, могут быть достигнуты резонансные условия для собственных колебаний активной части ледника, когда частоты землетрясений совпадают с частотами собственных его колебаний. Согласно проведенным оценкам для ледника Медвежьего резонансные частоты могут быть порядка 10 Гц.

Все механизмы, исследованные в настоящей работе, могут действовать и совместно, в сочетаниях друг с другом.

Список литературы

Баратов Р.Б. и др. Земная кора и мантия Таджикистана. Душанбе: «Дониш», 1981, 284 с.

Войтковский К.Ф. Механические свойства льда. М.: Изд-во АН СССР, 1960, 100 с.

Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Баланс пульсирующего ледника Медвежьего как основа прогнозирования его периодических подвижек. МГИ, вып. 32, 1978, с. 161–170.

Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Пульсирующие ледники. Л.: Гидрометеоиздат, 1982, 192 с.

Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: «Наука», 1983, 416 с.

Захаров В.С., Смирнов В.Б. Физика Земли. М.: «ИФРА-М», 2021, 328 с.

Каримов Ф.Х. Пульсирующий ледник Медвежий в Таджикистане: состояние на август 2021 г. Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии, гидрологии и разработки месторождений полезных ископаемых Таджикистана и сопредельных территорий». Душанбе: ТНУ, 2022, с. 288–296.

Каримов Ф.Х. Моделирование динамики ледников с «теплым льдом» в основании. Научный журнал ТНУ «Наука и инновация», Серия естественных наук, № 1, Душанбе: «Сино», 2019, с. 4–9.

Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М.: Наука, 1976, 480 с.

Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: «Наука», 1977, 832 с.

Котляков В.М., Десинов Л.В., Десинов С.Л., Рудаков В.А. Подвижки ледников Памира в 2020 году. Лед и снег, т. 61, № 3, 2021, с. 471–480.

Котляков В.М., Чернова Л.П., Хромова Т.Е., Муравьев А.Я., Качалин А.Б., Тюфлин А.С. Уникальные циклические пульсации ледника Медвежий. Доклады РАН, т. 483, № 5, 2018, с. 547–552.

Кравченко Н.Ю. Физика: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: «Юрайт», 2016, 300 с.

Мирзоев К.М. Основные черты сейсмичности Таджикистана. Прогноз землетрясений, № 1. Душанбе: «Дониш», 1982, с. 14–37.

Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясения. Кн.: Физика очага землетрясения. М.: Наука, 1975, с. 6–29.

Осипова Г.Б. Пятьдесят лет исследований института географии РАН на леднике Медвежий, Западный Памир. Лед и снег, № 1(129), 2015, с. 129–140.

Перов В.Ф. Селеведение. Учебное пособие. (Москва) М.: Географический факультет МГУ, 2012, с. 272.

Рототаев К.П. Ледник Медвежий бунтует. В кн.: Побежденные вершины. Годы 1961–1964. М.: «Мысль», 1966, с. 165–183

Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: «Наука», 1971, 752 с.

Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: «Высшая школа», 1973, 448 с.

Яблоков А.А. Новое о двух хорошо изученных ледниках Памира. Лед и снег, № 1, 2012, с. 132–134.

Геологический словарь. Под ред. Пфаффенгольца К.Н. М.: "Недра", 1993, т. 1, 488 с.

Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Отв. ред. Федынский В.В., М.: «Недра», 1976, 527 с.

Коллектив авторов. Литосфера Памира и Тянь-Шаня. Отв. ред. И.А. Фузайлов, Р.А. Мусин. Ташкент: «Фан», 1982, 248 с.

Cuffey K.M., Paterson W.S.B. The Physics of Glaciers, 4th Ed. Amsterdam, Boston, Heidelberg: Elsevier, 2010, 702 p.

Fowler A.C. A theory of glacier surges. Journal of Geophysical Research, 92, 1987, p. 9111–9120.

Hooke R., Le B. Principles of glacier mechanics, 2nd Ed., Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005, 429 p.

Jameson G.J.O. Inequalities for the perimeter of the ellipse. Mat. Gazette: Journal, v. 98, no 499, 2014, p. 227–234.

Jones A.S. Stability of temperature ice caps and ice sheets resting on beds of the deformable sediment. Journal of Glaciology, 24, 1979, p. 29–43.

Kamb B.M. Glacier surge mechanism based on linked cavity configuration of the basal water conduit system. Journal of Geophysical Research, 92(B9), 1987, p. 9083–9100.

McCarthy C., Savage H., Nettles M. Temperature dependence of ice-on-rock friction at realistic glacier conditions. Phil. Trans. R. Soc. A375: 20150348, 2017, p. 1–18.

Tsai V.S., Rice J.R., Fahnestock M. Possible mechanisms for glacial earthquakes. Journal of Geophysical Research, vol. 113, 2008, F03014, p. 1–17.

Zoet L.K., Carpenter B., Scuderi M., Alley R.B. Anandakrishnan S., Marone C., Jackson M. The effects of entrained debris on the basal sliding stability of a glacier. J. Geophys. Res. Earth Surface, 118, 2013, p. 656–666.

Расчет, картографирование и оценка риска уязвимости селевыми потоками в бассейне реки Баксан (Кабардино-Балкарская Республика)

А.М. Керимов, З.Т. Акшаяков, О.А. Курашева, А.Б. Ашабоков

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, oks.anchik@mail.ru

Аннотация. Оценка индивидуального риска необходима практически для всех горных районов РФ с современным оледенением, которое интенсивно деградирует. Актуальность определяется возрастающей в настоящее время активностью в освоении горных территорий Российской Федерации и необходимостью учета специфики этих территорий в имеющихся методах и средствах прогнозирования чрезвычайных ситуаций и снижения рисков их возникновения. В данной работе приведены результаты расчетов по оценке рисков связанных со сходом селей на федеральной автодороге А-158 протяженностью 88 км, начиная от с.п. Заюково до поляны Азау (Кабардино-Балкарская республика). Рассмотрены 59 селевых бассейнов в долине реки Баксан от с.п. Заюково до поляны Азау. Проведены расчеты и картографирование селевого риска в бассейне реки Баксан. Для данного участка определены: коллективный селевой риск; уязвимость населения в пространстве; уязвимость населения во времени; проведены расчеты индивидуального селевого риска. Картографирование коллективного и индивидуального селевого риска проведено с применением программы «Google Earth Pro». Оценка селевого риска производилась по методике, предложенной в работе [*Шныпарков, 2012*]. Составлены кадастры к этим картам, состоящие из 21 параметра, характеризующие морфологию селевых бассейнов и физические условия возникновения и распространения селевых потоков. Расчеты и анализ коллективного и индивидуального селевого риска выявили достаточно неравномерное распределение этих величин географически и социально-экономически в рассматриваемом регионе. По материалам исследований зарегистрирован кадастр в системе базы данных [*Керимов, 2022*].

Ключевые слова: *сель, селевая опасность, селевой бассейн, деградация оледенения, риск, поражаемость селями во времени, поражаемость селями в пространстве, повторяемость селей, селевой риск*

Ссылка для цитирования: Керимов А.М., Акшаяков З.Т., Курашева О.А., Ашабоков А.Б. Расчет, картографирование и оценка риска уязвимости селевыми потоками в бассейне реки Баксан (Кабардино-Балкарская Республика). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 252–259.

Calculation, mapping and risk assessment of debris flow vulnerability in the Baksan River basin (Kabardino-Balkarian Republic)

A.M. Kerimov, Z.T. Akshayakov, O.A. Kurasheva, A.B. Ashabokov

High-Mauntain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, oks.anchik@mail.ru

Abstract. Assessment of individual risk is necessary practically for all mountainous areas of the Russian Federation with modern glaciation, which is intensively degrading. The relevance is determined by the currently increasing activity in the development of mountainous areas of the Russian Federation and the need to take into account the specifics of these areas in the available methods and means of forecasting emergencies and reducing

the risks of their occurrence. This paper presents the results of calculations to assess the risks associated with debris flow on the federal highway A-158 with a length of 88 km, starting from the village Zayukovo to Azau Glade (Kabardino-Balkarian Republic). 59 debris basins in the Baksan River valley from Zayukovo settlement to Azau glade were considered. Calculations and mapping of debris flow risk in the Baksan river basin were carried out. For this area the following were determined: collective debris flow risk; population vulnerability in space; population vulnerability in time; calculations of individual debris flow risk. Mapping of collective and individual debris flow risk was carried out using the program "Google Earth Pro". Debris flow risk was assessed according to the methodology proposed in [*Shnyparkov, 2012*]. Inventories to these maps consisting of 21 parameters characterizing the morphology of debris basins and physical conditions of occurrence and distribution of debris flows were compiled. Calculations and analysis of collective and individual debris flow risk revealed rather uneven distribution of these values geographically and socio-economically in the region under consideration. Based on the research materials, a cadaster was registered in the database system [*Kerimov, 2022*].

Key words: *debris flow, debris flow hazard, debris flow basin, glacier degradation, risk, debris flow damage in time, debris flow damage in space, debris flow recurrence, debris flow risk*

Cite this article: Kerimov A.M., Akshayakov Z.T., Kurasheva O.A., Ashabokov A.B. Calculation, mapping and risk assessment of debris flow vulnerability in the Baksan River basin (Kabardino-Balkarian Republic). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 252–259.

Введение

Статистика потерь от природных и техногенных бедствий обнаруживает их быстрый рост по всему миру в последние десятилетия. В связи с этим расширяются исследования проблем управления риском. Основное внимание традиционно уделяется геофизической сути опасных природных явлений, методам и технологиям их прогноза, а также защитным мероприятиям. Наряду с этим до сих пор отсутствуют четкие определения понятий селевая активность, селевая опасность и селевой риск и, как следствие, их разграничение. Такое же положение наблюдается при описании других природных опасностей (обвалов, оползней, и т.д.).

В последние десятилетия активно развивается направление исследований проблем оценки, анализа и управления риском. Управление риском – это заблаговременное предвидение риска и принятие мер по его снижению. Для этого разрабатываются методики расчета индивидуального риска от опасных природных процессов. Индивидуальный риск – функция подверженности населения в пространстве и во времени неблагоприятному природному процессу на конкретной территории [*Перов, 2012*]. Такая оценка индивидуального риска необходима практически для всех горных районов РФ с современным оледенением, которое интенсивно деградирует.

Оценка опасности и риска селей. Под опасностью понимается угроза потерь жизни людей и материальных ценностей вследствие схода селя. Для оценки степени опасности используются такие показатели, как повторяемость, объем селевых выносов, густота сети селевых русел. Оценка опасности селей реализуется, главным образом картографированием. В зависимости от решаемых задач картографирование производится в разных масштабах [*Перов, 2012*].

Оценка риска. Риск селей – ожидаемое количество потерь человеческих жизней и экономического ущерба, вызванного сходом селя. Для оценки риска необходимо учитывать два ряда показателей, характеризующих степень селевой опасности и уровень освоенности территории. Проведем оценку риска селей в крупном масштабе. В качестве примера для оценки риска селей в среднем масштабе можно привести работу Ю.Б. Андреева и А.Н. Божинского [*Андреев, 1996*]. Авторы оценивают риск захвата селевым потоком

автомобильного транспорта на участке автомобильной трассы Заюково – Азау – автотрасса А-158 (Кабардино-Балкария) [*Андреев, 1996*]. Для расчета были учтены показатели селевой деятельности: ширина конуса выноса в месте пересечения с дорогой, повторяемость селей в бассейне и количество автомашин в единицу времени.

Материалы и методы исследований

Для расчета и картографирования селевого риска в бассейне реки Баксан (Кабардино-Балкария) воспользуемся современными значениями селеформирующих параметров в рассматриваемом районе, такими как: о потоке транспорта по автодороге, в данном случае среднесуточная интенсивность движения на федеральной автодороге А-158 составляет около 8 тыс. автомобилей на участке дороги, протяженностью 104 км, начиная от бывшего поста ДПС Баксанского района до поляны Азау. По кадастру селевой опасности КБР *[Кадастр, 2001*], селевые бассейны в долине реки Баксан начинаются в верхней части с.п. Заюково. Если предположить, что в течение суток транспортный поток по трассе распределен равномерно, то в течение часа на каждом километре трассы находится 77 единиц автотранспорта. На отрезке дороги от с.п. Заюково до поляны Азау суточный поток составит 6853 единиц автотранспорта. Оценка селевого риска будет производиться по методике, предложенной в работе [*Шныпарков, 2012*].

В указанной работе оценка индивидуального и коллективного селевого риска выполняется на основе формулы Елкина [*Елкин, 2004*].

Коллективный селевой риск определялся по методике, предложенной в работе [*Шныпарков, 2012*], по формуле:

$$R_{mf} = P_{mf} \cdot V_s \cdot V_t \cdot d \cdot K_l \cdot F, \quad (1)$$

где R_{mf} – коллективный селевой риск, жертв/год; P_{mf} – повторяемость селей, 1 раз в n лет; V_s – уязвимость населения в пространстве, доля единиц (д.ед.); V_t – уязвимость населения во времени, безразмерная; d – плотность населения на оцениваемой территории, чел./км^2; K_l – коэффициент летального исхода от селевых явлений, безразмерная (по оценке экспертов, как правило, принимается равной единице); F – заселенная площадь в пределах селеопасной территории, км^2.

Уязвимость населения в пространстве V_s (д.ед.) зависит от пораженности территории селевыми потоками:

$$V_s = S_a/S_t, \quad (2)$$

где S_a – площадь селеопасной территории в пределах изучаемого бассейна, S_t – общая площадь водосборного бассейна.

Уязвимость населения во времени V_t (д.ед.) зависит от возможного периода нахождения человека в опасной зоне в течение суток и в течение года:

$$V_t = (t_d/24\ \text{ч}) \times (t_y/365\ \text{сут}), \quad (3)$$

где t_d – время нахождения человека в селеопасной зоне в течение суток, часы; t – период нахождения человека в селеопасной зоне в течение года, равный продолжительности основного селеопасного периода, в течение которого сходит около 90% всех селевых потоков, сут [*Белая, 2004*].

Расчет индивидуального селевого риска R_{ind} (1/год) выполнялся по формуле:

$$R_{ind} = R_{mf}/D, \quad (4)$$

где D – численность населения на рассматриваемой территории, чел.

Но не все указанные в формуле (2) параметры, как правило, в литературе приводятся. Например, уязвимость населения в пространстве V_s – зависит от пораженности территории селевыми потоками. Для оценки уязвимости территории селевыми потоками необходимо знать площадь селеопасной территории. Но эта величина, как правило, ни в кадастрах селевой опасности, ни в научных статьях не приводятся. Для оценки этого параметра селевого риска, нами составлена электронная картосхема селевых бассейнов исследуемого района, на которых определяется площадь селеопасной зоны.

Электронные картосхемы селевых бассейнов долины реки Баксан получены с использованием программы «Google Earth Pro». По указанной программе составлены кадастры селевых бассейнов, включающие двадцать один параметр морфологических и геофизических параметров селевых потоков и характеристик селевых бассейнов. Кадастры зарегистрированы в системе базы данных [*Керимов, 2022*].

Результаты исследований и их обсуждение

На электронной картосхеме выделена и в кадастр занесена ширина конуса выноса селевого потока в месте пересечения с дорогой, что дает возможность приблизительно оценить количество автотранспорта, которые могут попасть в селевой поток из данного бассейна.

В упомянутом кадастре часто приводимые в кадастрах параметры дополнены: географическими координатами селевых бассейнов; коллективным риском; площадью зоны поражения селем; индивидуальным селевым риском; шириной конуса выноса при пересечении селевым потоком автодороги; коэффициентом селевой опасности; уязвимостью населения во времени; плотностью населенных пунктов, подвергающихся воздействию селевого потока, заселенной площадью в пределах селеопасной территории; коэффициентом летального исхода при попадании человека в селевой поток. В кадастре к картосхеме селевых бассейнов долины реки Баксан дана информация о 59 селевых бассейнах. В таблице 1 приводится фрагмент кадастра к электронной картосхеме, соответствующей селеактивной части долины р. Баксан в районе г. Тырныауза. Номера в столбце № 2 фрагмента таблицы 1 соответствуют номерам бассейнов в кадастре.

Для упрощения расчета коллективного и индивидуального селевого риска в таблице 2 приведены параметры селевых потоков и характеристики селевых бассейнов, приведенных в таблице 1 участка селевых бассейнов в долине реки Баксан. Указанный участок отличается наиболее активным селепроявлением не только в долине реки Баксан, но и для всей территории России.

Как было отмечено выше в кадастре к электронной картосхеме приводятся ширина конуса выноса селевых потоков, пересекающих автотрассу А-158. Из 59 селевых бассейнов, дорогу пересекают селевые потоки из 50 бассейнов. Кроме того при оценке селевого риска территории необходимо учесть не только поражаемость автотрасс, но и других линейных объектов (водопроводов, газопроводов, электрических линий и т.д.) Из данных электронных картосхем следует, что ширина зоны поражения дорог меняется в интервале от 40 м до 5 км на разных участках зоны реки Баксан (например, при прорыве озера Башкара в ущелье Адылсу).

В данной работе не будет рассматриваться селевой риск линейных объектов. Будет рассчитан селевой риск для площадных объектов: населенных пунктов; промышленных объектов; сельскохозяйственных угодий и вероятные человеческие жертвы. В результате использования электронной картосхемы (рис. 1) и параметров для определения селевого риска (таблица 2) были ранжированы значения коллективного и индивидуального селевого риска для селевых бассейнов долины реки Баксан.

Таблица 1. Фрагмент кадастра селевого риска

№	Название водотока	Координаты	Уклон русла, %	S_a водосбора, км^2	S_t зоны поражения, км^2	Длина русла, км	Высота бассейна max min (м)	Ущерб, наносимый объектам народного хозяйства	Источники водного питания	Тип селя	Объем селевых выносов, тыс. м^3 [*Кадастр, 2001*]	Угроза населенным пунктам	Повторяемость 1 раз в *n* лет. Даты схода селей [*Кадастр, 2015*]	Коэф. сел. опасности S_t/ S_a	V_t	*d*, чел./км^2	*F*, км^2	K_i	R_{mf}, чел/год	R_{ind}, 1/год
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
р. Баксан (левые притоки)																				
2-10	Камыксу	42°52'37,0432"в.д. 43°24'0,0509" с.ш.	21,2	25,0	1,90	9,31	3482 1278	Перекрытие р. Баксан, угроза жилым домам по левому и правому борту. Угроза сооружениям и коммуникациям ТВМК (по левому борту).	Д, Л-Д	ВК, ГК	> 500 000	Угроза с. Тырныауз	10-50/ 11.08.1937, 1945, 05.08.1967, 25.06.1972, 29.07.1977, 11.08.1977, 24.07.1984, 05.03.2004, 14.06.2005	0,08	0,5	356,89	3	1,0	4,28	$1,2*10^{-2}$
р. Баксан (правые притоки)																				
2-45	Герхожансу + Каяартысу	42°55'59,937" в.д. 43°22'2,6652" с.ш.	19,5	36,0	3,72	11,7	4120 1256	Угроза автодороге, транспортным коммуникациям, перекрытие р. Баксан	Л, Л-Д	ГК, ВК	6000 000	Угроза г. Тыр-ныауз	1-10/1890, 1934,11.08. 1937, 12.08.1953, 01.08.1960, 14.08.1961, 31.07.1962, 1963,1965, 03.08.1966, 1975,29.07.1977,11.08.1977,19.07.1983, 1995, 20.08.1999, 19.07.2000, 03.08.2011 26.06.2015 14-15.08.2017	0,08	0,5	338,68	3	1,0	26,87	0,024

Таблица 2. Параметры селевого риска

№	Название водотока	V_s	$V_{t.}$	d	F	K_l	P_{mf}	R_{ind}	R_{mf}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
р. Баксан (левые притоки)									
2–10	Камыксу	0,08	0,5	356,89	3	1,0	0,1	$1{,}2*10^{-2}$	4,28
р. Баксан (правые притоки)									
2–45	Герхожансу + Каяартысу	0,23	0,5	338,68	3	1,0	0,23	0,024	26,87

№ – номер селевого бассейна в кадастре; V_s – уязвимость населения в пространстве д.ед; Vt – уязвимость населения во времени; d – плотность населения на оцениваемой территории, чел./км^2; F – заселенная площадь в пределах селеопасной территории, км^2; K_l – коэффициент летального исхода, безразмерная; P_{mf} – повторяемость схода; $R_{ind.}$ – индивидуальный селевой риск, 1/год; R_{mf} – коллективный селевой риск, чел/год.

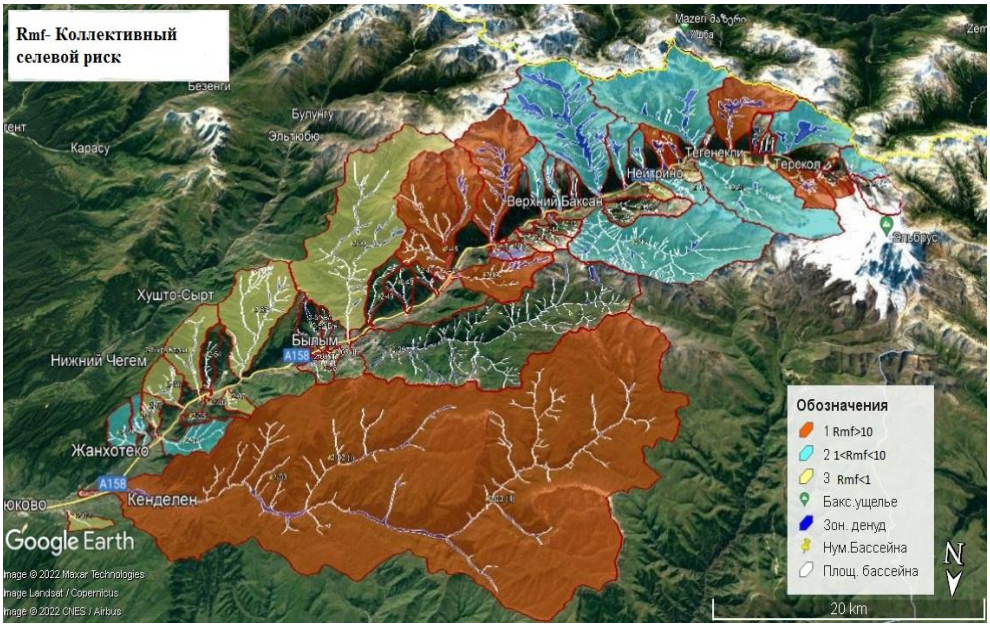


Рис. 1. Картосхема коллективного селевого риска для селевых бассейнов долины реки Баксан

Для коллективного селевого риска ранжирование селевых бассейнов выглядит следующим образом:

- R_{mf}<1 жертв в /год;
- 1 < R_{mf}< 10 жертв в /год;
- R_{mf}> 10 жертв в /год.

Для индивидуального селевого риска ранжирование селевых бассейнов выглядит следующим образом:

- R_{ind} > 10^{-4} 1/год);
- 10^{-6}< R_{ind} <10^{-4} (1/год);
- R_{ind} < 10^{-6} (1/год).

R_{mf} – коллективный селевой риск; R_{ind} – индивидуальный селевой риск.

Индивидуальный селевой риск ранжирован таким образом, что по классификации чрезвычайных ситуаций [*Воробьев, 2005*] первый интервал риска – «неприемлемый», второй – «допустимый» и третий «приемлемый» уровень риска. Из анализа значений индивидуального селевого риска кадастра и параметров селевых потоков следует, что в долине реки Баксан уровень индивидуального селевого риска «неприемлемый», так как уровень индивидуального селевого риска находится в первом интервале значений. Коллективный селевой риск в долине реки Баксан распределился следующим образом:

селевые потоки из 15 селевых бассейнов не представляют опасности для жизни человека; в селевых потоках из 25 селевых бассейнов могут погибнуть от одного до 100 чел./год; селевые потоки из 14 селевых бассейнов не представляют опасность для населенных пунктов; данные о селевых потоках из 5 селевых бассейнов не включены в электронную картосхему рисков, поскольку не хватает параметров для определения риска. [*Керимов, 2022; Керимов, 2023*]. На рис. 2 приведены электронные картосхемы индивидуального селевого риска для селевых бассейнов в долине реки Баксан.

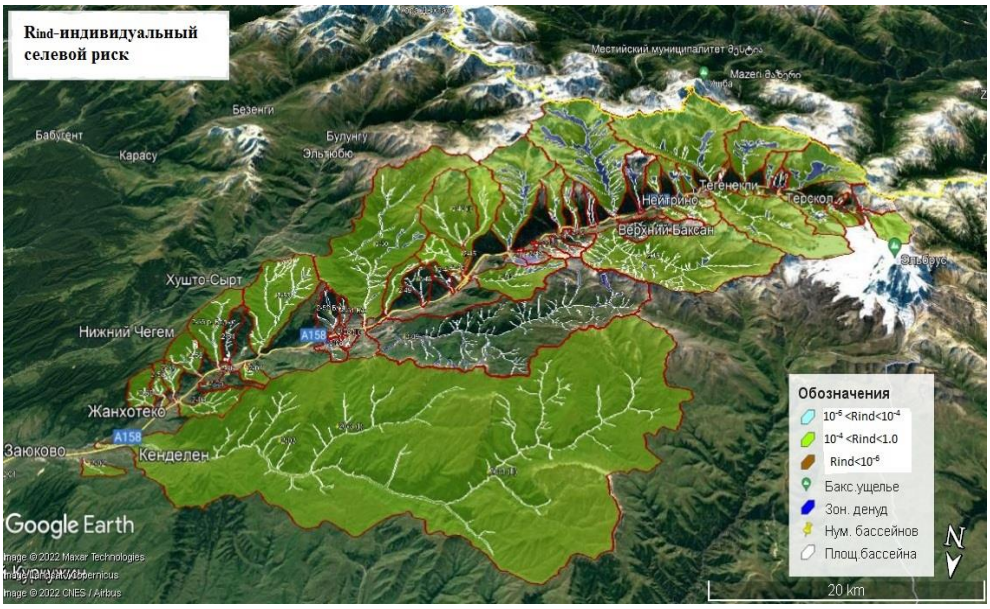


Рис. 2. Картосхема индивидуального селевого риска для селевых бассейнов долины реки Баксан

Уровень риска повторяет степень селевой опасности по данному району, в частности, для Тырныауза и его окрестностей; истоков реки Баксан, а также бассейна реки Гунделен. В дальнейшем электронная картосхема селевых рисков и кадастр к этой карте будут пополняться и уточняться по мере получения новой информации.

Выводы

Разработана электронная картосхема 59 селевых бассейнов долины реки Баксан с применением программы «Google Earth Pro». Составлены кадастры к этим картам, состоящие из 21 параметра, характеризующие морфологию селевых бассейнов и физические условия возникновения и распространения селевых потоков.

С использованием параметров кадастра были рассчитаны значения основных параметров коллективного и индивидуального селевого рисков, возникающих при селепроявлениях.

По анализу полученных результатов проведено ранжирование значений коллективного и индивидуального селевых рисков для всех селевых бассейнов Баксанской долины.

Выявлена степень опасности селевых потоков, образующихся в каждом селевом бассейне долины реки Баксан.

Список литературы

Андреев Ю.Б., Божинский А.Н. Проблемы оценки и картографирования природного риска (на примере лавин и селей) / Вестник Московского университета. 1996. № 3. Серия 5. География. С. 55−60.

Белая Н.Л. Режим селевых явлений земного шара как объект моделирования на базе климатической информации / Материалы гляциологических исследований. 2004. № 96. С. 152−158.

Воробьев В.Л. Безопасность жизнедеятельности (некоторые аспекты государственной политики) / М.: Изд-во МЧС, 2005. 376 с.

Елкин В.А. Региональная оценка карстовой опасности и риска (на примере Республики Татарстан): автореф. дис. … канд. геогр. наук. М., 2004. 27 с.

Кадастр лавинно-селевой опасности Кабардино-Балкарской Республики // Под ред. М.Ч. Залиханова, 2001. СПб.: Гидрометеоиздат. – 64 с.

Кадастр лавинно-селевой опасности Северного Кавказа / под ред. РАН Залиханова М.Ч. Гидрометеоиздат. С-П., 2001. 112 с.

Кадастр селевой опасности Юга Европейской части России / под ред. Кондратьевой Н.В. М.: Нальчик, 2015. 148 с.

Керимов А.М., Акшаяков З.Т., Курашева О.А. Картографирование селевого риска в бассейне реки Баксан (Кабардино-Балкарская республика) / Методы моделирования динамических процессов в различных средах: сборник научных трудов. – Нальчик: Каб.-Бал. Ун-т, 2023. С. 115 –118. ISBN 978-5-7558-0670-1

Керимов А.М., Акшаяков З.Т., Курашева О.А. Оценка и картографирование селевого риска в бассейне реки Баксан (Кабардино-Балкарская республика) / Коллективная монография по материалам XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа (ГЕОКАВКАЗ 2022)». г. Махачкала. Том XII. с. 455–462. ISBN 978-5-98866-074-3

Керимов А.М., Акшаяков З.Т., Курашева О.А. Электронная карта-схема и каталог селевых бассейнов КБР / База данных РФ № 2022621007 от 05.05. 2022.

Перов В.Ф. Селеведение. Учебное пособие / Географический факультет МГУ. Москва, 2012. 271 с.

Шныпарков А.Л., Колтерманн П.К., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Перов В.Ф. Селевой риск на Черноморском побережье Кавказа / М.: Изд-во Георискс. 2012. С. 20–25.

Методические рекомендации по обеспечению противоселевой безопасности объектов экономики (часть 1) / под ред. Анахаева К.Н. Нальчик. ВГИ, 2016. 60 с.

How do climate change and deglaciation affect the runoff formation mechanisms in the high-mountain river basins of the North Caucasus?

E.D. Kornilova[1,2], I.N. Krylenko[1,2], Yu.G. Motovilov[2], E.P. Rets[2], I.A. Korneva[3], T.N. Postnikova[2], O.O. Rybak[2]

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com

[2]Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[3]Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The present study focuses on the influence of climate change and glacier degradation on the processes that determine the formation of runoff in high-altitude areas. The ECOMAG runoff formation model was used as the main research method. Calculated changes in glaciation area (based on the global glaciological model GloGEMflow-debris) and regional climate changes (data from the CORDEX project) for two climate scenarios RCP2.6 and RCP8.5 were used as input data for the ECOMAG model. The mechanism of changing the genetic components of the flow in specific sub-basins will significantly depend on the altitudinal location of the zone of snow and glacier feeding. An increase in snowmelt is expected only in river basins, snow-feeding zone of which is located within Mount Elbrus and high-mountain zones that will affect the direction of changes in annual runoff. As a result of rising temperature and deglaciation, a decrease in the volume of glacial runoff is expected under any climatic scenario. There is also a significant increase in rainfall-runoff predicted by the last third of the 21st century. The model's estimates for the climate forecast period corroborate existing trends in the intra-annual distribution of runoff, highlighting a shift in the start of the high-water period to an earlier date, a decrease in summer runoff volumes, and an increase during the autumn months. These alterations could result in a scarcity of water resources during the summer, a critical period for agriculture and water supply.

Key words: *mountain hydrology, runoff formation modeling in mountainous regions, North Caucasus, Terek River, climate change, glacier degradation, CORDEX, GloGEMflow-debris, ECOMAG*

Cite this article: Kornilova E.D., Krylenko I.N., Motovilov Yu.G., Rets E.P., Korneva I.A., Postnikova T.N., Rybak O.O. How do climate change and deglaciation affect the runoff formation mechanisms in the high-mountain river basin of the North Caucasus? In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 260–261.

Как изменение климата и дегляциация влияют на механизмы формирования стока в высокогорных бассейнах рек Северного Кавказа?

Е.Д. Корнилова[1,2], И.Н. Крыленко[1,2], Ю.Г. Мотовилов[2], Е.П. Рец[2], И.А. Корнева[3], Т.Н. Постникова[2], О.О. Рыбак[2]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com

[2]Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

[3]Институт географии РАН, Москва, Россия

Аннотация. Данное исследование посвящено влиянию изменения климата и деградации ледников на процессы, определяющие формирование стока в высокогорных районах. В качестве основного метода исследования использовалась модель формирования стока ECOMAG. В качестве входных данных для модели ECOMAG применялись расчетные изменения площади оледенения (на основе глобальной гляциологической модели GloGEMflow-debris) и региональные изменения климата (данные проекта CORDEX) для двух климатических сценариев RCP2.6 и RCP8.5. Механизм изменения генетических компонентов стока в конкретных суббассейнах будет существенно зависеть от высотного положения зоны снегового и ледникового питания. Увеличение снеготаяния ожидается только в бассейнах рек, зона снегового питания которых расположена в пределах Эльбруса и других высокогорных районах Кавказа, что повлияет на направленность изменения годового стока. В результате повышения температуры и дегляциации при любом климатическом сценарии ожидается уменьшение ледникового стока. Также прогнозируется значительное увеличение дождевого стока к последней трети XXI в. Модельные оценки на период климатического прогноза подтверждают существующие тенденции изменения внутригодового распределения стока, подчеркивая смещение начала половодья на более ранние сроки, уменьшение объемов летнего стока и его увеличение в осенние месяцы. Эти изменения могут привести к нехватке водных ресурсов летом – в критический период для сельского хозяйства и водоснабжения.

Ключевые слова: *горная гидрология, моделирование формирования стока в горных регионах, Северный Кавказ, река Терек, изменение климата, деградация ледников, CORDEX, GloGEMflow-debris, ECOMAG*

Ссылка для цитирования: Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Мотовилов Ю.Г., Рец Е.П., Корнева И.А., Постникова Т.Н., Рыбак О.О. Как изменение климата и дегляциация влияют на механизмы формирования стока в высокогорных бассейнах рек Северного Кавказа? В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 260–261.

The full text of the article will be published in the Journal of Mountain Science.

Природные селевые потоки на Западном Кавказе в районе Сочи

В.И. Крыленко[1], И.В. Крыленко[2], Е.В. Дзагания[3], М.Ю. Дзагания[4]

[1]Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, krylenkovasiliy@gmail.com

[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, i-krylenko@yandex.ru

[3]ООО «ГК «Инжзащита», Сочи, Россия, krylenka@gmail.com

[4]Спасательная служба, Сочи, Россия, ya-lesnoi2012@yandex.ru

Аннотация. Исследования селевых потоков в районе города Сочи на Западном Кавказе показывают, что наиболее масштабные и разрушительные селевые потоки в этом районе формируются в результате внезапных крупных обвалов, оползней, запруд в труднодоступных долинах горных рек условиях высокой сейсмической активности, горного рельефа, пестрого геологического строения, разнообразных ландшафтов, влажного морского климата с интенсивными обильными осадками.
Анализ условий формирования селевых процессов природного генезиса на отдельных малых реках Бжижу, Кепша, где сошли крупные селевые потоки в недавнем прошлом, дает возможности для поиска закономерностей проявления селевых процессов в долинах рек Западного Кавказа, в Сочинском районе Краснодарского края России. Потенциально опасные природные селевые очаги также выявлены в бассейнах рек Бзерпия, Пслух, Лаура и их притоков (бассейн реки Мзымта), в бассейне правого притока реки Шахе и др.
Результаты исследований рекомендуется использовать при составлении планов хозяйственного освоения территорий (генеральных планов) и заблаговременно осуществлять мероприятия по защите существующих населенных пунктов и прилегающих особо охраняемых природных территорий Сочинского национального парка и Кавказского биосферного заповедника.

Ключевые слова: *природные селевые потоки, Сочи, селевой очаг, растительный покров, водосборный бассейн, обвалы, оползни, Западный Кавказ*

Ссылка для цитирования: Крыленко В.И., Крыленко И.В., Дзагания Е.В., Дзагания М.Ю. Природные селевые потоки на Западном Кавказе в районе Сочи. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 262–272.

Natural debris flows in the Western Caucasus, Sochi area

V.I. Krylenko[1], I.V. Krylenko[2], E.V. Dzaganiia[3], M.Yu. Dzaganiia[4]

[1]Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, krylenkovasiliy@gmail.com

[2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, i-krylenko@yandex.ru

[3]LLC "GK "Inzhzashchita", Sochi, Russia, krylenka@gmail.com

[4]Rescue Service, Sochi, Russia, ya-lesnoi2012@yandex.ru

Abstract. Studies of debris flows in the area of the city of Sochi in the Western Caucasus show that the most large-scale and destructive debris flows in this area are formed as a result of sudden large landslides, landslides, dams in hard-to-reach mountain river valleys under conditions of high seismic activity, mountainous terrain, variegated geological structure, various landscapes, humid maritime climate with intense heavy rainfall.

Analysis of the conditions for the formation of debris flow processes of natural genesis on individual small rivers Bzhizhu and Kepsha, where large debris flows occurred in the recent past, makes it possible to search for patterns in the manifestation of debris flow processes in the river valleys of the Western Caucasus, in the Sochi region of the Krasnodar Territory of Russia. Potentially dangerous natural debris flow centers have also been identified in the basins of the Bzerpiya, Pslukh, Laura rivers and their tributaries (the Mzymta River basin), in the basin of the right tributary of the Shakhe River, etc.
The research results are recommended to be used when drawing up plans for the economic development of territories (master plans) and to take measures in advance to protect existing settlements and adjacent specially protected natural areas of the Sochi National Park and the Caucasus Biosphere Reserve.

Key words: *natural debris flows, Sochi, debris flow origination site, vegetation cover, drainage basin, rockfalls, landslides, Western Caucasus*

Cite this article: Krylenko V.I., Krylenko I.V., Dzaganiia E.V., Dzaganiia M.Yu. Natural debris flows in the Western Caucasus, Sochi area. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 262–272.

Введение

Муниципальный городской округ (МГО) Сочи расположен на южных склонах горной системы Западного Кавказа, вдоль восточного побережья Черного моря и занимает около 3,5 тыс. км. При этом селитебные территории города-курорта Сочи занимают около 6 %, в основном вблизи берега Черного моря. В границы МГО Сочи, кроме населенных пунктов, также входят земли лесничеств и особо охраняемых территорий (ООПТ) Сочинского национального парка (площадь 2086 км²), Кавказского государственного природного биосферного заповедника имени Х.Г. Шапошникова.

Сочи является наиболее популярным курортом и туристическим центром России, быстро растущим мегаполисом с развивающимися горнолыжными курортами. Границы города-курорта постоянно отодвигаются от побережья Черного моря в горную местность. Актуальность исследования природных селевых процессов заключается в том, что при рекреационном и хозяйственном освоении горных районов многократно повышается опасность катастрофических воздействий на населенные пункты при внезапной активизации опасных природных процессов.

Исследования селевых потоков показывают, что наиболее масштабные и разрушительные селевые потоки в этом районе формируются в результате внезапных крупных обвалов, оползней, запруд в труднодоступных долинах горных рек в условиях высокой сейсмической активности, влажного субтропического климата с интенсивными обильными осадками до 300 мм/сут.

Анализ особенностей природных условий на реках Кепша (приток реки Мзымта в селе Кепша) и на реке Бжижу (приток реки Псезуапсе, аул Тхагапш), где в последние несколько десятилетий сошли крупные селевые потоки, дает возможность выявить аналогичные, потенциально селеопасные долины рек и учитывать риски при освоении территорий. Результаты исследований рекомендуется использовать при составлении генеральных планов территорий и заблаговременно осуществить мероприятия по защите существующих населенных пунктов для обеспечения безопасности и устойчивого развития города-курорта Сочи и прилегающих особо-охраняемых природных территорий Сочинского национального парка и Кавказского биосферного заповедника.

Краткий обзор проблемы

Несмотря на сильно пересеченную местность с высотой вершин на Главном Кавказском хребте более 3000 м, крутые склоны, множество рек с бурным течением,

обильные осадки, район города Сочи еще три десятилетия назад относили к категории территорий со слабой селевой опасностью. Густые широколиственные, хвойные леса, альпийские луга, занимая преобладающую часть территории, надежно защищали склоны от эрозии. Сельскохозяйственные земли в основном представляли собой сады, чайные плантации, которые также препятствовали эрозии.

В период подготовки XXII Зимних Олимпийских игр в городе Сочи застройка продвинулась в горы до субнивального пояса. Тысячи гектаров леса были вырублены. На склонах появились дороги, лыжные трассы, кабельные линии, линии электропередач, отвалы грунта.

Сплошные рубки леса, повреждение почв, подрезки склонов, отвалы рыхлообломочного материала на склоны привели к росту селевых очагов. Антропогенное воздействие вызвало многократное увеличение случаев схода селевых потоков на водотоках: реках Сулимовская, Ржаная, временных водотоках на участке от подстанции Мзымта до Культурно-этнографического центра "Моя Россия", в зоне строительства трамплинов на ручье Вторая Бригада, на временном водотоке Мостовой и др.

Тем не менее, наиболее мощные сходы селевых потоков были вызваны природными факторами: обвалами и оползнями. Эти природные процессы несут значительную угрозу безопасности населенных пунктов. Целью данной работы было выявление общих закономерностей природных селевых событий для выявления территорий с наибольшей опасностью образования природных селевых очагов и селевых потоков.

Сведения о природных селевых событиях на реках Кепша, Бжижу, Кутарха

Река Кепша

Река Кепша является правым притоком реки Мзымта (бассейн Черного моря). Впадает в реку Мзымта в 27 км от ее устья. Длина реки Кепша около 11 км, площадь водосборного бассейна – 37,8 км², средняя высота бассейна 680 м, средний уклон бассейна – 611 промилле, отношение длины к средней ширине бассейна – 3,2. Бассейн относительно симметричный, вытянутый вдоль русла, ширина составляет примерно половину протяженности бассейна, форма близка к четырехугольнику. В 100 м от устья в реку Кепша впадает правый приток Ахцу. Наивысшая отметка водосбора – 1449 м, отметка устья – 175 м.

В результате огромного обвала и последующего оползня в начале 2000-х гг. в русло и пойму реки Кепша попало около 10 миллионов кубов рыхлого грунта. Селевой очаг образовался в истоках реки Кепша на отметках 765 – 1052 м с продольным размером 0,9 км и шириной до 0,3 км. Он хорошо виден на спутниковых снимках, так как его площадь более 10 гектар, мощность оценивается до 50 м. Селевой очаг находится примерно в 9,5 км от села Кепша (рис. 1, 2) с населением около 300 человек.

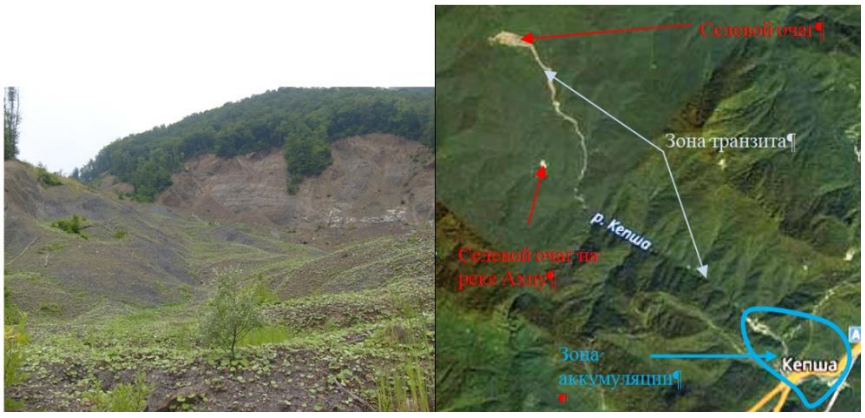


Рис. 1. Селевой очаг в верховьях и схема селевых зон реки Кепша. Фото И.В. Крыленко. Спутниковый снимок © Antrix Corporation Ltd. © ООО ИТЦ «СКАНЭКС» © Яндекс, 2012

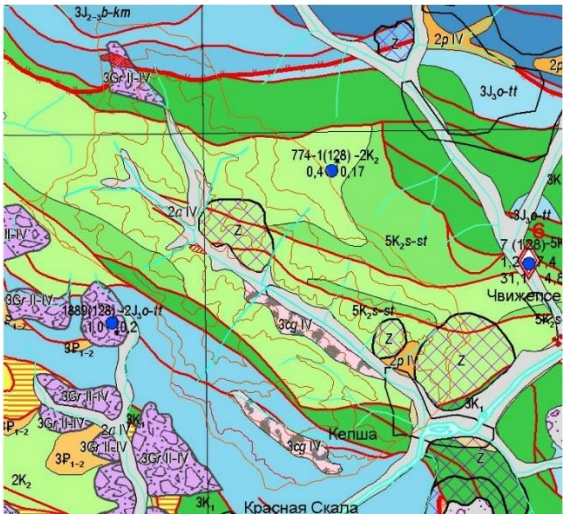
Рис. 2. Зона транзита селевого потока на реке Кепша. Фото И.В. Крыленко

Обвал произошел в Чвежипсинском подрайоне Больше-Кавказской гидрогеологической складчатой области, в зоне главного водопроводящего разлома согласно [*Отчета ФЦП, 2007*] (рис. 3).

Область в истоках реки Кепша, где произошел обвал, приурочена к нерасчлененному верхненеоплестоценово-голоценовому водоупорному горизонту гравитационного комплекса отложений, сложенному дресвяно-глинистыми отложениями с включением щебня, глыб, отторженцев, глин и суглинков. Бассейн реки Кепша относится к карстовому району Ахцу. В русле отмечены щебнисто-глинистые и дресвяно-глинистые отложения. В остальной части бассейна преобладает верхнемеловой водоносный горизонт казачебродской мергельно-известняковой толщи. Имеются источники гидрокарбонатных подземных вод. В соседней долине реки Чвежипсе находятся месторождения подземных минеральных вод, которые используются как лечебные.

Поселок Кепша находится на пойме реки Мзымта, в устьях рек Ахцу и Кепша, в зоне затопления этих рек и на конусе выноса реки Кепша, на отметках 175–180 м. Кроме того, паводок на реке Мзымта вызывает подпор стока и способствует увеличению паводковых уровней воды в притоках. Наносоводные потоки и карчеход заполняют отверстия под мостами, образуя запруды, и затапливают улицы поселка. В зоне затопления находится практически вся территория населенного пункта. Время прохождения водного паводка от истока до поселка – до 50 мин. При прохождении селя возможно образование запруд в узком ущелье, которые могут прорваться в период дождей и снести все, что расположено ниже по течению в зоне воздействия потока.

Селевые паводки наблюдаются несколько раз в году при выпадении интенсивных осадков, вынося в устье тысячи кубометров щебнистого мелкозернистого материала.



774-1(128)-2K2/0,4 0,17 — Родник: вверху номер по каталогу и индекс. Цифры слева – дебит, справа – минерализация, г/дм^3

а, б — Зоны водоподводящих разломов:
а – главные;
б – второстепенные

Отторженцы коренных пород

Селевой очаг (обвал, оползень)

Граница водосборного бассейна

Рис. 3. Фрагмент гидрогеологической карты [*Отчет ФЦП, 2007*]. Бассейн реки Кепша. Условные обозначения: $2K_2$ – верхнемеловой водоносный горизонт Казачебродской толщи, переслаивание мергелей и известняков, песчаников и алевролитов; 2a IV – аллювиальный голоценовый водоносный горизонт: валунно-галечники и гравийники с прослоями песков и глин; 3Gr II-IV – нерасчлененный верхненеоплестоценово-голоценовый водоупорный горизонт гравитационного комплекса отложений, сложенный дресвяно-глинистыми отложениями с включением щебня, глыб, отторженцев, глин и суглинков; 3cgIV – коллювиально-делювиальный голоценовый относительно водоупорный горизонт: глыбы, дресва, щебень; $3J_{2\text{-}3}$b-km – байосско-кимериджский относительно водоупорный горизонт: туфы, туффиты, аргиллиты с прослоями алевролитов, туфопесчаников и песчаников; $3J_3$o-tt – оксфордско-берриасский относительно водоупорный горизонт: аргиллиты, песчаники, мергели, известняки

Река Бжижу

Аул Тхагапш (население около 200 человек) находится в устье р. Бжижу на отметках 130–150 м в зоне затопления пойм рек Бжижу и Псеузапсе.

4–5 июня 2016 г. в Лазаревском выпало 201 мм осадков за сутки, 90 мм за 1 ч с 22.00 до 23.00 04 июня 2016 г. Ночью на 5 июня через село Тхагапш сошел грязекаменный селевой поток (рис. 4). В районе поселка Солоники был разрушен мост через реку Цуквадж. В Лазаревском районе повреждены дороги и жилые дома, в некоторых населенных пунктах прекращено электроснабжение. По словам местных жителей, в ауле Тхагапш это было уже третье наводнение, предыдущее было в 2013 г. [*Шапсугова, 2016*].

Река Бжижу является правым притоком Псезуапсе бассейна Черного моря, впадает на 14-м км от ее устья. Длина реки около 7 км, площадь водосборного бассейна – 13,2 км², отношение длины к средней ширине бассейна – 3,6. Водосбор широкий, ассиметричный, неправильной формы, похожей на кленовый лист. Средний уклон водосбора – 387 промилле, средневзвешенный уклон русла 135 промилле, средняя

высота водосбора – 740 м. Высшая точка водораздела реки Бжижу – гора Гвачева (1121 м). Склоны покрыты густым лесом. В верховьях реки преобладают широколиственные леса: бук, граб, дуб, каштан, с вечнозеленым подлеском из рододендрона, иглицы и др. В русле имеются водопады. Долина реки V-образная. Режим реки характеризуется паводками, возможными в течение всего года.

Рис. 4. Аул Тхагапш после селевого паводка. Фото пресс-службы ЮРПСО МЧС России

Селевой очаг образовался в узком ущелье в результате обрушения нижней части правого крутого склона долины реки в русло реки Бжижу. Участок имеет длину по направлению сползания до 300 м и протяженность вдоль реки – до 400 м. Зона срыва отмечается на абсолютных отметках борта долины 275–415 м. Место обвала хорошо видно на спутниковых снимках. Общая площадь пораженного участка около 19 га, мощность оценивается до 30 м. Объем мог достигать 1,4 млн м^3.

Следует отметить, что аналогичное строение имеет левый борт долины, где вероятность обвала (оползня) в русло также высока. Предположительно, в результате выпадения более 200 мм/сут дождевых осадков, экстремального паводка и обвала на реке Бжижу образовалось подпрудное озеро в районе водопада. Затем, в результате затяжных сильных дождей (с 4 по 6 июня 2016 г.), произошел прорыв, вызвавший формирование грязекаменного потока. Поток нес глыбы более 1 м в диаметре. Объем селевого выноса твердого стока на пойму реки Псезуапсе составил более 100 тыс. м^3.

Долину реки Бжижу, перпендикулярно руслу, пересекает второстепенный водоподводящий разлом, проходящий по срединной части обвала (рис. 5). Вышележащий склон обводнен, имеются родники.

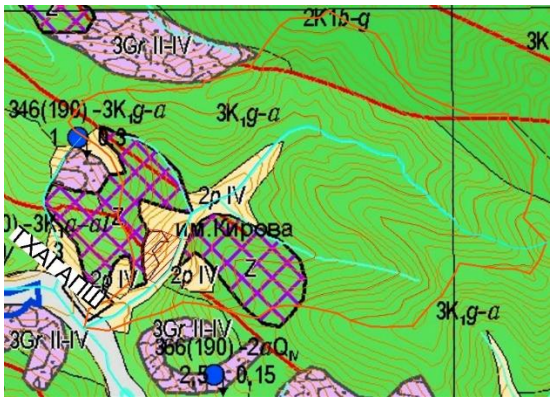


Рис. 5. Фрагмент гидрогеологической карты [*Отчет ФЦП, 2007*]. Бассейн реки Бжижу. Условные обозначения: 2pIV – пролювиальный голоценовый водоносный горизонт: щебнисто-глыбовые, валунные и глинисто-дресвяные отложения; 3K$_1$g-a – готеривско-аптский относительно водоупорный горизонт: глины, алевролиты, песчаники; 3Gr II-IV – нерасчлененный верхненеоплестоценово-голоценовый водоупорный горизонт гравитационного комплекса отложений, сложенный дресвяно-глинистыми отложениями с включением щебня, глыб, отторженцев, глин и суглинков. Остальные обозначения см. на рис. 3

Согласно гидрогеологической карте [*Отчет ФЦП, 2007*], срыв верхнего пласта грунта произошел по нижней границе отторженца коренных пород и верхней границе пролювиального голоценового водоносного горизонта с щебнисто-глыбовыми, валунными и глинисто-дресвяными отложениями.

Река Кутарха

Река Кутарха является левым притоком реки Сочи и впадает на 11-м км от ее устья. Длина реки – 6,5 км, площадь водосбора – 12,7 км², средняя высота водосбора – 282, средний уклон водосбора – 350‰, средневзвешенный уклон русла – 54‰. Форма бассейна ассиметричная, неправильная, отношение длины к ширине бассейна – 3,3. Речная сеть густая. Рельеф бассейна горный, поверхность сильно пересечена, склоны покрыты лесом, за исключением южного водораздельного гребня и нижнего течения, где находятся дачные участки и сельская низкоплотная застройка. Речная сеть густая. Долина V-образная, русла – водопадного типа. В долине рек Кутарха и Сочи имеются многочисленные выходы подземных вод. Вблизи от устья реки Кутарха в долине реки Сочи находятся эксплуатируемые источники минеральной воды Пластунская, которая используется как лечебная. Северный высокий водораздельный хребет Алек, с высотами более 800 м н.у.м., является наветренным при прохождении атмосферных фронтов со стороны Черного моря и долины реки Сочи, что способствует обильному выпадению конвективных осадков на его юго-западных склонах. Кроме того, хребет Алек является карстовым районом с многочисленными пещерами.

На реке Кутарха, притоке реки Сочи бассейна Черного моря, селевые потоки в последние три десятилетия не наблюдались. Тем не менее, в ее долине присутствуют признаки того, что река является селеопасной: мощные эрозионные врезы, борозды, заполненные рыхлообломочным материалом, русло и террасы выполнены мощными отложениями рыхлых материалов, с неустойчивыми оползневыми крутыми склонами, подрезаемыми при проходе высоких вод. В начале 2024 г., в результате выпадения снежных осадков, половодья при потеплении и последующего наложения дождевого паводка, в долине реки Кутарха произошел срыв оползня с образованием подпрудного озера длиной около 200 м и шириной до 50 м, глубина – около 3 м, объем – около 20 000 м³ (рис. 6).

Активный оползень имеет длину по направлению сползания до 380 м, протяженность вдоль реки – до 220 м. Зона срыва отмечается на абсолютных отметках борта долины 280 м, низ оползня находится на отметке 130 м. Общая площадь пораженного участка около 9,5 га, мощность оценивается до 10 м. Объем тела оползня может достигать 160 тыс. м^3.

Рис. 6. Подпрудное озеро на реке Кутарха, образовавшееся в результате оползня в 2024 г. Фото М.Ю. Дзагания

Как следует из сведений гидрогеологической карты (рис. 7), оползень сошел в нижней части бассейна на границе пролювиального голоценового водоносного горизонта и нерасчлененного верхненеоплестоценово-голоценового водоупорного горизонта, в зоне выхода подземных вод (рис. 8) у подножия карстового массива Алек.

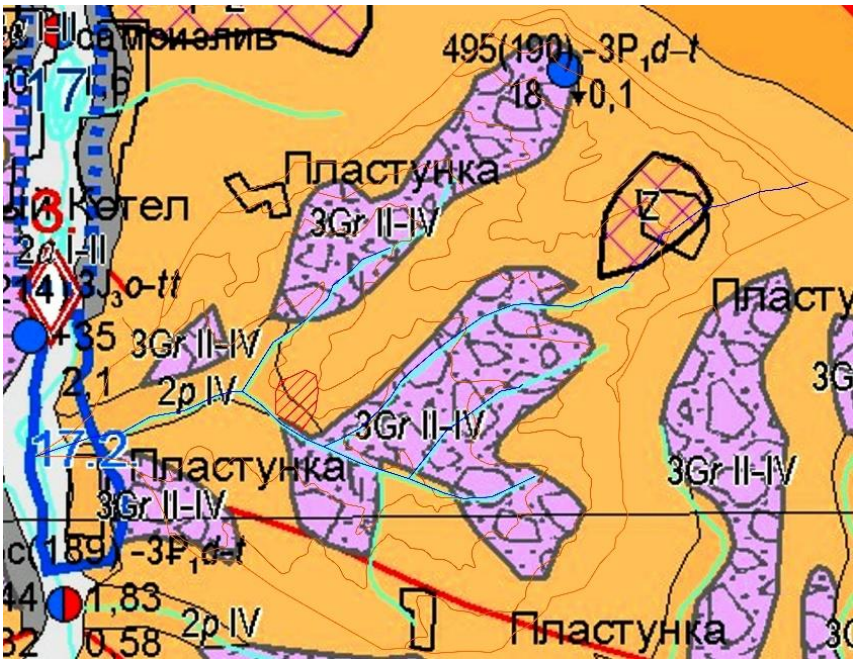


Рис. 7. Фрагмент гидрогеологической карты [*Отчет ФЦП, 2007*]. Бассейн реки Кутарха. Условные обозначения: 2pIV – пролювиальный голоценовый водоносный горизонт: щебнисто-глыбовые, валунные и глинисто-дресвяные отложения; 3Gr II-IV – нерасчлененный верхненеоплестоценово-голоценовый водоупорный горизонт гравитационного комплекса отложений, сложенный дресвяно-глинистыми отложениями с включением щебня, глыб, отторженцев, глин и суглинков. Остальные обозначения см. на рис. 3

Рис. 8. Родник у подножия хребта Алек в пойме реки Кутарха, ныне погребенный под телом оползня, 2017 г. Фото Е.В. Дзагания

При обследовании оползня чувствовался запах сероводорода, что может свидетельствовать о вскрытии ранее погребенных источников подземных вод с содержанием сероводорода (в городе Сочи находятся месторождения сероводородных минеральных вод и на их основе действует бальнеологический комплекс Мацеста, который находится в смежной с юга долине реки Мацеста). Предположительно, линии второстепенных водоподводящих разломов проходят от бассейна реки Мацеста, пересекают бассейн реки Кутарха и далее выходят к месторождению Пластунских минеральных в бассейне реки Сочи.

Язык оползня обводнен и состоит из мелкого рыхлообломочного грунта.

Образовался крупный селевой очаг, угрожающий наводнением в случае выпадения интенсивных осадков и прорыва озера, с возможным образованием грязекаменного потока. В устье реки Кутарха и в долине реки Сочи расположено село Пластунка с населением 2270 человек. Еще ниже по течению реки Сочи находится густонаселенный Центральный городской район города Сочи. На момент написания статьи ситуация остается опасной.

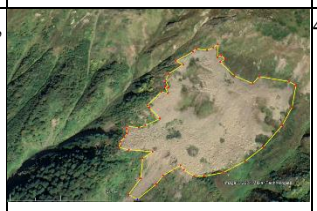
Выводы. Признаки повышенной опасности схода селевых потоков в водосборных бассейнах Сочинского района

Исследуемый район обладает рядом факторов, способствующих образованию селевых потоков в условиях горной местности и характерных для большинства бассейнов водотоков. К таким факторам можно отнести высокую сейсмичность до 9 баллов, интенсивные дождевые осадки до 300 мм/сут, возможность наложения половодья и дождевых паводков, густая ручьевая сеть. В высокогорье конусы осыпей и лавинных выносов достаточно постоянны, и эти очаги не носят внезапный характер. Большая часть природных селей происходит на безлюдных территориях, из-за чего селевая опасность часто бывает недооцененной. После продвижения человека в горы и освоения земель селевые процессы могут принести значительный ущерб населению и новым объектам.

По итогам комплексного изучения природных селевых процессов с привлечением материалов гидрогеологических исследований, преимущественно в среднегорной залесенной зоне Сочинского района, можно сформулировать следующие признаки наиболее неблагоприятных с точки зрения селевой опасности бассейнов:

1. Наличие крупных селевых очагов, оползней, осыпей и обвалов, лишенных растительного покрова при наличии такового на смежных участках, а также участки с «пьяным» лесом.
2. Глубоко врезанные V-образные долины, сложенные легко разрушающимися породами, рыхлыми обломочными грунтами, щебнисто-глыбовыми, валунными и глинисто-дресвяными отложениями.
3. Типы русловых процессов – ограниченное меандрирование, русловая многорукавность.
4. Орографические особенности, способствующие образованию в руслах подпрудных озер, завалов из карчехода в узких частях днища долины.
5. Наличие месторождений подземных вод.
6. Расположение на пересечениях главных или второстепенных водоподводящих разломов, на границах водоупорных и водоносных горизонтов и гидрогеологических формаций.
7. Юго-западная экспозиция бассейнов, их открытость для воздушных масс, идущих со стороны Черного моря.
8. Средние уклоны водосборных бассейнов более 350 промилле.
9. Отношение длины бассейна к ширине – менее 5.
10. По этим признакам, на основании анализа спутниковых снимков, выделен еще ряд рек в бассейне реки Мзымта, где вероятность формирования схода селевых потоков очень высока (таблица 1).

Таблица 1. Водотоки в бассейне реки Мзымта с высокой вероятностью схода селей

Местоположение	Фрагмент спутникового снимка	Координаты		Размеры и отметки очага	Примечания
		N	E		
Бассейн Чвижепсе, р. Медовеевка		43°44'21.12"	40° 6'10.25"	1700 м – низ, 1750 м – верх, ширина – 240 м, длина – 450 м, площадь – 0,53 км²	Проходит главный водоподводящий разлом, имеются источники подземных вод, район карстовый
Гора Сапун, р. Чвижепсе		43°39'17.84"	40°01'58.43"	1070 м – низ, 1100 м – верх, ширина – 240 м, длина – 450 м, площадь – 0,02 км²	
Массив Ачишхо, р. Бешенка, лев.		43°42'37.42"	40°11'43.11"	1520 м – низ, 1615 м – верх, ширина – 65 м, длина – 100 м, площадь – 0,01 км²	Проходит главный водоподводящий разлом, в бассейне – месторождение подземных вод
Правый приток р. Ачипсе, ниже Хмелевских озер		43°44'01.67"	40°12'23.86"	1220 м – низ, 1330 м – верх, ширина – 300 м, длина по склону – 205 м, площадь – 0,05 км²	Проходит главный водоподводящий разлом
Северо-восточный склон горы Бзерпи. Правый приток р. Пелуха (бассейн р. Пслух)		43°41'55.51"	40°24'02.04"	950 м – низ, 2200 м – верх, ширина – 500 м, длина по склону – 800 м, площадь – 0,2 км²	Поперек проходит 2 разлома, в т.ч. главный. В бассейне Пслуха – источники минеральных вод

Следует отметить, что подобных селевых очагов даже в бассейне реки Мзымта – десятки, по Сочинскому району – сотни селеопасных бассейнов.

Настоящее исследование показывает, что появление крупных селевых очагов в Сочинском районе наиболее вероятно на участках, расположенных на пересечениях главных или второстепенных водоподводящих разломов, на границах водоупорных и водоносных горизонтов, в бассейнах с месторождениями подземных вод. Определение наиболее селеопасных бассейнов следует выполнять с использованием спутниковых снимков, гидрогеологических карт, основных гидроморфологических параметров бассейнов и уточнять в ходе полевых исследований.

Благодарности

Авторы благодарят руководство компании ООО «ГК «Инжзащита», Институт водных проблем Российской академии, Московского государственного университета им. Ломоносова за содействие и предоставленную возможность выполнения исследований.

Список литературы

Ворошилов В.И. Селевые паводки и меры борьбы с ними на южном склоне Северо-Западного Кавказа: автореф. дис. канд. геогр. наук. Сочи: Изд-во Сочинского филиала Краснодарского политехнического института, 1972. 25 с.

Дзагания, Л. М. Применение лесомелиорации для селезащиты на Черноморском побережье Западного Кавказа / Л. М. Дзагания // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Труды 6-й Международной конференции, Душанбе–Хорог, Таджикистан, 20–26 сентября 2021 года / Отв. редакторы С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. Том 1. – Душанбе–Хорог, Таджикистан: Общество с ограниченной ответственностью "Промоушн", 2020. – С. 405–417. – EDN JKEEUX.

Отчет по созданию комплекта специализированных карт г. Б. Сочи и прилегающей части Туапсинского района для обоснования документов территориального планирования г. Б. Сочи и объектов ФЦП «Развитие г. Б. Сочи как горноклиматического курорта (2006 – 2014 гг.). / Отв. Р. Н. Лизогубова. — М.: ОАО «Росстройизыскания», «ОАО «Кавказгидрогеология», 2007.

Спутниковые снимки Google Earth. Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Image Landsat / Copernicus, Image IBCAO.

Шапсугова Т. Сочинский аул приходит в себя после стихии. Электронный источник: Московский комсомолец, Сочи 2016

Особенности формирования стока ручьев каменных глетчеров Северного Тянь-Шаня, Республика Казахстан

Л.С. Лебедева[1,2], В.В. Гончаренко[1,2]

[1]Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия, lyudmilaslebedeva@gmail.com

[2]Центрально-Азиатский региональный гляциологический центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Алматы, Казахстан

Аннотация. Аккумуляции воды в теле каменных глетчеров при выпадении аномальных осадков может привести к последующему сбросу накопленной воды вместе с обломочным материалом в виде селевых потоков. Так, в 2015 и 2019 г. в верховьях р. Каргалы сформировались селевые потоки вследствие блокировки подземных каналов стока с оз. Безымянное в тыловой котловине каменного глетчера и последующего прорыва, что привело к подтоплению улиц, домов и автотранспорта близ г. Алматы. Целью нашей работы является исследование стока воды с каменных глетчеров в бассейне р. Улкен Алматы (Большая Алматинка), Северный Тянь-Шань. В 2023 г. было отобрано 90 проб воды из ручьев, рек, источников подземных вод и атмосферных осадков, велись автоматизированные измерения температуры и электропроводности воды в местах ее выхода из тела каменных глетчеров Городецкого и Моренный, осуществлялись ручные измерения расходов воды ручьев каменных глетчеров. Каменные глетчеры оказывают существенное влияние на водный режим, температуру и химический состав водотоков, формирующихся выходами воды из них. Они отличаются практически полным отсутствием внутрисуточных колебаний уровня, температуры и удельной электропроводности воды, которые ярко выражены в летний период у рек и ручьев с ледниковым питанием. Некоторые выходы воды из каменного глетчера Городецкого не перемерзают зимой, что говорит о значительных запасах подземных вод в его теле. Воды каждого из трех изученных каменных глетчеров отличаются характерной минерализацией, температурой и соотношением основных ионов. Стабильный сток с каменных глетчеров может играть важную роль в поддержании речного стока.

Ключевые слова: *каменные глетчеры, Северный Тянь-Шань, механизмы формирования стока, гидрологический режим, химический состав воды, температура воды*

Ссылка для цитирования: Лебедева Л.С., Гончаренко В.В. Особенности формирования стока ручьев каменных глетчеров Северного Тянь-Шаня, Республика Казахстан. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 273–284.

Streamflow formation of the rock glacier creeks in the Northern Tien Shan, Republic of Kazakhstan

L.S. Lebedeva[1,2], V.V. Goncharenko[1,2]

[1]Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia, lyudmilaslebedeva@gmail.com

[2]Central Asian Regional Glaciological Centre as a category 2 under the auspices of UNESCO, Almaty, Kazakhstan

Abstract. The accumulation of water within the body of rock glaciers following abnormal precipitation can lead to the subsequent discharge of the accumulated water along with debris material in the form of debris flows. Thus, in 2015 and 2019, debris flows were formed in the upper reaches of the Kargaly River due to the blockage of underground

drainage channels from Lake Bezimyannoe in the rear basin of the rock glacier and the subsequent breakthrough, which led to the flooding of streets, houses, and vehicles near the city of Almaty. The aim of our work is to study the water runoff from rock glaciers in the Ulken Almaty river basin (Bolshaya Almatinka), Northern Tian Shan. In 2023, 90 water samples from streams, rivers, groundwater sources, and atmospheric precipitation were collected, automated measurements of water temperature and electrical conductivity at the Gorodetsky and Moraine rock glaciers creeks were carried out, and manual measurements of water discharges of rock glacier streams were performed. Rock glaciers have a significant impact on the water regime, temperature, and chemical composition of water. Rock glacier creeks are characterized by almost complete absence of intraday fluctuations in level, temperature, and specific electrical conductivity of water, which are pronounced in the summer period for rivers and streams with glacial feeding. Some water exits from the Gorodetsky rock glacier do not freeze in winter, indicating significant groundwater reserves within its body. The waters from each of the three studied rock glaciers differ in mineralization, temperature, and the ratio of major ions. The stable runoff from rock glaciers can play an important role in maintaining river flow.

Key words: *rock glaciers, Northern Tian Shan, runoff formation mechanisms, hydrological regime, water chemical composition, water temperature*

Cite this article: Lebedeva L.S., Goncharenko V.V. Streamflow formation of the rock glacier creeks in the Northern Tien Shan, Republic of Kazakhstan. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 273–284.

Введение

Каменные глетчеры распространены во многих горных системах мира [*Горбунов и Горбунова, 2010*]. О большом значении каменных глетчеров в формировании речного стока писал еще A. Corte в 1976 г. [*Corte, 1976*]. Вопрос о вкладе подземного льда каменных глетчеров в речной сток приобретает особую значимость на фоне резкого сокращения ледников и многолетних снежников. В отличие от ледников, каменные глетчеры более устойчивы к изменениям климата и могут существовать даже при положительной среднегодовой температуре воздуха. Jones и соавт. [*2019*] отметили, что вытаивание льда каменных глетчеров может быть существенным вкладом в сток рек, однако для количественных оценок необходимы натурные измерения, которые проводятся всего лишь на нескольких каменных глетчерах в мире преимущественно в Альпах.

Существенная гидрологическая роль каменных глетчеров показана в США на примере нагорья Большой Бассейн [*Millar, Westfall, 2019*], в Австрийских Альпах [*Wagner et al., 2020*], Швейцарских Альпах [*Kenner et al., 2020*], Чилийских Андах [*Schaffer et al., 2019*] и в Гималаях [*Jones et al., 2021*]. В Альпах происходит постепенный переход от ледникового и снегового питания рек к питанию за счет каменных глетчеров, подземных вод и жидких осадков [*Brighenti et al., 2019*]. Каменные глетчеры могут играть все более важную роль в формировании водных экосистем альпийских рек в условиях продолжающейся деградации ледников.

Каменные глетчеры широко распространены в горах Центральной Азии, но до сих пор слабо изучены [*Горбунов, 2006*]. Новая волна интереса к каменным глетчерам в XXI в. отчасти связана с их специфической реакцией на происходящие глобальные климатические изменения. На фоне интенсивного сокращения ледников многие каменные глетчеры выросли в размерах и активно наступают [*Марченко, 2003; Вилесов и др., 2006; Галанин, 2009*]. А.П. Горбунов и соавт. [*2018*] выявили, что наиболее крупные залежи подземных льдов в горной системе Тянь-Шаня сосредоточены в активных каменных глетчерах и современных моренах. Установлено, что объем ледников по отношению к объему подземных льдов существенно уменьшился в связи с

деградацией наземного оледенения, что может говорить о возросшей гидрологической роли каменных глетчеров [*Bolch, Marchenko, 2009*].

На хребтах северного Тянь-Шаня Иле Алатау (Заилийский Алатау) и Кюнгей-Ала-Тоо общей площадью более 3000 км^2 расположен 551 каменный глетчер [*Kaab et al., 2021*]. Относительно хорошо изученными являются всего лишь несколько каменных глетчеров региона, в том числе расположенные в бассейне р. Улкен Алматы глетчеры Городецкого и Моренный. В 1923 г. Н.Н. Пальгов заложил геодезическую сеть у подножий фронтальных уступов указанных каменных глетчеров и осуществил в 1926 г. повторную тахеометрическую съемку, определив скорости движения этих форм [*Пальгов, 1957*]. В 1946 и 1960 г. с этой опорной сети были проведены съемки уступов В.А. Зенковой, а в 1977 и 1994 г. – сотрудниками Казахстанской высокогорной лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН [*Gorbunov et al., 1992*]. А.А. Галанин и соавт. [*2017*] установили, что наиболее активные генерации каменного глетчера Городецкого находятся в талом состоянии и практически не содержат грунтовых льдов. А.Р. Медеу и соавт. [*2021*] сделали предварительный вывод о наличии большого количества воды в теле каменного глетчера Моренный. M. Shahgedanova и соавт. [*2020*] объяснили расхождение между рассчитанными с помощью гидрологической модели HBV-ETH и фактическими расходами воды р. Улкен Алматы во второй половине лета таянием подземных льдов каменных глетчеров, площадь которых достигает 30% от площади ледников. Полевые исследования стока воды с каменных глетчеров Иле-Алатау ранее не выполнялись, за исключением разовых измерений температуры воды и нескольких определений изотопного состава [*Галанин и др., 2017*].

Объекты исследования

Гляциально-криогенный комплексы (ГКК) Городецкого, Моренный и Тимофеева расположены в бассейне реки Озерная (верхняя часть бассейна р. Улкен Алматы) в Иле Алатау (рис. 1). Каждый из них имеет длину более 3 км. Максимальным по размеру является ГКК Городецкого протяженностью почти 5 км. Основными элементами их строения являются несколько небольших ледников в истоках и крупный каменный глетчер в терминальной части, а также сочленяющее поле льдистых морен, подпрудных озерных котловин и ложбин стока в средней части ГКК. Каменный глетчер (КГ) Городецкого имеет длину около 3 км, КГ Моренный около 2 км, КГ Тимофеева около 1,5 км и лежат в интервале абсолютных высот 3030–3770 м н.у.м. Очертания каменных глетчеров определяются по морфологическим признакам [*Горбунов и Горбунова, 2010*]. Фронтальный уступ каменных глетчеров имеет крутизну естественного откоса и даже превышает ее. Их поверхность на всем протяжении покрыта глыбами и щебнем гранитоидов, гранулометрический состав которых распределен неравномерно. Средние размеры поверхностных обломков варьируют от 0,1 до 1 м. Встречаются участки нагромождения крупных глыб диаметром более 2–3 м.

В области питания каменных глетчеров расположены несколько одноименных ледников. По состоянию на 2022 г. площадь питающих КГ Моренный ледников составила 0,31 км^2 (четыре небольших ледника), КГ Городецкого – 3,07 км^2 (два ледника – Городецкий правый и Городецкий левый), КГ Тимофеева – 1,01 км^2 (ледник Тимофеева).

В краевых частях ледников встречаются подпрудные озерные котловины, служащие промежуточными емкостями ледникового стока. Яркими признаками интенсивного внутреннего дренажа каменных глетчеров являются расположенные в основании фронтального откоса высокодебитные источники воды. КГ Моренный имеет два источника, КГ Городецкого – четыре и КГ Тимофеева – один. Сток осуществляется по хорошо выработанным стабильным руслам с твердым дном, покрытым гравийно-галечным материалом и валунами. Рассматриваемые каменные глетчеры относятся к активным. Ручьи, образуемые источниками КГ, впадают в р. Кысыл-Сай и Озерную.

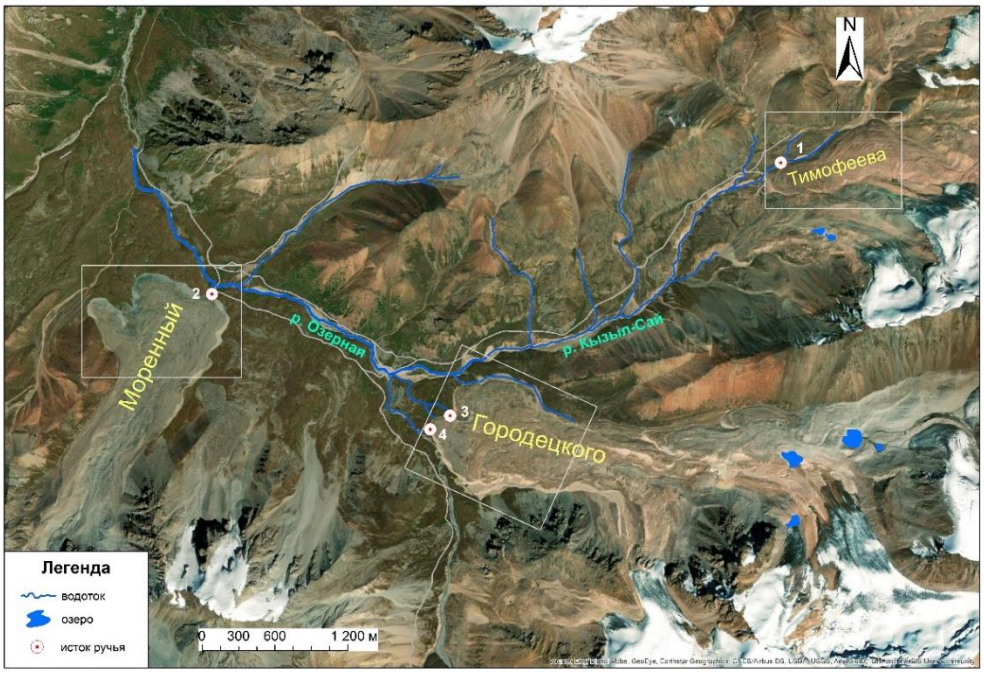


Рис. 1. Схема участка исследования. В качестве подложки использован снимок спутника GeoEye

Река Озерная вместе с р. Проходной образуют р. Улкен-Алматы. На ней функционирует гидрологический пост р. Улкен Алматы – в 1,1 км выше оз. Улкен Алматы (код поста 14239). Высота поста 2560 м н.у.м. Площадь водосбора 71.8 км^2. Средний расход воды на гидрологическом посту – 1,83 м^3/с. Максимальный расход 26,1 м^3/с наблюдался 4 июля 2015 г., минимальный 0,15 м^3/с зафиксирован с 28 апреля по 17 мая 2019 г. Длина р. Озерная около 12 км. Высшая точка водосбора около 4400 м н.у.м., отметка истока реки – 3700 м н.у.м.

Река Улкен Алматы имеет смешанное питание (талые воды снегов и ледников, дождевые осадки, грунтовые воды). Она относится к рекам с весенне-летним половодьем. Наибольший сток наблюдается в июне-августе, наименьший – в феврале-апреле. Максимальные расходы воды на реке Улкен Алматы формируются за счет таяния снега и ледников с наложением на них дождевых паводков. Летне-осенняя межень устанавливается во второй декаде сентября и заканчивается в начале третьей декады ноября, зимняя – соответственно в начале третьей декады ноября и в середине третьей декады апреля. Межень характеризуется относительно устойчивыми расходами воды, плавно снижающимися к началу половодья. Первые ледовые образования в виде заберегов появляются в среднем 24 ноября, ранние – 7 ноября, поздние – 7 января. Средняя продолжительность ледостава 38 дней, наибольшая 108 дней, наименьшая 0 дней.

Река Улкен Алматы является основным источником поверхностных вод, используемых для водоснабжения г. Алматы (92%). Воды р. Улкен Алматы также используются для получения электроэнергии (каскад ГЭС) и других целей.

Методы

С 2018 и 2019 г. ведутся автоматизированные измерения температуры воды в местах ее выхода из тела КГ Городецкого, КГ Моренный и КГ Тимофеева с помощью термических логгеров Onset HOBO с интервалом записи 4 часа. Логгеры были установлены на расстоянии от 1 до 3 м от подножия фронтального уступа и закреплены на дне водотока грузом. Один из логгеров на КГ Городецкого имел два температурных датчика: первый записывал температуру воды, а второй температуру воздуха на высоте 40 см от поверхности.

В течение экспедиционных исследований в 2023 г. отбирались пробы воды для определения химического состава – основных ионов, некоторых микрокомпонентов и стабильных изотопов воды. Также в поле осуществлялись измерения расходов воды с помощью гидрометрической вертушки и ручные определения электропроводности и температуры воды ручьев с каменных глетчеров, ледниковых водотоков, родников и других природных вод в бассейне р. Озерная с помощью портативного термокондуктометра HM-200 (Республика Корея). Полевые выезды в верховья р. Озерная были выполнены девять раз за сезон: 9, 17 июня, 15, 21, 27 июля, 4, 16 августа, 2 и 28 сентября. Всего за полевой сезон было отобрано 90 проб воды из ручьев, рек, источников подземных вод и атмосферных осадков. Химические анализы водных проб выполнялись в геохимической лаборатории Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН методами титрометрии и капиллярного электрофореза.

Результаты

Расходы воды ручьев КГ

Ручьи, вытекающие из-под КГ Городецкого, имеют высокие расходы, суммарно составлявшие 873–1025 л/с в конце июля 2021 г., 1270 л/с 16 августа 2023 г. и 241 л/с 28 сентября 2023 г. Один ручей впадает непосредственно в р. Озерная, несколько других ручьев группируются в один, впадающий в приток р. Озерная р. Кысыл-Сай. Ручей КГ Городецкого, впадающий в р. Озерная, имел расход 360 и 440 л/с 25 и 26 июля 2021 г. соответственно, 484 л/с 16 августа 2023 г. и всего лишь 8б4 л/с 28 сентября 2023 г. Ручьи из КГ Городецкого, впадающие в р. Кысыл-Сай, имели расход 513 и 586 л/с 25 и 26 июля 2021 г. соответственно, 785 л/с 16 августа 2023 г. и 233 л/с 28 сентября 2023 г.

Сток воды с КГ Моренный значительно меньше, чем с КГ Городецкого. Расход ручья составлял 1,7–2,1 л/с 24 и 26 июля 2021 г., 10,8 л/с 16 августа 2023 г. Сток отсутствовал в конце сентября 2023 г.

Расход воды р. Улкен Алматы (р. Озерная) на гидрологическом посту «в 1,1 км выше оз. Улкен Алматы» 25 и 26 июля 2021 г. был 6,96 и 7,64 $м^3$/с соответственно. Расход ручьев КГ Городецкого составлял 12,5 и 13,4% от стока р. Улкен Алматы (р. Озерная) на гидропосте, что является существенной величиной.

Расходы воды на гидрологическом посту за 2023 г. еще не опубликованы. Если принять, что август и сентябрь-октябрь 2023 г. близки по водности к среднемноголетним значениям (6,17 $м^3$/с в августе и 2.66 $м^3$/с в сентябре-октябре за период 2002–2021), то вклад ручьев КГ Городецкого в сток р. Улкен Алматы составил даже больше, чем в июле 2021 г. – около 20%, а в конце сентябре – 9%.

Расходы ручьев, формирующихся выходами вод из каменных глетчеров, стабильны в течение дня и не имеют выраженной внутрисуточной динамики. Были также измерены расходы ручья, формирующегося без участия каменных глетчеров. Его основным источником питания в июле 2021 г. является таяние ледников в верхней части водосбора. Расход этого ручья составил 4,3 л/с в 9:45 и 45,8 л/с в 16:00 26 июля 2021 г., то есть колебания водности ледниковых ручьев составляет сотни процентов в течение суток.

Температура воды ручьев КГ

Температуры воды ручьев показаны на рис. 2. Температурный режим пяти ручьев, вытекающих из КГ Городецкого, КГ Моренный и КГ Тимофеева, отличается и имеет свои характерные особенности.

Ручьи, вытекающие из КГ Городецкого, имеют относительно высокую температуру, которая достигает +2…+3°С. Температурный режим стока КГ Городецкого наблюдался в трех источниках. Период их стока и ход температуры различается. Температура воды в главном выходе изменялась от +2…+3°С с августа 2019 по октябрь 2021 г. и с июня 2022 по сентябрь 2023 г. с максимальными значениями в августе,

минимальными – в марте и апреле. Плавное снижение температуры воды с сентября по апрель примерно на градус свидетельствует о том, что этот выход функционировал круглогодично в 2019–2021 и в 2022–2023 гг. Это единственный из наблюдаемых водотоков, который не перемерзал в эти зимы. В ноябре 2021 г. записанная логгером температура понизилась до отрицательных значений, что говорит о перемерзании источника в месте установки логгера. Сток возобновился в конце апреля 2022 г. Период перемерзания продолжался 138 дней, что на 50 дней меньше, чем период отрицательных среднесуточных температур воздуха. Главный выход формирует наиболее многоводный ручей среди всех остальных выходов вод КГ. Центральный выход из КГ Городецкого перемерзает ежегодно и имеет температуру воды +0,5…+1°С с начала стока по конец июня и прогревается до +2…+2,5°С в июле и августе. Достаточно резкий подъем температуры воды на 1–2°С за 10–15 дней в начале июля предположительно связан с вытаиванием сезонных льдов в каменном глетчере. Продолжительность стока Центрального выхода составляла 172 и 167 дней в 2020 и 2021 гг. соответственно, что на 5 и 9 дней больше, чем период положительных среднесуточных температур воздуха.

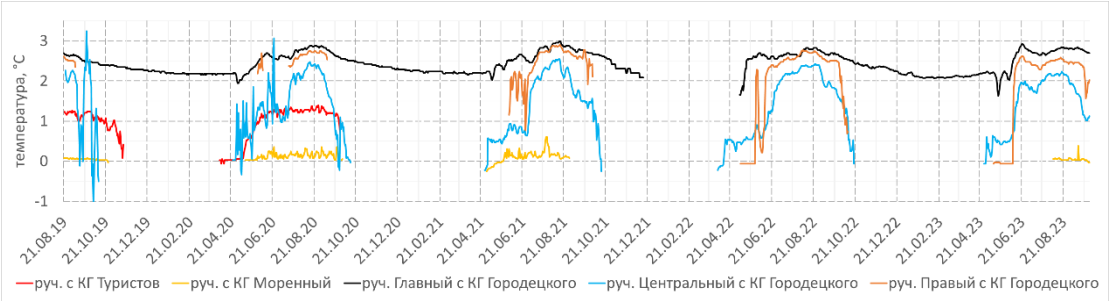


Рис. 2. Температура воды ручьев, вытекающих из каменных глетчеров (КГ), с августа 2019 по сентябрь 2023 г.

Ручей из КГ Моренный имеет околонулевую температуру воды в течение всего сезона стока, которая не превышает +0,5°С. Продолжительность стока в 2020 г. составила 126 дней, что на 41 день меньше, чем продолжительность периода с положительными среднесуточными температурами воздуха.

Ручей с КГ Тимофеева характеризуется температурой воды около +1°С. Логгер установлен на расстоянии нескольких десятков метров от фронтального уступа, что позволяет воде нагреться. Температура воды у ее выхода из тела каменного глетчера оставляет 0°С.

Ход электропроводности воды ручьев КГ

С октября 2022 по сентябрь 2023 г. одновременно с температурой воды велись наблюдения за электропроводностью воды руч. Главный КГ Городецкого (рис. 3), которая является прокси для минерализации воды. Ход электропроводности обратно пропорционален изменениям температуры воды. Электропроводность медленно возрастает при зимнем понижении температуры воды и имеет максимальные значения в мае и июне, когда сток ручья, по-видимому, минимален. Минимальные значения электропроводности наблюдаются летом, со второй половины июня по сентябрь, что совпадает с многоводным сезоном при таянии снежников и ледников. Размах колебаний электропроводности крайне незначителен, от 47 до 67 См/м, что может говорить о существенной емкости подземных вод КГ.

Химический состав исследуемых природных вод

С июня по сентябрь 2023 г. было отобрано 90 проб воды. Химический состав анализировался совместно с результатами, полученными в 2019 и 2021 гг. В августе

2019 г. было отобрано 19 проб, в июле 2021 г. – 55 проб воды атмосферных осадков, ручьев, стекающих с каменных глетчеров, выходов подземных вод, снега, льда ледника и двух рек в бассейне р. Озерная. Все воды относятся к ультрапресным с минерализацией от 4,7 до 187 мг/л (рис. 4). К наиболее минерализованным относятся воды некоторых ручьев (> 124 мг/л), а также ручья, вытекающего из КГ Моренный (108–121 мг/л), воды озера (116 мг/л) и родники (84–126 мг/л). Самыми разбавленными являются воды ручьев с ледниковым питанием (12–57 мг/л), жидких осадков (20–40 мг/л), снега (4,7–17 мг/л) и льда ледника (7,7–20,7 мг/л). Воды ручьев, стекающих с разных каменных глетчеров, отличаются характерными значениями общей минерализации: 63–90 мг/л для КГ Городецкого, 108–124 мг/л для КГ Моренного и 103–130 мг/л для КГ Тимофеева. Две пробы воды из руч. КГ Арчалы наиболее минерализованы среди ручьев КГ – 123 и 142 мг/л.

Рис. 3 Ход электропроводности воды руч. Главный КГ Городецкого

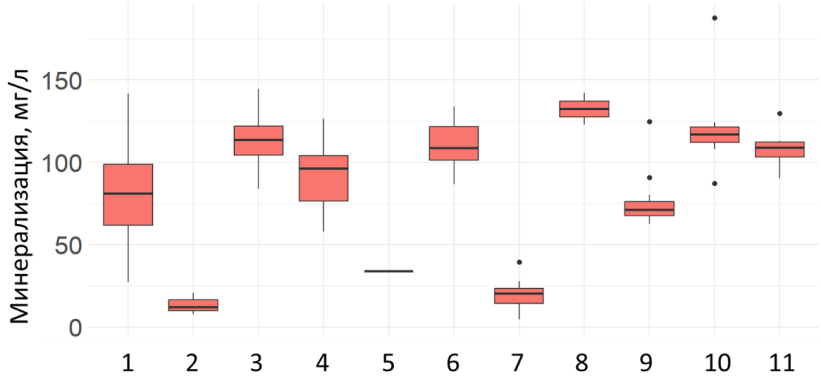


Рис. 4 Диаграммы размаха значений общей минерализации воды, мг/л, сгруппированные по типам опробованных природных вод: 1 – ручьи, 2 – ледник, 3 – источники подземных вод, 4 – р. Кысыл-Сай, 5 – озеро, 6 – р. Озерная, 7 – атмосферные осадки, 8 – руч. КГ Арчалы, 9 – руч. КГ Городецкого, 10 – руч. КГ Моренный, 11 – руч. КГ Тимофеева

Все опробованные воды относятся к гидрокарбонатно-кальциевым (по классификации О.А. Алекина), кроме одной пробы осадков и двух проб снега, которые относятся к гидрокарбонатно-натриевым водам.

Доля ионов магния относительно понижена в ручьях с КГ Моренный (5–17%), повышена в ручьях с КГ Тимофеева (14–59%) и имеет средние значения в ручьях с КГ Городецкого (11–31%). Доля ионов магния понижена в водах р. Озерная выше впадения в БАО (11–26%) и повышена в верховьях р. Озерная выше контакта с КГ Городецкого (22–38%).

Доля сульфат-ионов в ручьях с КГ Городецкого выше (5–10%), чем в ручьях с КГ Моренного (2–6%).

На диаграмме рассеивания концентраций ионов магния и кальция (рис. 5) видно, что пробы некоторых типов природных вод группируются, что говорит об их стабильном химическом составе в течение 2019, 2021 и 2023 гг. Наиболее тесные группы образуют пробы атмосферных осадков, ручьев КГ Городецкого, ручья КГ Моренного и источников подземных вод.

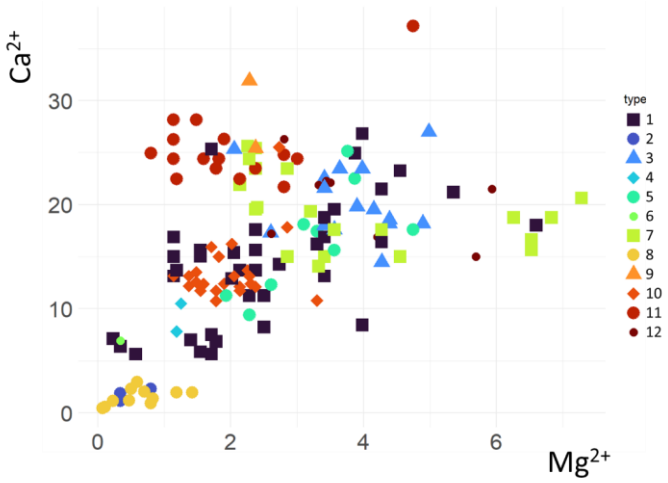


Рис. 5 Диаграммы рассеивания концентраций ионов магния и кальция, мг/л: 1 – ручьи, 2 – ледник, 3 – источники подземных вод, 4 – р. Кищи Алматы, 5 – р. Кысыл-Сай, 6 – озеро, 7 – р. Озерная, 8 – атмосферные осадки, 9 – руч. КГ Арчалы, 10 – руч. КГ Городецкого, 11 – руч. КГ Моренный, 12 – руч. КГ Тимофеева

Водородный показатель отобранных проб составляет от 5 до 8 (рис. 6), то есть исследуемые воды имеют слабокислую, нейтральную и слабощелочную реакцию. Слабокислой и нейтральной реакцией с pH ниже 7 обладают воды атмосферных осадков (pH 5–7), а также расплавы ледникового льда (pH 6,4–6,6) и ручьи, стекающие непосредственно со снежников и ледников. К слабощелочным водам (pH> 7.5) относятся семь проб, все из них отобраны из ручьев КГ в августе. Ручьи КГ, как правило, имеют pH выше 7 в течение всего теплого сезона, за исключением поздней осени. Также повышенным водородным показателем характеризуются воды рек и ручьев в июле и августе, что может говорить о бóльшем вкладе ручьев КГ в их питании в это время.

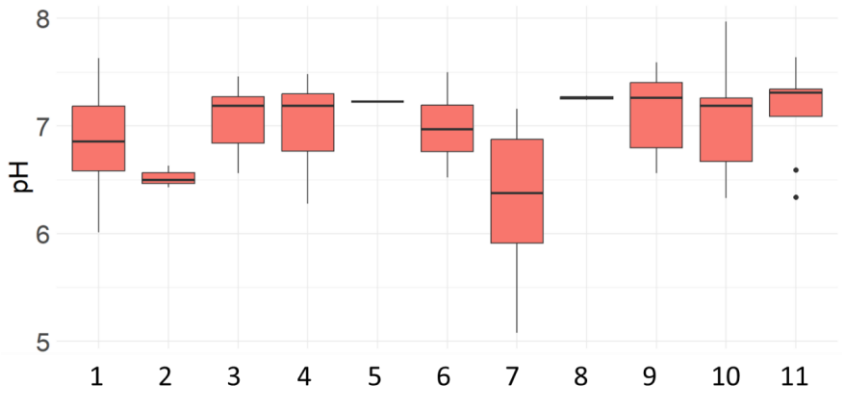


Рис. 6 Диаграммы размаха значений водородного показателя воды, сгруппированные по типам опробованных природных вод: 1 – ручьи, 2 – ледник, 3 – источники подземных вод, 4 – р. Кысыл-Сай, 5 – озеро, 6 – р. Озерная, 7 – атмосферные осадки, 8 – руч. КГ Арчалы, 9 – руч. КГ Городецкого, 10 – руч. КГ Моренный, 11 – руч. КГ Тимофеева

Сезонный ход минерализации и водородного показателя воды рек и ручьев КГ

Отобранные в течение 2023 г. пробы в устье р. Озерная (на гидрологическом посту), в ее верховьях и притоках позволили проследить сезонную динамику общей минерализации и водородного показателя (рис. 7).

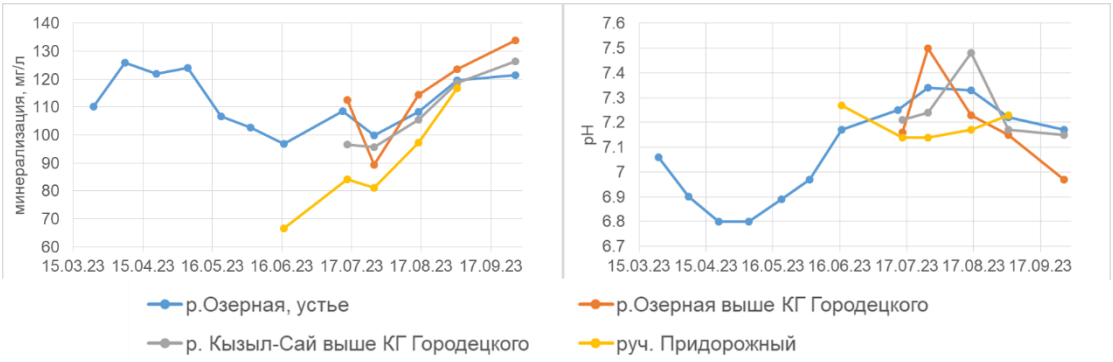


Рис. 7. Сезонный ход минерализации (слева)и водородного показателя (справа) воды р. Озерной и ее притоков

Оба показателя имеют выраженный сезонный ход. Общая минерализация воды р. Озерной в устье максимальна (до 126 мг/л) при минимальном стоке в апреле и начале мая и принимает пониженные значения (до 97 мг/л) в период повышенной водности с конца мая по август. В течение теплого сезона приток р. Озерная р. Кысыл-Сай имеет близкие к ней значения минерализации, а р. Озерная в верховьях (выше КГ Городецкого) на 5–10 мг/л более минерализована в августе-сентябре. Это говорит о том, что исток реки может формироваться относительно более минерализованными подземными водами, а вниз по течению происходит некоторое разбавление, то есть река питается менее минерализованными водами, в частности, ледниковых ручьев и водами ручьев КГ Городецкого. Малый приток р. Озерной руч. Придорожный, который преимущественно питается талыми ледниковыми водами, имеет пониженную минерализацию (до 66 мг/л) в июне-июле по сравнению с более крупными реками участка исследования, однако в начале сентября значения минерализации воды ручья приближаются к речным. В конце сентябре вода в русле ручья отсутствовала, тогда как сток ручьев КГ Городецкого, рек Озерная и Кысыл-Сай, источников подземных вод продолжался.

Водородный показатель воды р. Озерная в устье (на гидрологическом посту) в течение всего года нейтральный, при этом минимален в конце апреля и начале мая (pH 6,8) и максимален в конце июля и августе (pH 7,3). Отдельные пробы р. Озерной в верховьях и р. Кысыл-Сай в конце июля и августе относятся к слабощелочным (pH 7,5).

Сезонная динамика минерализации воды двух наиболее полноводных, в том числе одного неперемерзающего, из трех ручьев КГ Городецкого (рис. 8) отсутствовала в 2023 г. Значения варьировались от 64 до 80 мг/л. Минерализация воды руч. Правый КГ Городецкого была идентична им до конца августа, а в сентябре повысилась до 127 мг/л, что может говорить о частичном разобщении питающей емкости подземных вод КГ при понижении водности. Минерализация руч. КГ Моренный выше, чем ручьев КГ Городецкого на 15–50 мг/л. Минерализация руч. КГ Моренный повышается от минимальных значений в июне (87 мг/л) до максимальных значений в начале сентября (124 мг/л). К концу сентября руч. КГ Моренный пересох.

Сезонная динамика водородного показателя воды ручьев КГ согласуется друг с другом и с его изменением в реках исследуемой территории. pH несколько выше в ручьях КГ Городецкого по сравнению с руч. КГ Моренный. Максимальные значения наблюдаются в июле (до 7,5), минимальные – в конце сентября (6,7).

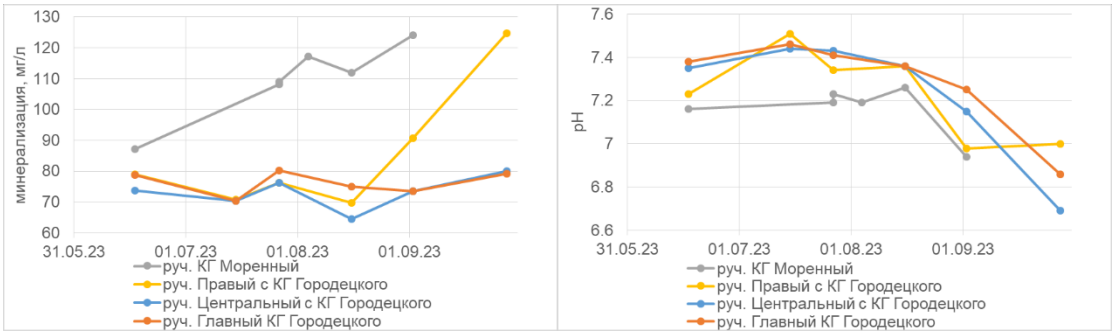


Рис. 8 Сезонный ход минерализации (слева) и водородного показателя (справа) воды ручьев с КГ Моренный и Городецкого

Обсуждение

О значительных различиях в льдистости КГ Городецкого, КГ Моренный и КГ Тимофеева и в распространении многолетнемерзлых пород свидетельствуют проведенные наблюдения за температурным режимом воды ручьев. Исследования в Австрийских Альпах показали, что существует прямая связь между температурой стока воды каменных глетчеров и его льдистостью. Температура воды ручья, вытекающего из активного высокольдистого каменного глетчера, не превышала 1°С, в то время как у неактивных, в которых лед практически вытаял, она была выше 1,7 °С [*Krainer, 2002, Krainer et al., 2007*]. Стабильно повышенные температуры ручьев КГ Городецкого также свидетельствуют об отсутствии многолетнемерзлых пород и существенных объемов многолетних подземных льдов в его краевых генерациях, что согласуется с результатами исследований А.А. Галанина с соавт. [*2017*] и A. Kaab с соавт. [*2021*]. Кроме этого, одним из косвенных показателей талого ложа краевой части служит наличие хорошей дренажной сети в теле каменного глетчера, которая проявляется наличием у фронтального откоса нескольких источников с большим расходом воды, один из которых не перемерзает в отдельные зимы. Это свидетельствует о значительных запасах подземных вод в теле каменного глетчера. Аккумуляции воды в теле каменных глетчеров при выпадении аномальных осадков может привести к последующему сбросу накопленной воды вместе с обломочным материалом в виде селевых потоков [*Wagner et al., 2020*]. Так, в 2015 и 2019 г. в верховьях р. Каргалы сформировались селевые потоки вследствие блокировки подземных каналов стока с оз. Безымянное в тыловой котловине каменного глетчера и последующего прорыва, что привело к подтоплению улиц, домов и автотранспорта г. Алматы [*Докукин и др., 2020*].

Малые расходы ручья КГ Моренный и его стабильно низкие температуры воды, наличие одного источника на всем протяжении фронтального уступа предполагают ограниченные запасы подземных вод в нем, наличие крупных блоков внутриглетчерных льдов и многолетнемерзлых пород, в отличие от КГ Городецкого. Кроме этого, проведенные в 2020 г. Н.В. Желтенковой и др. [*2020*] геофизические исследования методами ВЭЗ и ЗСБ в средней части КГ Моренный показали наличие высокоомных и высокополяризуемых пород с мощностью от 7 до 18 м, что свидетельствует о высокой льдистости этих горизонтов.

Различное соотношение основных ионов в химическом составе воды ручьев, стекающих с каменных глетчеров, говорит о различных источниках их питания, различиях в химическом составе вмещающих пород и времени взаимодействия воды с породами, что также связано с отличительными особенностями строения, льдистости и динамики.

Отобранные пробы природных вод в бассейне р. Озерная не позволяют однозначно судить о вкладе вытаивающих подземных льдов каменных глетчеров в сток воды, однако характерный химический состав ручьев, стекающих с каждого каменного глетчера и их температурный режим позволяют сделать вывод о трансформации стока за счет влияния

каменного глетчера. Трансформация стока выражается в отсутствии суточных колебаний уровня и температуры воды, а также в повышенной общей минерализации воды по сравнению с ручьями, где преобладает ледниковое питание. Обладая более или менее значительными запасами подземных вод, каменные глетчеры могут играть важную роль в поддержании речного стока. Так, 25 и 26 июля 2021 г. суммарные расходы ручьев КГ Городецкого составляли 12.5 и 13.4% от стока р. Улкен Алматы (р. Озерная) на гидропосте «в 1,1 км выше оз. Улкен Алматы». В августе 2023 г., предположительно, вклад ручьев КГ составил даже больше, чем в июле 2021 г. – около 20%, а в конце сентябре – 9%.

Заключение

Каменные глетчеры оказывают существенное влияние на водный режим, температуру и химический состав водотоков, формирующихся выходами воды из них. Они отличаются практически полным отсутствием внутрисуточных колебаний уровня, температуры и удельной электропроводности воды, которые ярко выражены в летний период у рек и ручьев с ледниковым питанием. Некоторые выходы воды из КГ Городецкого не перемерзают зимой, что говорит о значительных запасах подземных вод в его теле. Воды каждого из трех изученных каменных глетчеров отличаются характерной минерализацией, температурой и соотношением основных ионов. Стабильный сток с каменных глетчеров может играть важную роль в поддержании речного стока.

Благодарность

Работа выполнялась за счет проекта НИОКТР122012400106-7 «Подземные воды криолитозоны: закономерности формирования и режима, особенности взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами, перспективы использования», проекта НИОКТР122011800064-9 «Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене» и при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках гранта ИРН BR18574176 «Ледниковые системы трансграничных бассейнов Центральной Азии: состояние, современные и прогнозные изменения, роль в обеспечении водной безопасности стран региона».

Список литературы

Вилесов Е.Н., Горбунов А.П., Морозова В.Н., Северский Э.В. Деградация оледенения и криогенез на современных моренах Северного Тянь-Шаня // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 1. С. 69–73.

Галанин А.А. Каменные глетчеры северо-востока Азии: картографирование и географический анализ // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 49–61.

Галанин А.А., Оленченко В.В., Христофоров И.И., Северский Э.В., Галанина А.А. Высокодинамичные каменные глетчеры Тянь-Шаня // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 4. С. 58–74. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(58-74)

Горбунов А.П. Каменные глетчеры азиатской России // Криосфера Земли. 2006. т. X. № 1. С. 22–28.

Горбунов А.П., Горбунова И.А. География каменных глетчеров мира. М.: Т-во научных изданий КМК, 2010. 131 с.

Горбунов А.П., Железняк М.Н., Северский Э.В. Оценка объемов подземных льдов в горной системе Тянь-Шаня // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 6. С. 35–44.

Горбунов А.П., Северский Э.В. Скорости движения и деформации каменных глетчеров // Криосфера Земли. 2010.Т. XIV. № 1. С. 69–75.

Горбунов А.П., Северский Э.В., Титков С.Н. Геокриологические условия Тянь-Шаня и Памира. Якутск, изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1996. 194с.

Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Каменные глетчеры — очаги формирования катастрофических селей // ГеоРиск. 2020. Т. XIV, № 2, с. 52–65

Жданович А.Р. Большое Алматинское озеро и сейсмо-деструкционно-вбросовая гипотеза его формирования // Известия НАН РК. Серия геологическая. 2003, № 6, с. 94–108.

Желтенкова Н.В., Гагарин В.Е., Кошурников А.В., Набиев И.А. Режимные геокриологические наблюдения на высокогорных перевалах Тянь-Шаня // Арктика и Антарктика. 2020. № 3. С. 25–43.

Куликовский К.Т. О происхождении горных озер в бассейнах рек Иссык и Большой Алматинки и их селезащитной роли // Материалы по геологии и полезным ископаемым. Вып. 4 (29). Алма-Ата, изд-во «Наука» КазССР. 1971, с. 259–271.

Марченко С.С. Криолитозона Северного Тянь-Шаня: прошлое, настоящее, будущее. Якутск: ИМЗ СО РАН. 2003. 106 с.

Медеу А.Р., Пиманкин А.В., Гонтарь М.И., Пиманкина Н.В. Предварительные результаты геофизического исследования каменного глетчера Моренный // География и водные ресурсы. 2021. № 4. С. 5–9.

Пальгов Н.Н. Наблюдения над движением одного из каменных глетчеров хребта Джунгарского Алатау // Изв. АН КазССР. Серия геологическая. 1957. 2. С.195–207.

Bolch T., Marchenko S. Significance of Glaciers, Rockglaciers, and Ice-Rich Permafrost in the Northern Tien Shan as Water Towers under Climate Change Conditions // Proceedings of Workshop ‘Assessment of Snow, Glacier and Water Resources in Asia, Almaty, Kazakhstan, 28–30 November 2006, IHP-HWRP: Koblentz, Germany, 2009. pp. 199–211.

Brighenti S., Tolotti M., Bruno M.C., Wharton G., Pusch M.T., Bertoldi W. Ecosystem shifts in Alpine streams under glacier retreat and rock glacier thaw: A review // Sci. Total Environ. 2019. 675. P. 542–559.

Corte A. Rock glaciers // Biuletin Periglacjalny. 1976. № 26. P. 125–127

Gorbunov, A. P., Titkov, S. N., Polyakov, V. G. Dynamics of rock glaciers of the Northern Tien Shan and the Djungar Ala Tau, Kazakhstan. Permafrost Periglac. 1992. 3. P. 29–39.

Jones D., Harrison S., Anderson K., Shannon S., Betts R. Rock glaciers represent hidden water stores in the Himalaya // Sci. Total Environ. 2021. 793. 145368.

Jones D.B., Harrison S., Anderson K., Whalley W. B. Rock glaciers and mountain hydrology: A review // Earth-Science Rev. 2019. 193. P. 66–90.

Kääb A., Strozzi T., Bolch T., Caduff R., Trefall H., Stoffel M., Kokarev A. Inventory and changes of rock glacier creep speeds in Ile Alatau and Kungöy Ala-Too, northern Tien Shan, since the 1950s // The Cryosphere. 2021. 15. P. 927–949.

Kenner R., Pruessner L., Beutel J., Limpach P., Phillips M. How rock glacier hydrology, deformation velocities and ground temperatures interact: Examples from the Swiss Alps // Permafrost and Periglac. Process. 2020. 31. P. 3–14.

Krainer K. Hydrology of active rock glaciers: examples from the Austrian Alps // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2002. 34 (2). P. 142–149.

Krainer K., Mostler W., Spötl C. Discharge from active rock glaciers, Austrian Alps: a stable isotope approach // Austrian Journal of Earth Sciences. 2007. 100. P. 102–112.

Millar, C. I., & Westfall, R. D. (). Geographic, hydrological, and climatic significance of rock glaciers in the Great Basin, USA // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2019. 51(1). P. 232–249.

Schaffer, N., MacDonell, S., Réveillet, M. et al. Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes // Reg Environ Change. 2019. 19. 1263–1279.

Shahgedanova M., Afzal M., Hagg W., Kapitsa V., Kasatkin N., Mayr E., Rybak O., Saidaliyeva Z., Severskiy I., Usmanova Z., Wade A., Yaitskaya N., Zhumabayev D. Emptying water towers? Impacts of future climate and glacier change on river discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia // Water. 2020. 12 (3). 627.

Wagner T., Brodacz A., Krainer K., Winkler G. Active rock glaciers as shallow groundwater reservoirs, Austrian Alps // Grundwasser 2020. 25. P. 215–230.

Hazard potential change for rain-induced debris flow in silty clay mudstone environment after large earthquake and continuous rainfall sediment deposit

B.-S. Lin, H.-C. Hsu, W.-Y. Chiu, F.Y. Kuo

Feng-Chia University, Taichung, Taiwan, China, maggiehsu111@gmail.com

Abstract. Due to strong earthquake (M6.8) and heavy rainfall in Southeast Taiwan, Silty clay mudstone area which has been already delineated as debris flow potential area is strongly affected by continues repeat sediment deposit, which changes the landscape that might cause future secondary sediment disaster. Therefore, by the use of InSAR and LIDAR result for finding vulnerability analysis for slope loosen sediments downward a large-scale potential landslide area which form debris flow and conduct FLO2D simulation model and field investigation result, dividing site area into different analysis unit for debris flow impact potential, and finally giving different mitigation treatment suggestions, including no measures are being selected for setting the best benefit analysis under risk assessment.

Key words: *earthquake, secondary sediment disaster, InSAR, FLO2D, large scale potential landslide, risk assessment*

Cite this article: Lin B.-S., Hsu H.-C., Chiu W.-Y., Kuo F.Y. Hazard potential change for rain-induced debris flow in silty clay mudstone environment after large earthquake and continuous rainfall sediment deposit. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 285–301.

Изменение опасности селевых потоков дождевого генезиса, формирующихся в алеврито-глинистых отложениях после сильного землетрясения и продолжительных осадков

Б.-Ш. Линь, Х.-Ч. Хсу, В.-Ю. Чиу, Ф.-И. Ко

Университет Фэн Чиа, Тайчжун, Тайвань, Китай, maggiehsu111@gmail.com

Аннотация. Из-за сильного землетрясения (M6.8) и проливных дождей в юго-восточной части Тайваня территория, где развиты алеврито-глинистые отложения и которая ранее уже была отнесена к потенциально опасной с точки зрения селеформирования, сильно пострадала. Здесь, в частности, накопились большие объемы рыхлого материала, что в будущем может привести к чрезвычайным ситуациям в случае выпадения обильных осадков. В работе для оценки селевой опасности были использованы результаты анализа данных InSAR, LIDAR, моделирования в программе FLO2D и полевых исследований.

Ключевые слова: *землетрясение, вторичная катастрофа, InSAR, FLO2D, потенциальный крупномасштабный оползень, оценка риска*

Ссылка для цитирования: Линь Б.-Ш., Хсу Х.-Ч., Чиу В.-Ю., Ко Ф.-И. Изменение опасности селевых потоков дождевого генезиса, формирующихся в алеврито-глинистых отложениях после сильного землетрясения и продолжительных осадков. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 285–301.

Introduction

Large scale potential landslide mitigation and monitoring has been an important job for Taiwan slope management for recent years. East part of Taiwan, the geology of Hai-An Mountain basis of silty clay, therefore, underground water and surface runoff play an important role for these landslide potential areas. Thus, due to continuous sediment transport and deposit, it has not been noticed that, the riverbed slope and deposit depth has great changes without notice. This study conducts the method of surface survey and continues monitoring result behavior compare to modify a debris flow event due to accumulate sediment deposit and slope changes which will seriously change the risk potential of exist disaster prevention management benchmark value for site future safety.

Materials and methods

In this study, the usage of monitoring device such as rain gauge system, water pressure meter surface tilt meter, bore hole tilt meter, airborne UAV image DSM, site survey, InSAR satellite images and from the usage of monitoring statistic result help analysis the slope mass movement detail for landslide potential areas to find out where the movement is taking place and how rapid it is moving and how the recent slope bed sediment deposit effect the formation of debris flow and downstream region. And by calculating the time interval to establish the small area shallow potential landslide prevention work.

Site review and survey

From 2018, the monitor site in southeast Hualien County silty clay landslide potential area has been set (Fig. 1). Therefore, by monitoring the surface movement and underground water and bore hole displacement, establish the area disaster prevention management mechanism.

In this study, the usage of monitoring device such as rain gauge system, water pressure meter surface tilt meter, bore hole tilt meter, airborne UAV image DSM, site survey, InSAR satellite images and from the usage of monitoring statistic result help analysis the slope mass movement detail for landslide potential areas to find out where the movement is taking place and how rapid it is moving and how the recent slope bed sediment deposit effect the formation of debris flow and downstream region. And by calculating the time interval to establish the small area shallow potential landslide prevention work.

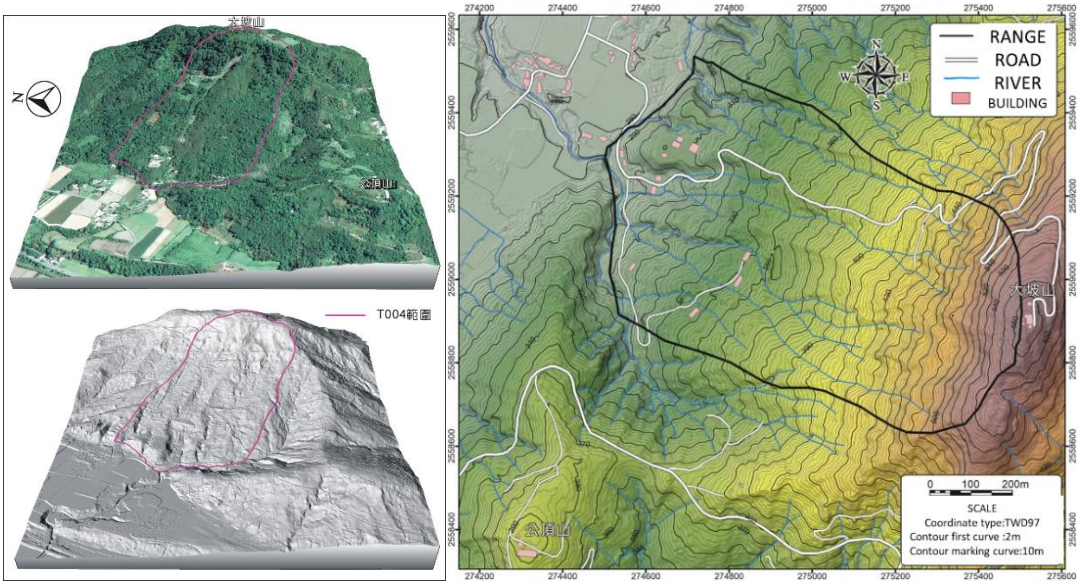


Fig. 1. 3D topographic map of Lixiang T004 (Dian-Tai Mountain) large-scale landslide potential area and terrain

Topography and geology

Terrain

The Dian-Tai Mountain research scope is located in Funan Village, Fuli Township, Hualien County, and belongs to the northwest slope of Dapo Mountain in the Dapo River basin, a tributary of the right bank of the Xiuguluan River. The topography of the T004 (Dian-Tai Mountain) landslide potential area is shown in Fig. 2. The 3D terrain simulation is as shown in Fig. 2. The overall terrain is with Dapo Mountain (elevation 573) on the southeast side of the site area as the highest point. The terrain from the head of the site area to Dapo Mountain is relatively steep, mostly grade 6 or 7 slopes. The slope starts from the southeast side of the site area. It slowly drops to the northwest to the Huadong Longitudinal Valley Plain area and near Highway Line 9. The main slopes are mostly third- and fourth-level slopes, and the terrain is steeper in local gully erosion areas.

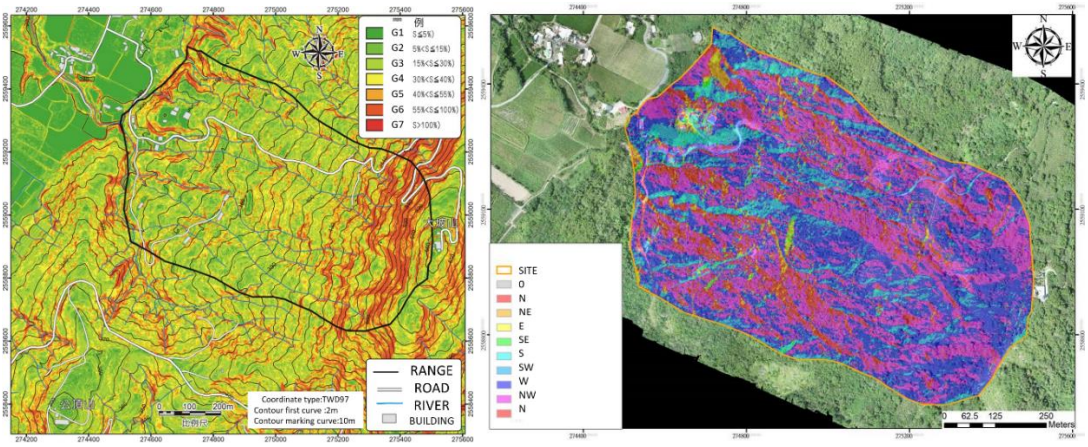


Fig. 2. Slope grading and aspect

Regional geology

Fuli Township T004 (Dian-Tai Mountain) large-scale landslide potential area is located in the area slightly south of the Coast Mountains. It belongs to the Coast Mountains geological area. The strata distributed in the surrounding areas are mainly the Fanshuliao Formation, Liji Formation, terrace accumulation layer and alluvial layer. etc. The geological structures are mainly Chishang Fault and Yongfeng Fault. The regional geological map is shown in Fig. 3.

The scope of this research is mainly located on the Liji layer. The Liji Formation is mainly composed of blue-gray or gray-black mudstone, which contains various sedimentary rock blocks and ophiolite blocks. The lithology of the sedimentary rock mass is similar to that of the Fanshuliao Formation. These quartzite greywacke blocks may have originally been deposited in sediments at the continental margin. In summary, the Ligi Formation was originally a mixed layer in front of the island arc. Later, the collision between the volcanic island arc and the continent caused the deformation and rupture of the sedimentary layers on the continental margin to form the Ligi Mixed Formation. Its shape, organization and content were all affected by later changes. Strata that have been severely damaged or even changed due to tectonic movements.

The geological structure is located between the Chishang Fault (Huadong Longitudinal Valley Fault) and the Yongfeng Fault. The Chishang Fault is a northeast-southwest trending left-moving reverse fault, which belongs to the first type of active fault announced by the Central Geological Survey. This fault is located on the west side of the site, only about 120 meters from the nearest edge of the site area. The Chishang Fault extends from the southeastern area of Ruisui to the south-southwest to the southeast of Chishang. The fault surface presents an eastward inclined surface with a steep upward slope and a gentle downward

slope, with an inclination of about 60 degrees close to the surface. It turns to be nearly horizontal at a depth of about 25–30 kilometers. The hanging wall of the fault is a Liji mixed layer hundreds of meters to several kilometers wide, thrust overlying the late Pleistocene conglomerate or Holocene gravel layer. The Yongfeng Fault is located on the east side of the research scope, about 810 meters away from the nearest point of the research scope. To the east of the Yongfeng Fault is the distribution range of the Fanshuliao Formation.

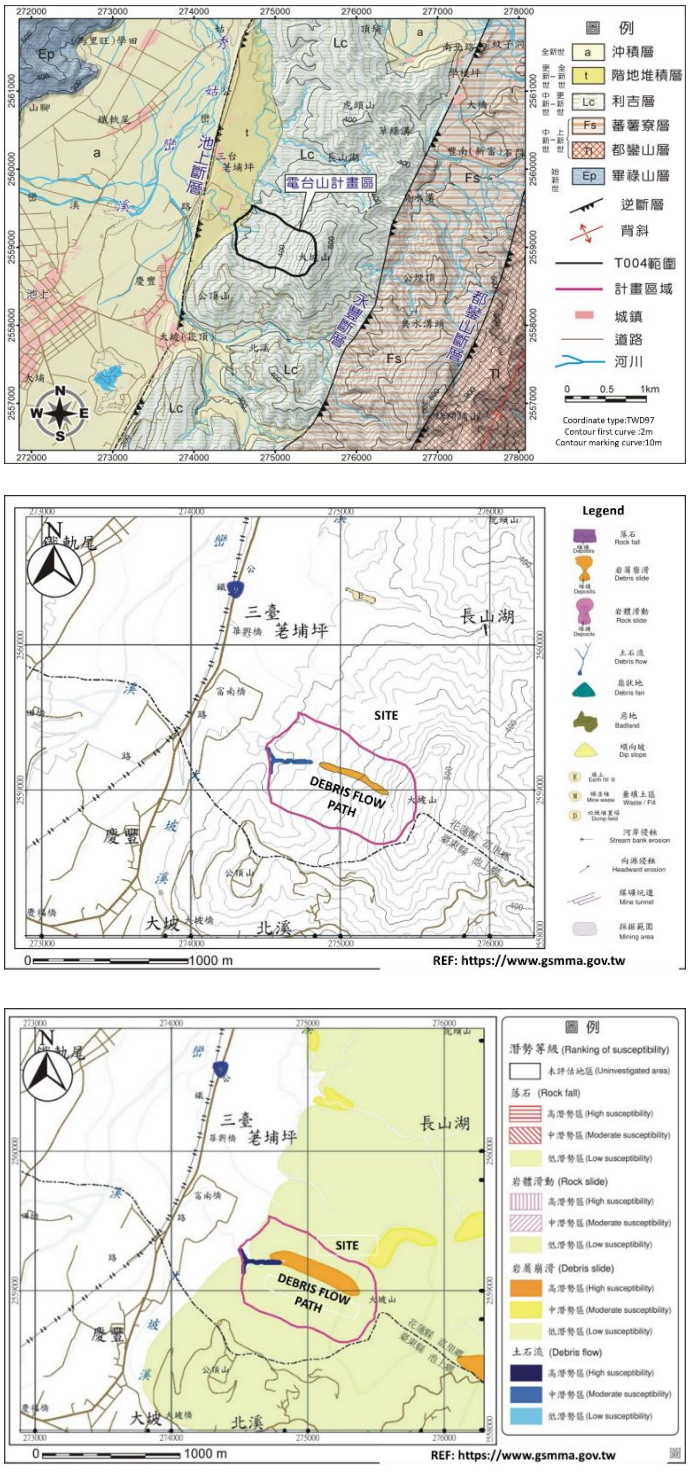


Fig. 3. Regional geological map and basic environmental geological map and geological hazard potential map of large-scale landslide potential areas

Environmental geology

According to the geologically sensitive area information announced by the Central Geological Survey, there is a geologically sensitive area for landslides and landslides within the Taidaishan site area. It is mainly located in the north-central part of the site area at an altitude of 335 to 470 meters. The overall appearance is as follows: It is long and narrow, covering an area of about 2.6 hectares. This geologically sensitive area is also located in the T004 large-scale collapse area. In addition, within the scope of this research, there is a stream with landslide potential numbered Huaxian DF055, which has high disaster potential The basic environmental geology map of the Geological Survey Institute of this region is shown in Fig. 3. It can be found that the aforementioned geologically sensitive area for landslides and ground slides was originally a debris avalanche disaster area. In terms of geological disaster potential, the geologically sensitive areas within the T004 large-scale collapse area belong to the high-scale landslide potential area of debris avalanche, while the remaining areas belong to the low-scale landslide potential area

Field investigation results

2018 survey

In 2018, the Soil and Water Conservation Bureau planned 7 geological boreholes from TH-1 to TH-7 in this area, with a total drilling depth of 300 m. The borehole layout and investigation purpose are shown in Fig. 4. In addition, the ground resistance detection includes 4 measuring lines such as H1~H4. The length of the measuring lines ranges from 200 m to 450 m, and the total length of the measuring lines is 1150 m. Drilling results show that the lithology within the site area is mainly blue-gray or gray-black mudstone, mixed with a large number of brecciated rock blocks. The composition of the rock blocks can be seen as tuffaceous sandstone, hard shale, andesitic clastic rock and ophiolite [*CGS, 2018; SWCB, 2018*]. Its heterogeneous rock blocks, with particle sizes ranging from several centimeters to several meters, are relatively fragmented due to strong shearing. Excerpts of borehole configuration and geological profile results are shown in Fig. 4.

2022 survey

The base surface is composed of lithic layer and Liji layer mudstone intercalated with exotic rock blocks and thick layers of exotic sandstone blocks. This thick layer of sandstone blocks is mainly located on the east side of the site area, and the sandstone blocks have relatively poor erosion resistance. The mudstone is high, and towering independent mountain tops are formed due to differential erosion.

According to the core analysis of drilling in 2018, the thickness of the debris layer in the large-scale landslide potential area ranges from 17.4 meters to a maximum depth of more than 40 meters. It is mainly composed of colluvial gravel and broken rock layers. The gravel composition is composed of igneous rock blocks, mainly sandstone blocks and mudstone blocks. Since the mudstone of the Liji Formation has no bedding and the surface is composed of lithic layers, there is no bedding position data within the scope of this research. According to the surface geological survey and drilling results of the large-scale landslide potential area, it is shown that the scope of this research should be an old large-scale landslide potential area. It is speculated that it is a collapse in the debris layer, which is an arc-shaped sliding type. The area where it occurs (i.e., the head) is an independent hilltop composed of sandstone blocks located on the east side of the collapse area, and is determined to be the earliest location where the collapse occurred.

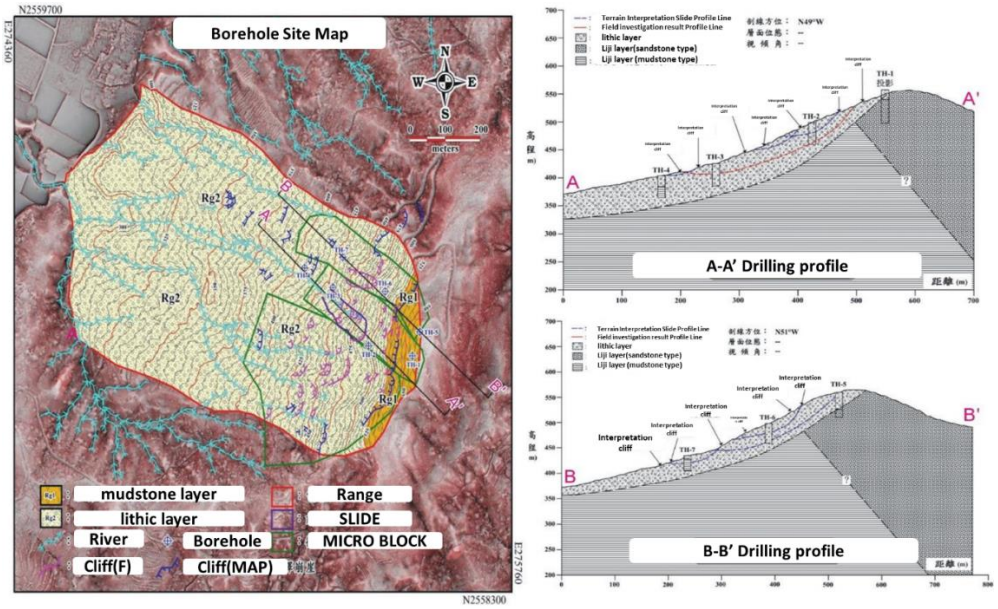


Fig. 4. Excerpts of the past-year geological survey results of T004

Geological plan and cross-section

With reference to the preliminary survey and geological exploration results, and in conjunction with the current stage surface geological survey and terrain analysis and other comprehensive research and judgment results, the geological plan and section of the Dian-Tai Mountain site area are drawn in Fig. 5. The rock plate in the large-scale landslide potential area is mainly composed of the Liji layer. According to different lithology, it is divided into Liji layer mudstone (Ms), sandstone (Ss) and mudstone interspersed with sandstone layer (Ms/Ss). The slope surface Covered by colluvium (Cv), the flat terrain below the slope is distributed with terrace accumulation layers (t) (CGS, 2018: 2013), of each rock formation are explained as follows:

(A) Liji Formation Mudstone (Ms): The lithology is mainly blue-gray to gray-black mudstone, containing various sedimentary rock blocks and ophiolite blocks. It is mainly exposed at the toe of the slope in the site area. in a nearby ravine. In geological boreholes, it mainly appears in 2018 boreholes TH-3, TH-4 and TH-7.

(B) Sandstone (Ss): The lithology is layered sandstone, with layer thickness ranging from more than ten centimeters to dozens of centimeters. The lithology is still hard, but the surface is weathered and turns yellow-brown and its strength is reduced. According to the survey results of various outcrops on the surface, the positions of the sandstone layers are quite close and distributed throughout the ridge area, showing that they are rock layers with a certain volume. It is speculated that they are the Fanshuliao Formation rock blocks that fell into the Liji Formation during plate movement. In geological boreholes, it mainly appears in boreholes such as TH-1 and TH-5 in 107, and there are often shear weak zones in the cores.

(C) Mudstone interspersed with sandstone layer (Ss-Ms): The surface of this layer is not exposed and should be covered by vegetation. It is mainly derived from the inferences of geological drilling results such as TH-2 and TH-6. The lithology is composed of Liji layer mudstone and sandstone. The layers appear alternately, and the lithology is sheared and broken. It is speculated that it should belong to the transition zone between the mudstones of the Liji Formation and the sandstone blocks of the Fanshuliao Formation.

(D) Rock debris layer (Rg): Mainly composed of yellow-brown to gray sandy or silty soil, intercalated with sandstone or other lithological rock blocks. The structure is loose and messy, and it generally covers all slopes in the site area. On the surface. In geological boreholes, the thickness is usually less than ten meters. However, since the boreholes are mostly located

in the upper half of the slope, it is inferred from the terrain characteristics that the thickness of the colluvium layer in the lower half of the slope should increase.

(E) Terrace accumulation layer (t): It is a flat area distributed under the slope. There are currently no outcrops and drilling data. It is speculated that it should be composed of unconsolidated gravel, sand, mud, etc., and its thickness is unknown.

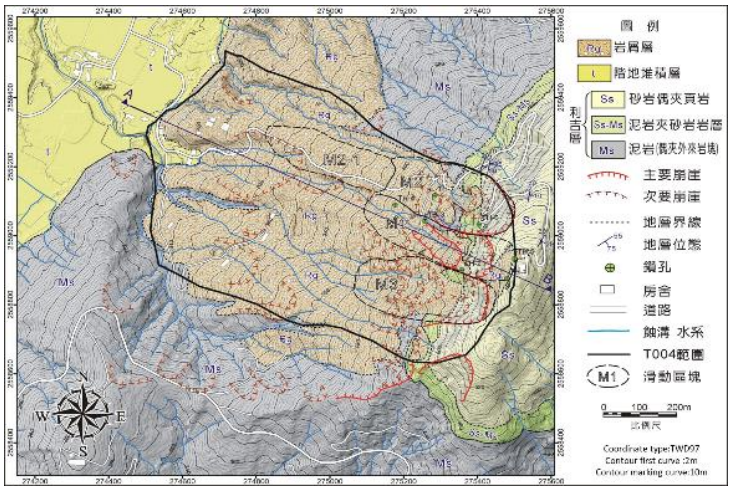


Fig. 5. Geological plan and Geological profile of T004 (6) Investigation of surface fissures

Investigation results of surface fissures

The surface fissure investigation mainly focuses on the investigation of cracks, deformation and damage phenomena on the surface and structures within the research scope. Cracks on the ground surface and structures can directly reflect the stability of slopes and are important items in the investigation and analysis of large-scale landslide potential areas. However, there are many reasons for the occurrence of fissures, which must be carefully filtered and analyzed to clarify their causes and provide effective data for the study and judgment of the activity of large-scale landslide potential areas. However, cracks in the surface and structures may be caused by various factors and are not necessarily related to landslides or collapse damage. Cracks may occur due to local topographic factors, structural defects caused by poor engineering quality, inadequate backfilling, insufficient thickness of concrete pavement, etc., as well as the rolling pressure of heavy vehicles or large machinery. These fissures are sometimes difficult to distinguish from fissures caused by stratigraphic sliding. It is necessary to conduct comprehensive research and judgment based on the distribution of surrounding fissures, geological topography, environmental factors, etc., in order to obtain more accurate results. In addition, because these cracks generally only appear on rigid surfaces such as man-made surfaces, pavements, or structures, and are difficult to form or easy to heal quickly on natural soil surfaces, their distribution locations are only for reference.

The survey results and on-site photos of surface fissures in the Dian-Tai Mountain site area last year (2023) are shown in Fig. 6. It can be found from the survey results that surface cracks are mainly located on the connecting roads leading to the top of the slope, mostly in the form of road cracks, and cracks also occur in local retaining walls. The distribution of cracks is mainly concentrated on the road pavement in the middle section of the slope. The types are mainly longitudinal cracks and irregular cracks. Damage to drainage ditches can also be seen in local areas (Fig. 6); damage to retaining walls is mainly concentrated in the location of area B in Fig. 7. Although there are many cracks in the remaining areas of this survey area, such as the road surface near the top of the slope and around the radio station, and the farm road near the toe of the slope, they should be related to the construction quality or local terrain, rather than caused by ground slippage.

Generally speaking, surface fissures in the Dian-Tai Mountain site area are mostly distributed near the middle section of the slope, and are less likely to occur in the sandstone layer area on the top of the slope. The reason may be that these cracks are mostly caused by shallow sliding, so they mostly occur in the colluvium accumulation area in the middle section of the slope.

Other surface damage phenomena

During this year's on-site investigation, a newly generated debris avalanche was discovered on the road slope near the boundary of the T004 large-scale landslide potential area. The failure pattern was arc-shaped sliding, with the collapse area being about 0.1 hectares and the sliding depth Within 3 meters, there is shallow damage (photos *a*, *b*, *c* in Fig. 7). After the collapse, a loose debris layer is exposed. The cause of the collapse is speculated to be poor geological conditions, steep terrain, and slope failure after heavy rain. There is a road passing above the collapse site (photo *d* in Fig. 7). No obvious abnormality was found in the investigation results, indicating that the collapse is a local damage phenomenon and the scope of impact has not yet extended to surrounding areas.

An erosion trough developed below the M1 collapse area, extending roughly along the center of the survey area. Earth-rock flows occurred in the early days, but currently only the main erosion gully, which is about 2 to 3 meters wide and 1 to 2 meters deep, remains, and much of the erosion gully has been covered with vegetation (photos *e* and *f* in Fig. 7). Since the slope surface is a loose rock debris layer that is easily affected by erosion, continued attention should be paid to the subsequent development of this erosion gully

Changes in surface behavior

The preliminary plan was to investigate surface fissures in the area in March 2018, and then conduct a supplementary investigation in October of the same year, mainly to examine the changes in surface damage in the investigation area after the 918 earthquakes. The investigation results found that the new damage on the surface after the earthquake was mainly distributed in the middle section of the slope, that is, the original crack-intensive area. Most of the damage was the expansion of the original pavement cracks, and there were also new cracks on the local pavement. As for the cracks in the existing retaining wall, the visual changes are not obvious. There is no obvious damage near the top of the remaining slopes, and the newly built retaining wall above the collapse area has no abnormal appearance.

A surface fissure survey was conducted in early March of this year (2012), and it was found that the survey points had little change compared with the situation in October 2011. This may be because no major natural disasters occurred during this period. This year's rainy season saw many typhoons hitting eastern Taiwan, bringing abundant rainfall. The survey was conducted again in mid-October and found that there was little difference between the survey results at each survey point and the survey results in March, indicating that this year's heavy rain had little impact on the changes in surface fissures in this region. In addition, since 2011, some pavements and retaining walls have been gradually re-paved and constructed, so many cracks no longer exist. Since this year, no new cracks have been seen in the newly paved roads.

Fig. 7 shows the results of the investigation of fissure changes in this area from October 2011 to October 2020. The description is as follows:

1. There are no obvious changes in the existing cracks in the road surface in the middle and lower sections of the slope (photos *a* and *b* in Fig. 7). After repairing part of the road surface damaged by the earthquake, there were no new cracks in the filled areas (photo *c* in Fig. 7.
2. There is no obvious change in the cracks in the road retaining wall in the middle section of the slope (photos *d* and *e* in Fig. 7). Some of the damaged retaining walls in this section have been repaired and rebuilt, and no cracks are found in the new retaining walls.
3. The road pavement in the middle section of the slope was originally an area with developed cracks. The pavement was re-paved in mid-2011, but new cracks were

discovered during the investigation in October 2011. During the survey in March of this year (2012), it was found that the road surface had been re-paved. When the survey was carried out again in October, no new cracks were found in the road surface (Fig. 7, photos *f*, *g*).

4. The survey results of the road surface on the upper slope of the survey area showed no significant changes (photo *h* in Fig. 7); there was also no significant change in the road surface around the radio station on the top of the slope (photo *i* in Fig. 7).

5. There are no signs of damage or other abnormalities in the newly constructed retaining wall in the upper slope improvement research of the M1 sliding area, and the surrounding sliding soil is gradually revegetated (photo *j* in Fig. 7).

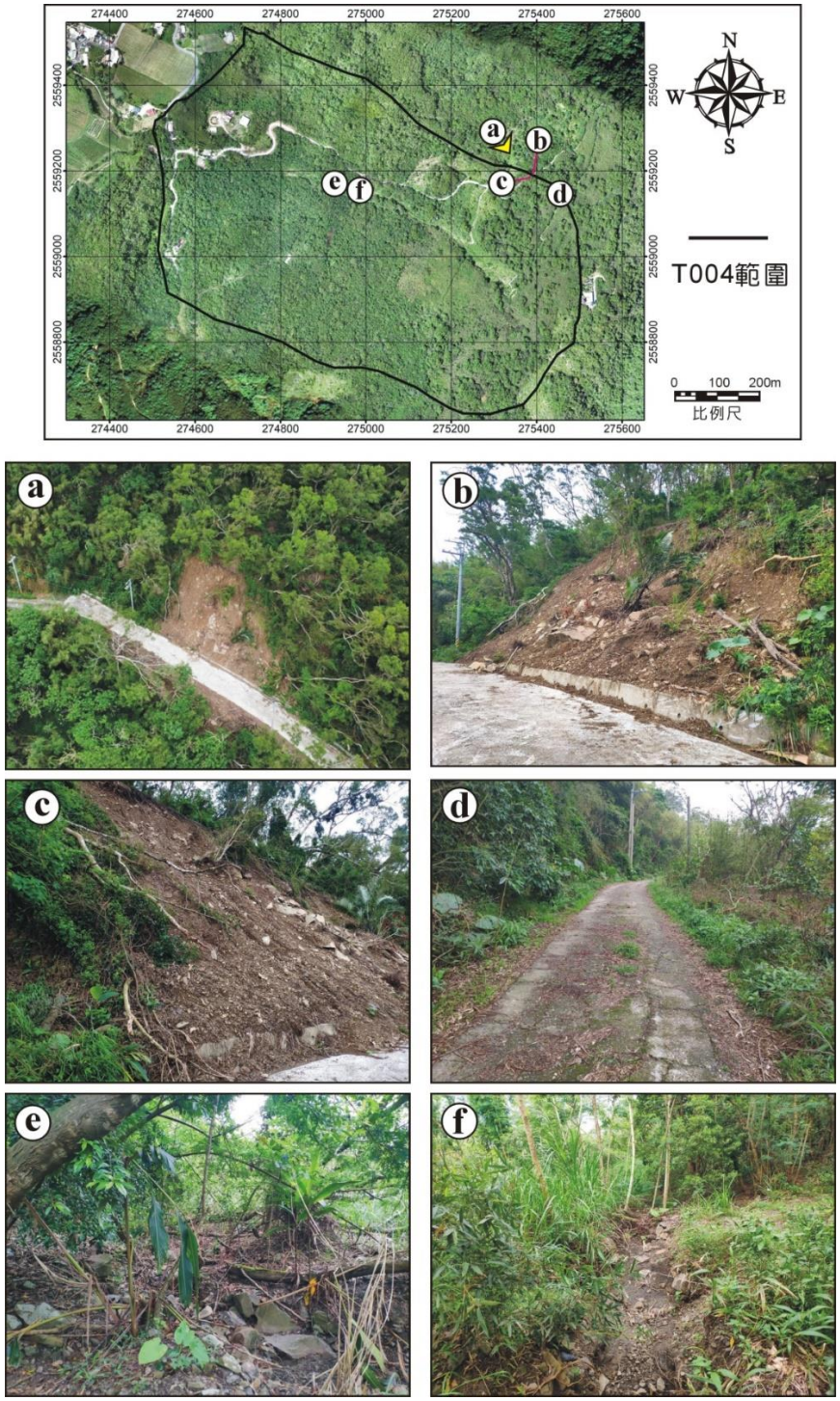


Fig. 6. Shallow damage and erosion in T004 (2023.10.15)

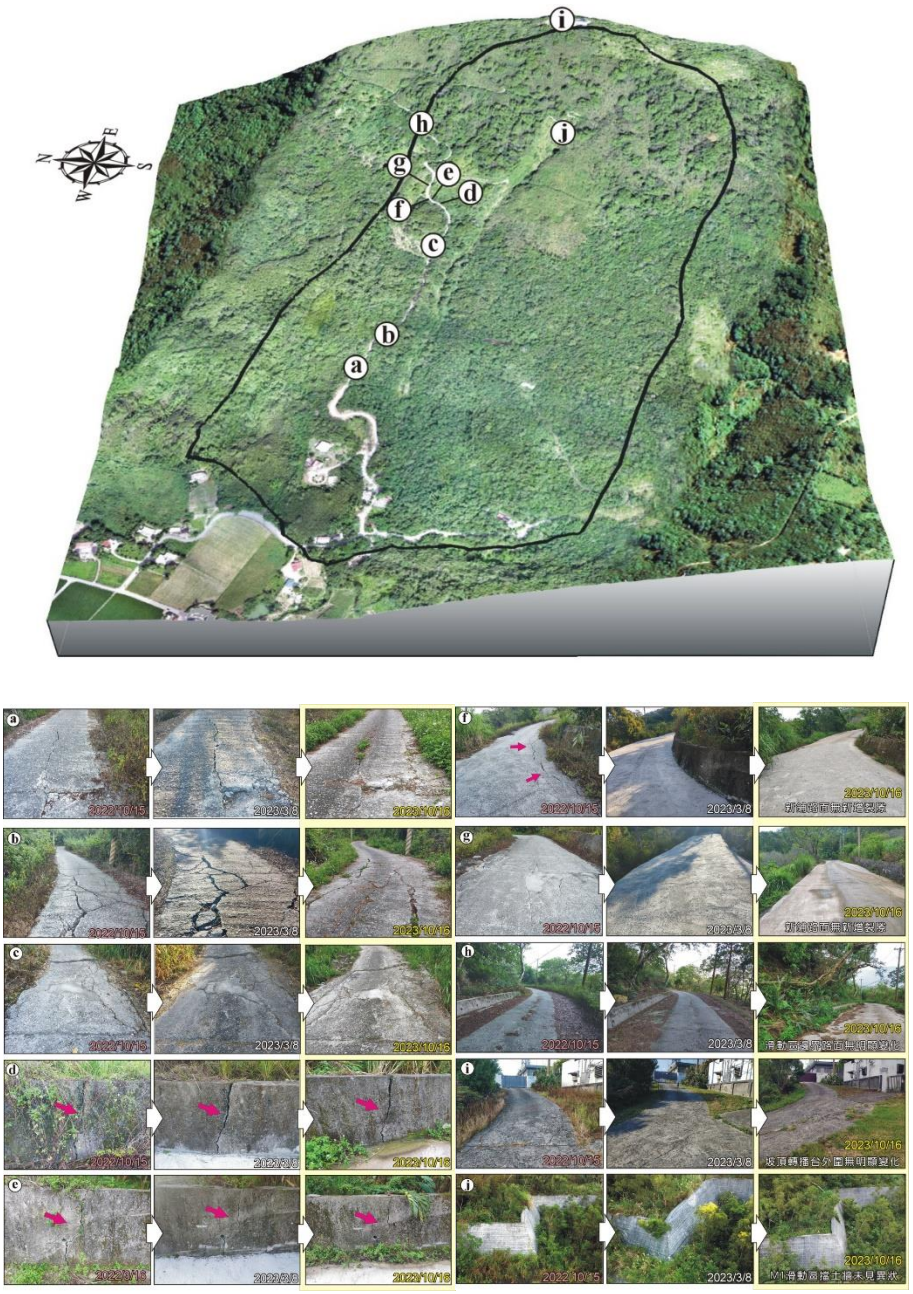


Fig. 7. Comparative photos of changes in surface fissures

Sliding block division

Referring to the previous survey results of this research scope, there are two large-scale landslide potential areas, M1 and M2, on the upper slope of the T004 range. In 110, Dian-Tai Mountain was divided into blocks, and it was found that there was a potential collapse area on the right side of the M1 block. Sliding block, so the M3 sliding block was added. However, since the M3 block has no accessible road and the signs of sliding are unclear, it is tentatively planned not to conduct relevant monitoring. Based on the results of high-precision numerical terrain interpretation, this plan considers the sliding direction and impact area of slope soil, as well as the location and direction of water systems and ridge lines, and re-targets the sliding blocks M1, M2 and M3 in the T004 large-scale landslide potential area. The boundaries are divided, and the result is shown in Fig. 8 Among them, considering the investigation results of surface damage phenomena, an additional sliding block M2-1 was designated on the middle

slope below the M2 block. The delineation results are shown in Fig. 8 and the current 3D terrain and slope surface are shown in Fig. 9.

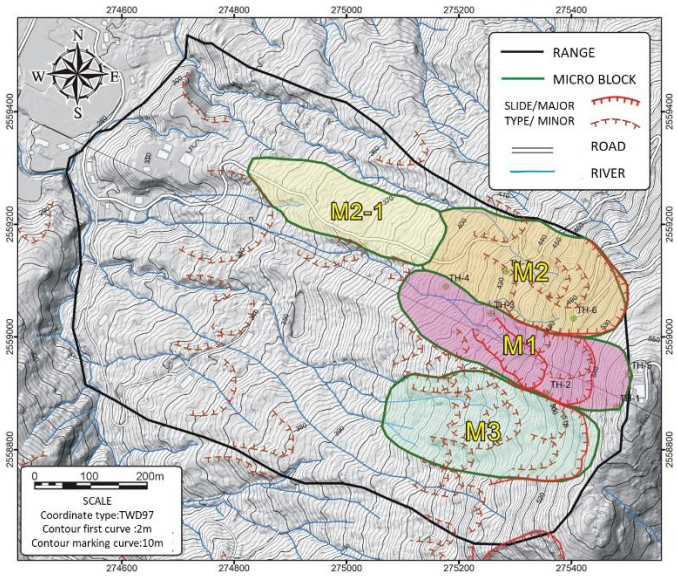


Fig. 8. Division of sliding blocks in T004

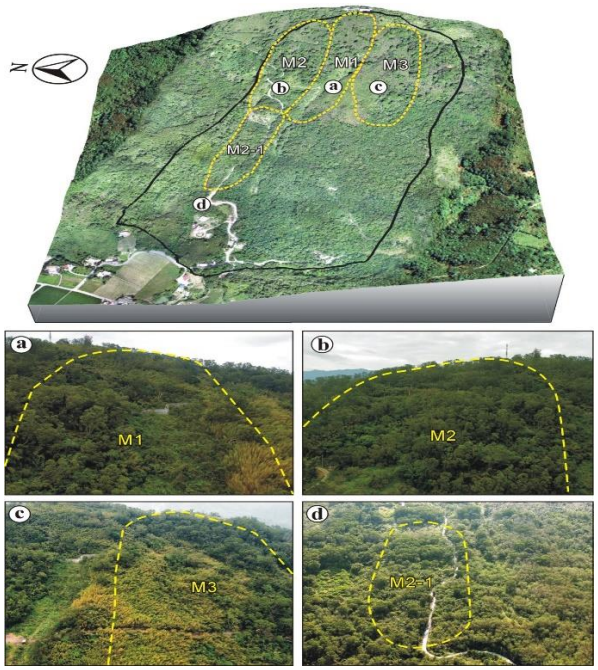


Fig. 9. Full view T004 Sliding block division (2023.10.15)

From 2018, three monitor sites in southeast Hualien County silty clay landslide potential area has been set. Therefore, by monitoring the surface movement and underground water and bore hole displacement, establish the area disaster prevention management mechanism.

For Dian-Tai Mountain during the Typhoon rail the entire area was under warning, and for during two different earthquakes, the upper region underground water level had become highly effected, but from surface deformation result, nothing much had changed due to correct construction method that help cease the landslide movement that makes pre-warning system more reliable shown in Fig. 3.

Rainfall statistics

Due to the increasing trend of rainfall in extreme events in recent years, this plan estimates that from 2007 to 2023, the maximum continuous 24-hour rainfall in the landslide potential area was 500 mm (Typhoon Compass in 2021), followed by 475 mm (Typhoon Lepus in 2021). The maximum hourly rainfall of a typhoon event is 67.5 mm/h (Typhoon Meranti in 2016); the maximum continuous rainfall for 6 h is 188 mm (Typhoon Lepus in 2013); the maximum continuous rainfall for 12 h is 284.5 mm (Typhoon Lepus in 2013) typhoon). Judging from the cumulative rainfall of events, this year's Typhoon Dusuri's 799 mm is currently the event with the highest cumulative rainfall [*SWCB, 2023*]

Results analysis and discussion

InSAR analysis

During the analysis, the area larger than the Dian-Tai Mountain monitoring area was cut, and only the vertical deformation was used to discuss the sliding situation of the overall slope during the process. Due to the Guanshan Chishang earthquake in September 2022, the vertical deformation was divided into long-term (from April 2017 to April 2017) May 2023), co-seismic and post-seismic vertical deformation are discussed in three-time intervals, and the solution results are drawn as shown in Figs. 10–13. From Fig. 11, the long-term vertical deformation produced is local or shallow deformation. Observed from Fig. 13 of co-seismic deformation, there is an obvious elevation drop at the slope toe. However, the deformation range is less related to collapse and may be more related to the earthquake surface deformation. The vertical deformation after the earthquake is shown in Fig. 10. As shown in 75, the overall downward deformation occurs below the middle section of the 2/3 slope, and the vertical deformation value is low. We can continue to observe whether there is an obvious collapse location transition in the future.

The main slope of Dian-Tai Mountain is towards the northwest. The incident azimuth angle of the ascending orbit of the Sentinel-1A satellite in this area is 79.4 degrees and the inclination angle is 38.3 degrees. The incident azimuth angle of the descending orbit is –79.3 degrees and the inclination angle is 35.3 degrees. The Sentinel-1A satellite is looking left., based on the satellite's geometric conditions and main slope orientation, the following descent orbit analysis is selected to be more reliable. However, the slope is not a single slope orientation. Possible changes in slope orientation should be considered and included in the ascending orbit analysis.

From this analysis to September 2023, the analysis results of the ascending orbit from the previous period to the end of this analysis are shown in Fig. 12. The decrease in head elevation can also be observed on the slope, but it is limited by the satellite incident direction. and the slope aspect within the range, a descending rail analysis must still be performed; the descending rail analysis results are shown in Fig. 13 [*SWCB, 2023*]. For past event of No21 Typhoon in 2021 and 0323 and 0918 earthquake (> M6.8) in 2022, the surface deformation can be seen that the slope slides from southeast to northwest, in Fig. 14 and the solution results will be that the head falls and the toe rises, and the reaction may exist Multiple sliding surfaces or partial sliding blocks can be supplemented and verified by underground monitoring.

Site monitor result

For Dian-Tai-San during the Typhoon rail the entire area was under warning, and for during two different earthquakes, the upper region underground water level had become highly effected, but from surface deformation result, M2 block surface deformation had changed due to earthquake and from past underground monitor result, there is rapid movement at the belly part and toe part of landslide potential mass. Although correct construction method can help cease the landslide from expanding, put from exist debris deposit surface movement is still important to take precaution, and for entire area unstable sediment pre-warning system setup, it is more reliable to put emphases in long term monitor [*SWCB, 2023–2018*].

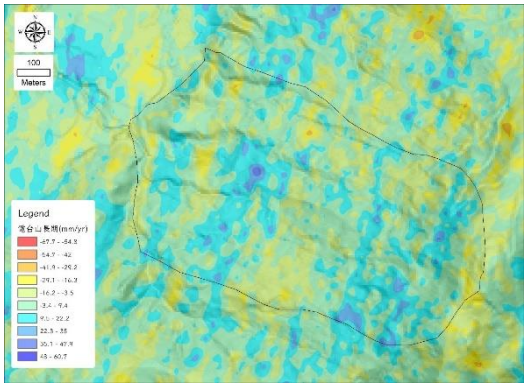


Fig. 10. Site long-term vertical deformation rate (mm/yr)

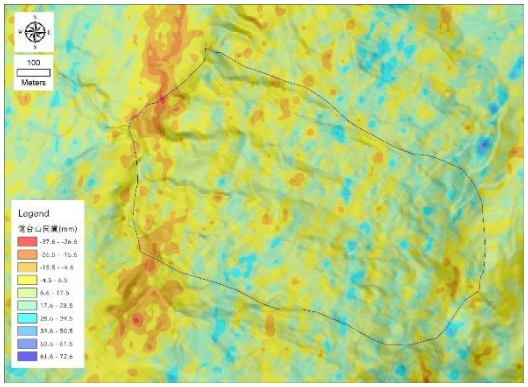


Fig. 11. Coseismic vertical deformation of site after earthquake in September 2022 (unit: mm)

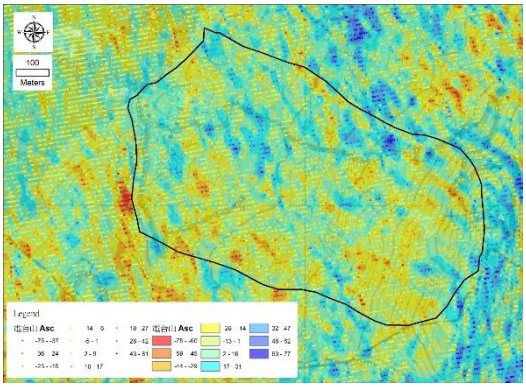


Fig. 12. Vertical deformation of the rising rail satellite from 2023/5 to 2023/9 (unit: mm)

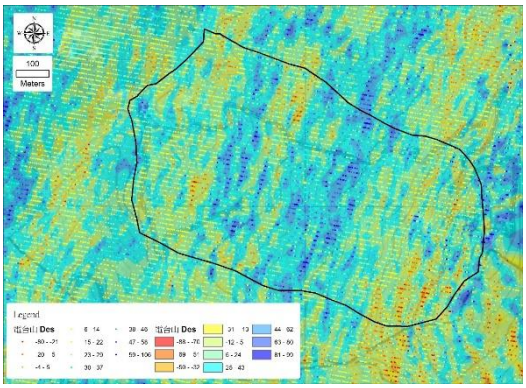


Fig. 13. Vertical deformation of the lower rail satellite from 2023/5 to 2023/9 (unit: mm)

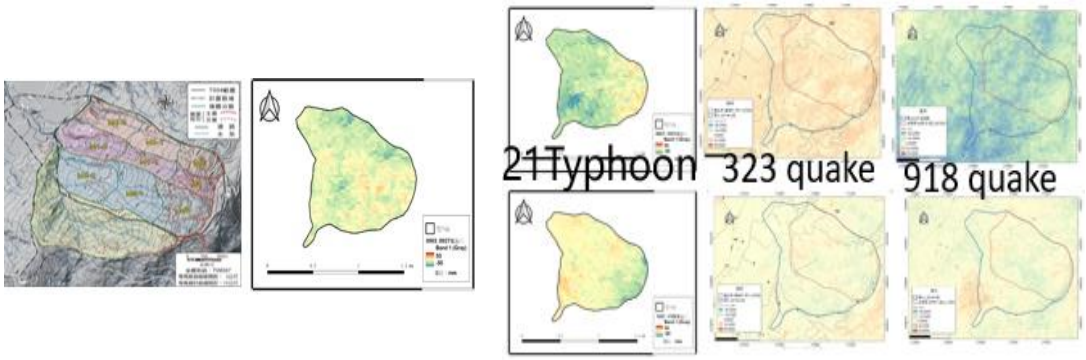
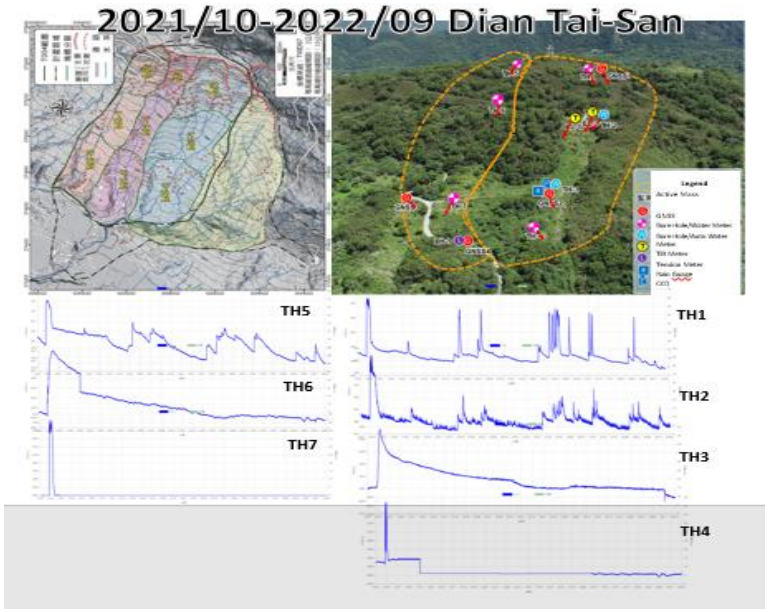


Fig. 14. Comparison of InSAR result under three nature events



1日	21Typh	323	918	1日	21Typh	323	918
RAIN	845	0	0	GNSS1	NA	NA	0.456
TH5	5.43	0	0	TH2	3.57	-0.021	0.032
GNSS2	NA	NA	0.531	EL1	0.1	0	0
TH6	3.21	0.007	0,014	EL2	0.4	0	0.1
GNSS3	NA	NA	0.348	TH3	2.72	-0.24	1.1
TH7	2.21	0.026	0.72	GNSS4	NA	NA	0.543
				TH4	4.78	-0.22	1.78

Fig. 15. Site underground water monitor result

Flow2D result

From above monitor result, surface displacement in different potential region has been monitored, and under each different event, sediment transfer has become obvious effect to the surrounding safety. Therefore, from typhoon rainfall which form surface runoff and continuous sediment deposit, with the help of strong earthquake shaking which loosen the upper region sediment supply and withdraw the help of residential ignorance of sediment deposit, debris flow formation has become a safety issue which might lead to hazardous disasters.

By looking at the surface deformation result for each modify rainfall scouring event and considering the deposit depth and exist levee or riverbank structure height, his research use return times debris flow simulation and alongside sedimentation analysis to setup risk map if

site sediment deposit has not been dealing. From Table 1 we divide the sediment deposit depth and spreading area into four category level, and letting the rainfall amount (680 mm/24hr) for triggering debris flow the same amount at each modify event. But, for the landscape elevation changes, each simulation uses the last result and simulate again and again. Fig. 17 show the exist debris flow deposit effect potential range hazard, and in Fig. 18 we show by using the current DEM result for first debris flow event simulation, and find the sedimentation difference at midstream deposit. Therefore, at second and third and fourth return event, we find the high-risk potential spot changes downward but due to slope decreasing and longitude reduce, the deposit height and effect area will also decrease due to lack of energy potential shown in Fig. 19 and effect will shrink at the fourth stage return.

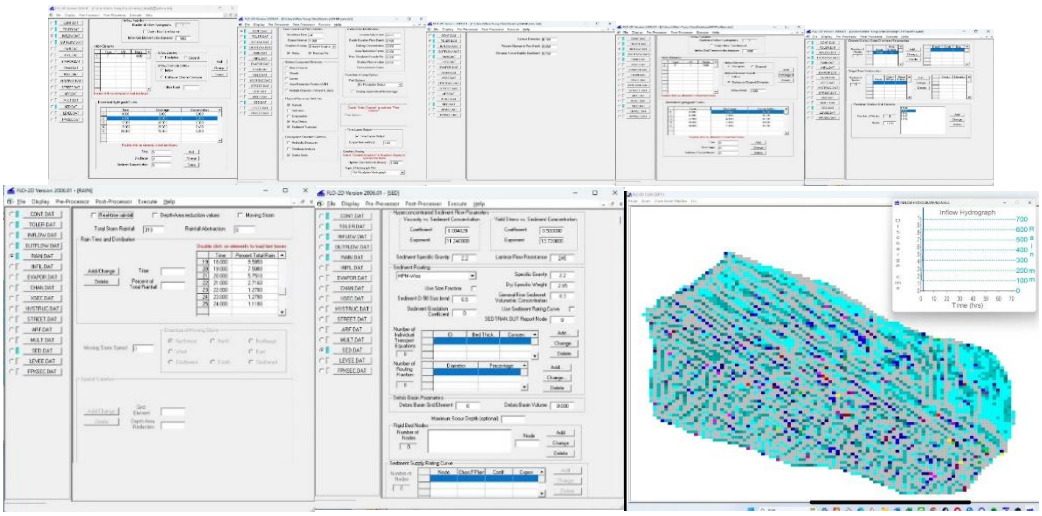


Fig. 16. Flo2D simulate procedure for return erosion debris flow formation

Fig. 17. Site debris flow deposit effect range

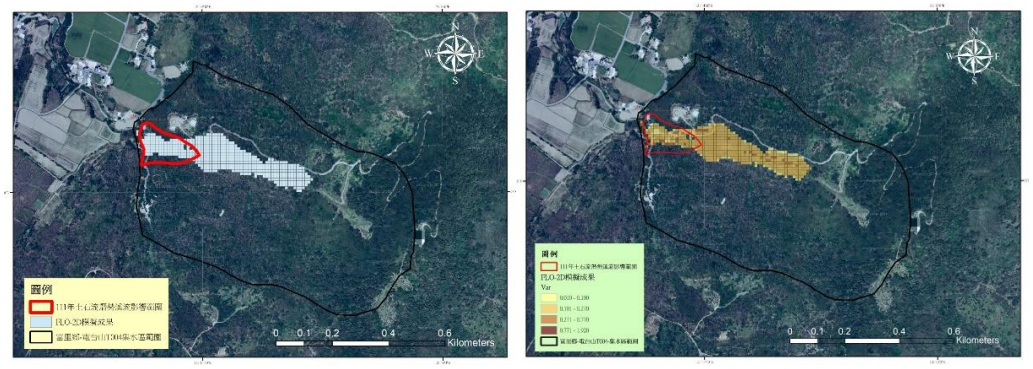


Fig. 18. Flo2D Simulate relationship between the current status for the first time and the impact range of landslides

Table 1. Deposit hight potecial scater comparion

Deposit area, %	Deposit depth, m			
	High (> 3 m)	Medium high (1–3 m)	Medium (0.5–1 m)	Low (< 0.5 m)
High (> 75%)				
Medium high (50–75%)				
Medium (25−50%)				
Low (< 25%)				

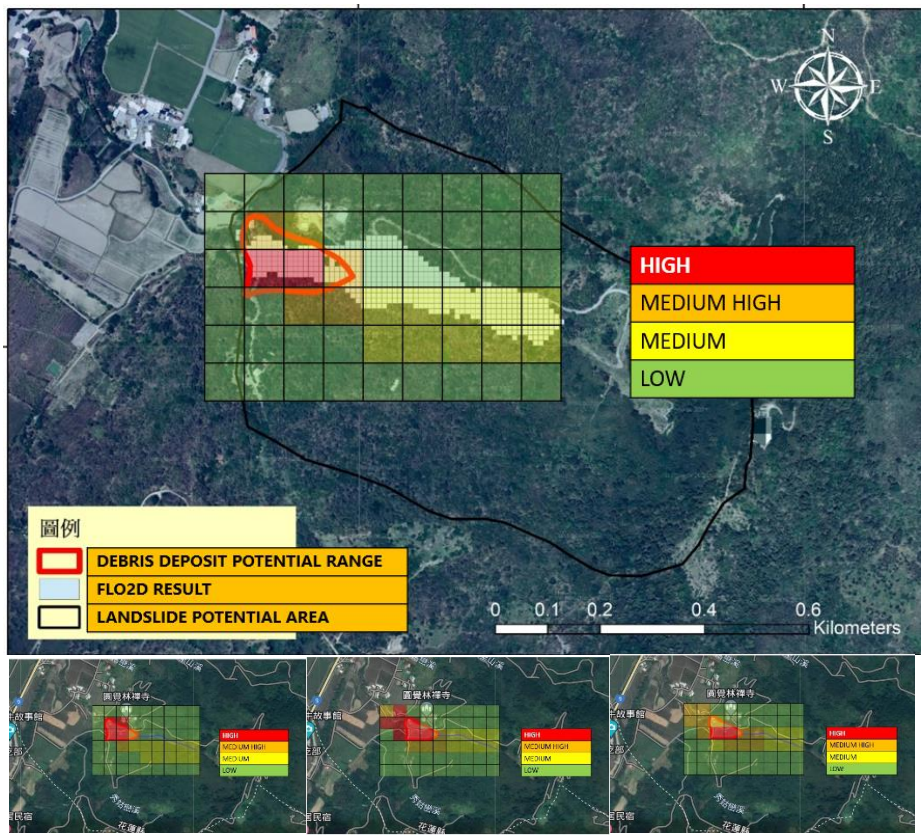


Fig. 19. Flo2D Simulate relationship between the current status for the first to forth time sedimentation impact of landslides

Conclusions

From continuous monitoring result analysis and conducting the real time endanger site precaution underground and surface observation management mechanism, can help the government agency to establish the landslide potential area site pre-warning system, and make preparation for evacuation plan before and after hazard event.

References

The Hualien Branch of Soil and Water Conservation Bureau of the Agriculture Committee of the Executive Yuan (SWCB), the monitoring survey and maintenance plan of the large-scale collapsed areas at T004, Luoshan Village, and Antong D018, Yuli Town, Hualien County, Fuli Township, Hualien County, 2023.

The Hualien Branch of Soil and Water Conservation Bureau of the Agriculture Committee of the Executive Yuan (SWCB), the monitoring survey and maintenance plan of the large-scale collapsed

areas at T004 of Tiaodian Mountain, Fuli Township, Hualien County, and D018, Antong, Yuli Township, 2022.

The Hualien Branch of Soil and Water Conservation Bureau of the Agriculture Committee of the Executive Yuan (SWCB), Hualien County-Yuli Town-Antong Hot Spring Settlement (D018) Large-scale Collapse Area Investigation and Treatment Planning, 2020.

The Hualien Branch of Soil and Water Conservation Bureau of the Agriculture Committee of the Executive Yuan (SWCB), the monitoring and investigation of the landslides of Radio Mountain in Fuli Township and Shiping Tribe in Zhuoxi Township, 2018.

The Hualien Branch of Soil and Water Conservation Bureau of the Agriculture Committee of the Executive Yuan (SWCB), Hualien County-Yuli Town-Antong Hot Spring Settlement (D018) Large-scale Collapse Area Investigation and Treatment Planning, 2018.

Central Geological Survey Institute of the Ministry of Economic (CGS), Ministry of Economic Affairs Geological Relics Geologically Sensitive Area Delineation Plan H0017, 2016.

Institute of Geological Survey, Ministry of Economic Affairs, Research on the Development and Application of Landslide Observation Technology (2/4), 2016.

The Hualien Branch of Soil and Water Conservation Bureau of the Agriculture Committee of the Executive Yuan (SWCB), Antong Hot Spring Collapse and Detailed Planning of Wild Creek Treatment, 2013.

Central Geological Survey Institute of the Ministry of Economic Affairs (CGS), National Land Conservation Survey and Analysis Plan for Geologically Sensitive Areas–Analysis of Geologically Sensitive Characteristics of Non-Morakot Typhoon-affected Areas (1/3), 2013.

Soil and Water Conservation Bureau of the Agriculture Committee of the Executive Yuan, Quantitative Evaluation and Observation Plan for Soil and Water Conservation and Conservation Effects (1/3), 2008.

Central Meteorological Bureau of the Ministry of Communications, "Annual Report on Climatic Data (Part 1 – Ground Data)", 2008~2020.

Intelligent debris flow monitoring and warning system

K.-F. Liu, S.-C. Wei

National Taiwan University, Taipei, Taiwan, China, kfliu@ntu.edu.tw

Abstract. A debris flow monitoring and warning system is installed on midstream Yusui Stream, Taiwan. The monitoring station is a fully automatic warning station. The system is composed of 2 CCDs, 2 MEMS, and one rain gauge. The arrival of debris flow is detected and double-checked with CCD and MEMS signals. CCD image can also produce debris flow velocity and flow height. MEMS can produce the Phase speed and flow rate for debris flows. All data will be compared with a pre-simulation of all scenarios from debris flow. The ultimate influence area and degree of destruction can be obtained from the data. Warnings are issued through on-site control, voice messages, line messages, broadcasting, and web-warning.

Key words: *Automatic monitoring system, debris flow, image processing*

Cite this article: Liu K.-F., Wei S.-C. Intelligent debris flow monitoring and warning system. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 302–306.

Интеллектуальная система мониторинга и предупреждения селевых потоков

К.Ф. Лю, С.Ч. Вей

Национальный университет Тайваня, Тайбэй, Тайвань, Китай, kfliu@ntu.edu.tw

Аннотация. Система мониторинга и предупреждения селевых потоков установлена в среднем течении руч. Юсуй (Тайвань). Она является полностью автоматической и состоит из двух ПЗС-матриц, двух МЭМС и одного осадкомера. Приход селевого потока обнаруживается и перепроверяется с помощью сигналов ПЗС и МЭМС. Изображение, полученное с помощью ПЗС-матрицы, может также отображать скорость и высоту потока. С помощью МЭМС можно получить данные о фазовой скорости и расходе селевых потоков. Все данные сравниваются с предварительным моделированием всех сценариев развития селевых потоков. На основе полученных данных можно определить конечную зону воздействия и степень разрушения. Предупреждения выдаются с помощью контроля на месте, голосовых сообщений, сообщений на линии, вещания и веб-предупреждений.

Ключевые слова: *Автоматическая система мониторинга, селевые потоки, обработка изображений*

Ссылка для цитирования: Лю К.Ф., Вей С.Ч. Интеллектуальная система мониторинга и предупреждения селевых потоков. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 302–306.

Introduction

Taiwan is characterized with its steep slope, fragile geological formation and concentrated heavy rainfalls, all these factors make debris flows a common phenomenon in the

island. There are 1732 debris flow potential stream in a small island with area 36197Km^2, so there is one debris flow for every 21 km^2 area. Monitoring of these streams and providing hazard warning for the downstream area is essential.

There are 13 monitoring stations in Taiwan installed and monitor special locations. There is one mobile station that can move to specific location and start monitoring in a very short time. However, all monitoring stations only provides data, warning is not directly related to all monitored data. Actual warning is issued through rainfall data only. This is the same situation for many monitoring stations around the world [*Hurliman., Rickenmann and Graf, 2003; Berti, etc., 2000*]. To improve the usefulness of monitoring station, data analysis should be added and warning should be issued automatically from the monitored data.

This paper presents the new intelligent monitoring station where data collection, analysis is all done in one system.

System specification

The system is composed of 2 MEMS detector, 2 CCD, 1 rain gage and a processing unit. MEMS unit detect debris flows and calculate the energy of debris flows. CCD detects debris flows, capture the average free surface elevation and calculate the phase speed of debris flows. All data is collected through cable to local cabin where industrial standard computer is used to process and analyze all data. If debris flow is detected, warning is sent to downstream target area.

The method of analysis and detection is described below.

Ground vibration signal

The ground vibration signal is detected using a MEMS unit. The MEMS is Analog Devices ADXL 355, triaxial acceleration chip. The signal is analog and MEMS is cased in a water proof cylindrical box, with output cable connected. The cable can be extended to 450 m, so MEMS unit can be placed far away from the processing unit. This newly developed device can extend the range of monitoring to a much larger area. Furthermore, the price of the unit is very cheap, so we use it as an easily replaced unit and it is installed very close to the potential hazard area.

Detection principle

The maximum value of 2-s averaged data is used as the ambient noise level. If the detected signals have an amplitude of one order of magnitude larger than that of the long-period noise level, then these signals indicate the arrival of debris flows. To avoid

pulse noise, this system used a variation of accumulative signal power between 10 and 40 Hz [*Arattano, 1999; Abancó, Hürlimann and Moya, 2014*] from a time series that was 0.5 s or longer as the main index for debris flow detection. The detection threshold is not a constant threshold but a large increase (at least an order of magnitude larger) from the noise signal power. This method has proved to be effectively in WEI and LIU (2019).

The ground variation signal is also empirically related to the flow rate data, so flow rate data is also available for reference. The ground vibration data can be used to estimate the debris flow velocity as Arattano M, Marchi L (2005), but this is not used in this system.

CCD detection

Debris flow detection

The total grey-level method is used to identify debris-flow events. We calculate the total grey level in the region of interest (ROI) and if it changes, this indicates there are events occurring within the ROI. This can be used to identify debris flow. [*Liu, Kuo and Wei, 2022*]

ROI is first defined in the stream area. For each pixel in the ROI, color is

transformed to grey level according to the standard from the International Telecommunication Union [*ITU-R, 1990*] code. where each pixel has a grey level from 0 to 255. Then the total grey level for the ROI is calculated This total grey level is then divided by the total number of pixels in the ROI to give the average grey level. If it is very dark, the average grey level will be close to 0. If it is very bright, the average grey level will be close to 255. Normal clear water flow will produce very bright and shining images, so the average grey level is around 150 or more. When debris flow or flood occurs, there is granular material and mud and the whole image becomes darker. As one of the characteristics of debris flows is a large amount of granular material concentrated at the front, the average grey level will become darker in a short period of time. The rate of change of the average grey level can be calculated.

With the temporal variation of average grey level obtained, a condition is required to determine the detection of debris flows. Since average grey level changes for different lighting conditions (sunlight, moonlight, rain), materials, and flow conditions, so the grey level average in "normal" condition is calculated once the system is running, then the noise average grey level will be updated every 5 min before any detection of event. for the stable state should be considered as the reference level.

To detect a change in average grey level, we use the slope. The rate of change of the grey level is calculated as: For every 10 s, we choose the maximum slope Smax within that 10 s as the representative parameter of flow condition. While Smax is small, the flow conditions remain the same. However, if at any moment the calculated slope is greater than twice the Smax value obtained 2s before, and this continues to be true for consecutive 5 points (1.5 s), this indicates event happened within the ROI. Then a debris flow warning will be issued after this detection process.

Velocity estimation

After detection of debris flow, two consecutive ROI average grey level variation will be adopted, the same. Assuming two very closed ROI should have the same variation of the grey level, the value of grey level slope is compared. Same grey level value occurred in two close ROI will have a time difference. The distance between two ROI divided by the difference of detection time provides the estimate of debris flow velocity.

Water level detection

When debris flow arrives, the flow depth will vary. As debris flow has different grey level than water, this can be identified through the difference of grey level for every pixel in the image. Therefore, once debris flow is detected, a simple search of pixels from top to bottom for fast grey level change can produce the debris flow area. The top boundary of the area is the flow depth. [*WEI etc., 2023*]

System and warning

All information is displayed in the web site as in Fig. 1.

After an event is identified by CCD and geophone detection is used as confirmation. Once the detection of debris flow is confirmed, warning on the potential affected area will be issued through line, message, radio triggered broadcasting and Web warning.

System location and monitoring record

The system is installed in Yu-Shui Stream, in Kaohsiung County. There was a serious debris flow event back in 2021 during Tropical Storm Lupit. The system is installed and fully functioned in June, 2023. After the system is installed, there are fog event, heavy rain event, and high concentration flow event, but none of the event induce downstream hazard. The system only reports the event but no false warning is issued.

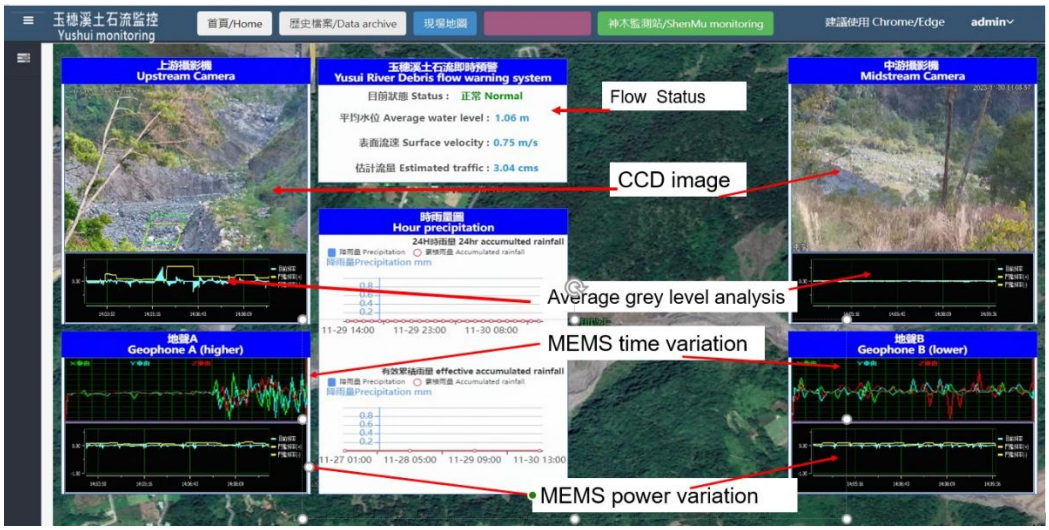


Fig. 1. Yu-Shui monitoring station instant information display

Conclusion

An automatic monitoring and warning system are developed in Taiwan. The system uses geophone to detect arrival of debris flow and estimates the flow rate. CCD is used for detection of debris flow, flow velocity and flow depth. All information is obtained and analyzed automatically. Once debris flow is detected, warning is sent out through different channel including broadcasting, machine control, messaging to people in charge and people in affected area.

Acknowledgement

This work is done solely by the support of Soil and water Conservation bureau through 2019 to 2023.

References

Abancó C, Hürlimann M, Moya J (2014) Analysis of the ground vibration generated by debris flows and other torrential processes at the Rebaixader monitoring site (Central Pyrenees, Spain). Nat Hazards Earth Syst Sci 14: 929–943

Arattano M (1999) On the use of seismic detectors as monitoring and warning systems for debris flows. Natural Hazards 20: 197–213

Arattano M, Abancó C, Coviello V, Hürlimann M (2014) Processing the ground vibration signal produced by debris flows: the methods of amplitude and impulses compared. Computers & Geosciences 73: 17–27

Arattano M, Marchi L (2005) Measurements of debris flow velocity through cross-correlation of instrumentation data Nat Hazards Earth Syst Sci 5: 137–142

Berti, M., Genevois, R., Lahusen, R., Simoni, A. and Tecca, P. R., (2000), "Debris flow monitoring in the Acquabona watershed on the Dolomites (Italian Alps)," *Phys. Chem. Earth*(B), Vol. 25, No. 9, pp. 707–715.

Hurlimann M., Rickenmann D. and Graf C., (2003), "Field and Monitoring Data of Debris-flow Events in The Swiss Alps," *Can. Geotech. J.* 40: pp. 161–175.

Liu, K. F., and Chen, S. C., (2003), "Integrated debris-flow monitoring system and virtual center," The Third Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment," Davos, Switzerland, pp. 767–774.

Liu, K.F., T.I. Kuo and S.C. Wei (2022) Debris Flow Detection Using a Video Camera. Proceeding Workshop on World Landslide Forum, Kyoto, pp 141–147

Regmi, S., Liu, K.-F., & Wei, S.-C. (2023). Experimental study of seismo-acoustic frequency and flow velocity of debris flow. 8th Debris Flow Hazard Mitigation

Wei, S. C, and K. F. Liu (2019). Automatic debris flow detection using geophones. Landslides. DOI 10.1007/s10346-019-01258-9. 131.

Wei, S.C., Chen B.A., Lei T.C., Liu K.F. (2023) Tracking Moving Boulders with Machine Vision. 21st International Symposium on Geo-disaster Reduction, Aug. 5–8, 2023 Shanghai, China.

Wei, S.-C., Liu, K.-F., & Regmi, S. (2023). Debris flow seismo-acoustic wave in a finite layer waveguide. 8th Debris Flow Hazard Mitigation, June. 26–29, Turin, Italy

Анализ условий формирования селей в Приэльбрусье в XXI веке

И.В. Мальнева[1], М.Д. Докукин[1], М.А. Анаев[2], М.М. Хаджиев[1]

[1]Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, malnir@mail.ru

[2]Главное управление МЧС России по Кабардино-Балкарской Республике, Нальчик, Россия

Аннотация. Представлены материалы о проявлении селей и других склоновых процессов в Кабардино-Балкарии в 2022 и 2023 г., а также в 2000 и 2017 г. Эти годы отличались аномально высокой температурой воздуха летом на Кавказе, и в Северном полушарии в целом. Отмечено, что особенности развития наиболее опасных геологических процессов (оползней, селей и др.) обусловлены глобальными климатическими изменениями. Для оценки климатических изменений и крупнейших катастроф использована типизация циркуляции атмосферы Северного полушария Земли, разработанная под руководством Б.Л. Дзердзеевского. Материалы типизации с 1899 по 2018 г. размещены в сети Интернет в открытом доступе на сайте www.atmospheric-circulation.ru. Учтены изменения солнечной активности и особенности космической погоды в последние годы, которые приближаются к максимуму 25 цикла солнечной активности.

Ключевые слова: *сели, оползни, солнечная активность, космическая погода, атмосферная циркуляция, элементарный циркуляционный механизм*

Ссылка для цитирования: Мальнева И.В., Докукин М.Д., Анаев М.А., Хаджиев М.М. Анализ условий формирования селей в Приэльбрусье в XXI веке. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 307–315.

Analysis of debris flow formation conditions in the Elbrus region in the 21st century

I.V. Malneva[1], M.D. Dokukin[1], M.A. Anaev[2], M.M. Khadzhiev[1]

[1]High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, malnir@mail.ru

[2]Main Directorate of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters for the Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Russia

Abstract. The materials on the manifestation of debris flows and other slope processes in Kabardino-Balkaria in 2022 and 2023, as well as in 2000 and 2017 are presented. These years were characterized by abnormally high air temperatures in summer in the Caucasus and in the Northern Hemisphere as a whole. It is noted that the peculiarities of the development of the most dangerous geological processes (landslides, debris flows, etc.) are caused by global climatic changes. To assess climate change and major disasters, the typification of atmospheric circulation in the Northern Hemisphere of the Earth, developed under the guidance of B.L. Dzerdzeevsky, was used. The materials of the typification from 1899 to 2018 are posted on the Internet in open access on the website www.atmospheric-circulation.ru. The changes in solar activity and the peculiarities of space weather in recent years, which are approaching the maximum of the 25th cycle of solar activity, are taken into account.

Key words: *debris flows, landslides, solar activity, space weather, atmospheric circulation, elementary circulation mechanism*

Cite this article: Malneva I.V., Dokukin M.D., Anaev M.A., Khadzhiev M.M. Analysis of debris flow formation conditions in the Elbrus region in the 21st century. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 307–315.

Введение

XXI в. в Северном полушарии отличается обилием природных катастроф и в первую очередь погодных аномалий – волны экстремальной жары, разрушительные лесные пожары. В России прошедший август оказался самым теплым в истории регулярных метеонаблюдений, т.е. с 1891 г. В связи с глобальным изменением климата в последнее время наблюдается активизация природных катастроф, связанных с проявлением опасных склоновых процессов, среди которых выделяются сели и парагенетически связанные с ними оползни, эрозия и др. К числу регионов с наиболее высокой активностью селевых процессов на территории России относится Северный Кавказ, где в течение XXI в. отмечена наиболее катастрофическая активизация селей в Приэльбрусье.

Приэльбрусье по праву считается одним из самых популярных горнолыжных курортов в России. Необходимость защиты от проявления опасных склоновых процессов обуславливается здесь в первую очередь растущей рекреационной нагрузкой. За последние 6 лет туристический поток вырос в 2,5 раза.

Начало XXI в. отмечено катастрофическими гляциальными селями, прошедшими по реке Герхожан-су в 18–25 июля 2000 г. (бассейн р. Баксан). В зоне поражения оказалось две трети г. Тырныауза, получили разрушения многочисленные здания и сооружения, имелись человеческие жертвы. Также наиболее сильная активизация произошла 1 сентября 2017 г. в результате прорыва озера Башкара по долине р. Адыл-Су, где произошел сход селевого потока объемом около 800 тыс. м^3 и наносоводный сель по реке Баксан [*Докукин, 2018; Черноморец, 2018]*, Также имелись человеческие жертвы.

Наблюдения за проявлением селей и факторами, их обуславливающими, на территории КБР проводятся много лет различными ведомствами. Накоплен очень большой материал, который, безусловно, является основой для прогнозирования селей. Вместе с тем, учитывая возрастающую техногенную нагрузку, необходимы непрерывные режимные наблюдения, которые на современном уровне и в объеме, представляющем исчерпывающий материал для прогнозирования селей, в настоящее время не ведутся.

Авторы много лет занимались исследованием условий формирования селей в наиболее селеопасных бассейнах, в том числе и условиями формирования катастрофических селевых потоков в 2000 и 2017 г. При этом условия во многом были похожи, но в 2022 и 2023 г. катастрофических проявлений селей не наблюдалось. Для оценки опасности подобных катастроф в будущем необходимо определить причину низкой и высокой активности селей в эти годы.

Краткий обзор проблемы

При сопоставлении условий формирования селей и других склоновых процессов целесообразно рассматривать их проявление и факторы, их обуславливающие, **как сложную открытую многокомпонентную систему**, в которой проявление отдельных процессов является результатом действия всей системы [*Шеко, 1980*]. В ходе развития системы осуществляется энергомассообмен между отдельными компонентами природы и привнос энергии и вещества извне. Главным звеном в этой цепи причинно-следственных связей является энергия, поступающая от Солнца.

Все факторы, обуславливающие развитие и активизацию селевого процесса, целесообразно разделить на три группы постоянные (геологические и геоморфологические условия), медлленноизменяющиеся (климатические,

геокриологические условия, быстроизменяющиеся (метеорологические, гидрологические факторы, сейсмичность и хозяйственная деятельность). Активность селей обусловлена факторами последней группы – метеорологическими, гидрологическими, сейсмическими условиями, а также деятельностью человека. В качестве основных быстроизменяющихся факторов развития склоновых процессов выступают также показатели внеземных геофизических полей, а именно – изменения солнечной активности. Еще в начале прошлого века важные аспекты солнечно-земных связей были отмечены А.Л. Чижевским [*Чижевский, 2004]*. При исследовании условий формирования селей необходимо знать так называемый «триггерный» фактор. При этом наибольшее значение имеет фактор так называемой «триггерной» погоды, т.е. погоды, когда развитие селевого процесса происходит при взаимодействии характера погоды и горных пород в очагах формирования селей.

Методы исследований

При исследовании условий формирования селей применялся широкий комплекс методов полевых исследований. Можно отметить, что для оценки возможной обстановки, связанной с переувлажнением склонов и прогнозом сетевой активности, ежегодно в период март-апрель аэровизуальное наблюдение за снегомерными рейками. При невозможности применять вертолет, проводится маршрутные специализированные обследования с применением беспилотных летательных аппаратов. В наиболее опасных местах выставляются сезонные посты наблюдения, непосредственно вблизи селевого бассейна. В последнее время для выявления состояния и динамики склонов, селевых бассейнов, моренно-ледниковых озер и т.д., активно и весьма эффективно используется дистанционное зондирование и земли, метод дешифрирования космических снимков. Кроме эмпирических методов, специалистами ведется многолетний сбор и обобщение моделей возможного развития событий. Модели строятся также и по наихудшему сценарию развития событий. В настоящей работе были использованы статистические методы.

Данные

Авторами использованы суточные данные метеорологических наблюдений за температурой воздуха, атмосферными осадками, снежным покровом по данным метеостанции Терскол за июнь – август 2000–2023 г., а также данные многолетних наблюдений на метеостанции Терскол. Даты проявления селей сопоставлены с ежедневными синоптическими картами Северного полушария, построенными в Гидрометцентре РФ, что позволило определить характер погоды, способствующий формированию селей, а также с проявлением элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) Северного полушария по типизации Б.Л. Дзердзеевского [*Кононова, 2009; Кононова 2015*], (www.atmospheric-circulation.ru), в этом районе. Для анализа синоптической ситуации также использовались карты Северного полушария (Германия), обновляемые ежедневно в открытом доступе на сайте http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsjmaeur.html. Для анализа космической погоды в период формирования и прохождения селей использовались данные, помещенные в открытом доступе на сайте www.tesis.ru, и анализ показателей, которые связаны со вспышками активности Солнца. Вспышечная активность на Солнце и степень возмущения его магнитосферы оценивалась по фактическим солнечноветровым данным – помещенным в сети Интернет в открытом доступе на сайте http://www.speaceweather.com.

Анализ результатов исследований

Территория Приэльбрусья отличается высокой пораженностью селевым процессом. Кроме катастрофических селевых потоков в 2000 и 2017 г. сели с

незначительным объемом выносов прошли в 2005, 2006, 2010, 2011, 2013, 2019 г. Все они в той или иной степени обусловлены метеорологическим фактором. Большое значение в развитии селевого процесса играли температурные условия.

При оценке метеорологических условий формирования селей следует отметить, что вследствие тенденции повышения температуры воздуха в начале XXI в. были созданы условия для изменения абляции, повышения снеговой линии на ледниках, которые сохраняются до настоящего времени. Снеговая линия поднялась значительно выше. Ото льда освободились значительные территории моренных комплексов с погребенными льдами. Маршрутные и вертолетные обследования последнего десятилетия показали, что кромки ледников Центрального Кавказа во многих местах перешли отметку в 3000 м над уровнем моря и находятся выше. В связи с этим снег, выпавший за зимний период на ледниках, не успевает таять за летний период, тем самым создается «чехол», который препятствует активной абляции. Поэтому в селеопасный период высокие значения температуры воздуха и даже совпадающие с ними периоды значительного количества осадков недостаточны для формирования мощного селевого потока.

В связи с интенсивной деградацией ледников помимо всего прочего исчезли моренные озера. Так существенные изменения произошли в верховьях Каяартысу. Зандры все остались далеко от края ледника. Однако, сохранилось достаточное количество погребенных льдов, которые могут принять участие в формировании селей при аномально высоких температурах и достаточном увлажнении за счет осадков. Увеличение количества осадков в целом способствовало активизации селей дождевого и смешанного генезиса, учитывая характер четвертичных отложений в Приэльбрусье, в частности, оползневых отложений. Вместе с тем, конкретные даты проявления селей не всегда совпадают с повышенными значениями метеорологических факторов (рис. 1).

Рис. 1. Многолетний ход средней температуры воздуха за июль – август по данным ГМС Терскол

Для оценки влияния метеорологических факторов формирования селей необходимо учитывать широкое развитие в районе исследований различных по генезису рыхлообломочных пород, являющихся средой развития экзогенных геологических процессов. Широким распространением в районе пользуются оползневые и селевые накопления. В высокогорной зоне оползни – потоки активизируются летом при

интенсивном таянии ледников и погребенных льдов, а весной при таянии снежного покрова, склоновые отложения могут приобретать тиксотропные свойства.

Рассмотрим проявление катастрофических селей, роль в их развитии метеорологических факторов. В сравнении с аномально жаркой погодой летом 2000, 2017, 2022 и 2023 г.

В июле 2000 г. наблюдалась экстремально высокая средняя месячная температура воздуха – самая высокая средняя месячная температура за весь период наблюдений. Максимальные средние суточные значения по данным метеостанции Терскол в период формирования и прохождения селей превышали 28 °С. По-видимому, на высоте 3500 м максимальная суточная температура была около 20 °С, так как по утверждению многих исследователей разница между значениями этого показателя на высоте 1500 и 3500 м составляет, примерно, 10 °С. Наиболее высокой она была в период с 14 по 23 июля [*Мальнева, 2001*].

Характерной особенностью синоптических условий на Северном Кавказе в теплый период 2000 г. было то, что с 14 мая по 4 августа этот район почти непрерывно находился под воздействием антициклона, пополняемого воздушными массами с севера в тылу проходивших севернее южных циклонов. С таким положением связаны и экстремально высокие температуры воздуха в отдельные дни, и сравнительно небольшое количество осадков. Катастрофический сель 2000 г. на р. Герхожансу был подготовлен продолжительным таянием ледника при ясной погоде и достаточно высокой температуре воздуха. Решающим было накопление талой воды в подледниковых условиях и прорывной водный импульс.

В 2017 г. прохождение селей было подготовлено аномальными погодными условиями в июле и августе. Так в июле 12 дней средняя суточная температура воздуха была выше 15 °С (по данным ГМС Терскол), что является пороговым критическим значением при формировании селей. В августе с начала месяца не было средней суточной температуры ниже 15 °С, а доходила она почти до 20°С, что обусловлено влиянием мощного антициклона на юге Европейской России. Осадков в августе практически не было. К 11 августа снеговая линия проходила на высоте более 3800 м. При этом высокие температуры воздуха создают условия для формирования больших объемов талых ледниковых вод, которые могут накапливаться внутри ледника и затем прорываться в виде гляциальных паводков. После длительного периода аномально жаркой погоды над высокогорными районами Центрального Кавказа установился атмосферный фронт, с которым были связаны локальные ливни. Причиной прорыва озера Башкара и катастрофического селя в Баксанском ущелье Кабардино-Балкарии стал один такой ливень. Такого сильного ливня в этом районе не было более четверти века.

Характер погоды в июле и августе в 2022 и 2023 г. имеет много общего с годами проявления катастрофических селей, лето было не просто жарким, а чрезвычайно жарким (таблица 1). Подготовка селевого процесса происходила длительное время и связана была с накоплением воды в массиве береговой морены от водотока, берущего начало с ледника, и разжижением моренного грунта. В Баксанском ущелье прошел сель по р. Герхожансу 5 августа 2022 г. с небольшим объемом выносов. За 4,5 часа до селя приледниковая зона в верховьях р. Каяартысу была практически свободна от облаков, что может служить основанием для предположения о незначительной роли атмосферных осадков в формировании селя. В 2023 г. прохождения селей по селеопасным водотокам не наблюдалось.

Характер погоды во все указанные в таблице 1 годы был обусловлен соответствующим характером атмосферной циркуляции. Для изучения режима ряда природных процессов, в частности, оползней, селей и др., использовалась типизация макроциркуляционных процессов, разработанная Б.Л. Дзердзеевским и др. [*Кононова, 2009; Кононова 2015]*. К настоящему времени календарь последовательной смены элементарных циркуляционных механизмов (сокращенно ЭЦМ) составлен с 1899 по 2019 гг. как в публикациях, так и на сайте https://atmospheric-circulation.ru/.

Годы максимального развития в северном полушарии меридиональной северной и южной групп циркуляции неоднократно были годами природных катастроф.

Таблица 1. Среднемесячные температуры воздуха и количество осадков в годы проявления катастрофических селевых потоков и в 2022 и 2023 г. по отношению к среднему многолетнему значению (по данным ГМС Терскол)

Год	Месяцы					
	Среднемесячные значения температуры воздуха ($T_{ср.}$) и количества осадков (Q), °С и мм соответственно					
	июнь		июль		август	
Среднее многолетнее значение	$T_{ср.}$	Q	$T_{ср.}$	Q	$T_{ср.}$	Q
	9,9	93	12,5	100	12,1	91
2000	9,8	98,7	15,6	58,6	12,2	105,9
2017	10,6	80,9	14,1	67,1	14,1	83,4
2022	10,8	107,2	13,11	87,8	14,8	42,7
2023	10,9	83,5	12,8	71,5	14,9	98,7

Росту их повторяемости способствует меняющийся характер циркуляции атмосферы: увеличение повторяемости блокирующих процессов (арктических вторжений, заканчивающихся формированием обширного стационарного антициклона) и выходов южных циклонов. В сложившейся ситуации, когда высокогорные районы Кабардино-Балкарии совершенно не охвачены метеорологическими наблюдениями, приобретают особое значение количественные показатели атмосферной циркуляции, с которыми, как указывалось выше, тесно связаны проявления селей. По данным календаря ЭЦМ можно подсчитать число дней с каждым ЭЦМ за месяц, за год и т.д. На основании анализа данных селевой деятельности, приведенных выше, и многолетних исследований совместно с Н.К. Кононовой можно сказать, что ЭЦМ являются моделью погоды для конкретного района [*Мальнева, 2001*].

Наиболее опасным в 2000, 2017 г. был ЭЦМ 13л. В последние годы отмечается значительный рост продолжительности меридиональной южной циркуляции, в том числе наиболее процессоопасного ЭЦМ 13л. При ЭЦМ 13л, отмечается 4 выхода южных циклонов в Северном полушарии, из них три – на территории России, один из которых – на Кавказе. За короткое время прохождения циклона (1–2 дня) могут выпадать большие суммы осадков, имеющие обеспеченность менее 1%, часто в виде интенсивных ливней. Это приводит к активизации оползневого, селевого, эрозионного и др. процессов. Как правило, с ЭЦМ 13л связано повышение температуры воздуха [*Кононова, 2009*]. Летом при ЭЦМ 13л уменьшается количество осадков, но повышается температура воздуха. На рис. 2 представлена продолжительность ЭЦМ 13л и 12а в настоящее время и по прогнозу в ближайшие годы [*Кононова, 2009; Мальнева, 2019*].

На основании анализа условий формирования селей в 2000, 2017, 2022 и 2023 г. для обеспечения безопасности территории необходимо отметить различие и сходство условий формирования селей и соответственно возможность их катастрофической активизации в ближайшие годы.

При ежегодных исследованиях условий формирования селей в Приэльбрусье после катастрофического селя 2000 г. авторы обратили внимание на характеристику космической погоды [*Гонсировский, 2017*] и в течение 2001–2023 гг. вели наблюдения с целью также установить связь между проявлением селей и показателями космической погоды [*Мальнева, 2022*].

Основной агент, посредством которого активные процессы на Солнце влияют на состояние околоземного пространства, геомагнитосферы и приповерхностной области Земли – это солнечный ветер. Посредством солнечного ветра происходит перенос импульса и энергии от Солнца к Земле и другим планетам. Было отмечено, что влияние космической погоды может проявить себя только тогда, когда для него будут подготовлены земные природные условия, в значительной степени определяющие активность опасных природных процессов [*Мальнева, 2020*].

Основные параметры плазмы геоэффективного солнечного ветра вблизи орбиты Земли – скорость плазмы солнечного ветра, измеряемая в км/с, и концентрация

(плотность) протонов в плазме солнечного ветра, измеряемая количеством частиц в кубическом сантиметре (ед./см^3).

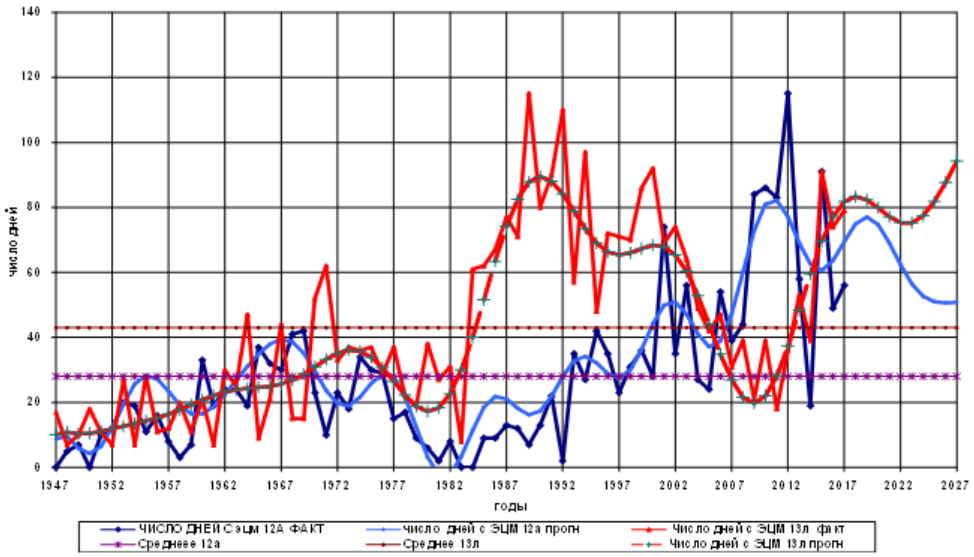


Рис. 2. Продолжительность ЭЦМ 13л и 12а в настоящее время и по прогнозу в ближайшие годы

Наибольшие амплитуды всплесков значений скорости солнечного ветра, доходящие до 1800–2300 км/с и протонов до 10–50 ед./см^{3}и более, наблюдаются тогда, когда он истекает из корональных дыр – открытых магнитных конфигураций с расходимостью магнитных силовых линий [*Мальнева, 2020*]. При исследованиях селей в период их формирования и прохождения, в первую очередь, были использованы. Фактические данные по солнечному ветру помещены в сети Интернет в открытом доступе (например, на сайтах http://www. http://spaceweather.com/, www.tesis.xras.ru).

На основании имеющихся данных были собраны сведения о наиболее значительных проявлениях оползней и селей на территории России и стран СНГ в XXI в. и сопоставлены с некоторыми параметрами солнечного ветра.

Указанные селевые катастрофы – это результат прорывных инжекций в приповерхностную область Земли сгустков отсоединившихся в геомагнитосферу компонент геоэффективного солнечного ветра [*Гонсировский, 2017*].

В наших работах [*Мальнева, 2019; Мальнева, 2022*] было отмечено, что опасными периодами для развития процессов являются переломные моменты в ходе солнечной активности.

В декабре 2019 г. закончился 24-й солнечный цикл и начался новый 25-й цикл [*Ишков, 2022*]. Считалось, что многолетние данные по солнечной активности (выраженной в числах Вольфа), наблюдаемой с 1749 г., позволяют экстраполировать ее изменения, а, следовательно, и тенденцию связанных с ней природных явлений на много лет вперед [*Мальнева, 2019; Шеко, 1980*].

Наступивший 25 цикл по новым предположениям специалистов будет выше, чем 24 цикл и, скорее всего, похож на 23 цикл, который был очень опасным с точки зрения активности селей (рис. 3). Через несколько лет после минимума предыдущего цикла в 1997 г. в Приэльбрусье произошла активизация селей. Если считать от 2019 г. в 25-м цикле, подобная активизация была возможна и в 2022 г., но вероятнее в 2023–2024 гг., когда по новым представлениям ученых близко к возможному максимуму 25-го цикла [*Ишков, 2022*].

Таким образом, период 2022–2025 гг. – это период возможной катастрофической активизации селей в наиболее опасных бассейнах Северного Кавказа и парагенетически связанных с ними оползневых и эрозионных процессов. Однако, при сходных

метеорологических условиях активизация селей в Приэльбрусье в 2022 и 2023 г. не произошла. Как отмечено по материалам сайта spaceweather.com в 2021 г. характер активности Солнца начал меняться (рис. 3).

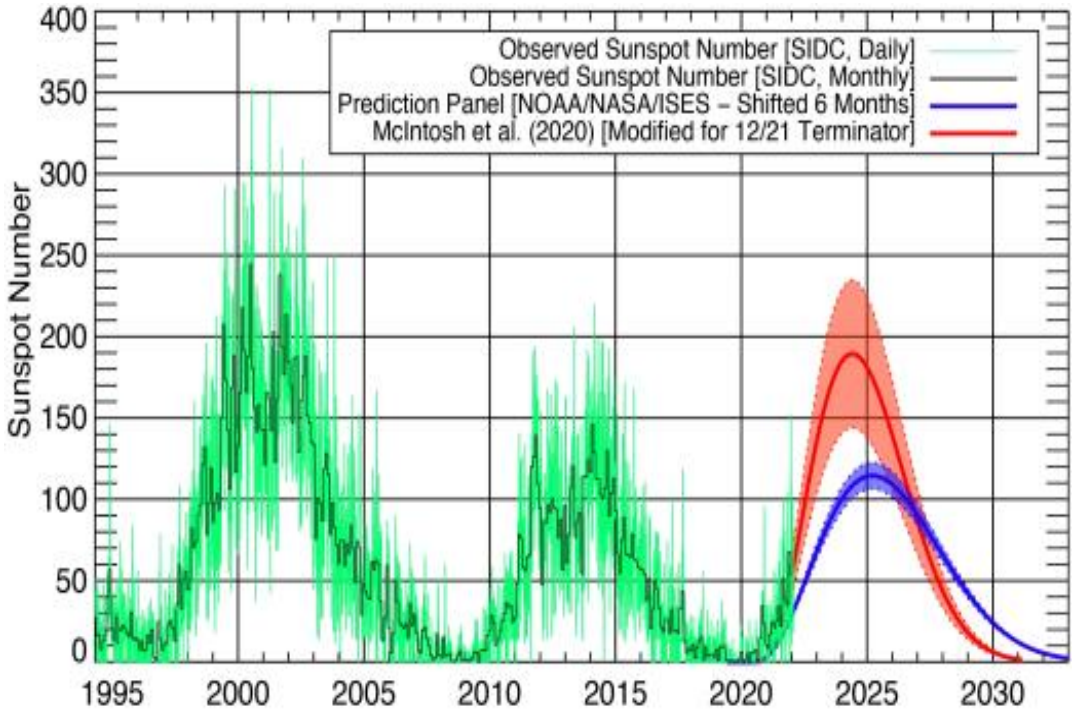


Рис. 3. Предсказания для солнечного цикла 25. Синий – официальное предсказание слабого цикла. Красный – это новый прогноз, (по данным сайта speaceweather.com/)

Хотя солнечная активность оставалась очень высокой, различные события в эти годы чаще происходят на обратной стороне Солнца и не оказывают очень большого влияния на развитие процессов на Земле. Хотя это влияние в той или иной степени проявляется. В 2022 и 2023 г., количество корональных дыр существенно уменьшилось на земной стороне Солнца, инжекций плазмы солнечного ветра практически не происходит.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы. Количество экстремумов, как температуры воздуха, так и осадков, в XXI в. продолжает расти. Отрицательные экстремумы осадков в сочетании с положительными экстремумами температуры воздуха приводят к природным пожарам, положительные экстремумы осадков – к катастрофическим наводнениям. Росту повторяемости и тех, и других способствует меняющийся характер циркуляции атмосферы: увеличение повторяемости блокирующих процессов (арктических вторжений, заканчивающихся формированием обширного стационарного антициклона) и выходов южных циклонов.

На основании всех рассмотренных материалов следует дать предварительную оценку активности наиболее опасных процессов на Северном Кавказе – селей и оползней, парагенетически связанных между собой, в ближайшие годы. Вероятность катастрофической активизации указанных процессов в 2024 и 2025 г. зависит от изменения характера солнечной активности. Необходимо вести систематические наблюдения и учитывать наличие корональных дыр, что является наиболее опасным. Пока не изменится существующая направленность активности Солнца, тенденцию развития опасных природных процессов на конкретной территории определить очень трудно.

Список литературы

Гонсировский Д.Г. О возможном влиянии плазмы солнечных вспышек на возникновение гляциальных селевых потоков на Земле // Жизнь Земли. 2017. Т. 39. № 2. С. 147–154.

Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Хаджиев М.М., Богаченко Е.М., Савернюк Е.А. Селевые потоки 14–15 августа 2017 г. в бассейне р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ): условия и причины формирования, динамика, последствия // ГеоРиск. 2018. Т. 12. № 3. С. 82–94.

Ишков В.Н. Космическая погода в 25 солнечном цикле и его особенности развития // Семнадцатая конференция «Физика плазмы в солнечной системе» ИКИ РАН, 7–11 февраля 2022 г. Тезисы докладов. Москва: Издательство ИС РАН. 2022. С. 71.

Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому / Отв. ред. А.Б. Шмакин, М.: Ин-т географии РАН. 2009. 371 с. Прил. 1. Календарь последовательной смены ЭЦМ за 1899–2008 гг. С. 219–328.

Кононова Н.К. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 127–156.

Мальнева И.В., Кононова Н.К. Метеорологические условия формирования катастрофических селей в июле 2000 года в бассейне р. Герхожан-су и прогноз селевой опасности // Геологическое изучение и использование недр: Научн.-техн. информ. сб. Вып. 6. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. С. 75–81.

Мальнева И.В. Прогнозирование современных геологических процессов на территории России и стран СНГ в начале XXI века // Геоэкология. 2019. Вып. 1. С. 87–98.

Мальнева И.В., Черкесов А.А. Особенности космической погоды и метеорологических условий в Приэльбрусье летом 2019 года и проявление опасных природных процессов // Пятнадцатая конференция «Физика плазмы в солнечной системе» ИКИ РАН, 12–14 февраля 2020 г. Москва. М.: ИКИ РАН, 2020. С. 234–297.

Мальнева И.В., Докукин М.Д., Калов. Р.Х., Акаев А.Р., Анаев М.А. Оценка проявлений опасных природных процессов на Северном Кавказе в 2002 и 2022 гг. // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы XVII Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций. М.: ООО «Геомаркетинг». 2022. С.214–221.

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ. Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 2. С. 70–80.

Чижевский А.Л. Земля в объятиях Солнца. М.: Эксмо. 2004. 928 с.

Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. Москва: Недра, 1980. 296 с.

Развитие селевых процессов в бассейне реки Гошгарчай (на примере северо-восточного склона Малого Кавказа в пределах Азербайджана)

С.А. Мамиева

Институт географии имени академика Г.А. Алиева Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджан, kuliyevaseva18@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена изучению селеносности бассейна реки Гошгарчай, – воды которого широко используются в сельском хозяйстве и промышленности Азербайджанской Республики. Проведено детальное исследование морфометрических и морфотектонических показателей речного бассейна, проанализировано антропогенное воздействие на рельеф и на состояние воды в реке, что непосредственно приводит к увеличению селеопасности реки. Методом ретроспективного анализа космоснимков нескольких лет было выявлено увеличение конуса выноса реки Гошгарчай, посредством принесенного аллювиального материала. На левом берегу реки Гошгарчай на высоте 1600 м над уровнем моря расположен город Дашкесан, который является важнейшим центром рудной промышленности Азербайджана. Пустая порода после добычи полезных ископаемых, а также хозяйственная безответственность человека служит обогащению селевого потока большим количеством твердого материала, примеры, которых приводятся в статье. Нисколько обилие осадков, а их интенсивность при наличии селевого материала на данном районе приводит к разрушительным селям в этом бассейне. В верховьях реки Гошгарчай формирование селевых очагов происходит в результате интенсивной вырубки горных лесов и кустарников, перевыпаса скота и уничтожения горно-луговой растительности. Для прогнозирования катастрофических селей и снижения ущерба от них требуются знания о динамике экзогенных процессов на склонах и рециклирование рыхлого обломочного материала. Нами для данного бассейна на конкретных примерах рассматриваются селевые явления и приводятся меры по защите от них, также приведен фрагмент составленной картосхемы селевой опасности в бассейне реки Гошгарчай.

Ключевые слова: *сель, селеопасность, Гошгарчай, экзогенные процессы, бассейн реки*

Ссылка для цитирования: Мамиева С.А. Развитие селевых процессов в бассейне реки Гошгарчай (на примере северо-восточного склона Малого Кавказа в пределах Азербайджана). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 316–326.

Development of debris flow processes in the Goshgarchay River basin (a case of the northeastern slope of the Lesser Caucasus, Azerbaijan)

S.A. Mamiyeva

Institute of Geography named after academician H.A. Aliyev, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan, kuliyevaseva18@gmail.com

Abstract. The article is devoted to the study of the debris prosseses of the Goshgarchay river basin, the waters of which are widely used in agriculture and industry of the Republic of Azerbaijan. A detailed study of the morphometric and morphotectonic indicators of the

river basin was carried out, the anthropogenic impact on the relief and the state of water in the river, which directly leads to an increase in the river's debris hazard, was analyzed. Using the method of retrospective analysis of satellite images for several years, an increase in the alluvial fan of the Goshgarchay River was revealed, due to the presence of brought alluvial material. On the left bank of the Goshgarchay River at an altitude of 1600 meters above sea level is the city of Dashkesan, which is the most important center of the ore industry of Azerbaijan. Waste rock after mining, as well as human economic irresponsibility, serves to enrich the debris with a large amount of solid material, examples of which are given in the article. The abundance of precipitation, and its intensity in the presence of debris material in a given area, leads to destructive debris flows in this basin. In the upper reaches of Goshgarchay, the formation of debris centers occurs as a result of intensive cutting down of mountain forests and shrubs, overgrazing of livestock and destruction of mountain meadow vegetation. To predict catastrophic debris flows and reduce damage from them, knowledge about the dynamics of exogenous processes on slopes and the recycling of loose clastic material is required. For this basin, we examine debris flow phenomena using specific examples and provide measures to protect against them, we also provide a fragment of a compiled map of debris hazard in the Goshgarchay River basin.

Key words: *debris flow, debris flow hazard, Goshgarchay, exogenous processes, river basin*

Cite this article: Mamiyeva S.A. Development of debris flow processes in the Goshgarchay River basin (a case of the northeastern slope of the Lesser Caucasus, Azerbaijan). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 316–326.

Введение

На северо-восточном склоне Малого Кавказа сели наравне с другими опасными геоморфологическими процессами, усиливающими экологическую напряженность, относятся к экстремальным природным процессам. Сели на территории Азербайджана распространены достаточно широко, академиком Будаговым Б.А. северо-восточный склон Малого Кавказа отнесен к средне селеопасному региону, но, несмотря на это, сели наносят огромный урон домам, дорогам, мостам, приусадебным и посевным участкам, гибель скота, не мало случаев гибели людей. С учетом кратковременности селей, реакция людей на это стихийное бедствие должна быть очень быстрой и особенно это касается малых горных рек

Интенсивно расчлененные горы северо-восточного склона Малого Кавказа чрезвычайно резко обособлены и отличается высоким энергетическим потенциалом развития опасных рельефообразующих процессов, таких как нивальноморозные, гравитационные, эрозионные, денудационные и др. Длительная история развития рельефа обуславливает сложное его строение. Сейсмическая активность северо-восточного склона проявляется высокой 8–9 балльной активностью. Эти сейсмодислокации сыграли значительную роль в формировании внешнего облика современного рельефа. Наличие крутых уклонов склона в верховьях реки во взаимодействии с гидро и метеоусловиями объясняют интенсивность эрозионных процессов [*Антонов, 1991*]. Соответственно раздробленность, трещиноватость и расчлененность территории бассейна, приводит к разрушению горных пород и активному накопления материала для селей и оползней.

Для смыва или сноса со склонов рыхлого твердого материала имеется и достаточное количество объема воды в русле. Причинами зарождения селей в исследуемом регионе служат обильные ливневые осадки, интенсивное таяние снега и льда, а также на склонах бассейна реки Гошгарчай существует достаточное количество продуктов разрушения горных пород.

С возрастанием численности населения, созданием инфраструктур и объектов туризма селевые процессы усиливался. В высокогорной части бассейна реки исследуемого района благоприятные климатические условия, чистый воздух, горный и лесной ландшафт, ресурсы целебных минеральных вод и трав создают благоприятные условия для зон отдыха, которые расположены на высоте 1500–2000 м н.у.м. Прекрасные условия для лечения и отдыха в высокогорье, к сожалению, не только приводят к загрязнению реки, а также интенсивной вырубке лесов, прокладки дорог и строительство активизирует селевые очаги. Развитие сельского хозяйства, активное строительство домов, спортивных сооружений, инженерно-коммуникационных сооружений, усиливают экологическую напряженность в данном регионе, что создает необходимость постоянного мониторинга и исследований [*Алекперова, Мамиева, 2022*]. Часть реки Гошгарчай от поселка Хачагая до места впадения в реку Кура наиболее подвержена антропогенному воздействию. Площадь, орошаемая рекой Гошгарчай равна – 5,0 га. Посевные площади составляют 80,0 (га). Объем воды, использованной для орошения, приравнивается 9,7 млн м³. Объем потерь воды 10,6 млн м³.

В 1930–1940-е гг. для регулирования селей на реке была построена гидроэлектростанция мощностью 50 кВт. Она расположена в 63 км от истока, недалеко от села Загалы. Длина железобетонной плотины водохранилища – 15 м, ширина – 1,5 м, глубина воды – 3 м. Ниже плотины построен канал для работы ГЭС таким образом использованная вода возвращается обратно в реку Гошгарчай.

Методы

В статье использованы ГИС-технологии, полевые исследования, историко-генетический анализ геологических, геолого-геоморфологических карт, анализ фактических статистических материалов, компаративный и другие методы. Экономико-географическая оценка риска наводнений проводилась на основе принципа анализа бассейнов в пределах отдельных административных районов. Влияние селей на экономику в затопленных речных бассейнах республики изучалось путем расшифровки аэрофотоснимков, сравнительного анализа статистических показателей, картографирования и других методов, а на основе этих исследований определялась опасность селей в местах расположения населенных пунктов.

Обзор проблемы

Река Гошгарчай является правым притоком реки Кура. Она протекает через Дашкесанский, Гейгельский и Гянджинский административные районы. Река Гошгарчай, берущая начало с высоты 1605 м, имеет 10 рукавов, из них 4 правых и 6 левых. Образуется река слиянием реки Хамамчай и реки Хачбулаг, стекающих с северного склона горы Гошгар (3367 м) Муровдагского хребта Малого Кавказа. Хамамчай считается главной рекой. Он образован слиянием нескольких сильных подземных ключей, на высоте 3368 м. Основными притоками являются реки Гущу (длина 11 км), Зангил (длина 17 км), Хейра (длина 24 км), Хачбулаг (длина 11 км), Зиярат (длина 10 км) и Сарысу (длина 11 км). Длина реки самой реки Гошгарчай – 736 км, площадь бассейна составляет – 798 км². Гошгарчай впадает в Куру в 736 км от ее истока в 83 м от уровня моря. Средняя ширина бассейна 10,7 км, средняя высота 769 м. Основной паводок на реке происходит весной, продолжительность длится в среднем 90–100 дней. 45% годового стока приходится на дожди, 30% на снег и 25% на подземные воды. В этот период годовой сток увеличивается в 20–25 раз. После паводка наступает период межени. В этот период проходит 8–10% годового стока. Сели, возникающие после дождей, часто повторяются на р. Гошгарчай после окончания засухи. Вторая межень наблюдается в зимние месяцы. Среднегодовой расход воды составляет – 3,41 $м^3/с$. Большая часть стока приходится на весенне-летний период. Сели и паводки часто повторяются на р. Гошгарчай после окончания засухи, обычно наблюдаются в июле и августе. В период интенсивного орошения сток сбрасывается 10–12% годового стока.

Среднегодовой расход реки составляет – 0,11 кг/с, а ее наносы – 320 г/м³, большая часть которых (50–70%) приходится на май-июнь. Общее падение уклона реки 2277 м, средний уклон 30‰ [*Məmmədov, 2012; Каширо и др., 2012*].

Особенностью геологического и, в частности, тектонического строения исследуемой территории является ее положение в пределах горст-синклинальных средне и низких плато и возвышенностей, которые частично наложенны, интенсивно и умеренно расчлененны, сложенно деформированными осадочными и вулканогенно-осадочными породами мезазоя [*Ализаде, 2001*].

В верховье реки Гошгарчай занимает Хачбулагский участок Башкенд-Дастафюрской котловины, имеющей эрозионно-тектоническое происхождение. Для участка характерны средне и значительно расчлененные высокие уступы в коренных породах. В центре Хачбулагский участок имеет слабо расчлененный низкогорный рельеф. Наиболее пониженной частью описываемого участка котловины является устье р. Хамамчай, расположенное в 3,5 км к юго-востоку от села Хачбулаг. На самой высокой точке водораздела рек Гошгарчай и Дастафюрчай, представляющей очень плоскую поверхность, где учеными обнаружена галька. На высоте 1600–1800 м в междуречье рр. Гошгарчай и Шамкирчай, рр. Гошгарчай – Гянджачай хорошо сохранилась Тертерская поверхность выравнивания. Резкий уступ, отделяющий Тертерскую от Чардахлинской поверхности, обращен к долине реки Гошгарчай. Его интенсивное расчленение составляет резкий контраст с выравненной поверхностью водораздела [*Антонов, 1991*].

На северо-восточном склоне Малого Кавказа в районах, испытывающих в настоящее время интенсивное тектоническое поднятие наиболее уверенно и достаточно четко дешифрируются линеаменты (элементы рельефа, связанные с разломами и трещинами) соответственно, наиболее активно развиваются экзодинамические процессы. Расположение линеаментов в целом отражает общий фон раздробленности, трещиноватости и расчлененности территории, что позволяет выявить характерные участки, которые отличаются интенсивностью тектонических и эрозионных процессов. В долинах рек Гошгарчая, Шамкирчая, Гянджачая, Карачая в исследуемом регионе на космоснимках дешифрируются как поперечные (близсубмеридиональные) линеаментные зоны. Сложная, многоэтажная, разнонаправленная, гетерогенная сеть разрывных нарушений отражает напряженную геодинамическую обстановку [*Ализаде, 2001*]. В целом, линеаменты данного региона имеют «решетчато-петельный рисунок» с некоторыми незначительными отклонениями.

Особенно в районе пересечения долины реки Гошгарчай, морфоструктуру Шамкирского горст-антиклинорного поднятия выделяется полоса с относительно локальным увеличением значений и густоты изолиний иногда достигающих 600–750 м. Хотя надо отметить, что фоновое значение колеблется в пределах 200–400 м. Сгущение изолиний позволяет провести морфологическую границу Предмалокавказской наклонной равнины с Шамкирской морфоструктурой. Поверхность относительно слабо расчленена, уклон поверхности обычно не превышает 25–30°. Глубина расчленения, особенно в районе пересечения долин рек Гошгарчай и Шамкирчай колеблется в пределах от 30–50 м до 200–400 м. Северные склоны являются более крутыми, чем южные и юго-восточные.

Специфика анализа селеопасных районов по КС зависит от масштаба используемых материалов. Среднемасштабная информация из космоса обладает большой обзорностью и генерализацией, что позволяет одновременно просматривать строение отдельных селевых бассейнов и проводить классификацию русел по обнаженности на основании различий тона. Хорошая дешифрируемость селевых русел позволяет оценить дальность выброса селевых потоков. КС мелких масштабов малопригодны для изучения деталей селевых русел. Но они информированы для общих ландшафтно-геоморфологических факторов селеобразования [*Махмудов, 2008*].

В период с 2004–2023 гг. в бассейне реки наравне с гибелью людей были многочисленные разрушения домов, дорог, линий электроснабжения. Причиной прохождения селей являлись погодные условия – ливневые дожди. Жители района

испытывают трудности в передвижении: вышла из берегов река Гошгарчай, что привело к затоплению автодорог, некоторые участки автодорог пришли в негодность, например 23.05.2023 в 18:00 из-за стихии прервана связь 5 сел с райцентром, где около 7 тысяч жителей оказались, отрезаны от внешнего мира. Также стихия нанесла ущерб линиям связи и нарушила подачу электричества, разрушены дороги (таблица 1).

27.06.2023 около 11:00 часов на территорию Дашкесанского района обрушились проливные дожди, сопровождающиеся сильным градом. Стихийное бедствие повредило в городе Дашкесан большую часть подпорных стен, дорожную инфраструктуру, некоторые линии электропередачи и связи. Селевые потоки размыли фундаменты многих частных домов. В селах Човдар, Астаф, Габагтепе, Эмирвар, Баян, Чанагчы, Гушчу, Алаханчаллы и Гарагуллар нанесен серьезный ущерб дорогам, частным домам и хозяйствам. Мощный сель сошел на центральную улицу города Дашкесан. На некоторых дорогах в сельской местности из-за скопления грязи и падения крупных обломков скал остановлено движение транспорта. Ущерб нанесен также кровельным покрытиям зданий, улицам и мостам, фруктовым деревьям и сельхозугодиям. Селевые потоки вынесли грязевые массы и валуны на автодороги, затрудняя тем самым движение транспорта. Исполнительной властью Дашкесанского района были приняты меры по устранению последствий стихии. Комиссия по чрезвычайным ситуациям Исполнительной власти Дашкесанского района совместно с органами местного самоуправления, предприятиями и службами за счет имеющихся внутренних средств провели восстановительные работы.

Таблица. 1. Селевой опасности бассейна реки Гошгарчай (2004–2023 гг.)

№	Дата прохождения селя	Время прохождения селя	Причина возникновения селя	Последствие селя в пределах бассейна
1	22.07.2004	вечером	ливни	Разрушены дома, затоплены подвалы.
2	30.06.2007	15:00	ливни	Повреждены близлежащие приусадебные участки.
3	18.06.2009	-	проливные дожди	Были разрушены хозяйственные объекты, мост и пострадал скот,
4	2020	09:40	ливни	Прошел кратковременный сель.
5	08.08.2022	10:40	ливни	Ущерб линиям связи и нарушила подачу электричества
6	27.06.2023	14:01	ливни	Нанесен серьезный ущерб дорогам, частным домам и хозяйствам. Мощный сель сошел на центральную улицу города Дашкесан
7	22.06.2023	8:00	ливни	Повреждены дороги, прервана связь между райцентром и несколькими населенными пунктами, наблюдаются перебои в электроснабжении.

Источник: [*Мамиева, Алекперова, 2019; Махмудов, 2008*].

В увеличение количества и частоты прохождения селевых процессов огромную роль сыграло уничтожение лесов для использования их в качестве топлива и для строительства. «Освобожденные» от леса участки используются под пахотные земли и животноводство. В районе реки Гошгарчай леса уменьшились на 50–70%, в значительной степени сократились уникальные рекреационные свойства этого района. Нарушился микроклимат и ландшафтные особенности местности. Здесь также производится неконтролируемый выпас скота, в охранных землях создаются частные фермы. Кроме того, неконтролируемая добыча речного камня, гравия, песка и плодородной земли привела к нарушению почвенного покрова, эрозии, размыванию

берегов речек и, как следствие, к деградации почв. На данный момент позитивных изменений в данной ситуации не наблюдается, что увеличивают возможности процессов селеобразования. Исследования показатели, что в Дашкесанском и близлежащих Гедабейском, Шамкирском, Гейгельском районах уничтожение лесных массивов достигло уровня экологической угрозы.

К аккумулятивным формам рельефа, образованным селевыми потоками, отнесены конусы выноса, валы, чингилы, затвердевшие селевые массы, которые имеют свои генетические особенности, условия формирования и морфологические черты. Благодаря затуханию селей на отдельных участках на различных расстояниях от области их формирования, скопления селевых отложений имеет прерывистый характер. При прохождение мощных селей часть выносов отлагается на поймах и речных террасах, а другая – выносится на конусы выноса. Селевые отложения, накопленные в поймах и низких террасах, имеют определенную форму [*Мамиева, 2014*]. Сочетание значительного горизонтального, вертикального расчленения рельефа, крутизны склонов и особенностей геологического строения территории, которые при их хозяйственном использовании создают благоприятные условия для развития плоскостной, овражной эрозии, оползней, относящихся к опасным процессам и накапливающих материал для сноса селями [*Tarikhazer et al., 2023*].

В представленной работе процесс составления картосхемы селевой опасности с использованием КС включает 4 этапа: 1) на топографической основе, где основными элементами содержания являются рельеф и гидрография, выделяются селевые бассейны, площади водосборов, элементы гидрографии, ограниченные водоразделами; 2) дешифрируются КС, определяются характерные особенности исследуемых бассейнов; 3) проводятся полевые исследования на ключевых участках, уточняются результаты камерального дешифрирования; 4) на основу переносятся результаты дешифрирования КС с использованием материалов полевых работ, и определяется степень селевой опасности исследуемой территории.

Анализ карты крутизны склонов земной поверхности показывает, что наибольшая крутизна склонов наблюдается в приречных участках водораздельных равнин р. Гошгарчай. В пределах бассейна значительные площади распаханных земель междуречья являются эрозионно опасными и подвержены определенным геоморфологическим рискам.

Суммарное горизонтальное расчленение рельефа (реками, балками) не одинаково близ истока р. Гошгарчай, горизонтальное расчленение чаще изменяется от 0,5 до 1,0 км/км², в среднем течение реки значения повышаются от 1,0 км/км² до 1,5 км/км², по направлению к устью расчленение увеличивается, в западной части бассейна встречается участок с расчленением до 2 км/км² [*Мамиева, Алекперова, Гамидова, 2015*].

Минимальные значения расчленения (0–0,5 м/км²) встречаются непосредственно в выходе реки на Предмалокавказкую равнину. Это участки, приуроченные к небольшим по площади выровненным поверхностям террас реки. Невелико расчленение и на небольших плакорных участках междуречий, в целом участки с малым расчленением. Участки с максимальным расчленением 1,5–2 км/км² наблюдается в средних частях склонов бассейна Гошгарчай, суммарная площадь таких участков невелика.

В целом в бассейне р. Гошгарчай преобладают значения горизонтального расчленения от 0 до 1,0 км/км². Основу горизонтального расчленения территории составляют овраги, овраги, карст, бедленд, также неоднородно и увеличивается в направлении к центральной части бассейна, что определяет аналогичное изменение суммарного расчленения территории.

Весьма значительно и вертикальное расчленение рельефа: относительные превышения достигают 600 м, но преобладают значения от 400 – до 600 м. Минимальные значения вертикального расчленения наблюдаются в месте выхода р. Гошгарчай к равнине. Перепады высот колеблются от 100 до 1800 м и более. При устьевой части р. Гошгарчай вертикальное расчленение составляет около 100 м, в средней части долины оно в основном меняется от 400 до 600 м (рис. 1) [*Мамиева, 2014*].

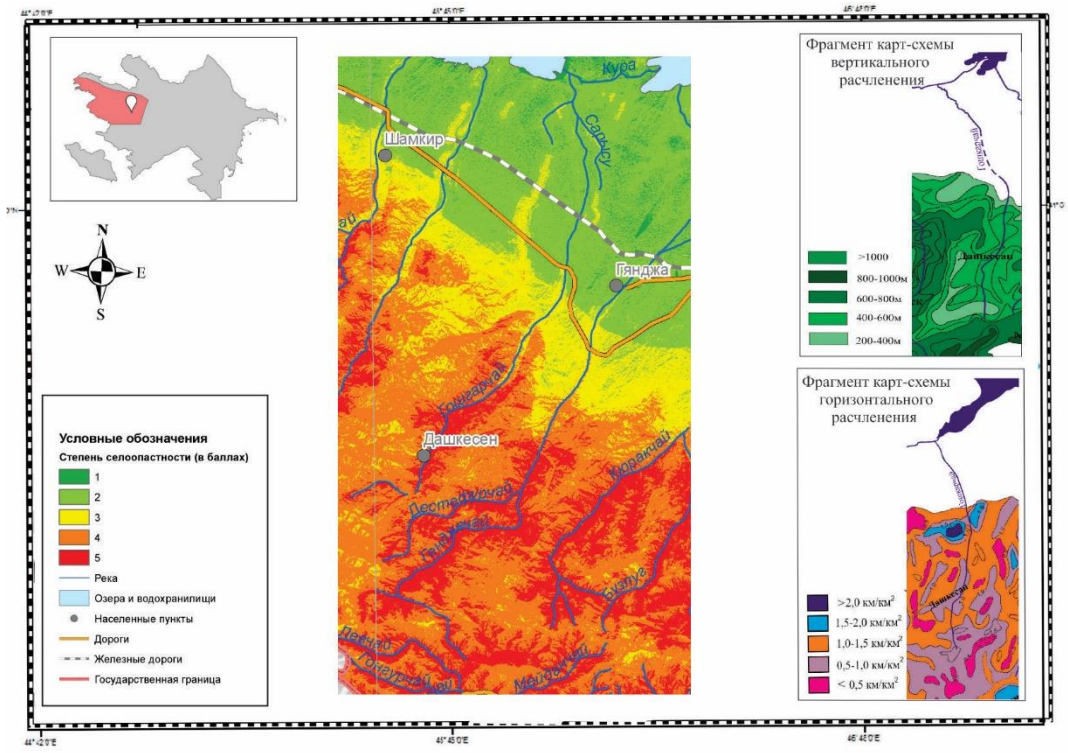


Рис. 1. Фрагмент картосхемы степени селеопасности в бассейне реки Гошгарчай

Самое низкое положение в рельефе бассейна р. Гошгарчай занимает русло реки, абсолютная высота в устье реки составляет 100м, истоки Гошгарчай лежит на высоте 1800 м н.у.м. Высоты профиля реки повышаются по направлению от устья к истокам, в междуречье рр. Гошгарчай и Кура высоты варьируют от 1800 м до 200 м. Густота речной сети бассейна составляет 0,39 км/км². Долина реки в верховьях имеет V-образную форму, ширина дна здесь 1–2 м, высоты склонов 10–30 м. Река расширяется к низовью. Она продолжает расширяться вплоть до города Дашкесан, ширина в нижнем течении 30–70 м. Самый широкий участок долины недалеко от села Гюней-Загалы. Высота склонов 200 м, крутизна 20–60°. Ниже села Сарытепе река принимает форму троговой долины, ширина реки 120–200 м, высота склонов 20–30 м, уклоны 20–30°. Сели, и паводки часто повторяются на р. Гошгарчай после окончания засухи, обычно наблюдаются в июле и августе [*Махмудов, 2015*].

Составленная нами картосхема бассейна отражает также отражает характерное распределение высот исследуемой территории (рис. 1). Важно отметить, что в исследуемом районе, наряду с положительными формами рельефа имеют место и отрицательные формы, к которым относятся карьеры, возникающие в результате антропогенного влияния. Отработанные карьеры разрушают полезный продуктивный слой почвы, оставляя бросовые земли или пустоши. Следует отметить, что сегодня местные жители активно используют крупные камни из отвалов для нужд строительства. В результате работы Дашкесанского железорудного предприятия созданы конусообразные формы рельефа площадью 80–100 га. Пустопорожные породы в виде осыпных конусов скопились на склонах реки Гошгарчай. Основными вредными антропогенными факторами в населенных пунктах исследуемого района является отсутствие канализационной системы, выброс мусора, неправильное использование транспортных дорог и др. [*Мамиева, Алекперова, Гамидова, 2015*].

Для характеристики и оценки селеносности исследуемого бассейна на основе собранного материала нами представлен фрагмент карты-схемы селеопасности реки Гошгарчай (рис. 1). На представленной картосхеме селевой опасности по пяти бальной системе, нами выделены наиболее напряженные территории. К V баллу отнесены очень

напряженные территории с высокой степенью опасности (раз в 2–3 года возможен 1 сильный сель). К IV баллу отнесены напряженные территории со средней селевой опасностью (раз в 3–5 лет возможен 1 сильный сель). К III баллу отнесены территории со слабой селевой опасностью (раз в 5–10 лет сильный сель). Ко II баллу отнесены территории с потенциальной селевой опасностью. К I баллу отнесены территории, где практически не наблюдаются селевые явления. Установлено, что в результате увеличения антропогенного воздействия в исследуемом бассейне происходит резкое усиление процесса селеобразования, расширились площади селевых очагов, в результате чего повысилась экзодинамическая опасность региона, и усилился риск для жизнедеятельности людей [*Мамиева, 2014*].

На левом берегу реки Гошгарчай на высоте 1600 м н.у.м. расположен город Дашкесан, который возник благодаря добыче железной руды и является важнейшим центром рудной промышленности Азербайджана. Минералы включают железную руду, кобальт, алунит, мрамор, известняк и др. В настоящее время в стране подтверждены запасы трех железорудных месторождений: «Дашкасан», «Джануби Дашкасан» и «Демир». Разведанные запасы железной руды составляют более 250 миллионов тонн. Промышленная добыча руды здесь началась в 1954 г. Также была построена канатная дорога длиной 4 км для транспортировки добытой на руднике руды на месторождение железной руды. В южной части г. Дашкесан в результате интенсивной эксплуатации местных карьеров образовалась большая масса отвальной породы, которая на протяжении десятилетий скапливалась в виде конусов. В настоящее время на их поверхности образовался крупный оползень техногенного происхождения.

После обретения Азербайджаном независимости в Гяндже был построен крупный металлургический завод. ОАО «Дашкасан Филизсафлизам», действующее с 2007 г., приступило к добыче железной руды только в августе 2010 г. после экономического кризиса. Всего количество железа в 36 тыс.т. произведенного концентрата составляет 60,3%, в остальном – 52–58%. Река Гошгарчай от села Баян, где расположен металлургический завод до точки впадения в Куру, откуда неочищенные сточные воды жилых помещений и завода с увеличенным содержанием азотистых соединений разлагаемой органики, тяжелых металлов и взвешенных веществ попадают в реку. Также на этом участке забирается вода из реки для промышленных целей. Вода коричневая, мутная и субстраты (камни) покрыты слоем ила. Предприятие имеет мощность по добыче 40–50 тыс.т. железной руды в месяц. Машиностроительная отрасль представлена производством оборудования для заводов, средств связи, ремонта машин и сельскохозяйственной техники. Предприятия легкой промышленности района состоят из производства хлопчатобумажных местного сырья и хлопчатобумажной ткани, шерстяных тканей и ковров в Дашкасане и других районах. Азербайджанский бентонит высоко ценится за свое качество. Он служит основным компонентом металлургической промышленности, добывается совместным российско-азербайджанским предприятием «Азроспроминвест» на участке «Дашсалахлы», расположенном на границе с Арменией. Производственная мощность «Азроспроминвеста» составляет 245 тыс. т/год. Это предприятие обеспечивает 90% металлургического рынка России бентонитом [*Мамиева, Алекперова, 2019*].

Большинство жителей села Хошбулаг, города Дашкесан, которым приходится использовать загрязненную воду реки Гошгарчай в хозяйстве и быту, страдают от различных заболеваний. Чрезмерное загрязнение реки Гошгарчай превратило ее в источник реальной опасности для жителей приречных населенных пунктов. Если не принять срочные профилактические меры, естественный режим реки окажется под угрозой. Это настоящая проблема для тысяч людей, пользующихся водой реки. Мало того, что сточные воды Дашкесанского района годами сбрасываются прямо в реку без очистки, с одной стороны, предприятия, занимающиеся производством мрамора, сбрасывают свои сточные воды в реку, создав реальную угрозу для реки Гошгарчай. Участок долины реки Гошгарчай от поселка Хачагая до места впадения в реку Кура серьезно пострадал от раздачи воды на орошение и от сброса сточных вод. В регионе обнаружены серьезные проблемы для достижения соответствующих работ по очистке

производственных отходов и сточных вод, которые приводят к катастрофическому экологическому состоянию реки.

На высоте 1200–1300 м интенсивно развито орошаемое земледелие и животноводство. И как результат возросшего воздействия на склоны они оказались подвержены овражной эрозии, оползневым и осыпным процессам. На территории между селами Газанбулаг, Гурударя, Сарыехуш появились зимние пастбища (гышлаги). Как следствие в результате перевыпаса скота на правом берегу рр. Гянджачай, Дзегамчай, Шамкирчай склоны гор оголены. На территории села Зурнабад широко распространены осыпной материал и глыбы камней [*Мамиева, 2014*].

В частности, наличии формирующих сели материалов, присутствие (наличие) источников интенсивного обводнения этих грунтов, а также геологических форм, способствующих образованию достаточно крутых склонов и русел. В последние годы рост населения и изменения климата увеличили спрос на воду в регионе. Мониторинг, проведенный на реке Гошгарчай, показывает, что деревья, орошаемые загрязненной речной водой, засыхают, а продуктивность фермерских хозяйств снижается. Антропогенный фактор, который способствует формированию материала, готового для сноса селями при первой возможности является одной из важных причин формирования селей на исследуемой территории. Основными провоцирующими факторами же антропогенных процессов исследуемого района является отсутствие канализационной системы, выбросы производственного неочищенного мусора в реки, неправильное использование транспортных дорог и др.

Выводы

В процессе освоения горных регионов первостепенное значение имеет проблема изучения, оценки и прогнозирования, опасных природно-разрушительных явлений, которые являются чрезвычайно угрожающим экологии фактором. Азербайджан входит в число стран мира не богатых водными ресурсами. В Республики эффективного использования рек существуют, предпринимаются действенные шаги, хотя в полной мере это нельзя применить к реке Гошгарчай.

Общепризнанно, что существующие методы делятся на 2 группы: инженерные и неинженерные методы. Инженерные методы – это традиционные методы, широко используемые при борьбе с наводнениями во всем мире. Развитие науки и техники позволило этим методам сыграть важную роль. Поскольку характеристики наводнений и природно-географические условия районов их формирования различны, различны и применяемые на практике инженерные методы.

Для противоселевых мероприятий некоторые требуемые действия как строительство водохранилищ, создание системы управление речного бассейна, укрепление берегов рек, очистка речных русл от наносов и т.п. позволяют регулировать образование селей. В борьбе с селями люди постепенно осознали, что это стихийное бедствие можно контролировать лишь до определенной степени. Ведь если сель очень сильный он разрушит и плотину, нанося еще больший ущерб экономическим и социальным системам. Этот уровень определяется развитием науки и техники, финансовых и материальных ресурсов. Повсеместное строительство инженерных сооружений невозможно и не нужно. Помимо инженерных устройств, а иногда и вместо них, должны широко использоваться не инженерные методы. Такие методы практически не оказывают негативного воздействия на окружающую среду. Основными не инженерными методами являются следующие – создание единой команды и системы управления, создание системы мониторинга для прогнозирования и предупреждения, лесопосадка, страхование от селей и т. д [*Tarikhazer, 2020*].

Основной причиной формирования селей является не только уменьшение частоты выпадения атмосферных осадков, но и повышение их интенсивности и усиление процессов выветривания и, как следствие, обильное питание селей твердыми материалами. Сбор сточных вод в крупных жилых массивах и их очистка вода реки Гошгарчай представляет один из самых важных аспектов для сохранения реки. Вторая

по значимости проблема – это промышленные предприятия, загрязняющие воду. Промышленные предприятия, расположенные вокруг реки Гошгарчай, также должны создать свои очистные сооружения, а воду, которую они возвращают в реку, необходимо прежде очищать. Длина сооружений защитной плотины от селей и наводнений на реке Гошгарчай – 10,0 км.

В целях предотвращения наводнений и селей каналы реки Гошгарчай были отрегулированы. Каналы Надель, Моллаосман, Кызылджа и Бахрамбах и канавы были укреплены листами, бетонными блоками и другими средствами. С помощью тяжелой техники в русле реки проведены очистные работы объемом 171 тыс. м^3. В целом интенсивность выпавших в разное время осадков привела к многократному прохождению селевой массы по региону. В результате селей, неоднократно проходившего через Гейгельский и Дашкесанский районы, а также город Гянджу, были повреждены частные фермы, домашняя птица, животные, даже автомобили, хранившиеся во дворах, дорожная инфраструктура, мосты, ирригационные сети жителей города, поселка и села. В целях предотвращения стихийного бедствия в ведомстве созданы штаб и оперативные рабочие группы. С помощью сил и техники ведомства в течение дня и ночи были удалены крупные деревья и другие массы, застрявшие перед мостами и оросительными сетями, и сель как бы перенесен в сторону течения реки. Благодаря этому сельскохозяйственные поля в районах были защищены от опасности [*Azərbaycanin orta kür hövzə..., 2015*].

Учитывая опасность селевых процессов кроме предложенных мер по защите, территории важно принимать своевременные и соответствующие решения по выполнению Государственных Программ. Решения, принятые в государственной политике (2004–2008 и 2009–2013 гг.), имеют особое значение для решения проблемы наводнений и селей. Первая и Вторая Государственные Программы по многим бассейнам рек в Азербайджане принятые решения не были полностью реализованы. Решения анти-селевых программ как видно требует как грамотных научных, так и добросовестных административных вмешательств.

Список литературы

Алекперова С.О., Мамиева С.А. Влияние селей на территориальную организацию хозяйств в населенных пунктах бассейнов горных рек (на примере междуречья Дзегамчай – Гянджачай в азербайджанской части Малого Кавказа) / Научный журнал «Вопросы географии и геоэкологии», № 1, Алматы, Казахстан, 2022. с. 37–46, https://doi.org/10.55764/2957-9856/2022-1-37-45.05.

Ализаде Э.К. Особенности морфоструктурного дешифрирования КС зоны сопряжения морфотектонических блоков (на примере восточной части Малого Кавказ) // Геоморфология, № 1, М., 2001, с. 22–30

Антонов Б.А. Геоморфология и вопросы новейшей тектоники юго-восточной части Малого Кавказа. Баку,1991. 161 стр.

Azərbaycanin orta kür hövzə rayonu üzrə çay hövzəsinin idarə edilməsi planı. Beynalxalq çay hövzələri ətraf mühitinin mühafizəsi layihəsi müqavilə No.2011/279-666. Bakı, 2015. 200s.

Каширо М.А., Жилина Т.Н., Васильева М.С., Евсеева Н.С. Эколого-геоморфологические исследования бассейна р. Басандайки (Томская область). «Науки о Земле», Томск, 2012 г. с. 184–188.

Məmmədov M.Ə. Azərbaycanın hidroqrafiyası. “Təhsil”. Bakı 2012. 254 s.

Мамиева С.А. Оценка экогеосистем северо-восточного склона Малого Кавказа (на основе материалов дешифрирования КС) Автореферат. Баку, 2014. 27 стр.

Мамиева С.А., Алекперова С.О. Влияние антропогенного фактора на предгорные и горные территории северо-восточного склона Малого Кавказа // Матер. науч. конф. общественных географов (Азербайджан-Россия) «Человеческая география в Азербайджане и России: основные пути развития в XXI веке». Баку 2019, с. 194–201.

Мамиева С.А., Гамидова З.А., Алекперова С.О. Селеопасность на Малом Кавказе и оценка влияния селей на хозяйственную систему (на примере северо-восточного склона Малого Кавказа) // Журнал «География и природные ресурсы», № 2, Баку, 2015, с. 35–40.

Махмудов Р.Н. Каталог рек Азербайджана. Баку, 2008. 106 стр.

Махмудов Р.Н. «Анализ гидрометеорологических условий в Азербайджане» 2015 г, изд. Баку. 312 с.

Tarikhazer S.A. Mammadov S.G., Hamidova Z.A. – Application of quantitative methods for the of landslide susceptibility of the Aghsuchay river basin // Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University, series" Geology. Geography. № 58, 2023, p. 257–273 https://doi.org/10.26565,2410-7360-2023-58-20

Tarikhazer S.A. The geographical prerequisites for the identification and prevention of dangerous geomorphological processes in the mountain geosystems of the Alpine-Himalayan belt (on the example of the Major Caucasus of Azerbaijan) // Journal of Geology, Geography and Geoecology. Украина, Днепропетровск, № 1, 2020, p. 176–187 DOI https://doi.org/10.15421/112016

Risk assessment of debris flows in vulnerable areas

S.I. Matsiy, U.R. Sidaravičute, V.S. Matsiy

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia, dd600902@gmail.com

Abstract. The study provides the first assessment of debris flow risk for locally detected debris flow basins within the confines of the study area. On the basis of the quantitative and qualitative data on debris flows and consequences of their descent, acquired while carrying out works in the territory of the Republic of Crimea near the village of Dachnoe, the initial data on debris flows are divided into three groups, for each group a stage-by-stage assessment with assignment of scores is carried out, and calculated indicators such as debris flow velocity and flow rate are determined. According to the results of the study, the third group belongs to second category debris flow risks, which is characterised by a high probability of significant damage. The first and the second groups belong to the third category debris flow risks. The conducted semi-quantitative assessment of debris flow risk allows to identify potentially dangerous areas, inform about the threat, and take timely measures to protect the lands. In order to protect lands from the destructive force of debris flows within third group basins, it is necessary to erect debris flow control structures, namely: agroforestry and erosion control structures, debris flow retention structures, debris flow check and prevention facilities, and other engineering protection facilities.

Key words: *debris flow, debris flow hazard, semi-quantitative assessment, debris flow risk, land conservation*

Cite this article: Matsiy S.I., Sidaravičute U.R., Matsiy V.S. Risk assessment of debris flows in vulnerable areas. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 327–333.

Оценка риска селевых потоков на незащищенных территориях

С.И. Маций, У.Р. Сидаравичуте, В.С. Маций

Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия, dd600902@gmail.com

Аннотация. В работе впервые дана оценка селевого риска для локально выявленных селевых бассейнов в пределах исследуемой территории. На основе количественных и качественных данных о селях и последствиях их схода, полученных при проведении работ на территории Республики Крым в районе села Дачное, исходные данные о селях разделены на три группы, для каждой группы проведена поэтапная оценка с присвоением баллов, определены расчетные показатели, такие как скорость и расход селей. Согласно результатам исследования, третья группа относится ко второй категории селевых рисков, которая характеризуется высокой вероятностью значительного ущерба. Первая и вторая группы относятся к третьей категории селевых рисков. Проведенная полуколичественная оценка селевого риска позволяет выявить потенциально опасные участки, информировать об угрозе и своевременно принять меры по защите земель. Для защиты земель от разрушительной силы селей в пределах бассейнов третьей группы необходимо возведение противоселевых сооружений, а именно: агролесомелиоративных и противоэрозионных, селезадерживающих, селепропускных и противоселевых сооружений и других объектов инженерной защиты.

Ключевые слова: *сель, селевая опасность, полуколичественная оценка, селевой риск, охрана земель*

Ссылка для цитирования: Маций С.И., Сидаравичуте У.Р., Маций В.С. Оценка риска селевых потоков на незащищенных территориях. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 327–333.

Introduction

Debris flows cause colossal damage to the national economy, agriculture and certain local inhabitants by destroying not only settlements and industrial enterprises, but also transport infrastructure and adjacent infrastructure facilities (electric power lines, gas and water pipelines, communication lines, etc.). The territory of the Crimean Peninsula is actively affected by landslides, debris flows and other dangerous geological phenomena. The main factors of debris flow formation are lack of green cover on slopes, and land degradation (water and wind erosion) [*Gorbunov,2020, Popovych, 2021*]. During the works on the site, it was determined that the greatest danger was posed by debris flows near Dachnoe village. For further works, basins and channels formed by debris flows were studied, some of which were known to occur annually and cause catastrophic damage. The emergence of debris flows was caused by a sharp rise in the water level in the channel, active erosion processes, and significant slopes [*Ghetto, 2022*].

Brief overview of the issue

An area is considered as debris flow-prone if one or more debris flow basins are found there. Since there is no generally accepted methodology to rank land sites by the degree of debris flow danger, the use of semi-quantitative, quantitative, qualitative and other methods is possible for research purposes. It is possible to comprehensively assess the degree of debris flow danger if the method of field surveys is combined with the analysis of meteorological, geological and other data, which can be achieved by semi-quantitative assessment of debris flow risk [*Kiul, 2011*].

Reclamative afforestation is used to protect the terrain from the impact of debris flows and erosion processes. It includes: forestry practices aimed at improving the soil, hydrological and climatic conditions of the terrain (creation of field-protective forest belts, afforestation of gullies, steep slopes and sands) [*Maltseva, 2021*].

Therefore, the purpose of the present study was to determine the level of debris flow danger in the area, including determination of the category of debris flow risks based on the debris flow basins found in the area, and determination of the main causes of debris flow formation. If required for further stabilisation of the situation, the following debris flow control works should be carried out: erection of debris flow protection structures, and development of a system of reclamative afforestation activities.

The Crimean Peninsula belongs to the areas with moderate risks of fluviomorphological processes, where sediment-water debris flows (with predominantly large fractions) prevail (Fig. 1) [*Chalov, 2016*]. The solid part of such debris flows is formed due to the washout of friable fragmental material from bare slopes and erosion of river sediments. Low-density flows with solid material saturation up to 330 kg/m^3 are more often formed in small water catchments [*Kiul, 2011*].

Atmospheric precipitation is the only source of water inflow to the analysed area [*Gorbunov, 2021*]. Fissure-karst waters and precipitation falling in the area are infiltrated into the thickness of rockfall and landslide formations. The greatest amount of precipitation falls in Crimea during the passage of meteorological fronts of cyclones; this period falls on summer months (summer type of atmospheric circulation begins from the second half of May and lasts until the end of September) [*Yefimov, 2022*]. Due to these climatic conditions, the rainfall type of debris flow formation prevails, and combined with the lack of erosion control measures, the risk of debris flows increases significantly (Fig. 2).

a b c

Fig. 1. Debris flow channel: a – PK294, within the boundaries of the modern debris flow fan; b – PK299, near the bed of a temporary watercourse; c – PK289, within the boundaries of the ancient debris flow fan

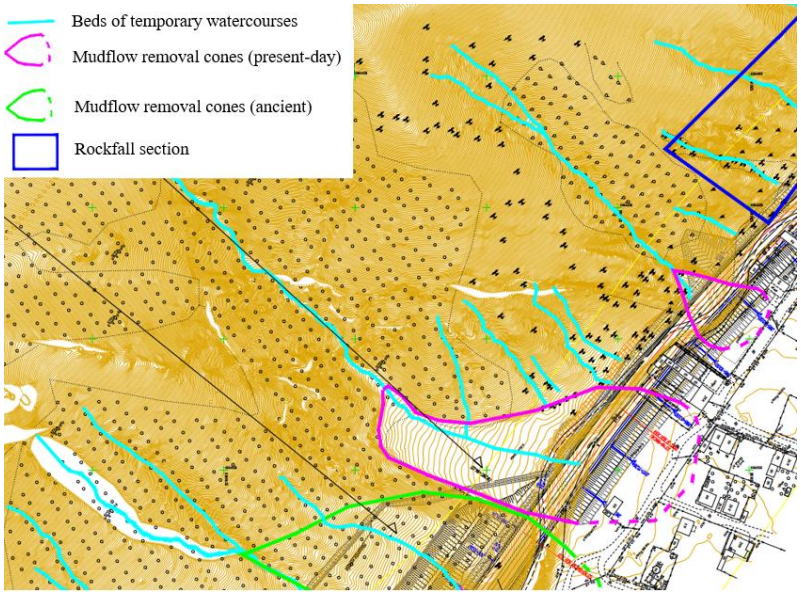


Fig. 2. Summary plan combined with the layout of debris flow channels

When debris flows are formed by climatic and geological factors, the debris flow-forming soils differ from friable fragmental material by conditions of bedding, genesis, particle-size material composition, and such debris flow-forming sources are referred to potential debris flow massifs [*Kiul, 2011*].

The collection and analysis of information on debris flows includes:

- identification of the areas subject to active debris flow processes for further observation, and of the main factors of debris flow formation (lack of vegetation on slopes, presence of prolonged heavy precipitation);
- study of the consequences of debris flows with respect to transport installations and the adjacent territory (partial or complete disruption of roadway integrity, reduction of performance of adjacent engineering utilities);
- determination of the priority of works, formulation of recommendations on protection of the areas exposed to debris flows.

For convenience and clarity, the debris flow basins were divided into three groups according to the maximum basin height.

The soils composing the debris flow channel were 5–10 cm thick in the upper part and 0.5–1.0 m thick in the lower part. The thickness of the soils composing the fans reached 5–7 m.

Materials and methods

The assessment results provide a basis for prioritising the reconstruction and construction of protection structures, including structures to protect agricultural lands from debris flows. Once the number of scores for a debris flow basin or a group of debris flow basins has been determined, a risk category is assigned, on the basis of which design decisions are made [*Matsiy, 2019*].

In order to conduct a semi-quantitative assessment of the debris flow risk of the area, the debris flow risk assessment factors were adjusted, with scores assigned for them taking into account the factors dominating in the territory of the site (Table 1) [*Matsiy, 2019*]. The assessment results provide a basis for prioritising the reconstruction and construction of protective structures, including ones to protect agricultural lands from debris flows. Once the number of scores for a debris flow basin or a group of debris flow basins has been determined, a risk category is assigned, on the basis of which design decisions are made [*Matsiy, 2019*].

In order to conduct a semi-quantitative assessment of the debris flow risk of the area, the debris flow risk assessment factors were adjusted, with scores assigned for them taking into account the factors dominating in the territory of the site (Table 1) [*Matsiy, 2019*].

Table 1. Semi-quantitative assessment of the debris flow risk

Reference	Score	Description of factor	Influence quantity
Group I			
H1	2	Average catchment slope steepness – 27°	0.2
H2	4	Catchment channel steepness – 24°	0.3
H3	2	limiting factor of water balance change – atmospheric precipitation	0.1
H4	2	active development of water erosion and deflation processes, lack of green cover on slopes.	0.3
H5	1	friable fragmental material involved in debris flow formation – up to 2,500 cubic metres per square kilometre	0.2
H6	2	channel is partially sodded (<1%)	0.3
H7	1	max basin height – 165 m	0.2
H8	4	frequently recurring debris flows (once in 2–3 years)	0.3
H9	0	absence of breakthrough lakes	0.3
H10	2	dispersed debris flow centres and/ or potholes	0.3
A	0.1	no debris flow control structures	–
D1	3	regional road	–
D2	4	section length over 100 m	–
D3	1	low degree of debris flow impact on transport infrastructure and adjacent infrastructure facilities	–
D4	2	presence of engineering communications in the vicinity of the motorway	–

Thus, quantitative and qualitative indicators of Table 1 serve as a basis for making design decisions on stabilisation of the situation, where in accordance with qualitative characteristics the following are determined: level of responsibility, additional coefficients for reliability calculation, etc., and quantitative ones are necessary for direct calculations of retention capacity of designed structures, calculation of loads on such structures, etc. [*Sidaravičute, 2023*]. If there are protective structures in the debris flow-prone area, decisions on their replacement, reconstruction or reinforcement are made depending on their wear and tear.

Coefficient D5 – the debris flow discharge is determined by the formula recommended for use by Industry Road Guidance Document 218.2.052-2015:

$$Q_c = V_c \cdot \omega, \quad (1)$$

where Q_c is the debris flow discharge, m^3/s; V_c is the debris flow velocity, m/s; ω is the debris flow cross-section area, m^2.

According to Industry Road Guidance Document 218.2.052-2015, debris flow speed is calculated by the following formula:

$$V_c = \frac{\sqrt{2g\Delta h}}{\alpha'}, \quad (2)$$

where V_c is the debris flow speed, m/s; g is the free-fall acceleration, m/s^2; Δh is the height difference between absolute elevations of level marks, m; α' is the coefficient depending upon the peculiarities of the debris flow mass (the average value $\alpha' = 0{,}65$)[2].

Thus, for Group I of debris flow basins the maximum absolute elevation of level traces was 119.01 m, the minimum was 117.36 m, here Δh = 1.65 m, hence, the debris flow velocity V_c = 8.75 m/s (2), which corresponds to cohensionless debris flows [*Perov, 2012*]. The cross-section area was determined in field conditions, the average value for Group I being ω = 0.369 m^2. Thus, substituting the values into the formula, the debris flow discharge is obtained: Q_c = 3.23 m^3/s (1).

The value of potential damage directly depends on the significance of the motorway. The formula to calculate the value of damage is shown in [*Matsiy, 2019*]:

$$C_n = D_1 + D_2 + \ldots + D_n, \quad (3)$$

where $D_{1, 2, \ldots, n}$ is the partial damage coefficient.

For Group I, the value of damage is as follows: C_1 = 19.

$$P_n = H \cdot A, \quad (4)$$

where P_n is the probability of impact of a hazardous geological process (debris flow) on road infrastructure facilities; H is the total indicator of predisposition to the emergence of debris flow; A is a constant reflecting the state of protective structures (debris flow protection structures), depending on the level of wear; in the absence of such structures the highest significance coefficient of 0.1 is assigned [*Matsiy, 2021*].

The probability of debris flow impact on road infrastructure facilities is: P_1 = 0,52.

$$H = \sum H_n \cdot t, \quad (5)$$

where H the total indicator that reflects predisposition to the emergence of debris flow; H_n is debris flow formation factor; t is the significance coefficient of the debris flow formation factor [*Sidaravičute, 2023*].

Here for Group I the following was obtained: H = 5.2.

The risk category is determined by the formula [*Sidaravičute, 2023*]:

$$R_c = P_n \cdot \mathrm{C}_n, \quad (6)$$

where R_c is the debris flow risk category; P_n is the probability of impact of a hazardous geological process (debris flow) on road infrastructure facilities; C is the indicator of potential damage value.

Results and discussion

Thus, RI = 9.88, hence, Group I of basins is included in R_3 risk category; debris flows of this group pose a low threat. To prevent catastrophic consequences, it is necessary to apply slope-greening measures.

A similar assessment was carried out for Groups II and III, and the results were as follows.

Group II – atmospheric precipitation is the limiting factor of debris flow formation; active development of erosion processes and lack of green cover on slopes; sodding of channels. In terms of distribution, debris flow-forming sources are dispersed, and there are no breakthrough lakes. In terms of quantitative parameters, the basins belonging to this group are characterized by an average catchment slope steepness of 29° and channel steepness of 23°, while the maximum height of the debris flow basins reaches 232 m on average in the Baltic Elevation System. Here, the friable fragmental material involved in debris flow formation do not exceed 2500 m^3/km^2, and the recurrence of debris flows of this group takes place once every two to three years. According to the debris flow discharge calculation, the average value is 11.00 m^3/s. The debris flow basins are located in close proximity to the regional motorway with adjacent engineering utilities. Here, the area affected by debris flows reaches 100 m. However, the debris flows' impact on objects of various purposes is assessed as low, bearing in mind the absence of debris flow control structures. The total weight of "*H*" indicators for Group II is 5.4.

For Group II of debris flow basins, the flow velocity was determined by formula (2), at Δh = 2.32 m; V_c = 10.3 m/s. The cross-sectional area was determined in field conditions: ω = 1.06 m^2. Consequently, the flow rate was determined by the formula (1): Q_c = 11.00 m^3/s. For Group II, the index of potential damage C_2 = 21, and the probability of the impact of a dangerous geological process (debris flow) on road infrastructure facilities P_2 = 0.54. The weight of "*H*" indicators is determined by formula (5): H_2 = 5.4. Thus, according to the formula (6); *RII* = 11.34, Group II of basins is included in *R3* risk category; debris flows of this group pose a low threat; without greening measures on slopes applied to prevent water and wind erosion, the situation will aggravate.

For Group III, atmospheric precipitation is the main factor of debris flow formation; active development of erosion processes of weathering, deflation and absence of greening on slopes, and significant sodding of channels (more than 48%) were identified for this group. By nature of distribution, debris flow centers are dispersed, and there are no breakthrough lakes. The quantitative parameters of the basins belonging to this group are: catchment slope steepness – 36°; channel steepness – 19°, and the maximum height of debris flow basins on average reaches 344 m in the Baltic Elevation System. In this group, the friable fragmental material involved in debris flow formation do not exceed 20,000 m^3/km^2, and debris flows of this group recur with a frequency of once every two to three years. Based on the calculations, the average debris flow discharge is 67.86 m^3/s. The debris flow basins are located in close proximity to the regional motorway with adjacent engineering utilities. The area affected by debris flows reaches 100 m. However, the impact of debris flows on objects of various purposes is assessed as low, in the absence of debris flow control structures. The total weight of "*H*" indicators for Group III is 6.6.

Calculations for Group III debris flow basins were carried out similarly, viz.: the flow velocity was determined by formula (2), at Δh = 3.44 m: *Vc* = 12.6 m/s. The cross-sectional area for Group III was determined in field conditions and was equal to: ω = 5.37 m^2. Consequently, the flow rate was determined by the formula (1): Q_c = 67.86 m^3/s. For Group III, the index of potential damage C_3 = 23, and the probability of the impact of a dangerous geological process (debris flow) on road infrastructure facilities P_3 = 0.66. The weight of "*H*" indicators is determined by formula (5): H_3 = 6.6. Thus, according to the formula (6); *RIII* = 15.18, Group III of basins is included in R_2 risk category, which implies a high probability of damage to engineering, transport and other structures.

Conclusions

The study is the first assessment of debris flow risk for debris flow basins found within the boundaries of the area studied. Based on the semi-quantitative assessment of debris flow risk for three groups, the following results were obtained: Group I belong to risk category R_3 (medium), Group II – to R_3 (medium), Group III – to R_2 (high). For Groups I and II it is recommended to arrange cascade anti-debris flow basins, and it is necessary to apply erosion control measures, such as slope greening, prohibition of cutting of existing plantations, and regular monitoring of the condition of the debris flow control structures. The R_2 section is

subject to intensive accumulation of solid component, which in case of heavy rainfall will serve as material for debris flow formation. It is unsafe to use this road during prolonged rains. Along the Lgovskoe – Grushevka – Sudak motorway, it is necessary to immediately erect debris flow-preventing, debris flow-retaining, debris flow-stabilising, debris flow-discharge and other types of debris flow control structures, and to carry out reclamative afforestation to control wind and water erosion and strengthen the slopes.

References

Bagrova L.A., Smirnov V.O., Gunkina I.Yu., Zmerzlaya K.S. Dangerous natural phenomena in the Crimea // Geopolitics and regional ecological geodynamics. 2013. Vol. 9. Issue 2. Part 1. P. 115–126. (In Russian.)

Chalov R.S. Channel processes: a manual. M.: INFRA-M, 2016. 565 p. (In Russian.)

Ghetto O.N., Belov V.A. Organisational and technical measures to ensure debris flow protection // Melioratsiya i gidrotekhnika [Land Reclamation and Water Engineering]. 2022. No. 3. P. 264–276 http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1305 DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-3-264-276. (In Russian.)

Gorbunov R., Gorbunova T., Kononova N., Priymak A., Salnikov A., Drygval A., Lebedev Ya. Spatiotemporal aspects of interannual changes precipitation in the Crimea. Journal of Arid Environments. 2020. Vol. 183. P. 104280.

Gorbunov R.V., Gorbunova T.Yu., Tabunshchik V.A., Drygval A.V., Safonova M.S. Dynamics of atmospheric precipitation in landscapes of the lowland Crimea // Achievements of Modern Natural Science. 2021. No. 9. P. 31–38. DOI 10.17513/use.37682. (In Russian.)

Kiul Ye.V., Dzhappuyev D.R. Landscape assessment of the territory's mudflow hazard // Bulletin of the Kabardino-Balkar Scientific Centre of the Russian Academy of Science. 2011. No. 6(44). P. 90–96. (In Russian.)

Maltseva I.S. Sustainable land use in the Northern region: problems and tools // Proceedings of the Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2021. No. 2(48). P. 102–114. DOI 10.19110/1994-5655-2021-2-102-114. (In Russian.)

Matsiy S.I., Sukhliaeva L.A. Semi-quantitative assessment of mudflow risk on motorways // Bulletin of PNIIPU. 2019. Vol. 10. No. 4. P. 105–115. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.4.10. (In Russian.)

Matsiy S.I., Sukhliaeva L. A. Debris flow protection: a monograph. Krasnodar: KubSAU. 2021. 168 p. (In Russian.)

Perov V.F. Debris flow studies: a manual. – Moscow: Geographical Faculty of MSU, 2012. – 271 p. – ISBN 978-5-89575-208-1. (In Russian.)

Popovych V.F., Dunaieva I.A. Assessment of the GPM IMERG and CHIRPS precipitation estimations for the steppe region of the Crimea. Meteorology Hydrology and Water Management. 2021. Vol. 9, iss. 1–2. 13 p. DOI:10.26491/mhwm/133088.

Sidaravičute U.R. Load calculation on debris flow control structures / U.R. Sidaravičute, D.V. Sukharev // Melioratsiya i gidrotekhnika [Land Reclamation and Water Engineering]. – 2023. – Vol. 13, No. 3. – P. 237–255. – DOI 10.31774/2712-9357-2023-13-3-237-255. (In Russian.)

Yefimov V.V. Characteristics of extreme atmospheric precipitation in Crimea // Ecological Safety of Coastal and Shelf Marine Zones. 2022. No. 2. P. 6–18. DOI: 10.22449/2413-5577-2022-2-6-18. (In Russian)

Опыт создания комплексной защиты от селевых потоков ключевого участка Иле Алатау (на примере бассейна реки Улкен Алматы)

А.Р. Медеу[1], Н.В. Попов[1], С.У. Ранова[1], А.Н. Камалбекова[1,2], У.Р. Алдаберген[1,2]

[1]АО «Институт географии и водной безопасности» Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, Алматы, Казахстан, aidana.kamalbekova@gmail.com

[2]Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Аннотация. Хребет Иле Алатау, входящий в систему Северного Тянь-Шаня, за последние 140 лет стал ареной проявления мощных селевых потоков различного генезиса – от сейсмогенных до ливневых и гляциальных. Наиболее активным участком проявления селей является бассейн реки Улкен Алматы. Здесь сформировались катастрофические сели, нанесшие значительный материальный ущерб в 1887, 1921, 1950, 1975, 1977, 1988, 1998, 2006 гг., отмечались человеческие жертвы. В бассейне реки Улкен Алматы создана комплексная инженерная защита из крупных противоселевых плотин, расположенных в горах и селесбросных каналов с отстойниками – на территории города. В верховьях реки проводятся профилактические работы на моренно-ледниковых озерах для снижения их прорывоопасности. Проводиться мониторинг селей, включающий аэровизуальные и наземные обследования, дистанционные наблюдения с использованием космических съемок и беспилотных летательных аппаратов, организацию сезонных постов наблюдения и оповещения. До 2000 г. в бассейне реки действовала созданная еще в 1960–1970-х гг. система радиооповестителей селей (РОС). В настоящее время здесь создана современная система раннего оповещения о селевых потоках, включающая автоматизированные посты на моренно-ледниковых озерах, селевых руслах и противоселевых сооружениях с передачей информации в режиме online непосредственно в город Алматы. Селеопасные объекты ключевого участка (моренно-ледниковые озера, селевые очаги и русла) служат предметом пристального исследования учеными Казахстана. Созданы, основанные на результатах наблюдений и специальных исследований, модели формирования селей различного генезиса. Разработаны и используются при прогнозировании селей ситуационные модели развития селевых потоков гляциального и ливневого происхождения, основанные на выявленных эмпирических зависимостях.

Ключевые слова: *селевой очаг, ливневый селевой поток, гляциальный селевой поток, противоселевые мероприятия. селевая опасность*

Ссылка для цитирования: Медеу А.Р., Попов Н.В., Ранова С.У., Камалбекова А.Н., Алдаберген У.Р. Опыт создания комплексной защиты от селевых потоков ключевого участка Иле Алатау (на примере бассейна реки Улкен Алматы). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 334–335.

Experience of creation of complex protection from debris flows of the key section of Ile Alatau (a case of the Ulken River basin, Almaty)

A.R. Medeu[1], N.V. Popov[1], S.U. Ranova[1], A.N. Kamalbekova[1,2], U.R. Aldabergen[1,2]

[1]JSC "Institute of Geography and Water Security", Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, aidana.kamalbekova@gmail.com.

[2]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Abstract. The Ile Alatau Ridge, which is part of the Northern Tien Shan system, has become an arena of manifestation of powerful debris flows of different genesis – from seismogenic to flash floods and glacial flows over the last 140 years. The most active area of debris flow manifestation is the basin of the Ulken River in Almaty. Catastrophic debris flows were formed here, causing significant material damage in 1887, 1921, 1950, 1975, 1977, 1977, 1988, 1998, 2006, human casualties were noted. In the basin of the Ulken River, Almaty has created a complex engineering protection consisting of large debris flow control dams located in the mountains and debris flow channels with sedimentation ponds – in the city. In the upper reaches of the river, preventive works are carried out on moraine-glacial lakes to reduce their bursting hazard. Debris flow monitoring is carried out, including aerial and ground surveys, remote observations using space imagery and unmanned aerial vehicles, organization of seasonal observation and warning posts. Until 2000, the system of radio-alerting debris flows (ROS), created in 1960–1970s, operated in the river basin. At present there is a modern system of early warning about debris flows, including automated posts on moraine-glacial lakes, debris flow channels and debris flow control structures with *on-line* transmission of information directly to the city of Almaty. Debris flow hazardous objects of the key area (moraine-glacial lakes, debris flow centers and beds) are the subject of close study by scientists of Kazakhstan. Based on the results of observations and special studies, models of debris flow formation of different genesis have been created. Situational models of debris flow development of glacial and storm flows based on the revealed empirical dependencies have been developed and are used for debris flow forecasting.

Key words: *debris flow origination site, storm debris flow, glacial debris flow, anti-debris flow measures, debris flow hazard*

Cite this article: Medeu A.R., Popov N.V., Ranova S.U., Kamalbekova A.N., Aldabergen U.R. Experience of creation of complex protection from debris flows of the key section of Ile Alatau (a case of the Ulken River basin, Almaty). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 334–335.

Полный текст статьи будет опубликован в журнале «ГеоРиск».

Подход к оценке риска, связанного с селе-паводковой активностью для проблемных территорий в Узбекистане

А.С. Меркушкин[1], Г.Н. Трофимов[2], С.И. Климов[3]

[1]ПРООН, Ташкент, Узбекистан, aleksandr.merkushkin@undp.org

[2]Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Ташкент, Узбекистан

[3]ООО NBT, Ташкент, Узбекистан, klimov1980@mail.ru

Аннотация. Рассматривается подход к оценке риска, связанного с селе-паводковой активностью с использованием распределения Пуассона, как функции распределения вероятностей для оценки вероятности возникновения определенного числа селе-паводковых проявлений в определенный промежуток времени (характеристика угрозы) и плотности населения на проблемных территориях в качестве характеристики уязвимости. Приводятся результаты оценки риска для трех временных горизонтов (2030, 2050 и 2080) на основе обнаруженных связей параметра распределения Пуассона (λ) с величиной атмосферных осадков и высотой местности, климатических сценариях изменения годовых сумм осадков (REMO-0406), а также различных сценариях роста населения. Приводятся карты риска.

Ключевые слова: *селе-паводковая активность, риск, оценка и картографирование риска, уязвимость, функция распределения вероятностей, распределение Пуассона, климатические сценарии, сценарий роста населения*

Ссылка для цитирования: Меркушкин А.С., Трофимов Г.Н., Климов С.И. Подход к оценке риска, связанного с селе-паводковой активностью для проблемных территорий в Узбекистане. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 336–337.

Approach to flash flood risk assessment for the problematic territories in Uzbekistan

A.S. Merkushkin[1], G.N. Trofimov[2], S.I. Klimov[3]

[1]UNDP, Tashkent, Uzbekistan, aleksandr.merkushkin@undp.org

[2]National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent, Uzbekistan, (co-author is died)

[3]NBT LLC, Tashkent, Uzbekistan, klimov1980@mail.ru

Abstract. The approach to flash flood actual and projected risk assessment as being based on use of single parameter Poisson distribution as a discrete probability distribution to expresses the probability of flash flood number occurring in a fixed interval of time (characteristic of threat) and density of population as vulnerability characteristic is considered. Risk calculation based on revealed relationships of the Poisson distribution parameter (λ) with precipitation and elevation, climate scenario for precipitation pattern (REMO-0406) as well different approximations of the temporal population growth is completed for tree (3) time horizons: 2030, 2050 and 2080. The risk assessments say that risks are going to be risen 1.13 times by 2030, 1,18 by 2050 and 1,23 times by 2023 against current ones. The risks assessment outputs are mapped.

Key words: *flash flood activity, risk, risk assessment and mapping, vulnerability, discrete probability distribution, Poisson distribution, climate scenarios, population growth scenario*

Cite this article: Merkushkin A.S., Trofimov G.N., Klomov S.I. Approach to flash flood risk assessment for the problematic territories in Uzbekistan. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 336–337.

Полный текст статьи будет опубликован в журнале «ГеоРиск».

Особенности формирования селей в бассейне р. Шахе (Северо-Западный Кавказ) и оценка возможности их трансформации в турбидные потоки в прибрежной зоне Черного моря

С.Г. Миронюк, Ю.В. Ефремов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, mironyuksg@gmail.com

Аннотация. Морские сооружения (подводные трубопроводы, кабели связи и др.), расположенные на шельфе, особенно в мелководной его зоне, находятся в особых условиях эксплуатации. Здесь они могут быть подвержены воздействию волн, течений, а также крупных оползней и обвалов, возникающих на высоких клифах. Особенно опасны приустьевые области горных рек. В этой зоне сели, сформировавшиеся в их руслах, могут преобразоваться в турбидные потоки, способные пересечь узкие шельфы, и дальше двигаться вниз по континентальному склону к его подножью. Воздействие таких потоков может нарушить целостность подводных сооружений. Нередко возникают ситуации, когда трассу, например, морского трубопровода нельзя проложить в обход опасных участков. В таких случаях в процессе инженерно-геологических изысканий необходимо оценить вероятность воздействия турбидных потоков на сооружения и, если она высокая, разработать адекватные меры инженерной защиты объекта. Первым этапом таких исследований является анализ селевой опасности и оценка возможности трансформации селевых потоков в придонные гравитационные течения повышенной плотности. В статье представлены результаты таких исследований, выполненных в бассейне р. Шахе и на шельфе мористее ее устья. Следы прохождения небольших селевых потоков зафиксированы в некоторых притоках р. Шахе, где уклоны тальвегов водотоков достигают 15–25° и имеются селеформирующие грунты. Определены основные условия и факторы селеформирования, разновидности селеформирующих грунтов, повторяемость селевых потоков и их генетические типы, объемы единовременных выносов твердой составляющей потоков и др. Исследования на шельфе включали: многолучевое эхолотирование, гидролокацию бокового обзора, видео-и фотосъемку морского дна, отбор проб донных осадков и др. Анализ полученных данных позволил заключить, что отсутствуют признаки движения селей непосредственно в русле р. Шахе. По экспертной оценке, вероятность формирования таких селей в период эксплуатации газопровода низкая. Не обнаружены и явные следы движения турбидных потоков на шельфе.

Ключевые слова: *сель, селевая опасность, шельф, турбидные потоки, катастрофические паводки, Черноморское побережье Кавказа, долина р. Шахе*

Ссылка для цитирования: Миронюк С.Г., Ефремов Ю.В. Особенности формирования селей в бассейне р. Шахе (Северо-Западный Кавказ) и оценка возможности их трансформации в турбидные потоки в прибрежной зоне Черного моря. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 338–348.

Features of debris flows formation in the Shakhe River basin (Northwest Caucasus) and assessment of the possibility of their transformation into turbid flows in the coastal zone of the Black Sea

S.G. Mironyuk, Yu.V. Efremov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, mironyuksg@gmail.com

Abstract. Offshore structures (offshore pipelines, communication cables, etc.) located on the shelf, especially in its shallow water zone, are subject to special operating conditions. Here they can be exposed to waves, currents, as well as large landslides and rockfall that occur on high cliffs. The estuarine areas of mountain rivers are especially dangerous. In this zone, debris flows formed in their channels can transform into turbidity flows capable of crossing narrow shelves and further moving down the continental slope to its foot. The impact of such flows can compromise the integrity damage of offshore structures. Situations often arise when the route, for example, of an offshore pipeline cannot be laid to bypass dangerous areas. In such cases, in the process of engineering-geological surveys, it is necessary to assess the likelihood of the impact of turbidity flows on structures and, if it is high, to develop adequate measures for engineering protection of the facility. The first stage of such research is the analysis of debris flow hazard and assessment of the possibility of transforming debris flows into bottom gravity currents of increased density. The article presents the results of such studies carried out in the river basin Shakhe and on the shelf seaward of its mouth. Traces of small debris flows were recorded in some tributaries of the river Shakhe, where the slopes of the thalwegs of watercourses reach 15–25° and there are debris flow-forming soils. The main conditions and factors of debris flow formation, varieties of debris flow-forming soils, frequency of debris flows and their genetic types, volume of mass transport of debris flows, etc. were determined. Research on the shelf included: multi-beam echo sounding, side-scan sonar, video and photography of the seabed, bottom sampling, etc. Analysis of the data obtained allowed us to conclude that there are no signs of debris flow movement directly in the river bed Shakhe. According to expert estimates, the likelihood of such debris flows occurring during the operation of the gas pipeline is low. There are also no obvious traces of movement of turbid flows on the shelf.

Key words: *debris flow, debris flow hazard, shelf, turbidity flows, catastrophic floods, Black Sea coast of the Caucasus, Shakhe River valley*

Cite this article: Mironyuk S.G., Efremov Yu.V. Features of debris flows formation in the Shakhe River basin (Northwest Caucasus) and assessment of the possibility of their transformation into turbid flows in the coastal zone of the Black Sea. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 338–348.

Введение

В процессе инженерных изысканий для строительства морских сооружений, в части изучения геологических и гидрометеорологических процессов, основное внимание, что закономерно, уделяется оценке опасности морских природных воздействий на проектируемые объекты [*СП 504.1325800.2021, 2021*]. Между тем ряд процессов, периодически возникающих в сухопутной части береговой зоны и в бассейнах рек (крупные оползни, обвалы, сели), могут также представлять угрозу для их целостности [*Миронюк, 2015*]. Особую категорию опасных процессов составляют турбидные потоки, возникающие в устьевых зонах крупных рек и на шельфе. Турбидные потоки – это разжиженные, состоящие из минеральных частиц, гравитационные, турбулентные придонные потоки, в которых частицы приходят во взвешенное состояние из-за турбулентности жидкости [*Middleton, Hampton, 1973*]. Они делятся на два основных типа: потоки высокой плотности (1500–2400 кг/м^3) и потоки низкой плотности (1030–1300 кг/м^3) песчано-алеврито-глинистые по составу [*Перов, 2012*]. Турбидные потоки, как высокой, так и низкой плотности характеризуются разбавленной массовой концентрацией (Cm <10 кг/м^3), турбулентным течением (число Рейнольдса Re >104) и высокой неоднородностью взвешенных осадков [*Parsons et al., 2007*]. Выполненные расчеты показали, что мелкий терригенный материал, принесенный реками в береговую зону Черного моря, может перемещаться на субабиссальную равнину потоком суспензии толщиной в несколько десятков сантиметров [*Есин и др., 2017*].

Непосредственной причиной формирования турбидных потоков являются провоцирующие факторы (триггеры): штормовые волны, катастрофические паводки, сильные землетрясения. При действии узконаправленного потока масс в трубопроводе может возникнуть критический изгибающий момент, что может привести к нарушению общей устойчивости транспортного сооружения, истиранию наносами изоляционного покрытия труб (корразии) и эрозии морского дна [*Piper, Cochonat et al., 1999*]. В случае узких шельфов (от нескольких сот метров до километров) эти потоки могут выйти за его пределы. Наиболее опасны потоки, связанные с катастрофическими, селеподобными паводками, которые выносят в море крупнообломочный материал. Мощные высокоэнергетические потоки могут формироваться даже в маловодных и пересыхающих водотоках. Существенным фактором к образованию в них селевых потоков являются морские смерчи, способные приносить огромное количество осадков с моря на сушу и «разгружать» их за короткий отрезок времени, вызывая обильные и экстремально интенсивные осадки (2 мм/мин.) [*Баринов и др., 2011*]. В этом случае на шельф выносится весь накопившийся за «сухой» период материал (валуны, галька, гравий, остатки древесной растительности, часто довольно крупные). Такие процессы довольно трудно прогнозировать, так как их развитие связано с рядом различных факторов: метеоусловия; уровень воды, предшествующий повышению; количество накопившегося материала в руслах водотоков и т.п. Проявления перемещений (возможно, стоковыми течениями) донного материала (полосчатая структура изображения дна – светлые полосы, ориентированные перпендикулярно изобатам) установлены по данным сонарной съемки на траверзе рек Аше, Псезуапсе и Дагомыс (рис. 1).

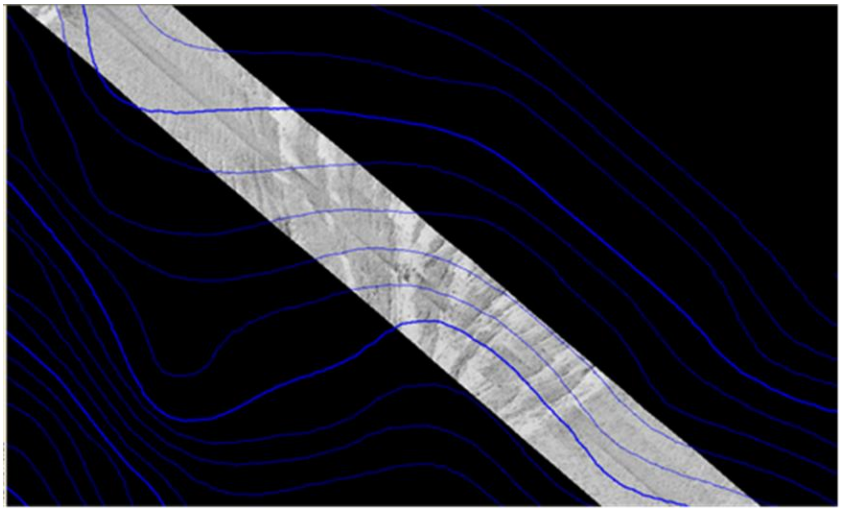


Рис. 1. Дендроидные структуры изображения дна – проявления перемещений донного материала мутьевыми потоками (линии синего цвета – изобаты). Сонарная съемка на траверзе р. Псезуапсе

Установлено, что на узких шельфах речные струи могут выходить за их пределы. Например, при паводковых условиях струи таких рек, как Чорохи, Риони, Кодори на Черном море, пересекают шельф шириной 4–5 км и проникают в зону континентального склона. Очевидно, что большие объемы твердого стока рек пересекают трассу трубопровода и на участке между устьем р. Шахе и верховьем одноименного каньона. По данным S. Jaoshvili [*Jaoshvili, 2002*], к головной части каньона Шахе выносится одноименной рекой около 79 тыс. м^3/год терригенного материала. Следует отметить, что в настоящее время перенос вещества поперек шельфа изучен недостаточно. Между тем, селевые потоки в долинах рек, в случае их трансформации в приустьевом взморье в мутьевые потоки, представляют опасность для сооружений, расположенных на шельфе. Оценка селевой опасности и возможности трансформации селевых потоков,

зарождающихся в бассейне упомянутой реки, в придонные узконаправленные мутьевые потоки и является целью настоящей работы.

Краткий обзор проблемы

Выбор оптимального расположения трассы подводного газопровода, других морских сооружений осуществляется по различным критериям. С одной стороны, это стоимость приведенных затрат, промышленная и экологическая безопасность сооружения, ремонтопригодность, с другой – параметры субаквальной природной обстановки и т.п. Важнейшее значение при выборе площадок (трасс) проектируемых объектов имеет корректная оценка опасности природных процессов и явлений [*Миронюк, 2009*]. Согласно [*ВСН 51-3-85, 1985*] при выборе трасс трубопроводов, участки дна моря с проявлениями, например, грязевого вулканизма рекомендовано обходить. В ряде случаев обойти участки повышенной опасности (протяженные разрывные нарушения, палеодолины, зоны значительной гидродинамической активности и т.д.) не представляется возможным. Именно такая ситуация имела место при выборе трассы газопровода «Джубга – Лазаревское – Сочи» (ДЛС). Магистральная часть трассы газопровода проходит вдоль береговой линии в благоприятной по инженерно-геологическим условиям средней части шельфа с глубинами моря от 50 до 75 м. На участке обхода каньона р. Шахе трасса с безопасного интервала глубин смещается к берегу и проходит в области глубин ~ 15–25 м в зоне активного волнового воздействия и распространения шлейфов мутных речных вод (плюмов). Отмеченная выше ситуация обусловила необходимость дополнительной оценки геологической опасности предустьевого взморья.

На начальном этапе проектирования газопровода ДЛС рассматривался наиболее опасный по последствиям гипотетический сценарий аварии, согласно которому в устьевой зоне крупной реки мощный сель трансформируется в турбидный поток. Последний, двигаясь перпендикулярно изобатам, может достичь намеченной трассы газопровода, тем самым создавая угрозу его целостности. Одним из аргументов в пользу этого «пессимистического» сценария послужило обнаружение гравийно-галечных отложений в русле каньона р. Шахе, расположенного против устья указанной реки на глубинах моря более 25 м в 1,5 км от берега и в 2,6 км от устья р. Шахе. Считается, что в условиях кавказского побережья каньоны, пересекающие материковый склон, могут служить маршрутом стока крупногалечных отложений за пределы береговой зоны [*Сафьянов и др., 2001*]. О случаях селевых выносах в береговую зону Черного моря в районе Большого Сочи с последующим их распространением в зону континентального склона имеется упоминание в работе [*Шуляков, Чернявский, 2015*].

Для проверки указанного сценария были решены следующие задачи:

1. Выявлены на основе имеющихся материалов изысканий современные проявления экзогенных геологических процессов и условия их развития по трассе газопровода на шельфе и на прилегающей территории суши.
2. Рассмотрены некоторые закономерности формирования и распространения селевых потоков в бассейне р. Шахе.
3. Изучены условия, факторы и динамика литодинамических процессов в приустьевом районе р. Шахе.
4. Выполнена экспертная оценка вероятности развития турбидного потока на шельфе путем трансформации селя.

Материалы и методы

Изыскания охватывали обширную площадь, включая бассейны ряда рек (Джубга, Шахе и др.), шельф и верхнюю часть континентального склона. В процессе рекогносцировочного обследования района изысканий особое внимание уделялось выявлению селеопасных участков. Оценивались морфологические особенности территории, гидрологические характеристики и паводковый режим р. Шахе,

метеорологические условия, литодинамические процессы на участке трассы газопровода.

В основу описания субаквальной инженерно-геологической обстановки положены материалы инженерно-геологических изысканий, выполненных за период с 2002 по 2012 гг. различными организациями (ООО «Питер Газ», ООО «Сварог», ООО «ГлобалОффшорСервей», ООО «Деко-геофизика», ФГУГП «Южморгеология» и др.) по трассе газопровода «ДЛС», которые авторы настоящей работы проанализировали и обобщили с целью оценки опасности селевых и турбидных потоков для газопровода на участке его обхода верховьев каньона р. Шахе (рис. 2).

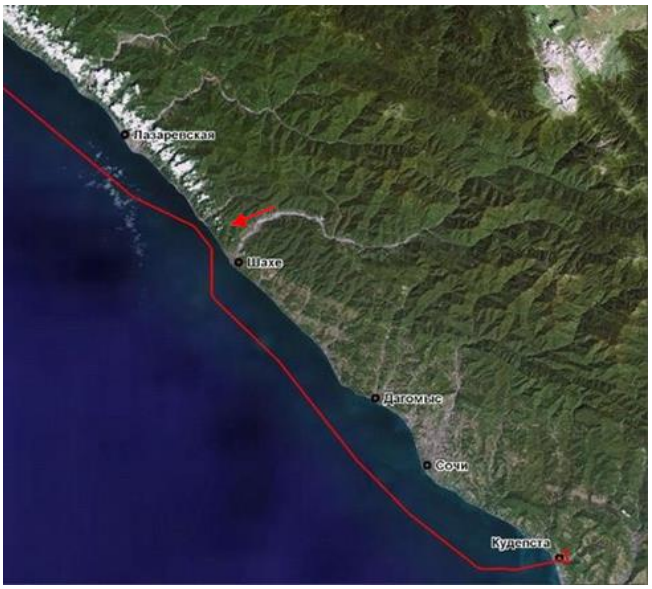


Рис. 2. Схема трассы газопровода «Джубга-Лазаревское-Сочи» на участке его обхода верховьев каньона р. Шахе (красная стрелка)

Материал, характеризующий морские инженерно-геологические условия участка, был получен в ходе инженерно-геофизических исследований и отбора образцов грунтов пробоотборниками для последующего изучения их состава и свойств. Геофизические исследования включали промеры глубин эхолотом, многолучевое эхолотирование, обследование морского дна гидролокатором бокового обзора (ГЛБО). Осмотр морского дна осуществлялся также с помощью водолазов и телеуправляемыми необитаемыми подводными аппаратами (ТНПА). Для изучения дна и верхней части грунтового массива, геологических процессов применялись также акустическое и непрерывное сейсмоакустическое профилирования (АПр, НСП). Батиметрические измерения выполнялись с помощью однолучевых промерных эхолотов ПЭЛ-Д, Odom Echo Track MK III, а также двухчастотного эхолота «ST60 Depth». Многолучевое эхолотирование осуществлялось посредством аппаратов Kongsberg EM3002, а ГЛБО «Гидра-2», Klein 3000, «Катран-Д», «Benthos SIS 1624», «C-Max». На участке обхода верховьев каньона р. Шахе (рис. 2) детальная площадная съемка рельефа выполнялась в масштабе 1:1000 с использованием многолучевого эхолота «Reson Sea Bat 7125» на частоте 400 кГц, что обеспечивало регистрацию всех глубин в районе работ.

Видео- и фотосъемка морского дна проводилась ТНПА «SUB-fighter 7500», «SUB-fighter 15K», «Falcon». АПр для изучения верхней части разреза на глубину (по грунту) до 20 м и НСП проведены соответственно профилографом АП-4 разработки НИПИокеангеофизика, параметрическим профилографом SES 2000 Medium и одновременным профилированием двумя системами – «Benthos Chirp II» и электроискровым излучателем тип «Спаркер» (ООО «Питер Газ»). Пробоотбор до глубины 21 м выполнялся с помощью забортной гидроударной установки УГВП-130/4 с

НИС «Диорит» и ударной прямоточной трубкой. На участках развития песчаных (и более грубозернистых) грунтов использовался дночерпатель «Океан-0,25».

Результаты

Согласно [*Руководство по изучению селевых потоков, 1976*] к селеопасным бассейнам принято относить бассейны малых горных рек и ручьев со значительными уклонами тальвегов (более 3°) и достаточным количеством готового к перемещению рыхлообломочного материала, образованию которого способствуют процессы физического выветривания и водноэрозионная деятельность на водосборе. Эрозионно-транспортный селевой процесс возникает при уклонах свыше ~ 6°. Причем до 17° – это еще наносоводный селевой поток, срывающий русловую самоотмостку и переносящий большое количество взвешенных и влекомых наносов за счет своей транспортирующей способности. При уклонах более 17° начинается сдвиговой селевой процесс, формируется грязевой (плотность около 2000 кг/м^3) или грязекаменный селевой поток (плотность более 2000 кг/м^3). Известны случаи прохождения антропогенных селевых потоков наносоводного типа в районе г. Новороссийска. Формирование их связано с неупорядоченным сбросом отвалов скальных грунтов при производстве строительных работ и разработке карьеров.

Региональные оценки селевой опасности

Региональные оценки селевой опасности в селевом районе Большого Сочи (южный склон Северо-Западного Кавказа, бассейны рек Мзымта, Шахе, Псоу и др.) дали следующие результаты: показатель пораженности территории (%) <5; максимальный объем выносов <50 тыс. м^3; степень селевой опасности – низкая [*Чернявский, 2010; Шуляков, Чернявский, 2015*]. Согласно В.Ф. Перову, категория селевой опасности в рассматриваемом районе – очень низкая. Максимальный объем единовременных выносов менее 10 тыс. м^3 [*Опасность селей, 2007*].

Условия развития и проявления селевого процесса в бассейне р. Шахе

Долина р. Шахе широко разработана русловыми процессами (рис. 3). Склоны покрыты густой лесной растительностью, что весьма ограничивает возможности накопления обломочного материала в потенциальных селевых очагах верховий притоков реки.

Рис. 3. Долина р. Шахе в среднем течении

Результаты полевых исследований в бассейне р. Шахе в верхнем и среднем ее течениях дали возможность оценить масштаб селепроявления, выявить условия формирования селей, установить характеристики прошедших селей и т. д. [*Ефремов, 2012*].

Река Шахе – вторая по длине река Черноморского побережья в пределах Краснодарского края. Она берет начало на склонах г. Малая Чира (2218 м), протекает по Лазаревскому району города Сочи, собирает воды с бассейна площадью 562 км^2. Длина реки 59 км, общее падение 1620 м, средний уклон 15,3°. Средняя высота водосбора 1010 м. Средняя высота бассейна 854 м, максимальная ширина 46 км, средняя ширина 12 км. Почти весь бассейн реки горный и покрыт лесом [*Геращенко, 2017*].

Река принимает многочисленные притоки, среди которых наиболее крупные Ажу, Бзыч, Бзуху и др. По некоторым из них периодически сходят селевые потоки на дорогу между с. Солох Аул и кордоном Бабук Аул. По данным Отдела высокогорных исследований СК УГМС, в бассейне р. Шахе в пределах рассматриваемой дороги выявлено 7 селеактивных русел, по которым регулярно сходят селевые потоки [*Заруднев и др., 2007*]. Небольшие селевые потоки (микросели) проходили по боковым селеопасным оврагам на левом приустьевом склоне долины, где уклоны тальвегов водотоков достигают 15–25º. Селевые явления отмечались в июле 1949 г., августе 1960 г., июне 1965 г., июне 1966 г., августе 1969 г., декабре 1971 г., сентябре 1972 г. Так, например, 4 августа 1969 г. микросель повредил сады и огороды в п. Малый Кичман в 6 км от моря.

По генезису здесь преобладают дождевые селевые потоки. По составу твердой составляющей это грязевые сели (около 40%), остальные – грязекаменные (60%). Объемы единовременных выносов твердой составляющей колеблются от сотен м^3 до нескольких тысяч м^3. Повторяемость прохождения селевых потоков также колеблется в широком диапазоне от одного раза в год и до одного раза в 10 лет. Средняя длина селевых русел от 0,5 до 1,5 км. Средняя площадь селевых бассейнов составляет 0,2–10 км^2.

Источником твердой составляющей являются рыхлые отложения – продукты физического выветривания, размыва русел малых рек. Это гравитационные, элювиально-делювиальные и аллювиальные образований, разнообразные по составу и мощности. На мел-палеогеновом флишевом субстрате склоновые отложения представлены грубообломочным глинисто-щебенистым материалом мощностью 0,5–5 м. На песчано-глинистых отложениях состав их суглинисто-глинистый с небольшим содержанием обломков, мощность их здесь достигает 15–20 м и более. У многих рек, особенно в верхнем течении, долины имеют денудационные воронки, в которых скапливается рыхлый материал – основной источник твердой составляющей селевых потоков. В составе аллювия р. Шахе преобладает галечный материал. Наиболее крупные фракции (валуны до 30–40 см) аккумулируются в предгорной зоне, по мере приближения к устью средний диаметр крупнообломочных грунтов уменьшается до 10–12 см. Такое распределение наносов связано с падением скорости течения речного потока.

Морфологические особенности рельефа рассматриваемой территории создают благоприятные условия для возникновения селевых потоков. Здесь селесборами служат водосборы мелких и средних водотоков, временных и постоянных, площадью от 1–2 до 100–200 км^2 и характерным уклоном русла ~ 6°–17°.

Гидрологические условия в бассейне оказывают преобладающее влияние на процессы формирования селей. Притоки р. Шахе отличаются большими уклонами и часто имеют вид горных ручьев, каскадами ниспадающих с гор. Режим реки характеризуется паводками, наблюдающимися в течение всего года, отчасти слабо выраженным весенним половодьем с марта по июнь, а также более или менее устойчивыми низкими уровнями, имеющими место обычно летом, между июнем и сентябрем. Половодье часто (3–6 раз) нарушается дождевыми паводками. Максимум уровня весеннего половодья наблюдается обычно в мае–июне и составляет 0,6–1,2 м. Количество паводков колеблется от 2 до 23 (в год), продолжительность их 2–3 дня, реже до 10–15 дней. Средняя высота – 0,5–0,9 м, максимальная (1,4–2 м) наблюдается большей

частью в июне. В межпаводковые периоды амплитуда колебаний уровня воды не превышает 0,05–0,1 м. Отдельные резкие подъемы, вызванные дождями, иногда достигают высоты 0,6–0,9 м, а в некоторые годы даже 1,7 м. В питании реки участвуют снеговые, дождевые и грунтовые воды. Быстрое таяние снега в бассейне, совпадающее с выпадением большого количества осадков, обусловливает высокий сток с марта по май. В течение этого периода река сбрасывает около 40–45% годового стока. В остальные сезоны сток распределяется более или менее равномерно. Низкий сток (4–12%) наблюдается в период с июля по сентябрь [*Ресурсы поверхностных вод СССР, 1974*].

Средний расход взвешенных наносов реки равен 7,4 кг/с, а средняя наибольшая мутность 5230 г/м^3. Наибольший расход взвешенных наносов наблюдается в мае и июне, когда в смыве почв принимают участие талые и дождевые воды, а также в августе при сильных дождях после продолжительной засухи.

Наблюдения последних лет показали, что структура твердого стока подвержена значительным колебаниям сезонного и многолетнего характера. Так, на р. Шахе соотношение наибольшего и наименьшего годового стока достигает 55.

Атмосферные осадки при благоприятных геоморфологических условиях являются основной причиной схода селевых потоков. В изученном районе годовая сумма осадков составляет в Бабук Ауле 2267 мм, а в Солох Ауле 2456 мм.

Проведенные рекогносцировочные исследования в долине р. Шахе по дороге Солох Аул – Бабук Аул показали значительную селевую опасность. Было зарегистрировано около десятка селей различного объема. По всей вероятности, все зарегистрированные селевые потоки сформировались во время интенсивных атмосферных осадков.

Для оценки потенциальной селевой опасности в нижнем течении и приустьевой зоне р. Шахе были собраны и проанализированы соответствующие материалы по малым рекам Черноморского побережья Кавказа, впадающим в Черное море. Сели и селеподобные паводки при интенсивных дождях, завершающихся ливнями, могут формироваться по следующим водотокам: р. Псебе, р. Аше, р. Туапсе и др. Анализ отдельных случаев появления селей на Северо-Западном Кавказе позволяет отметить, что наиболее селеопасными были влажные годы с обеспеченностью годового количества осадков 10% и менее [*Кононова, Мальнева, 2004*]. В эти годы наблюдалось максимальное число дней с обильными осадками. Установленная закономерность характерна как для среднегорных и высокогорных районов, так и для низкогорных районов приморья. Для всей исследуемой территории с малыми площадями водосборов селевых водотоков, при условии преобладания в селевых очагах мел-палеогенового флиша и продуктов его выветривания, из всех прочих условий формирования селей наибольшее значение имеют экстремальные суточные осадки. Селевая опасность возникает при суточных осадках 100 мм и более [*Природные опасности России, 2002*]. Подобная ситуация отмечалась в селеопасных 1942, 1949, 1960, 1964 гг. Столь высокая интенсивность осадков бывает достаточно редко. Например, за 11-летний период (1991–2001 гг.) по метеорологической станции Туапсе отмечено всего 4 таких случая: в один из дней июня 1996 г. выпало 118 мм осадков; 1 марта 1996г. – 147 мм; 10 января 1998г. – 123,6 мм; 10 ноября 2000 г. – 153,8 мм.

Особенности литодинамики на предустьевом взморье р. Шахе

В качестве основных возможных источников геологической опасности для газопровода в пределах авандельты (приустьевого взморья) можно рассматривать стоковые течения в периоды паводков, штормовое воздействие волн на дно и оползневые процессы.

Проведенные изыскания показывают, что изменения рельефа дна стоковыми течениями на приустьевом взморье ограничиваются изобатой 5–7 м (400–500 м от береговой черты). Совмещение участков батиметрической съемки, выполненной с помощью многолучевого эхолотирования в 2008 и 2011 гг., показало, что в пределах авандельты р. Шахе в приблизительно указанном интервале глубин моря в 2011 г. имел

место размыв дна, о чем свидетельствует понижение отметок дна моря на некоторых площадях по сравнению с 2008 г. на 0,4–0,6 м. Зафиксировано также в отдельных местах приустьевого взморья реки повышение отметок дна за счет аккумуляции речных наносов. Относительные превышения по сравнению с 2008 г. составляет 0,5–0,8 м. По данным исследований рельефа р. Шахе, выполненных ранее [*Пешков, 2005*], после прохождения крупного паводка на приустьевом взморье отмечалось понижение отметок дна в устьевом створе до 2,6 м (в среднем 1,5 м). Мористый склон устьевого бара выдвинулся на глубину около 7 м. Мощность отложившегося в период паводка слоя наносов на баре составила 3,5 м при средней в 2,3 м; объем – 140 тыс. м^3. Для цели настоящей статьи особый интерес представляет дальность выноса материала песчано-алевритовой фракции. Проведенные приближенные оценки показали, что для диапазона высоких значений скоростей речной струи, характерных для паводковых ситуаций (v_o >1,5 м/с), песчано-алевритовый материал, обогащенный автохтонным раковинным материалом, может выноситься на расстояния до 1,5–2,0 км от устьевого створа до глубины 15–20 м (рис. 4).

Рис. 4. Литодинамические проявления в пределах авандельты р. Шахе: аккумуляция песчано-алевритового материала выноса р. Шахе.

С глубин около 20 м в составе современных осадков постепенно повышается роль пелитового материала [*Подводные каньоны Мзымты и Шахе, 2018*]. Взаимодействие вод реки и моря при их непосредственном контакте приводит к замедлению струйного речного течения и, как следствие, к отложению в первую очередь крупнообломочной составляющей речных наносов, формированию специфических устьевых форм рельефа дна.

Выводы

Рассмотренный сценарий возможной аварийной ситуации на траверзе Шахе, обусловленной воздействием на сооружение мутьевого потока высокой плотности, экспертно оценивается как имеющий крайне низкую вероятность. По данным выполненных изысканий, выносимый рекой крупнообломочный материал почти полностью задерживается в пляжевой зоне или в верхней части подводного склона. В верхней части разреза в пределах коридора трассы газопровода (глубина моря 15 м и более) развиты илы с ракушечным детритом, супеси, реже пески мелкие и пылеватые. Отсутствуют также здесь и характерные формы гравитационного переноса осадков, которые уверенно идентифицируются на сонограммах. Они проявляются появлением дендровидных, полосчатых структур – протягивающихся в крест направления изобат полос, с низкоамплитудной записью, приуроченных к локальным понижениям рельефа морского дна (эрозионным ложбинам) и сливающихся в направлении к бровке шельфа.

Что касается найденных гравийно-галечниковых отложений в русле подводного каньона р. Шахе, то не исключено, что это отложения новоэвксинской регрессии Черного моря, когда ее уровень понижался, по разным оценкам, на 42–120 м. Ввиду слабой изученности механизмов трансформации селевых потоков в мутьевые, потенциально опасные области современного шельфа требуют особого внимания при проектировании и строительстве подводных сооружений.

Список литературы

Баринов А. Ю., Аш Е. В., Чистов С. В. Геолого-геоморфологические и климатические условия формирования селевых потоков на прибрежных территориях России // ГеоРиск. 2011. № 4. С. 28–32.

ВСН 51-3-85. Проектирование промысловых стальных трубопроводов. М.: 1985. 28 с.

Геращенко И. Н. Гидролого-гидрографическая характеристика некоторых бассейнов рек влажных субтропиков Причерноморья Краснодарского края //Символ науки. 2017. Т. 3. №. 3. С. 230–232.

Есин Н.В., Мурдмаа И.О., Есин Н.И., Мельникова И.В. Медленное течение потоков суспензии на абиссальной равнине Черного моря// Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. М.: ИО РАН, 2017. С. 59–61.

Ефремов Ю. В. Селевые процессы и явления в бассейне р. Шахе (Северо-Западный Кавказ) //Двадцать седьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. 2012. С. 114–116.

Заруднев В.М., Салпагаров А.Д., Хома И.И. Лавинно-селевая опасность бассейнов рек Теберда, Большой Зеленчук, Мзымта и защита от снежных лавин и селей горнолыжных комплексов Домбай, Архыз, Красная Поляна // Труды Тебердинского государственного заповедника. Кисловодск: Северо-Кавказское издательство «МИЛ», 2007. Вып. 46. 287 с.

Кононова Н.К., Мальнева И.В. Вероятность повторения на Северном Кавказе природных катастроф 2002 г. Устойчивое развитие горных территорий: проблемы и перспективы интеграции науки и образования. 21–23 сентября 2004 г. // Владикавказ. 2004. С. 214–219.

Миронюк С. Г. Геологические опасности дна восточной части Черного моря и их учет при выборе трасс подводных газопроводов // Геология, география и экология океана: Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Д.Г. Панова (8–11 июня 2009 г., г. Ростов-на-Дону). Ростов – на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН. 2009. С 230–233.

Миронюк С. Г. Анализ геологических опасностей и рисков при строительстве морских трубопроводов и подводных добычных комплексов // Инженерная защита. 2015. № 11. С. 30–39.

Перов В. Ф. Селеведение. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.

Пешков В.М. Галечные пляжи неприливных морей. Краснодар, 2005. 444 с.

Опасность селей. 1: 3 000 000. Автор: В. Ф. Перов //Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. РФ. Южный федеральный округ. М.: Дизайн. Информация. Картография. 2007. С. 94–95.

Подводные каньоны Мзымты и Шахе: морфология, литодинамические процессы// Система Черного моря / Глазырин Е. А., Мараев В. Л. М.: Научный мир. 2018. С. 84–105.

Природные опасности России. Том. 3. Экзогенные геологические опасности. Под ред. В.М. Кутепова, А. И. Шеко // КРУК. Москва. 2002. 345 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 9. Закавказье и Дагестан. Вып. 1. Западное Закавказье (Гидрографические описания рек, озер и водохранилищ). Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 578 с.

Руководство по изучению селевых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 144 с.

Сафьянов Г. А., Меньшиков В. Л., Пешков В. М. Подводные каньоны–их динамика и взаимодействие с береговой зоной океана. М.: Изд-во ВНИРО. 2001. 197 с.

СП 504.1325800.2021. Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования. М.: Минстрой России. 2021. 168 с.

Чернявский А.С. Селевой морфолитогенез на Черноморском побережье Кавказа (в пределах Краснодарского края). Автореф. канд. географ. наук. Краснодар. 2010. 24 с.

Шуляков Д. Ю., Чернявский А. С. Оползни и сели. Краснодар: Просвещение-Юг. 2015.230 с.

Jaoshvili S. The rivers of the Black Sea. Technical Report, № 71. European Environment Agency, 2002. 58 p.

Middleton, G.V., and M.A. Hampton, 1973, Sediment gravity flows: Mechanics of flow and deposition, in G.V. Middleton, and A.H. Bouma, eds., Turbidites and Deep-Water Sedimentation: Pacific section SEPM, Los Angeles, California, p. 1–38.

Parsons, J. D., Friedrichs, C.T., Trykovski, P., Mohrig, D., Imran, J., Syvitski, J. P. M., Parker, G., Puig, P., and Garcia, M. H. 2007. The mechanics of marine sediment gravity ows. Continental Margin Sedimentation: Transport to Sequence. IAS Special Publication 37, Blackwell Publishing Ltd, Oxford (C. Nittrouer Editor). P. 275–338.

Piper D. J. W., Cochonat P., Morrison M. L. The sequence of events around the epicentre of the 1929 Grand Banks earthquake: initiation of debris flows and turbidity current inferred from sidescan sonar // Sedimentology. 1999. Vol. 46. №. 1. P. 79–97.

Debris flow phenomena and their assessment using geoinformation system technologies for the development of the tourist industry of Uzbekistan

A.N. Nigmatov

Gulistan State University, Gulistan, Uzbekistan, nigmatov_an@mail.ru

Abstract. The article, based on the requirements of the UN concept of the Sustainable Development, examines the dynamics of debris flows in Uzbekistan, which are the one of the most dangerous processes in the development of the tourism industry in the mountainous regions of the republic. A methodology for a step-by-step assessment of the physical-geographical factors of a debris flow based on the use of modern geographic information systems (GIS) technologies has applied in the example of the Shakhimardan exclave touristic-recreational-zone of the Fergana touristic subregion. The debris flow hazard of the research object was assessed on five scales of tourist comfortness and then zoning was carried out both according to individual and complex natural components that create the risk of a debris flow phenomenon. Effective and practical safety measures for conducting tourist routes are recommended.

Key words: *debris flow, Uzbekistan, tourism, Shakhimardan zone, GIS technologies, methodological assessment, comfort, zoning, safety measures and tourist routes*

Cite this article: Nigmatov A.N. Debris flow phenomena and their assessment using geoinformation system technologies for the development of the tourist industry of Uzbekistan. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 349–358.

Селевые явления и их оценка с использованием ГИС-технологий для развития туристической отрасли Узбекистана

А.Н. Нигматов

Гулистанский Государственный Университет, Гулистан, Узбекистан, nigmatov_an@mail.ru

Аннотация. В статье, исходя из требований концепции устойчивого развития ООН, рассматривается динамика селей в Узбекистане, которые являются одним из наиболее опасных процессов в развитии индустрии туризма в горных районах республики. На примере туристско-рекреационной зоны Шахимарданского экскlава Ферганского туристского субрегиона применена методика поэтапной оценки физико-географических факторов селя, основанная на использовании современных геоинформационных систем (ГИС) технологий. Селевая опасность объекта исследования была оценена по пяти шкалам комфортности для туристов, после чего было проведено зонирование как по отдельным, так и по комплексным природным компонентам, создающим риск селевого явления. Рекомендованы эффективные и практичные меры безопасности при проведении туристских маршрутов.

Ключевые слова: *сель, Узбекистан, туризм, Шахимарданская зона, ГИС-технологии, методологическая оценка, комфорт, зонирование, меры безопасности и туристические маршруты*

Ссылка для цитирования: Нигматов А.Н. Селевые явления и их оценка с использованием ГИС-технологий для развития туристической отрасли Узбекистана. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 349–358.

Introduction

A set of measures is being gradually implemented to develop the tourism sector as one of the strategic sectors of the national economy, ensuring intensive development of regions, creating new jobs, increasing incomes and living standards of the population, and increasing the investment attractiveness of the country in the Republic of Uzbekistan. According to the 35th goal of the Development Strategy of New Uzbekistan for 2022–2026, within the framework of the "Travel in Uzbekistan" program, the number of domestic tourists should be at least 12 million people, and 9 million of them should be foreigners. The priority goal of the state Strategy in the field of tourism is to ensure safety trips.

Brief overview of the problem

One of the most dangerous natural phenomena in Uzbekistan is debris flows [*Uzhydromet, 2021*], because of the mountainous areas, where many types of tourism and recreational activities have been widely developed. There are complex relief conditions, a weak soil protective cover of vegetation, and intense rainfall (90%), a melting snow cover risk (4%) with DAM break, snow debris, and glacial bridges risks (6%). Debris flows cause material and social damage in 61% of cases, and in 17% of them are accompanied by human casualties [*Akhmedov, 2018*]. Therefore, there is an urgent need for accounting, assessment, monitoring and forecasting of debris flow processes using modern GIS technologies.

The purpose and objectives of the research – were to assess the debris flow hazard of the Fergana Valley of Uzbekistan using the example of the Shakhimardan exclave tourist-recreational zone using GIS technologies. The objectives of the research were to determine the dynamics of debris flows in the touristical recreational areas of Uzbekistan, to identify a methodology for assessing and mapping debris flow risk factors for tourism activities in a key area using GIS technologies, to outline measures for planning tourism services in debris flow risk areas.

Research methods

GIS in tourism, as a rule, includes six mandatory subsystems: data entry, storage and search, updating and adjustment, processing and analysis for estimating parameters, solving calculation and analytical problems, presenting data in various forms [*Kazakis, 2015*]. GIS give opportunity to quickly respond to any emerging situation in any territory with the receipt of all the necessary cartographic and thematic information on it. It is a cartometric study with the simultaneous construction of any maps, plans and diagrams [*Tehrany, 2017; Salimova, 2019*]. Based on GIS technologies, it is possible to simulate debris flow phenomena and study changes in their state over time. The structure and content of GIS technologies are determined by the scientific and applied problems solved in it, among which the most important is their assessment for making appropriate decisions [*Ajibade, 2021*].

Multi-criteria decision making (MCDM) is recognized as an important method for evaluating complex decision-making problems containing disparate data or criteria, such as identifying and mapping debris flow risk areas using multiple factors, and the Analytic Hierarchy Process (AHP) is the most commonly used decision-making method according to several criteria. Therefore, to organize the Shakhimardan exclave touristical recreational zone, taking into account debris flow risk, the approach of multi-criteria decision analysis based on GIS (GIS-MSDA) and the integration of the analytical hierarchy process (AHP) was used (Table 1).

Table 1. Data types and sources used for mapping debris flow risk areas

Data types	Data sources
Shuttle Radar Topography Mission (SRTM GL1) Global (30m spatial resolution)	High resolution topographic open data. https://portal.opentopography.org/
Sentinel 2A satellite images for May 27, 2023 (spatial resolution 10m)	Data from the Copernicus Open Access Centre. https://scihub.copernicus.eu/
Annual precipitation (2010–2020 years)	Data from the Worldwide Energy Outlook (POWER) https://power.larc.nasa.gov/

Research data

According to NIGMI and Uzhydromet in Uzbekistan, the area with debris flows exceeds 53.7 km^2, which is 12% of the total territory of the republic, and their number reaches more than 709 [*Dergacheva, 2017*]. The total number of debris flow days over 36 years of observations in the Fergana Valley was 372 days or 46% of the total number throughout Uzbekistan (Table 2). The stationary observations and in-depth studies of debris flows has stopped at the end of the 90s of the 20th century and the beginning of the 21st century in the republic.

Table 2. Dynamics of the number of days of mudslides in the regions of Uzbekistan*

Regions of Uzbekistan	Number of debris flow days			
	Number of days 1950–1986	in % of the total	Number of days 2010–2020	in % of the total
Namangan	180	22.2	60	8.9
Fergana	119	14,7	134	19.9
Surkhandarya	116	14,3	133	19.8
Samarkand	115	14,2	73	10.9
Kashkadarya	74	9.1	98	14.6
Andijan	73	9.0	11	1.6
Jizzakh	63	7.8	76	11.3
Tashkent	55	6.7	63	9.4
Navaiy	16	2.0	22	3.3
Total	811	100	672	*100*

*Debris flow events are not observed in the Syrdarya, Khorezm regions and the Republic of Karakalpakstan, and were not taken into account in the Bukhara region

Although the periodicity of the destructive debris flows themselves can span 40–60 years. The Shakhimardan natural crisis is the second most destructive among the 10 most destructive debris flows in Central Asia in the entire history of observations, which took place on 05/04/1927, 05/29/1997, 06/13. and 7.07.1997, 8.06.1998 [*Kadyrov, 1998; Aitamtov, 2012, Tulyaganov, 2020*]. As a result of the latest natural disaster, more than 100 people died, up to 600 people went missing, and 500 people lost their homes. A study of the consequences was not possible due to tensions in inter-ethnic relations, which were further aggravated by the disaster [*Petrakov, 2020*].

Latest published data on hazardous debris flow events in Uzbekistan for the period 2010–2020 years shows a slightly different picture [*Uzhydromet, 2021*]. The Fergana and Surkhandarya regions became the most debris flow risk areas of Uzbekistan. In the 21st century, the Namangan and Andijan regions of the Fergana Valley became less progressive debris flow phenomena. This is due to the implementation of complex debris flow protection structures in the Namangan region and less rainy seasons in the Andijan region, due to climate change. But over the past 11 years, the observation of the number of debris flows in average annual terms has increased from 23 to 61 debris flow days, or 2.66 times more without taking into account

the melting of snow cover and the DAM breaks, snow debris, glacial bridges, i.e. 9/10 of all reported incidents.

Recorded debris flow activity in Uzbekistan in March-May of 2010–2020 years given in Fig. 1, and their total annual value is about 74% or ¾ of the total debris flows. Many tourist routes in these mountainous areas are planned specifically for the months of March-May, when it is important to take into account debris flows to ensure sustainable development of tourism. It is advisable to assess tourism risks, which, due to their geographical location, may be affected by debris flows. This allows for safe tourist routes while reducing damage from natural disasters.

Thus, debris flows in the Fergana region of Uzbekistan are an increasingly natural-anthropogenic process and the most dangerous factor affecting the tourism industry. The "Concept for the development of tourism in the Republic of Uzbekistan for 2019–2025," approved by Presidential Decree No. 5611 of January 5, 2019, sets the task of diversifying the tourism industry of the Fergana region by increasing their safety. To implement this task, the assessment of debris flow hazard in tourist sites in the Fergana region becomes an urgent issue. Here it is necessary to take into account such principles of tourism as the discrepancy between natural and political-administrative boundaries, because the diversity of tourism policies in

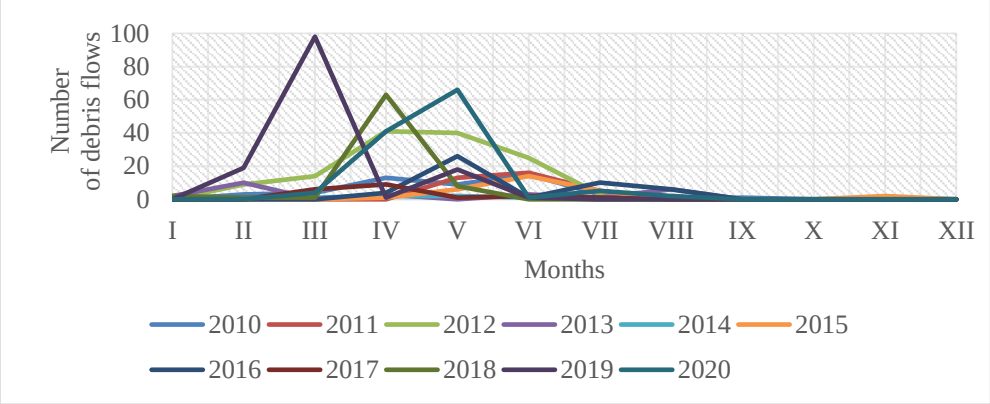


Fig. 1. Monthly number of debris flows in Uzbekistan from 2010 to 2020 (according to Uzhydromet, 2021)

Central Asian countries requires the researcher to assess debris flow hazards within administrative units. Therefore, the objects of all scientific research conducted in the field of tourism in Uzbekistan are countries or their administrative units. From the point of view of "Geographical tourism", the object of our research is the Shakhimardan exclave touristical recreational zone, located on the territory of the Republic of Kyrgyzstan (Fig. 2), because in this key area, 1/3 of all registered debris flow events in the Fergana region occur [*Tobirov, 2021; Nigmatov, 2023*].

Research analysis

Spatial data layers of six factors influencing the occurrence of floods, such as absolute elevation (AE), slope (S), mean annual precipitation (MAP), vegetation density (NDVI), landuse and land cover (LU/LC) and flow concentration (FC) was prepared in raster format using GIS technologies and remote sensing methods in the case of research area.

All raster coefficient maps were reclassified using Spatial Analyst Tools to a common measurement scale of 1 (very low) to 5 (very high), and all classified data were resampled to 10 m using the raster data management tool → raster processing → tool Resample in the ArcGIS environment, converted to spatial dimensions. Then, reclassifying the debris flow hazard factor maps, the AHP model was used to determine the relative influence of each factor. The final debris flow susceptibility map of the study area was obtained by overlaying four spatial layers using the weighted overlay method in the ArcGIS environment. For this study,

six factors closely related to debris flows were selected based on the analysis of previous studies and taking into account the availability of data based on the conclusions of the researchers, as well as the natural structure of the study area. The factors considered in this study and the methods used to map each factor are described below.

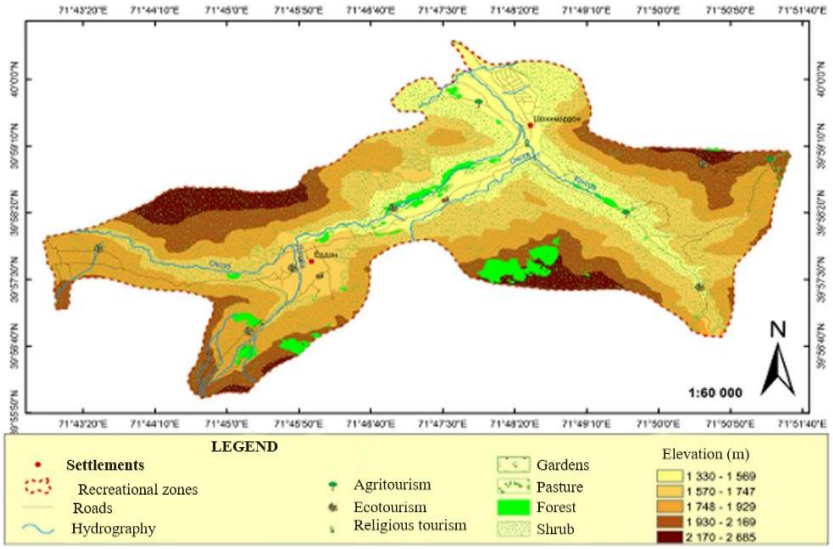


Fig. 2. Shakhimardan exclave tourist-recreational zone

The Digital Elevation Model (DEM) of the Shakhimardan touristical recreational zone was reclassified into five debris flow sensitivity classes and scaled to a spatial resolution of 10 m to create an elevation coefficient map. It was prepared from a DEM using the Spatial Analyst Tools of ArcGIS.

One of the debris flow map was created using DEM [*Ajibade, 2021*]. According to him, a flow direction map is created, then a raster flow concentration map is created. The calculation of flow direction and concentration was performed using hydrological tools – Fill, Flow Direction and Flow Accumulation, respectively, in the Spatial Analyst Tools ArcGIS program [*Kazakis, 2015*].

Precipitation data taken for 2010–2020 years from the World Energy Outlook (POWER) website, and was used to prepare a precipitation coefficient map for the study area. Mean annual precipitation was interpolated in ArcGIS10.8 using the interpolation method (IDW) with a cell size of 10 m and extracted using an area boundary shape file to create a precipitation map.

The area vegetation index (NDVI) map was prepared from the Sentinel 2A satellite image downloaded from the European Open Access Service Copernicus website using ArcGIS 10.8 software using the following equation.

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} = \frac{(Band8-Band4)}{(Band8+Band4)}, \quad (1)$$

where: *NIR* is the spectral reflectivity of the surface in the near-infrared range (8 bands on the Sentinel 2A satellite image), *RED* is the spectral reflectivity of the surface in the red line (Sentinel 2A position 4 on the satellite image).

After all debris flow factors were prepared in raster format, they were reclassified into five groups of measurement scales from 1 to 5 at the same spatial scale (10 m). A high classified rating value (5) corresponds to territories with more advanced debris flows, a lower value (1) corresponds to less progressive debris flows. Since there is no single criterion for reclassifying mudslide warfare, classes of all factors were created based on the results of previous studies and taking into account local conditions.

The AHP process is the most commonly used and effective method in the multi-criteria decision making (MCDM) process for determining the relative importance of each criterion or

factor [*Saaty, 1987; Tehrany, 2017*]. Factors used to map debris flow risk by using multi-criteria decision making included local natural features of the study area and impact indicators based on assessments of previous studies. The following steps carried out to establish the relative effects for each debris flow factor:

Step 1. Each factor was assigned a value from 1 (equal) to 9 (extreme) to construct a paired comparison matrix (Table 3).

Table 3. Matrix of paired comparisons by debris flow factors

Factors	Number					
	1	2	3	4	5	6
	NDVI	*LU/LC*	*S*	*FC*	*MAP*	*AE*
NDVI	1.00	1/3	1/5	1/7	1/9	1/9
LU/LC	3.00	1.00	1/3	1/5	1/7	1/9
S	5.00	3.00	1.00	1/3	1/5	1/7
FC	7.00	5.00	3.00	1.00	1/3	1/5
MAP	9.00	7.00	5.00	3.00	1.00	1/3
AE	9.00	9.00	7.00	5.00	3.00	1.00

Note: *AE* – absolute height, *FR* – landform, *UP* – surface slope, *MSD* – average annual precipitation, *NDVI* – vegetation density, *FC* – flow concentration).

Step 2. Created an optimized pairwise comparison matrix table (Table 4) by dividing each value in a column of the pairwise comparison matrix by the sum of the columns.

Table 4. Degree of influence of factors on debris flow processes

Factors	*NDVI*	*LU/LC*	*S*	*FC*	*MAP*	*AE*	Degree of influence of factors
NDVI	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.06	2.5%
LU/LC	0.09	0.04	0.02	0.02	0.03	0.06	4.3%
S	0.15	0.12	0.06	0.03	0.04	0.08	8.0%
FC	0.21	0.20	0.18	0.10	0.07	0.11	14.4%
MAP	0.26	0.28	0.30	0.31	0.21	0.18	25.6%
AE	0.26	0.36	0.42	0.52	0.63	0.53	45.2%

Step 3. The influence of each factor was calculated (Table 4) by dividing the sum of each row of the optimized table of paired comparison matrices by the number of factors according to the formula:

$$CI = \frac{\gamma_{max} - n}{n-1}, \quad (2)$$

where n is the number of compared factors in the matrix, and γ_{max} is the maximum value of the pairwise comparison matrix.

After calculating the effects for each debris flow hazard factor, a stability check was carried out using equations. The maximum value (γ_{max}) of the comparison matrix was calculated using the following steps:

Step 1. Multiplying each value in the column by the influence of the criterion (Table 5).

Table 5. Significance rate for pairwise comparisons (CR = 0.005)

Factors	*NDVI*	*LU/LC*	*S*	*FC*	*MAP*	*AE*	Sum of factor impact values	Degree of influence of factors
NDVI	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.15	6.14
LU/LC	0.08	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.26	6.09
S	0.13	0.13	0.08	0.05	0.05	0.06	0.50	6.26
FC	0.18	0.21	0.24	0.14	0.09	0.09	0.95	6.60
MAP	0.23	0.30	0.40	0.43	0.26	0.15	1.76	6.88
AE	0.23	0.39	0.56	0.72	0.77	0.45	1.89	4.18

Step 2. Calculate the total effect value by adding the values in the rows.

Step 3. Calculation of the ratio of the total value of each impact to the influence of the corresponding criterion.

Step 4. Averaging the ratio of the total impact value to the impact criterion.

Checking the consistency coefficient (CR) is calculated by leveling:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (3)$$

where *CI* is the consistency index, *RI* is a random index that varies depending on the number of factors used in the paired comparison matrix. If *CR* is below 0.10, it means that the pair comparison matrix has optimal consistency. Greater than or equal to 0.10 this comparison is inconsistent. In this case, the comparison process should be repeated until the *CR* value falls below 0.10.

After preparing and classifying each debris flow management factor on a common scale (1–5) using ArcGIS and weighting the factors using the AHP approach, the spatial layers were merged. When creating debris flow risk maps using the equation below, the method of spatial analysis of the ArcGIS environment, scalable coverage was used.

$$FS = \sum_{i=0}^{n} x_i * w_i, \quad (4)$$

where *FS* is the sensitivity to debris flows, *n* is the number of decision criteria, x_i is a special optimized criterion, and w_i is the corresponding effect of the criterion.

The cell/pixel values of the raster layers were multiplied by the effects/percentage effects obtained from the AHP analysis, and the results were added together to obtain the total debris flow risks.

According to the country's law "On special economic zones of the Republic of Uzbekistan" dated February 17, 2020, the tourism industry of the economy began to develop in tourist and recreational zones and clusters, which should take into account the regional characteristics of the territory. Taking into account this need for a trend in economic development, we have proposed a new scientific and practical direction – "Geographic tourism", the object of study of which is precisely tourist areas, zones and clusters [*Nigmatov, 2023*]. It was classified the Earth's geosystems taking into account tourist zoning, where the Shakhimardan exclave touristical recreational zone was separately identified. In this zone, debris flows have been increasing over the past decades due to: widespread development of foothill lands for irrigated agriculture (60%), construction of road and communication networks in difficult terrain conditions without appropriate anti-erosion measures (15%), increased grazing of livestock on slope areas (12%), changes in precipitation patterns (11%) and other natural and man-made processes and phenomena (2%).

Using GIS technologies of terrain indicators, the determining risks of debris flow hazard in the territory of the key area were assessed (Fig. 3*a*). The absolute height of the area is classified on a 5-point scale, where low altitude areas (1.2), which are more prone to debris flows, are uncomfortable for tourism. Since in these areas of the zone the concentration of river flow is higher than in high-altitude zones. Areas with high debris flow hazard (ab.v. 1324–1500 m) are located in the northeastern part of the key area.

Flat landforms are very risk to debris flows, followed by concave and convex ones. In Fig. 3*b*, the terrain features areas with flat terrain are located on the southern slopes of the Alatau basin of the Aksu river.

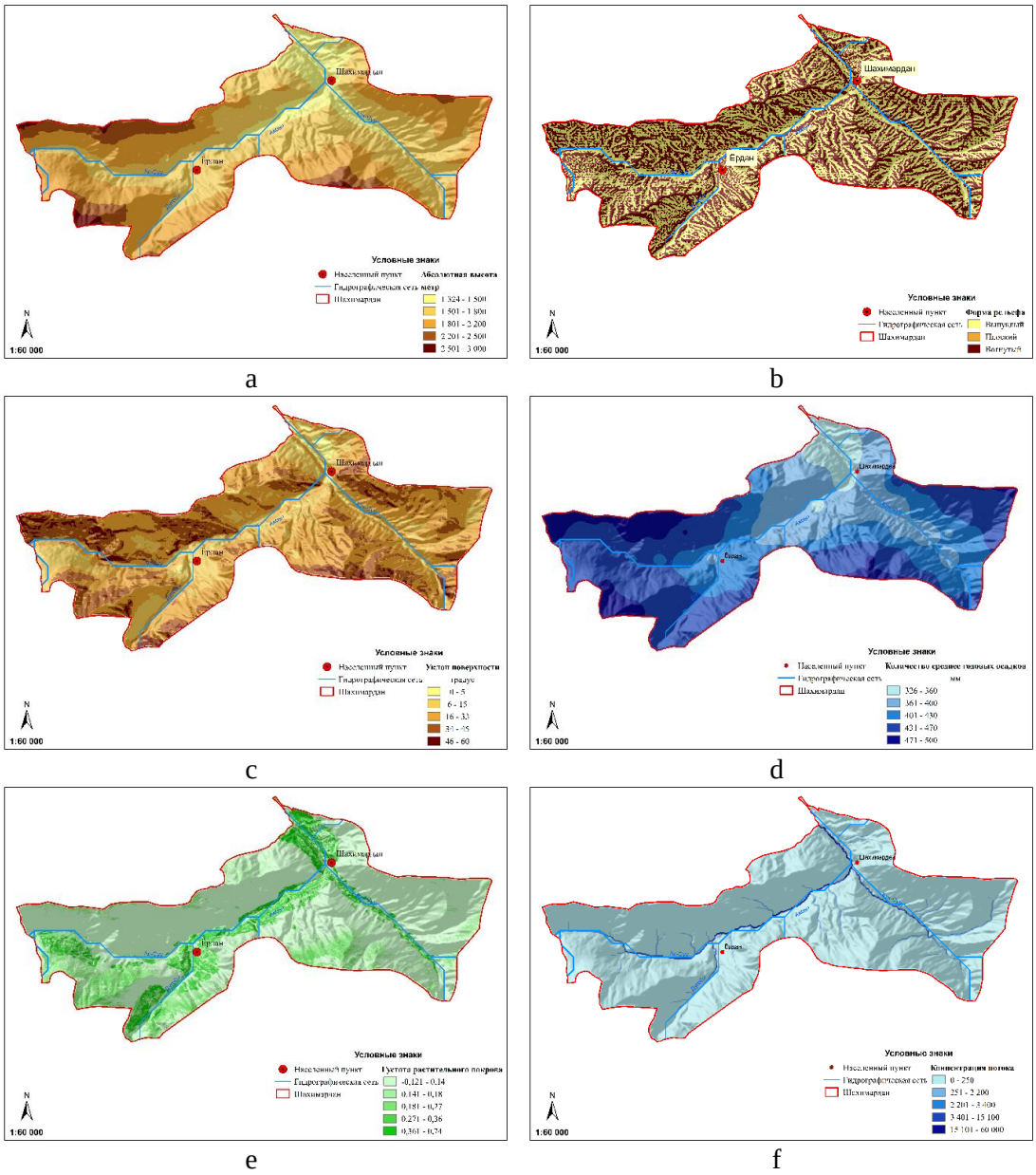


Fig. 3. Physico-geographical indicators that determine the debris flow hazard of the territory in the Shakhimardan tourist and recreational zone: a – absolute height, b – landform, c – surface slope, d – average annual precipitation, e – vegetation density, f – flow concentration)

The reclassified slope map (Fig. 3*c*) shows the territories with the most comfortable areas of the tourist and recreational zone. Debris flow-hazardous areas with a surface slope above 160 are located in the valleys of the Aksai and Kuk-Suu rivers, as well as in the area below the village of Shakhimardan.

The average annual precipitation ranges from 326–500 mm (Fig. 3*d*). They are too high for a storm debris flow on the watershed part of the Alaitau Mountains.

Vegetation cover is an index reflecting the density of vegetation per m^2 of area used to determine susceptibility to debris flow events (Fig. 3*e*). NDVI values in this study ranged from 0.14 to 74 m^2. The densest areas of vegetation cover are those where the annual average precipitation is the highest.

The runoff concentration was reclassified into five risk categories (Fig. 3*f*): very low (<250 pixel), low (250–2200), moderate (2200–3400), high (3415–15100), very high (>15100). The most concentrated flows are observed in areas with a large amount of average annual precipitation.

The debris flow risk map of the Shakhimardan touristical recreational zone (Fig. 4) was developed by combining the above-described thematic maps for the six debris flow hazard factors of the territory described above. It was integrated into three risk classes, according to the level of comfort – subcomfort, discomfort, subcomfort. The integrated use of multi-criteria decision making (MCDM) based on GIS and AHP technologies is more effective in identifying areas prone to debris flows for management purposes in the tourism industry [*Zimina, 2021*].

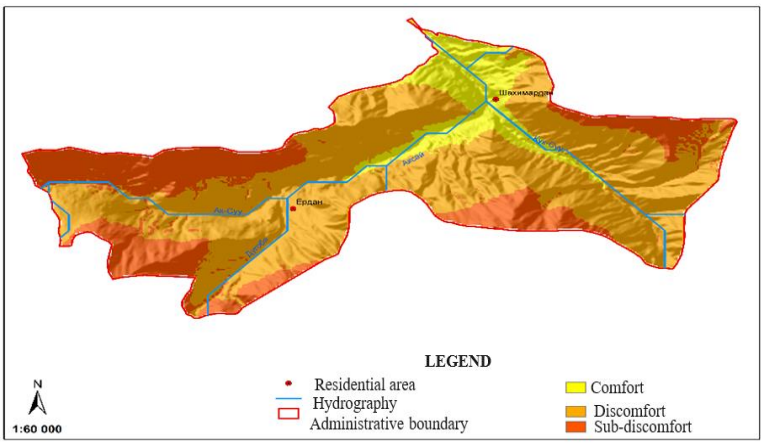


Fig. 4. Debris flow risk map of the Shakhimardan touristical recreational zone

Comprehensive detailed studies conducted by scientists from various countries [*Chernomorets, 2016, Viskhadzhieva, 2016*] revealed that climate warming in the Shakhimardan River catchment area contributes to the formation of dozens of lakes with a high breakthrough potential. In this case, for the safe development of tourism, systematic monitoring of the development of glacial lakes and the installation of early warning systems should be carried out.

To ensure the safety of tourists in areas at risk of debris flows, we have proposed measures that can be taken into account when planning tourist trips:

1. Providing tourists with access to information about debris flow risk zones, including maps and descriptions of debris flow-hazardous areas.
2. Development of methodological recommendations or instructions on the rules of conduct for tourists in debris flow-prone areas.
3. Introduction of assessment, monitoring and forecasting of debris flow events using sirens, sms messages and local media.
4. Providing travel companies with electronic information about weather conditions and river flow conditions.
5. Training travelers on the rules of responding to the threat of debris flows, including advice on safe places and evacuation procedures.
6. Installation of information and safety signs at tourist evacuation sites.
7. Creation of networks of hydrometeorological posts and a base for a unified information exchange system in tourist and recreational areas.
8. Providing tourists with a list of important contacts, including emergency services, medical institutions and organizations for assistance.
9. Recommendations for a set of necessary items (flashlight, water, canned food, documents, etc.).
10. Working with local authorities and emergency services to coordinate security measures.
11. Conducting joint exercises and training to prepare for emergency situations.

These measures will help ensure safety and reduce risk in tourist and recreational areas to reduce risks in the event of a debris flow.

Conclusions

Geographic tourism is a new direction in the tourism industry, the object of study of which is tourist and recreational taxonomic/inner units – regions, zones, clusters.

In the geographical and tourism classification, the Fergana Valley of Uzbekistan is an independent subregion, and the Shakhimardan mountain exclave is a separate tourist and recreational zone, where the economic development of valley bottoms leads to the activation of glacial debris flows, which must be taken into account when planning, constructing and operating tourist facilities and routes.

It is necessary to develop a consistent methodology for the digital collection and analysis of remote sensing data with the subsequent compilation of electronic web maps for six factors that determine the hazard of debris flow risk to assess the debris flow hazard of touristical recreational areas using modern GIS technologies in a laboratory conditions.

Integrated zoning was carried out by applying factor maps of debris flow hazard zones, taking into account five levels of comfort for tourists. These cartographic materials will serve as the basis for the development of a set of measures for the safety of tourist routes.

References

Akhmedov M.A., Salyamov K.D. Selected phenomena in Uzbekistan. Bulletin of the University of Green Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus. T.2, No. 2, 2018. pp. 214–221.

Viskhadzhieva et al. (2016). Debris flow processes on the Alai and Kyrgyz ridges (using the examples of the Shakhimardan and Aksai river basins). K.S. Debris flows: disasters, risk, forecast, protection: Proceedings of the IV International Conference, 2016. – P.56–59.

Dergacheva I. Problems of forecasting and accounting for transboundary floods in mountainous and foothill areas of Uzbekistan [Electronic resource] / NIGMI, Uzhydromet. http://skachate.ru/geografiya/148685/index.html. Date: 07/01/2017.

Law of the Republic of Uzbekistan "On special economic zones of the Republic of Uzbekistan" dated February 17, 2020.

Zimina A.S. (2021) Analysis of the use of geographic information systems in the tourism industry. https://cyberleninka.ru.

Kadirov B.Sh. Comprehensive analysis of mudflow phenomena in the north of the Fergana Valley. – Proceedings of SANIGMI (Tashkent), 1998, Issue 154 (235). pp. 100–108.

Nigmatov A.N. Geographic tourism and geographic information systems technologies in its assessment. Monograph. – Gulistan: GNPK "Cartography", 2023. – 142 p.

Review of mudflow activity on the territory of the Republic of Uzbekistan // Center of the Hydrometeorological Service of the Republic of Uzbekistan. – Tashkent: "Uzhydromet", 2021.

Chernomorets S.S. Assessment of debris flow hazard in the transboundary Shahimardan basin (Kyrgyzstan-Uzbekistan) based on remote sensing and field survey data / Ecology, economics, computer science // Geoinformation technologies and space monitoring. Volume 2. Rostov-on-Don, 2016. – P. 177–184.

Salimova B. D., Makhkamov B. R. Prospects for using the "Makvoll" system to combat mudflows in the mountainous regions of Uzbekistan // Bulletin of Science and Education No. 22(76). Part 2. 2019.

Tobirov O., Madaminzhonova Sh.A. "Geographical tourist zoning of territories" // "Science, technology and education" Moscow, 2021. No. 8 (83). 86–95 pp.

Ajibade F.O. et al. (2021). Flood-prone area mapping using GIS-based analytical hierarchy frameworks for Ibadan city, Nigeria. J Multi-Criteria Decis Anal. 28(5–6): 283–295. https://doi.org/ 10.1002/mcda.1759.

Kazakis N., Kougias I., Patsialis T. (2015) Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: application in Rhodope-Evros region, Greece. Sci Total Environ 538:555–563. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055

Saaty W.A. (1987). The analytic hierarchy process-what and how it is used. Math Modell 9 (3–5): 161–176.

Petrakov D.A et al. (2020) Putting the poorly documented 1998 GLOF disaster in Shakhimardan River valley (Alay Range, Kyrgyzstan/Uzbekistan) into perspective / Science of the Total Environment. Том 724, 1 июля 2020, 138287journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv.

Tehrany M.S. et al. 2017) GIS-based spatial prediction of flood prone areas using standalone frequency ratio, logistic regression, weight of evidence and their ensemble techniques. Geomat Nat Haz Risk 8(2): p. 1538–1561.

MODIS imagery-based water content forecasting methodology for the Kyzylsu River

J.B. Niyazov[1], O.Yu. Kalashnikova[2]

[1] Institute of Water Problems, Hydropower, and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, niyazovjafar@mail.ru; iwphenast2021@gmail.com

[2]Central-Asian Institute for Applied Geosciences (CAIAG), Bishkek, Kyrgyz Republic

Abstract. The article investigates the possibility of using snow cover satellite data for short-term hydrological forecasting for the Kyzylsu River with high-altitude catchment. The research aimed to elaborate a methodology for forecasting mean 10-day (decadal) river discharge (MDD) of the Kyzylsu River based on MODSNOW-processed MODIS satellite imagery. The objectives of the study were to calculate the snow cover index (SCI) for high-altitude zones in 200 m increments for selected river basins, and to analyze the closeness of dependency between the corresponding SCIs and MDDs. The research resulted in equations applicable for producing operational river water content forecasts. Timely and reliable information on expected river water content during the forthcoming 10-day period allows decision makers (water management and hydropower agencies, emergency authorities) plan water supply for various economic sectors, as well as take measures to prevent hazardous hydrological phenomena on the rivers of Central Asia. The main advantage of the applied method is the possibility of obtaining high-quality and reliable forecasts of high-mountain river runoff based on MODIS satellite imagery processed in the MODSNOW application. The forecasting for the Kyzylsu River is extremely important for preventing hazardous hydrological events like floods, hydrological droughts and mud floods.

Key words: *water discharge, snow cover, hydrological forecasting, space imagery, Central Asia*

Cite this article: Niyazov J.B., Kalashnikova O.Yu. MODIS imagery-based water content forecasting methodology for the Kyzylsu River. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 359–366.

Методика прогнозирования водности реки Кызылсу на основе снимков MODIS

Дж.Б. Ниязов[1], О.Ю. Калашникова[2]

[1]Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан, niyazovjafar@mail.ru; iwphenast2021@gmail.com

[2]Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Кыргызстан

Аннотация. В статье рассматривается возможность использования спутниковых данных о снежном покрове для краткосрочного гидрологического прогноза для реки Кызылсу с высокогорным водосбором. Цель исследования – разработать методику прогноза среднего 10-дневного (декадного) речного стока (СРС) р. Кызылсу на основе спутниковых снимков MODSNOW, обработанных спутником MODIS. Задачи исследования заключались в расчете индекса снежного покрова (ИСП) для высотных поясов с шагом 200 м для выбранных речных бассейнов и анализе тесноты зависимости между соответствующими ИСП и БДР. В результате исследований

были получены уравнения, применимые для составления оперативных прогнозов водности рек. Своевременная и достоверная информация об ожидаемой водности рек на предстоящий 10-дневный период позволяет лицам, принимающим решения (водохозяйственным и гидроэнергетическим ведомствам, органам МЧС), планировать водоснабжение различных отраслей экономики, а также принимать меры по предотвращению опасных гидрологических явлений на реках Центральной Азии. Основным преимуществом применяемого метода является возможность получения качественных и достоверных прогнозов стока высокогорных рек на основе спутниковых снимков MODIS, обработанных в приложении MODSNOW. Прогноз для реки Кызылсу чрезвычайно важен для предотвращения опасных гидрологических явлений, таких как наводнения, гидрологические засухи и селевые паводки.

Ключевые слова: *сток воды, снежный покров, гидрологический прогноз, космические снимки, Центральная Азия*

Ссылка для цитирования: Ниязов Дж.Б., Калашникова О.Ю. Методика прогнозирования водности реки Кызылсу на основе снимков MODIS. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 359–366.

Introduction

For the first time, satellite information about snow cover contained in satellite images was applied for hydrological forecasting in 1977 in the Martinek-Rango SRM (Snowmelt Runoff Model) [*Rango, 1977*]. However, the 1.1 km spatial resolution of the AVHRR (NOAA) imagery allowed using snow cover data only for watersheds with significant areas; in addition, satellite images could be used only in case of clouds not distorting the snow cover picture. For long-term forecasting of Central Asian river runoff, snow cover data of AVHRR imagery were processed using the ERDAS Software with 10-day interpolation [*Pertzinger, 2002; Baumgartner, 2000*].

The algorithms for calculating snow cover area allow for the removal of cloud cover from MODIS images making it possible to obtain daily data on snow cover dynamics. Using satellite information about snow cover contained in MODIS images for operational hydrological forecasting in Central Asian countries became possible thanks to the MODSNOW-Tool application [*Gafurov, 2009*]. It allows automatically downloading images from the Internet, removing cloud noise and calculating snow cover area for various river basins [*Gafurov, 2016*]. As studies have shown, the 500 m spatial resolution of MODIS imagery permits using this information for a wider range of catchments – from 1,000 km^2 or more.

The river water content forecasting methods based on MODIS imagery were successfully applied for producing vegetation season and monthly forecasts for the rivers in the Naryn Basin [*Kalashnikov, 2015; 2017; 2020*], as well as for forecasts for vegetation season months for the Pamir-Alai rivers [*Niyazov, 2020*]. When designing the river discharge forecasting methodologies for vegetation months for the Tien Shan and Pamir-Alai rivers, the method accommodating the duration of snow cover accumulation based on MODIS imagery was applied [*Gafurov, 2018; 2019*]. H. Apel conducted a significant amount of work on MODIS-based statistical modeling for the Central Asian region [*Apel, 2018*]; he demonstrated the efficiency of using snow cover information in these images to forecast seasonal river runoff. The efforts of the academic community in recent years have focused on the prevention of hydrological droughts in the Central Asian region important for integrated water resources management [*Gerlitz et al., 2020*].

The Kyzylsu River is the main tributary of the Vakhsh River and is formed in the mountains of Kyrgyzstan. The Vakhsh cascade of hydroelectric power stations operates on the Vakhsh River in Tajikistan. Nurek hydroelectric power station is the largest power plant in Tajikistan, and the most powerful hydroelectric power station in Central Asia.

The 300 m high Nurek hydroelectric power station dam is one of the highest in the world. An artificial Nurek reservoir with a volume of 10.5 km^3, which has great hydro-energy and water-economic importance for Tajikistan and for the countries located downstream in the Amudarya River basin (Uzbekistan and Turkmenistan). However, the pressure on the river system is constantly increasing, which is a cause of concern for downstream countries.

Water content forecasting for the Kyzylsu River is important both for water resource planning and preventing hydrological hazards associated with expected low-water (hydrological drought) or high-water (flood) periods.

The authors of the article possess the experience of successfully applying MODIS satellite imagery data for long-term hydrological forecasting (flood period and its months) for the river catchment of the Kyzylsu. Using the forecasting equations for 10-day (decadal) intervals makes this approach innovative. The study used the snow cover information contained in MODIS satellite imagery processed in MODSNOW to determine the spatial characteristics of seasonal snow cover reserves in the high-altitude Kyzylsu. The research aimed to analyze the correlation dependencies between mean 10-day river discharge and snow cover area in high-altitude zones in 200 m increments. The analysis led to elaborating prognostic equations of applied significance for executing timely and high-quality decadal river water content forecasts.

The article includes the review of the main characteristics of the studied object. It likewise presents the formulas for calculating the snow cover index, main equation parameters and quality criteria for the proposed short-term hydrological forecasting methodology. The article also presents the advantages of the newly developed methodology for operational short-term hydrological forecasting.

The article's Conclusions Section describes the main research findings and further research prospects.

Materials and methods

The Kyzylsu River basin is distinguished by the presence of powerful Glaciers on the Zaalay Range, which to a significant extent has elevations of 6000 meters, and the maximum individual heights are about 6500 meters or more (Lenin (Abu Ali ibn Sino – in present) peak is 7134 m), most of the rivers (about 23) flow from its northern slope with length 1251 km. The rivers flowing from the southern slope of the Alai Range with a height of no more than 4000 meters (about 15 rivers) are less water-bearing and have a length of 451 km. Noteworthy is the high regulation of the flow of the Kyzylsu River, associated with the distribution of coarse material in the Alai Valley [*Shults, 1965*].

The Kyzylsu River, which are glacier-snow fed have a tight flow regulation (the base flow is 60–70% of the annual), due to the peculiarities of the geological structure in the river basin. The melted snow and glacier feeding are for 15–22% in a percentage ratio, but air temperature has the greatest influence on runoff [*Niyazov, 2022; Podrezova et al, 2022*]. The location of the basins in Central Asia is shown in Fig. 1. Main characteristics of the basins up to the observation points are given in Table 1.

High water is observed on the Kyzylsu from April to September. River belongs to the glacial- snow nourishment type with peak floods and maximum water discharge in July-August. The Kyzylsu River runoff hydrographs differ greatly from year to year and can be either saw tooth or, to a lesser extent, change during the flood period, forming a ridge of long constant duration due to the glaciers melting. During high-water period, the main sources of river nourishment are meltwater from glacial meltwater, seasonal snowmelt, ground- and to a lesser extent rainwater. Due to this, the hydrological forecasting practice has been taking into account the snow reserves accumulated during the cold season. The information on the snow cover depth and water content is collected via a network of observation stations of national hydrometeorological services. Yet, the point nature of the information and the widely spaced grid of the observation network do not allow assessing the situation with snow reserves in the mountains reliably. The study team used the snow cover information in MODIS satellite imagery providing for spatial characterization of its distribution in high-altitude zones. MODIS snow cover data underwent processing using the MODSNOW software.

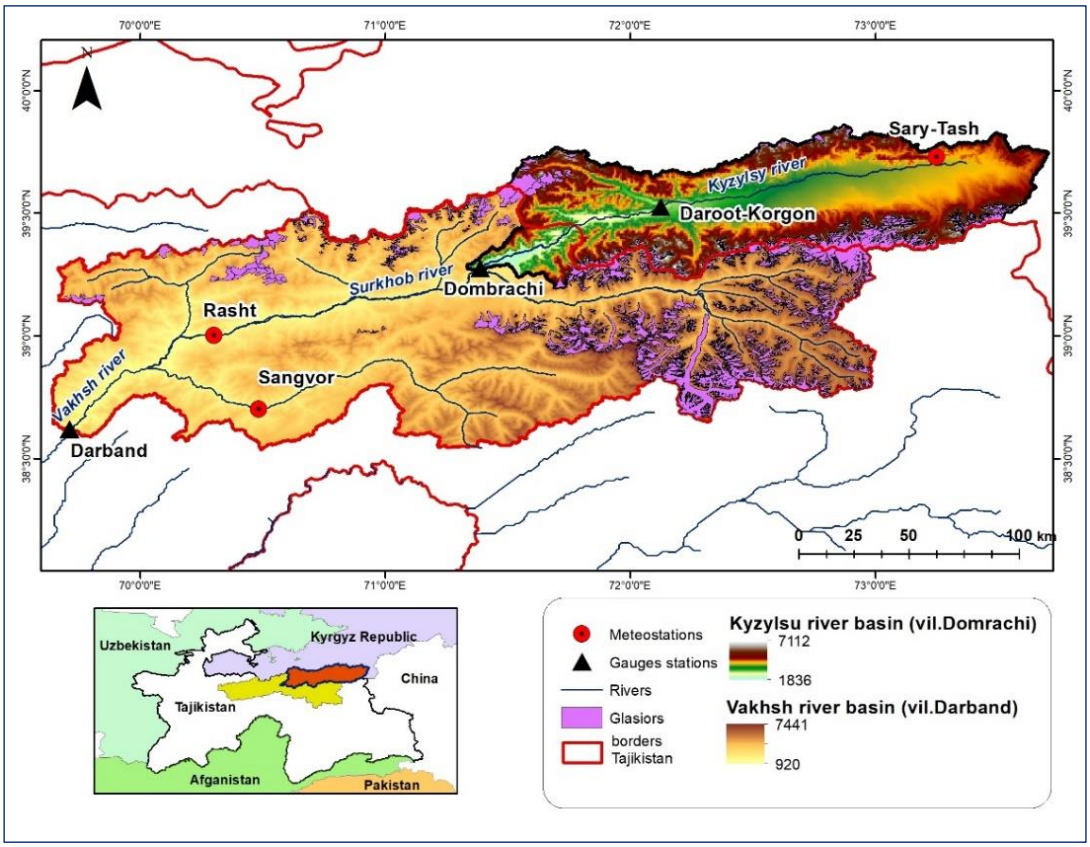


Fig. 1. Geographic location of the Kyzylsu River Basins on the territory of Tajikistan and the countries of Central Asia and observation networks of meteorological and hydrological parameters the Dombrachy and Sary-Tash hydroposts (compiled by the authors)

Table 1. Basic information about the Kyzylsu river basin*

Name of the gauging station	Catchment area in km^2	Mean catch-ment elevation, m a.s.l.	Glacier area			Mean annual water discharge, m^3/s
			1940–1970s, km^2	*2013–2016, km^2	Percen-tage of the basin area*	
Kyzyl-Suu River – Dombrachi	8470	3540	640,3	578,4	6,8	76,2

*Glacier area according to Landsat images for 2013–2016. Compiled by the author.

To develop a methodology for 10-day river water content forecasting, snow cover data calculated for high-altitude zones with 200 m increments were used. Calculations of the snow cover area (SCA) as a percentage of basin area were carried out for each day in the series.

Snow cover duration (or the number of days with snow cover) also affects the formation of river runoff. In this regard, the snow cover index (SCI) was also applied calculated based on the following formula [*Gafurov et al., 2018*]:

$$SCI_t = \sum_{n=1}^{n=365/366} SCA_i,$$

where *SCA* represents snow cover area as a percentage of basin area for *i*-day (in our case for each day); *SCI* – snow cover index, duration of snow cover accumulation during forecast time (*t*); and *n* is the number of days with snow cover for hydrological year.

The linear regression method [*Podrezov, 2019*] was used to analyze the dependence between MDD and SCI.

Research results

The snow cover area as a percentage of the total basin area for high-altitude zones with 200 m increments was calculated for every day during 2000–2019 for the Kyzylsu River Basins (Fig. 2.).

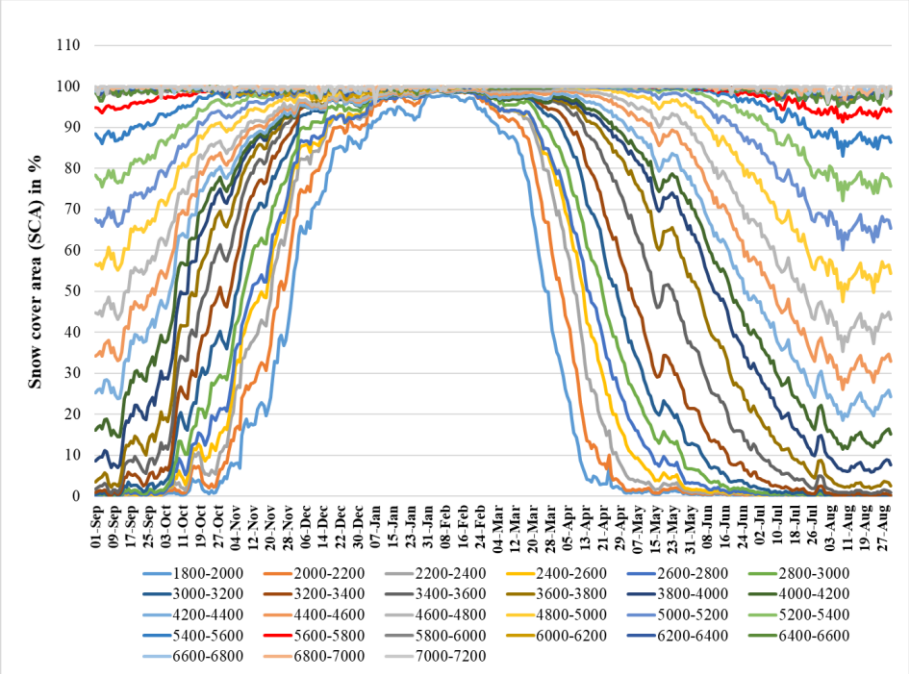


Fig. 2. Snow cover area as a percentage of total river basin area (Kyzylsu River, high-altitude zones in 200 m increments) (compiled by the authors)

According to formula (1), SCI was calculated from September 1 up to the forecasted 10-day interval. For instance, to forecast the situation during the first 10-day interval of May, SCI was calculated from September 1 until April 30; and to forecast the situation during the second 10-day interval of May – from September 1 until May 10, and so forth.

Further, the linear dependency correlation ratios between mean 10-day water discharge and SCI for high-altitude zones with 200 m increments for the Kyzylsu were calculated. The highest correlation ratios corresponded to the discharge with zone elevation 2800–3000 m. The calculation results are shown in Fig. 3.

The analysis of calculation results of the correlation ratios between mean 10-day water discharge and SCI for various altitude ranges allowed identifying the most effective linear relations and elaborating the corresponding equations. Table 2 shows the obtained equations of linear dependence between mean 10-day water discharge of the Kyzylsu River with SCI and discharge of previous decade, correlation ratios (R) calculated for the observation period from 2000 to 2017. An example of the analysis of simulated and observed water flow for the August first decade is shown in Fig. 4. In most calculations, the value of the correlation coefficient R was greater than 0.6, which allows the equations to be used for forecasts over decades.

Discussion

The lack of information on the conditions of snow accumulation in the discharge formation zones of Central Asian rivers with high-altitude catchments can be replenished by satellite sensing data. MODIS imagery processed using the MODSNOW software provide information on the daily snow cover dynamics, and can be applied for designing short-term hydrological forecasting methods. The method developed for the Kyzylsu River based on the snow cover data of MODIS images and previous decade can be used for making 10-day

forecasts. In most calculations, the value of the correlation coefficient R was above 0.6, into the category of "good" and "satisfactory", which allows the use of equations for forecasting over decades.

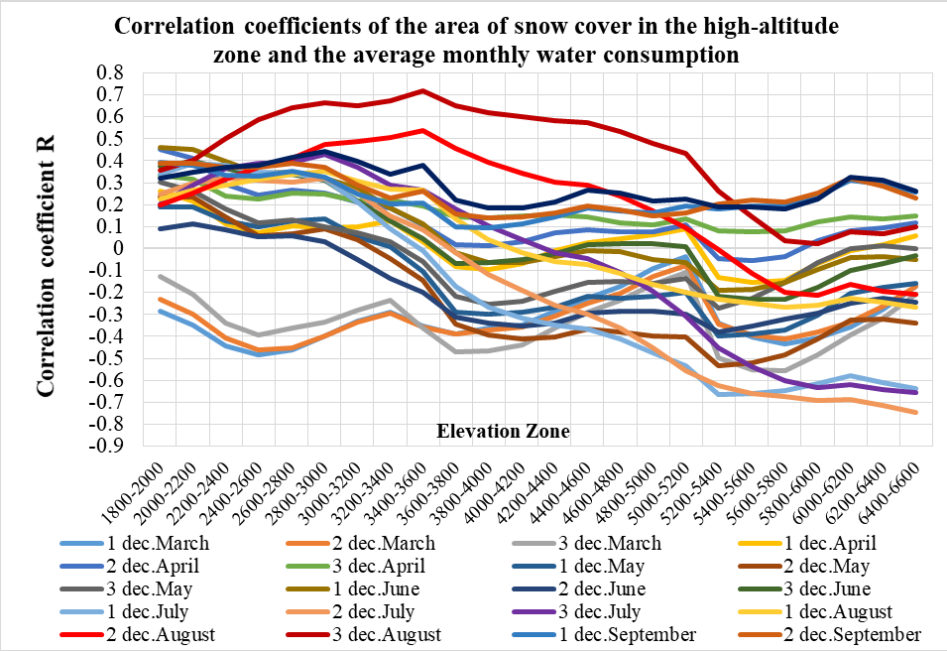


Fig. 3. SCI and mean decadal discharge correlation ratios (R) Kyzylsu – Dombrachi River Basin, high-altitude zones in 200 m increments (compiled by the authors)

Table 2. Linear dependency equations for mean monthly water discharge and SCI by high-altitude zone 2800–3000 m increments

Ten-day interval	Equation	R
1rd 10-days (April)	1.19Q 3 dec. March+29.8*SCI zone 2800–3000 –20.2	0.81
2rd 10-days (April)	0.98Q 1 dec. April+19*SCI zone 2800–3000 –3.4	0.77
3rd 10-days (April)	1.24Q 2 dec. April–0.23*SCI zone 2800–3000 –4.52	0.78
1nd 10-days (May)	0.86Q 3 dec. April–15.8*SCI zone 2800–3000 +28.5	0.67
2nd 10-days (May)	0.66Q 1 dec. May–0.09*SCI zone 2800–3000 +40.4	0.67
3rd 10-days (May)	0.64Q 2 dec. May+5.11*SCI zone 2800–3000 +27.8	0.42
1st 10-days (June)	1.14Q 3 dec. May+49.4*SCI zone 2800–3000 –30.7	0.82
2nd 10-days (June)	1.02Q 1 dec. June–52.8*SCI zone 2800–3000 +61.1	0.66
3rd 10-days (June)	0.72Q 2 dec. June+63.1*SCI zone 2800–3000 –8.18	0.66
1st 10-day (July)	0.68Q 3 dec. June+26.3*SCI zone 2800–3000 +28.7	0.49
2nd 10-days (July)	0.86Q 1 dec. July+19.5*SCI zone 2800–3000 +7.15	0.65
3rd 10-days (July)	0.70Q 2 dec. July+32.4*SCI zone 2800–3000 +23.4	0.82
1st 10-days (Aug)	0.41Q 3 dec. July+28.3*SCI zone 2800–3000 +73.5	0.30
2nd 10-days (Aug)	1.05Q 1 dec. August +40.8*SCI zone 2800–3000 –45	0.83
3rd 10-days (Aug)	0.32Q 2 dec. August +72.8*SCI zone 2800–3000 +36.2	0.60
1st 10-days (Sept)	0.72Q 3 dec. August–25.6*SCI zone 2800–3000 +40	0.74
2nd 10-days (Sept)	0.96Q 1 dec. September+11.7*SCI zone 2800–3000 –20.2	0.91
3rd 10-days (Sept)	0.76Q 2 dec. September+21.9*SCI zone 2800–3000 –8.97	0.77

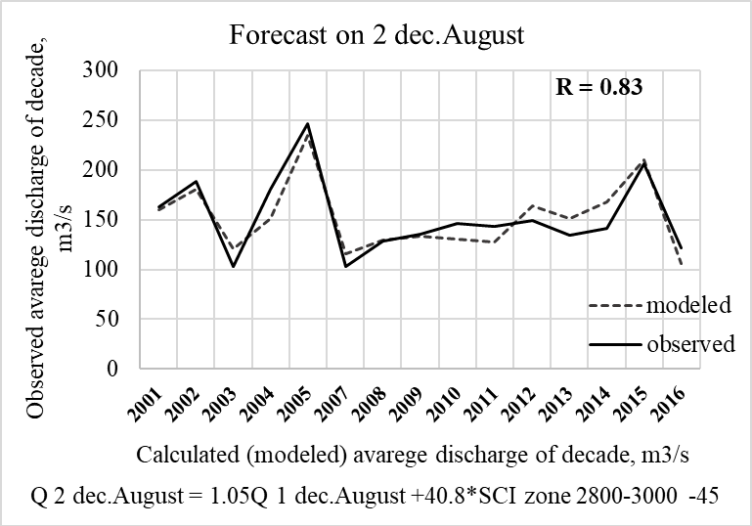


Fig. 4. Simulated and observed water discharge for the first August decade (compiled by the authors)

The limitations of using MODIS imagery for developing river runoff forecasting methods are predetermined by image resolution. The snow cover on MODIS images has the spatial resolution of 500 m and, thus their use for watersheds smaller than 1,000 km^2 is considered inappropriate.

Conclusions

The main advantage of the applied method is the possibility of obtaining high-quality and reliable forecasts of high-mountain river runoff based on MODIS satellite imagery processed in the MODSNOW application. This is particularly important for the catchments where no land-based snow cover observations are carried out currently and/or for the river basins not sufficiently covered by observations;

Water content forecasting for the Kyzylsu River is extremely important for preventing hazardous hydrological events like floods, hydrological droughts and mud floods;

The analysis of the correlations between SCI calculated for high-altitude zones with 200 m increments and the mean water discharge pointed to their close dependence over the months when melt snow and glacial runoff play a decisive role in the formation of river runoff;

Future studies will be conducted for other mountain river basins in Central Asia to elaborate MODIS-based methods for short-term hydrological forecasting for operational application by national hydro meteorological agencies.

Acknowledgements

This research effort was supported by the Central Asian Water (CAWa) Project (www.cawa-project.net; Grant AA7090002) funded by the German Federal Ministry of Foreign Affairs under the 343rd German Water Initiative for Central Asia (“Berlin Process”).

References

Apel H., Abdykerimova Z., Agalkhanova M., et al. (2018). Statistical forecast of seasonal discharge in Central Asia using observational records: development of a generic linear modelling tool for operational water resource management. Hydrology Earth System Sciences, 2018, № 2, pp. 2225–2254 (doi: 10.5194/hess-22-2225-2018);

Baumgartner M., Spreafico M., Weiss H. (2000). Operational snowmelt runoff forecasting in the Central Asian mountains. Remote Sensing and Hydrology 2000 (Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, USA, April 2000). IAHS-AISH Publication, No. 267, pp. 66–71;

Catalogue of glaciers of the USSR (Ed.-in-chief O.N. Vinogradov), vol. 14. L.: Gidrometeoizdat, 1980, p. 44 [in Russian];

Gafurov A., Bárdossy A. (2009). Cloud removal methodology from MODIS snow cover products. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, № 3(7), pp. 1361–1373 (doi: 10.5194/hess-13-1361-2009);

Gafurov A., Kalashnikova O., Apel H. (2019). Hydrological forecast based on the snow cover index, derived from basin-wide and elevation specific remote sensing snow cover data in mountainous basins. Geophysical Research Abstracts. Vienna: EGU2019, 2019, vol. 21, EGU2019-12817;

Gafurov A., Lüdtk, S., Unger-Shayeste, K., Vorogushy, S., Schön, T., Schmid, S., Kalashnikov, O., Mer, B. (2016). MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data. Environmental Earth Science, 2016, № 75(14), p. 1078 (doi: 10.1007/s12665-016-5869-x);

Gafurov A., Nurbatsina A., Kalashnikova O. (2018). Assessment of water resources in Central Asia by remote sensing methods. New methods and results of landscape research in Europe, Central Asia and Siberia, edited by Sycheva V. and Muller L. in 5 volumes, 2018, vol. 2, pp. 405–409 [in Russian];

Gerlitz N.L., Vorogushyn N.S., Gafurov N.A. (2020). Climate informed seasonal forecast of water availability in Central Asia: State-of-the-art and decision-making context. Water Security, 2020, vol. 10, 100061 (doi: 10.1016/j.wasec.2020.100061);

Guided Tutorial for Forecasting Services. Section 3, part 1. L.: Gidrometeoizdat, 1962, p. 196 [in Russian];

Kalashnikova O., Gafurov A. (2017). Using ground and satellite data on snow cover to predict the Naryn River runoff. Ice and Snow, 2017, vol. 57, № 4, pp. 507–517 [in Russian];

Kalashnikova, O.Yu. (2015). On the issue of developing methods for long-term forecasting of mountain river runoff and water inflow to reservoir: Naryn River case study. Science, new technologies and innovations of Kyrgyzstan, 2015, № 5, pp. 100–103 [in Russian];

Kalashnikova O.Yu., Gafurov A.A., Omorova E.A. (2020). Forecasting the water content of the Naryn River for the growing season months based on MODIS imagery. Science, new technologies and innovations of Kyrgyzstan, 2020, № 3, pp. 14–18 [in Russian];

Niyazov J.B., Kalashnikova O.Yu., Gafurov A.A. (2020). Water resource assessment of the Pamir-Alai rivers by remote sensing methods (Kafirnigan and Gunt Rivers case studies). KRSU Bulletin, 2020, vol. 20, № 4, pp. 152–157 [in Russian];

Pertzinger F., Baumgartner M., Kobilov T., Schulz A., Vaselina L. (2002). Model of snow cover formation and methodics of long-term prediction of inflow into water reservoir during flood season. Proceedings, International Conference on Flood Estimation, Bern, Switzerland;

Podrezov O.A. (2019). Methods of statistical processing and analysis of hydrometeorological observations: textbook for bachelor hydrometeorologists. Bishkek: KRSU. 2019, p. 170 [in Russian];

Rango A., Salomonson V., Foster J. (1977). Seasonal streamflow estimation in the Hymalayan region employing meteorological satellite snow cover observations. Water Resources Research, 1977, vol. 13, No. 1, pp. 109–112;

Shabunin A.G. (2018). Catalogue of glaciers of Kyrgyzstan. Central Asian Institute for Applied Geosciences (CAIAG). Bishkek, 2018, p. 709 [in Russian];

Shults V.L. (1965). Rivers of Central Asia. L.: Izd-vo GIMIZ, 1965, p. 680 [in Russian]

Podrezova Yu.A., Niyazov J.B., Kalashnikova O.Yu., Pavlova I.A., Mirzokhonova S.O. (2022). The Kyzylsu River (Amu-Darya river basin) runoff dynamics and forecast in a changing climate. Climate & Nature. № 3 (44), p. 25–38. [in Russian]

Niyazov J.B. (2022). Study of the effects of the meteorological parameters on the Kyzylsu run-off formation and the components. Climate & Nature. № 3 (44), p. 38–47. [in Russian]

Debris flows and climate dynamics in natural areas of Eastern Cuba

A. Peña-de-la-Cruz[1], R. Delgado-Téllez[2], M. Ding[3], Y. Savón-Vaciano[1]

[1]Cuban Institute of Meteorology, Environmental Agency, Guantánamo, Cuba, aris.delacruz@gtm.insmet.cu

[2]Mountain Development Centre, Environmental Agency, Guantánamo, Cuba

[3]Southwest Jiaotong University, Chengdu, China

Abstract. Debris flows are triggered by intense rainfall and are often associated with tropical cyclones. Preceding precipitation, as one of the determining factors for debris flow occurrence, is a variable of interest in assessing the risk of debris flows triggered by such events. In this research, we conducted an initial analysis of the effects that local climate dynamics can have on the likelihood of debris flow occurrence in conserved natural zones. We utilized a landslide inventory to identify five topoclimates where concentrations of debris flows exist in the natural areas of eastern Cuba. For each of these topoclimates, we analyzed the evolution of local climate characteristics, as well as water and bioclimatic balances, across the following time series: 1970–2000, 2000–2040, 2040–2060, 2060–2080, and 2080–2100, considering two shared socioeconomic trajectories. Our results show that the monthly rainfall distribution throughout the year in high-risk debris flow zones will remain relatively stable under the studied scenarios, with a slight decrease in soil saturation occurring during the central months of the hurricane season. However, in topoclimates with a significant proportion of debris flows, a steep reduction in available water within ecosystems is anticipated for most of the hurricane season, potentially mitigating the danger posed by debris flows in the area. Furthermore, the increase in temperature favors atmospheric water vapor in a positive feedback loop, which increases precipitation intensity, especially during severe rainfall events, consequently altering the conditions of occurrence of landslides.

Key words: *topoclimates; debris flows; climate change; hydrologic balance; severe weather events*

Cite this article: Peña-de-la-Cruz A., Delgado-Téllez R., Ding M., Savón-Vaciano Y. Debris flows and climate dynamics in natural areas of Eastern Cuba. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 367–375.

Селевые потоки и динамика климата в природных зонах Восточной Кубы

А. Пенья де ла Круз[1], Р. Дельгадо-Теллез[2], М. Дин[3], И. Савон-Васиано[1]

[1]Кубинский институт метеорологии, Гуантанамо, Куба, aris.delacruz@gtm.insmet.cu

[2]Центр развития горных территорий, Агентство по защите окружающей среды, Гуантанамо, Куба

[3]Юго-западный университет Цзяотун, Чэнду, Китай

Аннотация. Селевые потоки вызываются интенсивными дождями и часто связаны с тропическими циклонами. Предшествующие осадки, как один из определяющих факторов возникновения селевых потоков, являются переменной, представляющей интерес для оценки риска селевых потоков. В данном исследовании мы провели первоначальный анализ влияния местной динамики климата на вероятность возникновения селей в охраняемых природных зонах. Использовалась инвентаризация оползней, чтобы определить пять топоклиматов, к которым

приурочены селевые потоки в природных зонах Восточной Кубы. Для каждого из этих топоклиматов проанализирована эволюция местных климатических характеристик, а также водных и биоклиматических балансов в следующих временных рядах: 1970–2000, 2000–2040, 2040–2060, 2060–2080 и 2080–2100 гг. учитывая две общие социально-экономические траектории. Наши результаты показывают, что ежемесячное распределение осадков в течение года в зонах высокого селевого риска останется относительно стабильным в рамках изученных сценариев, с небольшим снижением насыщения почвы, происходящим в середине сезона ураганов. Однако в топоклиматах со значительной долей селевых потоков ожидается резкое сокращение количества доступной воды в экосистемах на протяжении большей части сезона ураганов, что потенциально смягчит опасность, которую представляют селевые потоки в этом районе. Кроме того, повышение температуры благоприятствует образованию водяного пара в атмосфере по принципу положительной обратной связи, что увеличивает интенсивность осадков, особенно во время сильных дождей, и, как следствие, изменяет условия возникновения оползней.

Ключевые слова: *топоклиматы, селевые потоки, изменение климата, гидрологический баланс, суровые погодные явления*

Ссылка для цитирования: Пенья де ла Круз А., Дельгадо-Теллез Р., Дин М., Савон-Васиано И. Селевые потоки и динамика климата в природных зонах Восточной Кубы. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 367–375.

Introduction

Debris flows are commonly associated with episodes of intense rainfall, with the intensity of precipitation being one of the most relevant factors in their occurrence [*Pospehov et al., 2023*]. However, other characteristics of the rainfall regime, such as prior precipitation, are also factors to consider when predicting the occurrence of debris flows [*Zhang et al., 2014*]. Consequently, the behavior of other climate elements and related phenomena resulting from the interrelationships of the climate system, especially those related to the hydrological cycle, become relevant in the context of climate variability and change [*Green et al., 2017; Zaitchik et al., 2023*].

While the majority of the research related to climate change impacts on the probability of debris flow occurrence refers to alterations in rainfall regimes [*Jakob, 2022; Lin et al., 2022*], these studies have generally focused on global and regional scales in heavily anthropized environments. Analyzing climate characteristics with a local focus, such as that provided by topoclimate research [*Atkinson, 2003*] in mountains with a predominance of natural areas, can provide relevant information for the planning of risk reduction strategies and adaptation to climate change for local stakeholders.

Debris flows can have significant impacts both on the natural environment and on society [*Fan et al., 2020*]. In relatively preserved natural areas, however, debris flows can be considered natural phenomena to which endemic species have adapted throughout their evolution. Nevertheless, the reduction in preserved areas, the expansion of invasive species, and anthropic pressure have turned massive debris flow events into a cause for concern from a biodiversity conservation perspective.

An example of an atmospheric event known to trigger massive debris flows is tropical hurricanes in the insular Caribbean. Eastern Cuba hosts one of the largest biodiversity reserves in the insular Caribbean. It is home to the Cuchillas del Toa Biosphere Reserve, a World Heritage Site notorious for its biodiversity in the insular Caribbean, with the highest number of endemic taxa in this region [*Gallardo-Toirac et al., 2023*]. This region records the highest rainfall values of the island, with intense rainfall events during the months of October and

November, often associated with the influence of tropical cyclones [*Peña-de la Cruz et al., 2013*].

In meteorological sciences, the concept of climate dynamics encompasses the behavior and interrelation of the components of the climate system and their evolution, including human impact. This research analyzes the temporal dynamics in the topoclimates of eastern Cuba, where debris flow events triggered by tropical hurricanes have been recorded. In this context, climate dynamics are considered the evolution of the atmosphere subsystem at a local scale and its relationship with the hydrological regime in two human impact scenarios.

Methods and data

The study was conducted in the natural areas of Eastern Cuba (Fig. 1). This region is sparsely populated, with a significant proportion under conservation. Cuban humid forests predominate in the area, in which the average annual precipitation reaches 2200 mm. The relief is abrupt, with steep slopes known locally as "cuchillas". The elevations are relatively low, averaging 360 m above sea level.

An inventory of landslides carried out after hurricane Matthew [*Pospehov et al., 2023*] was used as a reference to identify the areas with the highest danger of debris flow events. Hurricane Matthew was a high-intensity tropical cyclone that moved through the Atlantic and the Caribbean, reaching a maximum of 5 on the Saffir-Simpson scale. In Cuba, Hurricane Matthew made landfall on October 4, 2016, at 18:00 local time on the south coast of the eastern mainland in a north–northwest direction and category 4 on the Saffir-Simpson scale. During October 5, 6, and 7, accumulated rainfall of up to 700 mm was recorded in some areas of the region under the influence of its feeder bands [*Stacy R. Stewart, 2017*]. This hurricane caused catastrophic damage to the infrastructure and vegetation of the area, which was valued at 2430.8 million pesos by the Cuban government.

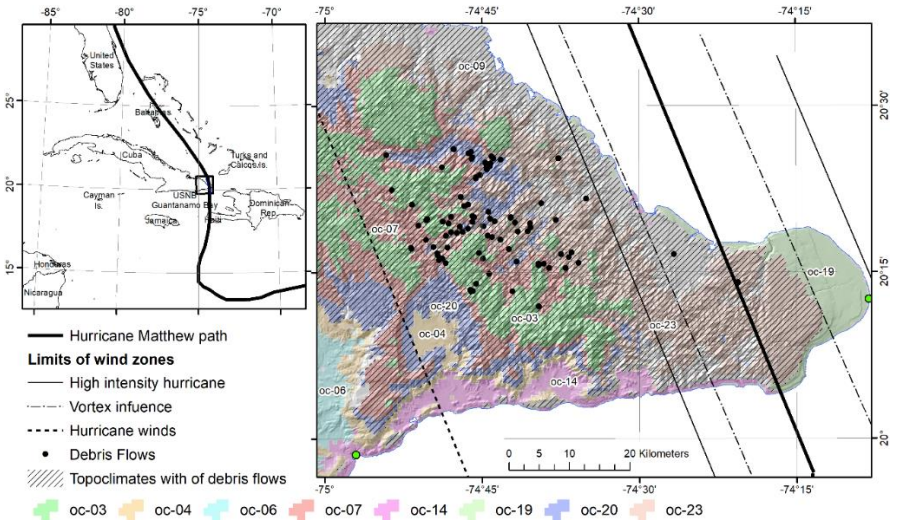


Fig. 1. Map of the study area, topoclimates, and debris flows recorded in the area. The limits of the hurricane wind intensities are shown as a reference. The locations of the debris flows were taken from Pospehov et al. [*2023*]. Source: prepared by the authors

The topoclimates were delineated using patterns of local climate types according to complex climatology theory [*Piotrowicz and Ciaranek, 2020*]. Similar patterns of diurnal cycles of temperature and relative humidity were identified for the rainy (PLL) and less rainy (PPLL) periods in the area. Each topoclimate is a cluster from a dimensional reduction of the patterns made with a deep autoencoder. The topoclimates that recorded debris flow events during the hurricane were selected for this study. The evolution of local climatic characteristics and water balance for each climate reference and future climate terms was analyzed.

The analysis and evolution of topoclimates were determined using two climatic elements: temperature and precipitation. Climatological series from 1970–2000, used as a reference period, and from 2040, 2060, 2080, and 2100 were used. For the medium-term climate (MT) scenario, the 2040–2060 series was used, and the 2080–2100 series was used for the long term (LT) scenario. The source of climatological data used was the WorldClim v2.1 product [*Fick and Hijmans, 2017*]. A set of five global climate models (MCG) with a history of use in the Caribbean region included in the CMIP6 [*Eyring et al., 2016*] was selected: HadGEM3, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, FIO-ESM-2-0, and BCC-CSM2-MR.

Two shared socioeconomic pathways (SSPs) [*Riahi et al., 2017*] were considered to consider the human impact on the evolution of the future climate. These pathways were selected based on current trends according to Hausfather and Peters [*2020*]: SSP2-4.5 was the most trending pathway, and SSP5-8.5 was the most negative extreme. The Bioclim package implemented in R language v3.0 [*Serrano-Notivoli et al., 2022*] was used for the hydrological balance analyses.

Results and discussion

The intersection of the topoclimates and debris flows allowed the identification of five topoclimates in the eastern region of Cuba prone to debris flows (Table 1). The analysis focused on the oc-20, oc-23, oc-07, and oc-03 topoclimates. The oc-09 topoclimate does not present a significant number of events.

Table 1. Debris flows recorded for each topoclimate, debris flows count, from [*Pospehov et al., 2023*]

Topoclimate	Debris flows
oc-20	25
oc-23	29
oc-07	21
oc-03	17
oc-09	2

The topoclimates associated with debris flows are similar in the rainfall regime, with maximum values occurring between the months of May, September, and October (Fig. 2).

According to the Walter-Lieth climogram of those topocliamtes, the evolution of the average monthly accumulated rainfall will remain relatively stable. However, a disturbance related to the impoverishment of the relative minimum values of the month of July within the summer period is expected. This decrease was accentuated in the oc-20 topoclimate for the SSP5-8.5 trajectory (Fig. 2). The increase in the monthly average temperature is consistent in all the terms and trajectories analyzed.

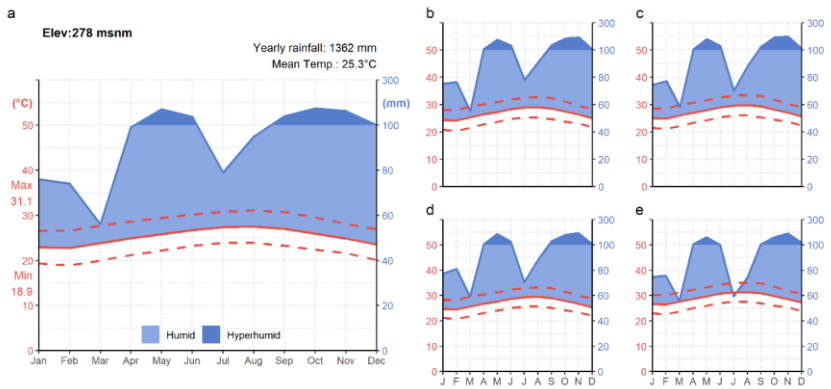


Fig. 2. Walter-Lieth climogram for the oc-20 topoclimate. a – reference period; b – SSP2-4.5 MT; c – SSP2-4.5 LT; d – SSP5-8.5 MT; and e – SSP5-8.5 LT. Source: prepared by the authors

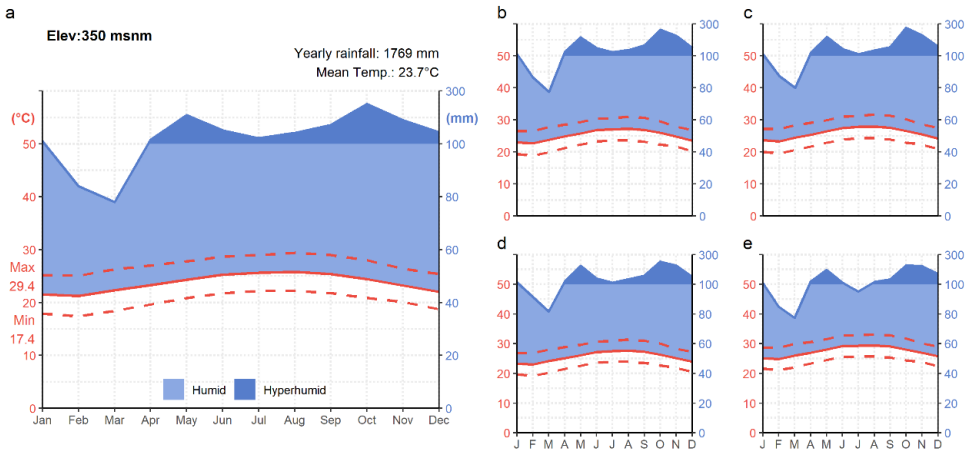


Fig. 3. Walter-Lieth climogram for the oc-23 topoclimate. a – reference period; b – SSP2-4.5 MT; c – SSP2-4.5 LT; d – SSP5-8.5 MT; and e – SSP5-8.5 LT. Source: prepared by the authors

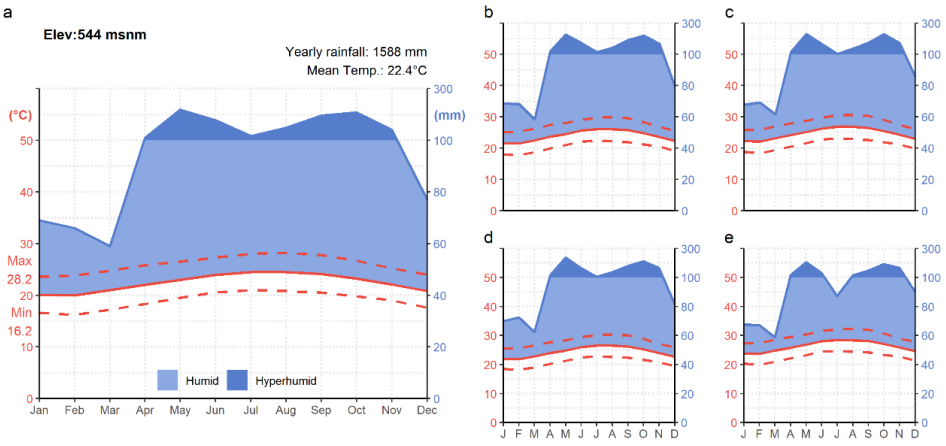


Fig. 4. Walter-Lieth climogram for the oc-07 topoclimate. a – reference period; b – SSP2-4.5 MT; c – SSP2-4.5 LT; d – SSP5-8.5 MT; and e – SSP5-8.5 LT. Source: prepared by the authors

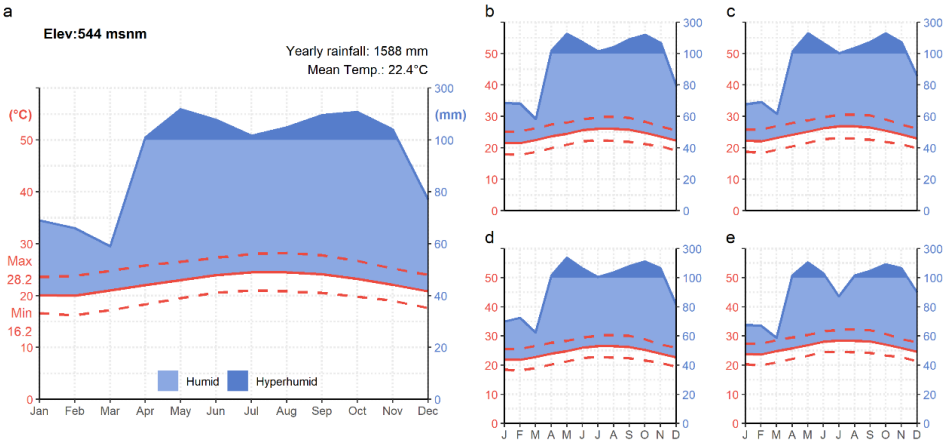


Fig. 5. Walter-Lieth climogram for the oc-03 topoclimate. a – reference period; b – SSP2-4.5 MT; c – SSP2-4.5 LT; d – SSP5-8.5 MT; and e – SSP5-8.5 LT. Source: prepared by the authors

The results of the climate projections are consistent with the steady increase in average temperature values for all future terms and trajectories (Fig. 6*a*). This result corroborates, at a

local scale, the conclusions of other studies and the IPCC for the Caribbean region [*IPCC, 2023; Taylor et al., 2018*].

In the case of average accumulated precipitation values, the results indicate a small increase in the medium term and a trend toward the recovery of current values in the long term in the SSP2-45 trajectory. Notably, this trend is much stronger in the SSP5-8.5 trajectory for all topoclimates (Fig. 6*b*), in which a significant decrease in total rainfall is expected. However, it should be noted that several authors have highlighted greater uncertainty in the rainfall prediction of GCMs [*Centella-Artola et al., 2020*]. Additionally, the greatest disturbances in precipitation resulting from climate change are expected to be concentrated in extreme hydrometeorological events, such as severe drought episodes alternating with intense rainfall events [*Taylor et al., 2018*]. These disturbances may not be reflected in the average monthly and interannual precipitation accumulations analyzed in this study.

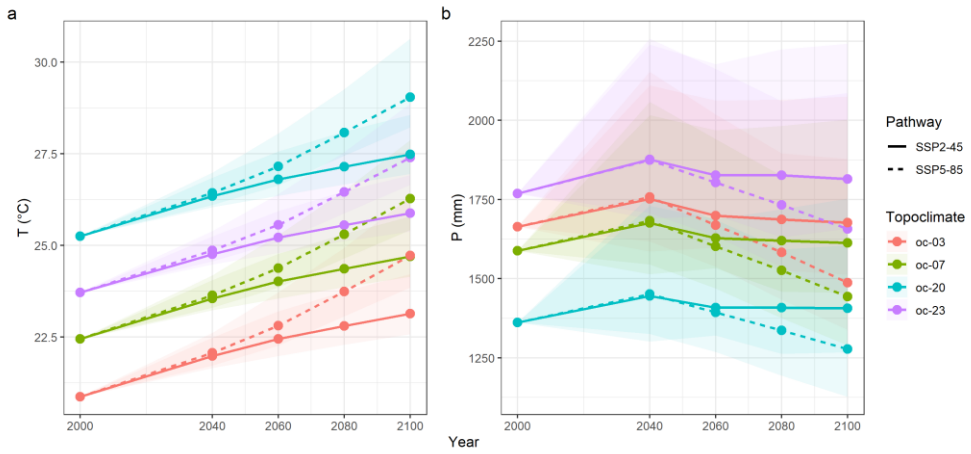


Fig. 6. Projection of the elements of the topoclimates associated with the landslides: a – temperature; b – precipitation. Prepared by the authors

The water balance analysis revealed that the oc-23 topoclimate evolved from experiencing two months of soil water deficit to experiencing 3 to 7 months of water deficit, with the last occurring under SSP5-8.5 LT. This increase in water deficit is associated with the summer period (Figs. 7*b–e*), except for SSP5-8.5. The evolution is similar for the oc-07 and oc-03 topoclimates after two months of soil water deficit in the reference period, albeit in different months (Figs. 9*a* and 10*a*). However, the oc-03 topoclimate presents a different distribution of water deficit for the reference period, and the oc-07 topoclimate may evolve toward more severe water deficit in SSP5-85 LT.

The water balance of the oc-20 topoclimate shows that there are 7 months with negative feedback in the hydrological cycle during the current climate period. This topoclimate evolves from these 7 months with water deficit in the reference period to a generalized water deficit with only short periods of water recharge in both trajectories for the ST period (Figs. 8*b*, *d*). The difference in the evolution of the water balance for this topoclimate despite having similar rainfall regimes to the others is associated with the difference in the current and projected temperature values (Fig. 6*a*), which is positively correlated with evapotranspiration [*Zaitchik et al., 2023*].

These water balance results highlight the relevance of the temperature increase in the evolution of the topoclimates and its impact on the soil water cycle, a variable of great interest for the study of debris flows.

All the topoclimates of eastern Cuba prone to debris flows triggered by intense rainfall events showed similar changes in their water balance, except for the oc-20 topoclimate. They are characterized by a deficit of water availability associated with the PPLL, and relatively low rainfall accumulates in the summer. In the specific case of oc-20, only in short periods during the months of May, October, and November are soil water recharged. This topoclimate presents

a significant decrease in water availability, which increases and becomes very marked in both periods and in the SSP under study (Fig. 8).

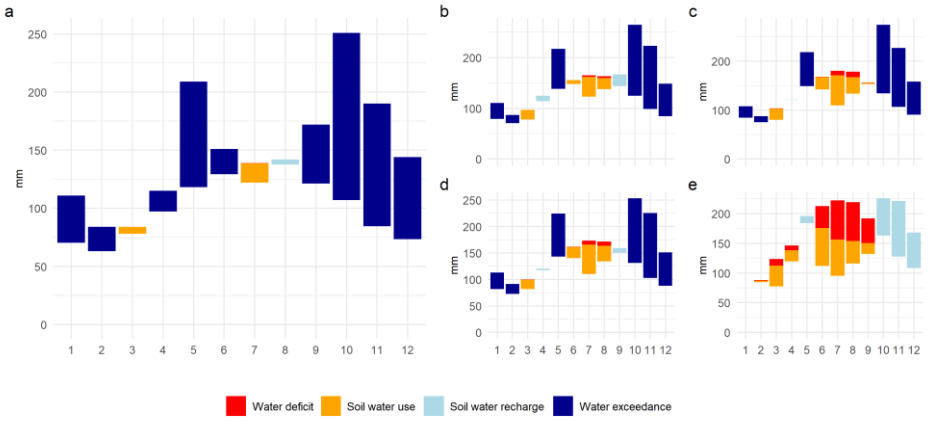


Fig. 7. Water balance of the oc-23 topoclimate. a – reference period; b – SSP2-4.5 MT; c – SSP2-4.5 LT; d – SSP5-8.5 MT; and e – SSP5-8.5 LT. Source: prepared by the authors from the BioClim results

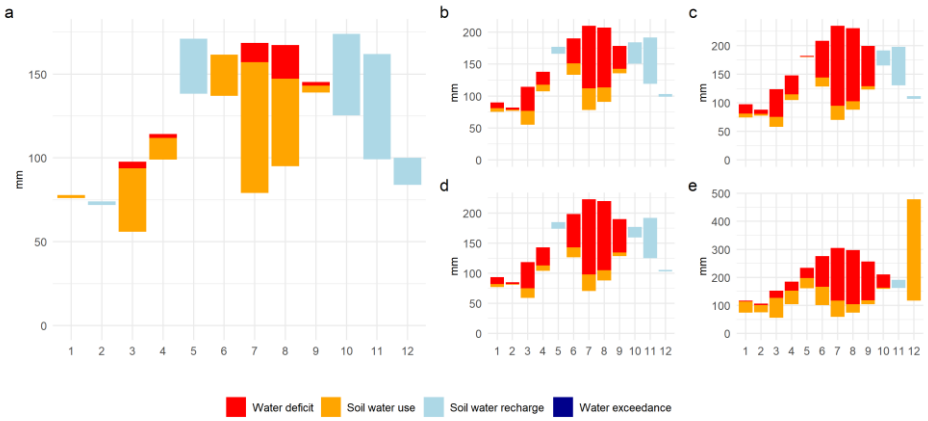


Fig. 8. Water balance of the oc-20 topoclimate. a – reference period; b – SSP2-4.5 MT; c – SSP2-4.5 LT; d – SSP5-8.5 MT; and e – SSP5-8.5 LT. Source: prepared by the authors from the BioClim results

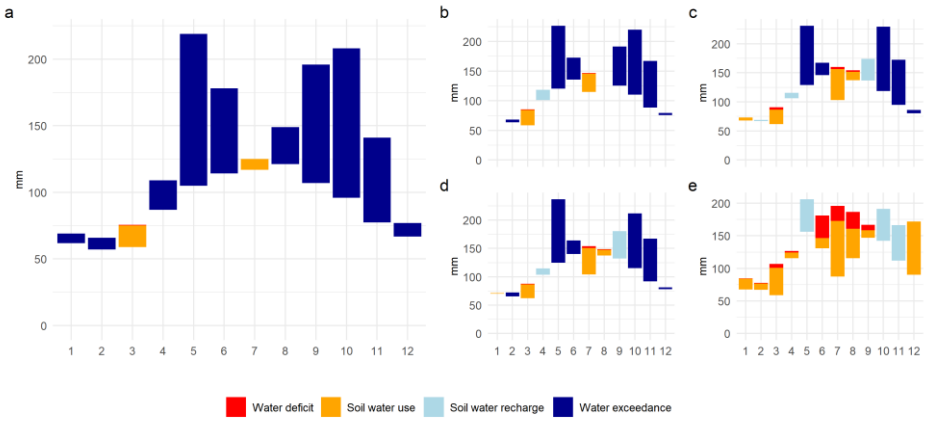


Fig. 9. Water balance of the oc-07 topoclimate. a – reference period; b – SSP2-4.5 MT; c – SSP2-4.5 LT; d – SSP5-8.5 MT; and e – SSP5-8.5 LT. Source: prepared by the authors from the BioClim results

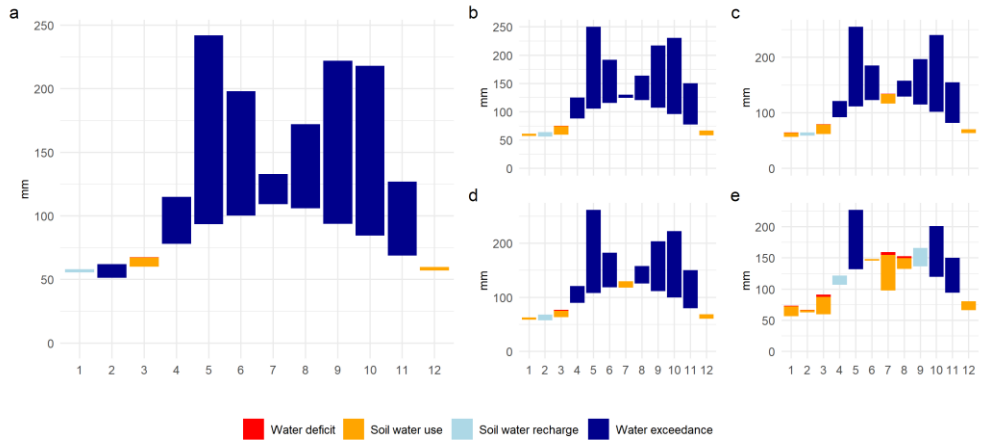


Fig. 10. Water balance of the oc-03 topoclimate. a – reference period; b – SSP2-4.5 MT; c – SSP2-4.5 LT; d – SSP5-8.5 MT; and e – SSP5-8.5 LT. Source: prepared by the authors from the BioClim results

These results show that the projected increase in interannual rainfall accumulation in the MT does not translate to greater water availability, which is expected to decrease across socioeconomic pathways. These conclusions confirm the findings of studies affirming that on tropical islands such as Cuba, an increase in temperature favors an increase in water vapor, creating positive feedback since water vapor is a greenhouse gas [*Buis, 2022; Chia & Lim, 2022*]. However, this increase in precipitation will especially reflect in severe events such as those associated with hurricanes. The second statement, referring to the decreasing volume of water in the soil in the topoclimates associated with debris flows, agrees with the findings of researchers such as Zaitchik et al. [*2023*], who associated the increase in global evapotranspiration with changes in moisture availability in terrestrial regions. The projected increase in water loss due to evapotranspiration will cause disturbances, sometimes counterintuitive, in the hydrological cycle. In both cases, these trends could influence the probability of debris flows occurring in preserved natural areas of tropical island regions.

Conclusions

The results of this study show that the rainfall distribution in areas at risk of debris flows in conserved regions of eastern Cuba will remain relatively stable throughout the year, with a decrease in the minimum accumulation during the summer period and in periods with little rainfall. Climate projections predict that increasing rainfall will accumulate in the medium term and that there will be a negative deviation in the long term, which is very pronounced in the SSP5-8.5 trajectory. However, a notable increase in the water deficit in the soil is expected, which is associated with increases in temperature and evapotranspiration. The projected increase in temperature favors atmospheric water vapor in a positive feedback loop, which will increase precipitation intensity, especially during severe rainfall events, consequently altering the conditions of occurrence of landslides.

The results of this research could inform further analysis of the probability of occurrence of landslides in preserved natural areas of tropical regions.

Acknowledgments

This work was supported by funding from the Office of Management of Funds and International Projects of Cuba under the code PN211LH009-036 “Impacts of medium-term climate change on the topoclimates associated with coffee and cocoa in Cuba”.

References

Atkinson, B.W. [2003]. The climate near the ground, sixth edition, R. Geiger, R. H. Aron and P. Todhunter, Rowman and Littlefield Publishers, Lanham, MD, USA, 2003. No. of pages xviii +584. ISBN 0-7425-1857-4. International Journal of Climatology, 23(14), 1797–1798. https://doi.org/10.1002/joc.967

Centella-Artola, A., Bezanilla-Morlot, A., Taylor, M.A., Herrera, D.A., Martinez-Castro, D., Gouirand, I., Alpizar, M. [2020]. Evaluation of Sixteen Gridded Precipitation Datasets over the Caribbean Region Using Gauge Observations. Atmosphere, 11(12), 1334. https://doi.org/10.3390/atmos11121334

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., and Taylor, K.E. [2016]. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development, 9(5), 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937–2016

Fan, X., Dufresne, A., Siva Subramanian, S., Strom, A., Hermanns, R., Tacconi Stefanelli, C., Xu, Q. [2020]. The formation and impact of landslide dams – State of the art. Earth-Science Reviews, 203, 103116. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103116

Fick, S.E., and Hijmans, R.J. [2017]. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 37(12), 4302–4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

Gallardo-Toirac, C., Martínez-Zorrilla, A.J., Valdés-Pérez, J.A., and Salabarría -Fernández, D. [2023]. The System of National Reserves in Cuba: Conserving biodiversity and ecosystem services. In Family Farms and the Conservation of Agrobiodiversity in Cuba (pp. 15–24). Retrieved from https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315183886-16/

Green, J.K., Konings, A.G., Alemohammad, S.H., Berry, J., Entekhabi, D., Kolassa, J., Lee, J.-E., and Gentine, P. [2017]. Regionally strong feedbacks between the atmosphere and terrestrial biosphere. Nature Geoscience, 10(6), 410–414. https://doi.org/10.1038/ngeo2957

Hausfather, Z., and Peters, G.P. [2020]. Emissions – the 'business as usual' story is misleading. Nature, 577(7792), 618–620. https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3

IPCC. [2023]. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 — IPCC. Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/

Jakob, M. [2022]. Chapter 14 – Landslides in a changing climate. In T. Davies, N. Rosser, and J. F. Shroder (Eds.), Landslide Hazards, Risks, and Disasters (Second Edition) (Second Edition, pp. 505–579). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818464-6.00003-2

Lin, Q., Steger, S., Pittore, M., Zhang, J., Wang, L., Jiang, T., and Wang, Y. [2022]. Evaluation of potential changes in landslide susceptibility and landslide occurrence frequency in China under climate change. Science of The Total Environment, 850, 158049. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158049

Peña-de la Cruz, A., Moya-Álvarez, A. S., and Delgado-Téllez, R. [2013]. Patrones Sinópticos que generan lluvias intensas que producen inundaciones en el municipio de Baracoa. Revista Cubana de Meteorología., 19(2).

Piotrowicz, K., and Ciaranek, D. [2020]. A selection of weather type classification systems and examples of their application. Theoretical and Applied Climatology, 140(1–2), 719–730. https://doi.org/10.1007/s00704-020-03118-2

Pospehov, G. B., Savón, Y., Delgado, R., Castellanos, E. A., and Peña, A. [2023]. Inventory Of Landslides Triggered By Hurricane Matthews In Guantánamo, Cuba. GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY, 16(1), 55–63. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-133

Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Tavoni, M. [2017]. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Global Environmental Change, 42, 153–168. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

Serrano-Notivoli, R., Longares, L. A., and Cámara, R. [2022]. Bioclim: An R package for bioclimatic classifications via adaptive water balance. Ecological Informatics, 71, 101810. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101810

Stacy R. Stewart. [2017]. HURRICANE MATTHEW (No. AL142016). National Hurricane Center.

Taylor, M. A., Clarke, L. A., Centella, A., Bezanilla, A., Stephenson, T. S., Jones, J.J., Campbell, J. D., Vichot, A., and Charlery, J. [2018]. Future Caribbean Climates in a World of Rising Temperatures: The 1.5 vs 2.0 Dilemma. Journal of Climate, 31(7), 2907–2926. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0074.1

Zaitchik, B.F., Rodell, M., Biasutti, M., and Seneviratne, S.I. [2023]. Wetting and drying trends under climate change. Nature Water, 1(6), 502–513. https://doi.org/10.1038/s44221-023-00073-w

Zhang, S., Yang, H., Wei, F., Jiang, Y., and Liu, D. [2014]. A model of debris flow forecast based on the water-soil coupling mechanism. Journal of Earth Science, 25(4), 757–763. https://doi.org/10.1007/s12583-014-0463-1

Селевые потоки как причины аварий на объектах инфраструктуры

Е.Г. Петрова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, epgeo@mail.ru

Аннотация. Селевые потоки относятся к числу наиболее опасных природных процессов и явлений. За последние десятилетия катастрофические селевые потоки нанесли большой экономический и социальный ущерб во многих горных регионах мира. Помимо прямого разрушительного воздействия на здания и объекты инфраструктуры, они также служат своеобразным «спусковым крючком» различных аварий в инфраструктуре, приводящих к нарушению нормальных условий жизни людей, штатной работы транспорта, энергетики, связи и других объектов системы жизнеобеспечения. Такие негативные последствия селевых событий приводят к возникновению чрезвычайных ситуаций (ЧС). Селевые потоки активны на 20% территории Российской Федерации. В основном они встречаются в горных районах, но могут также происходить и на возвышенных участках равнин. В отличие от предыдущих исследований селевых потоков, данная работа направлена на изучение воздействий селевых потоков на инфраструктуру, приводящих к авариям. В качестве исходных данных для анализа использовалась информация созданной автором базы данных. В базе данных регистрируются аварии на объектах техносферы, вызванные опасными природными процессами и явлениями, в том числе селями различного генезиса и типа. Задачи исследования: оценить долю селевых потоков среди других природных факторов возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций в инфраструктуре, выделить основные типы объектов инфраструктуры, наиболее уязвимых к их воздействию, предложить типологию природно-техногенных ЧС, обусловленных селевыми потоками, и выявить территории с наибольшим риском их возникновения. На этих территориях и объектах инфраструктуры должны быть сосредоточены основные усилия по предотвращению аварий и чрезвычайных ситуаций и ликвидации их последствий.

Ключевые слова: *селевые потоки, объекты инфраструктуры, природно-техногенные аварии и ЧС, база данных*

Ссылка для цитирования: Петрова Е.Г. Селевые потоки как причины аварий на объектах инфраструктуры. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 376–383.

Debris flows as triggers of accidents in the infrastructure

E.G. Petrova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, epgeo@mail.ru

Abstract. Debris flows are among the most dangerous natural processes and phenomena. Over the last decades, catastrophic debris flows produced large economic and social losses in many mountain regions of the world. In addition to direct destructive impacts on buildings and infrastructure facilities, they also serve as a kind of "trigger" of various accidents in the infrastructure, leading to disruption of normal living conditions of people and normal operation of transport, energy, communication, and other lifeline systems. Such negative consequences of debris flow events lead to emergency situations. Debris flows are active on 20% of the territory of the Russian Federation. Mostly, they occur in the mountain areas, but also within the uplands of plains. Unlike previous studies on debris flows, this work aims at analyzing impacts of debris flows on the infrastructure leading to

accidents. Information of the database created by the author was used as initial data for the analysis. The database registers accidents, which were caused by hazardous natural phenomena and natural hazards including debris flows of various genesis and types. The research objectives are to assess the share of debris flows among other natural factors of accidents and emergency situations in the infrastructure, highlight the main types of the facilities most vulnerable to their impacts, propose a typology of natural-technological events due to debris flows, and reveal areas with the highest risk of their occurrence. On these areas and infrastructures, the main efforts to prevent accidents and emergency situations or mitigate their consequences should be focused.

Key words: *debris flows, infrastructure facilities, natural-technological accidents and emergencies, data base*

Cite this article: Petrova E.G. Debris flows as triggers of accidents in the infrastructure. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 376–383.

Введение

Опасные природные процессы различных типов, особенно в случаях катастрофического их проявления, могут не только приводить к разрушительным последствиям и наносить значительный материальный, социальный и экологический ущерб, но и выступать в роли так называемых «триггеров» для создания аварийных ситуаций на объектах техносферы. К числу таких опасных природных процессов, способных провоцировать техносферные аварии и приводить к усилению природно-техногенного риска, относятся, в том числе, и селевые потоки.

Под термином «природно-техногенный риск» разными авторами понимается как техногенно (антропогенно) усиленный природный риск, так и техногенный риск, провоцируемый какими-либо природными событиями [*Мягков, 1995*]. Соответственно, аварии и чрезвычайные ситуации на объектах техносферы, которые провоцируются или усиливаются воздействием на них различных природных факторов, понимаются как «природно-техногенные». В данной статье рассматриваются природно-техногенные события, возникновение которых было вызвано воздействиями селевых потоков на различные объекты инфраструктуры.

В отличие от предыдущих исследований других авторов, в которых основное внимание уделялось физическим параметрам [*Jacob and Hungr, 2005; Takahashi, 2014; Zegers et al., 2020; Riedel and Sarrantonio 2021*], региональным особенностям проявления [*Hilker et al., 2009; Perov et al. 2017; Marchi et al., 2021*] и моделированию селевых потоков [*D'Agostino and Tecca, 2006; Naef et al., 2006; Rickenmann et al., 2006; Sosio et al., 2007; Cesca and D'Agostino, 2008; Calvo and Savi, 2009; Lin et al., 2011; Frank et al., 2015; Gregoretti et al., 2019; Pudasaini and Mergili, 2019*], данная работа направлена на изучение их воздействия на инфраструктуру. В качестве исходных данных для анализа использовалась авторская электронная база данных.

В предлагаемом исследовании решались следующие задачи:

- попытаться оценить вклад селевых потоков среди других природных факторов возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций на объектах инфраструктуры,
- выделить основные типы инфраструктурных объектов, наиболее уязвимых к их воздействию,
- предложить типологию природно-техногенных ЧС на объектах инфраструктуры, обусловленных селевыми потоками,
- выявить территории с наибольшим риском их возникновения.

Методы

Основным методом настоящего исследования является мониторинг аварий и чрезвычайных ситуаций, возникающих на объектах техносферы в России в результате воздействия на них опасных природных процессов и явлений различных типов, с последующим их географическим и статистическим анализом. Мониторинг таких природно-техногенных событий осуществляется в научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей географического факультета МГУ на регулярной основе, начиная с событий 1991 г. по настоящее время. Все происходящие природно-техногенные аварии и чрезвычайные ситуации отслеживаются и включаются в авторскую электронную базу данных [*Петрова, 2009; Petrova 2020*]. Главным источником исходной информации служат ежедневные оперативные сводки МЧС РФ, которые дополняются сообщениями средств массовой информации. Вся используемая и заносимая в базу данных информация является открытой. В базе данных она структурируется определенным образом, позволяющим производить дальнейшую компьютерную обработку массива данных. Помимо непрерывного ряда данных за указанный выше период, в базе зафиксированы также наиболее крупные по своим масштабам события и за более ранний период наблюдений, однако они носят отрывочный характер.

В целом электронная база данных является достаточно эффективным инструментом, предоставляющим очень широкие возможности для хранения, поиска, обработки и использования различной информации. Она позволяет собирать и накапливать сведения о прошлых событиях, совершившихся в течение продолжительного периода времени на той или иной территории. Используя такие многолетние ряды данных о неблагоприятных и опасных природных воздействиях на объекты техносферы, можно исследовать особенности проявления этих процессов во времени и пространстве, рассчитывать и анализировать среднемноголетнюю повторяемость изучаемых событий, оценивать тяжесть их последствий, отслеживать пространственно-временные изменения различных параметров. Информация о динамике предыдущих неблагоприятных и опасных событий, собранная в базе данных за достаточно большой промежуток времени, может быть интерполирована на перспективу и использована для прогнозирования будущего развития исследуемых процессов, а также для оценки природных и природно-техногенных рисков.

В используемой в этой статье авторской базе данных вся информация о природно-техногенных событиях фиксируется по следующим основным параметрам: 1) время возникновения события; 2) место возникновения события; 3) тип ЧС; 4) социальный ущерб (число пострадавших, жертвы); 5) материальный ущерб; 6) причины аварии и другие имеющиеся сведения; 7) источник информации.

Формат базы данных позволяет осуществлять различную автоматическую обработку накопленного массива данных в соответствии с целями и задачами проводимого исследования. Основными ее инструментами являются тематические запросы по ключевым словам или параметрам, а также сортировка данных.

Для целей данного исследования из базы данных была выбрана и проанализирована информация об аварийных и чрезвычайных ситуациях, произошедших за весь период наблюдений на различных объектах инфраструктуры в результате схода селевых потоков.

Результаты и их обсуждение

Доля селевых потоков среди других природных факторов техносферных аварий

В базе данных было зафиксировано 3267 событий природно-техногенного характера – аварий и ЧС, произошедших на территории России с 1991 по 2022 г. в результате воздействия на объекты техносферы опасных природных процессов и

явлений разного типа. Были проанализированы основные природные причины, которые привели к возникновению всех этих событий. Результаты анализа показаны на рис. 1.

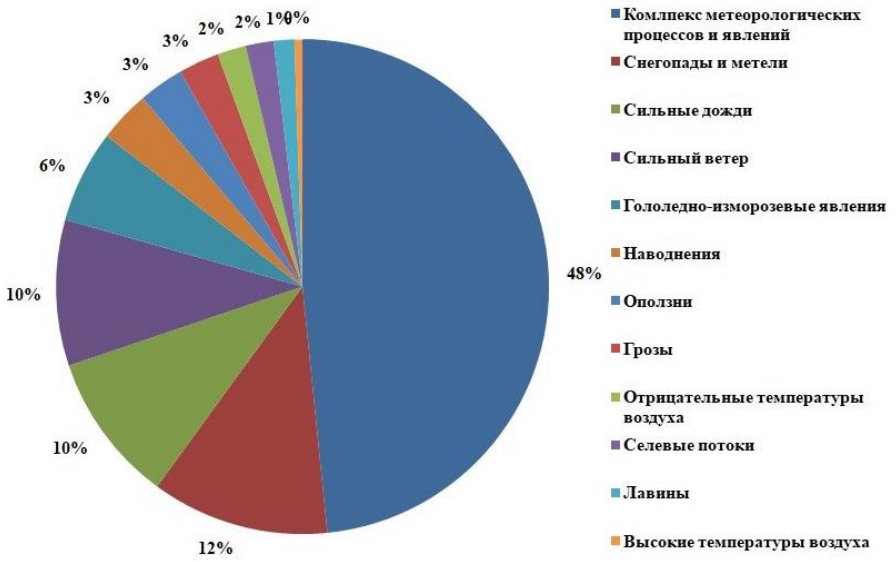


Рис. 1. Соотношение основных природных факторов аварий и ЧС природно-техногенного характера в России за 1991–2022 гг.

Как видно на диаграмме на рис. 1, почти половина всех событий (48%) была вызвана воздействием на техносферу целого комплекса опасных процессов и явлений метеорологического характера, к которым относятся неблагоприятные сочетания различных климатических параметров и процессов, таких как сильные ветры, жидкие и твердые атмосферные осадки и другие. Кроме того, значительную роль среди причин природно-техногенных аварий и ЧС играли также отдельные гидрометеорологические процессы и явления, такие как снегопады и метели – 12%; сильные дожди и сильный ветер – по 10%; гололедно-изморозевые явления – 6%; наводнения и грозы – по 3%. Доля селевых потоков среди всех остальных природных факторов техносферных аварий относительно невелика – 2%, однако их вклад в техносферную аварийность обязательно необходимо учитывать при проектировании различных объектов, поскольку в случае особенно крупных масштабов схода селевых потоков при их внезапности последствия могут носить катастрофический характер.

Типы инфраструктурных объектов, наиболее уязвимых к воздействию селевых потоков

За рассматриваемый период в базе данных было зарегистрировано 64 события природно-техногенного характера, основной причиной возникновения которых явился сход селевых потоков. Все эти 64 события были проанализированы с точки зрения затронутых в них типов инфраструктурных объектов. Как показал проведенный анализ, наиболее уязвимыми к селевым воздействиям оказываются линейные сооружения, такие как транспортные коммуникации (автомобильные и железные дороги), линии электропередачи и связи, водопроводы, газопроводы, а также другие объекты инфраструктуры. Их уязвимость по отношению к селевым потокам обусловлена, прежде всего, значительной протяженностью этих объектов. В районах высокой селевой активности такие линейные объекты неизбежно оказываются на пути следования селевых масс.

Были выделены основные типы объектов инфраструктуры, наиболее уязвимых к воздействию селевых потоков, на которых были зафиксированы аварии за период 1991–2022 гг. Результаты анализа отражены в таблице 1.

Таблица 1. Типы объектов инфраструктуры и регионы, где были зарегистрированы аварии на этих объектах под воздействием селевых потоков за 1991–2022 гг.

Типы объектов инфраструктуры	Регионы возникновения ЧС
Жилые дома и другие здания	Алтайский край, Магаданская и Сахалинская области, Республика Бурятия, Ингушетия, Кабардино-Балкария, Чукотский АО
Системы энергоснабжения	Краснодарский и Приморский края, Магаданская и Сахалинская области, Республика Дагестан, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Северная Осетия – Алания
Линии связи	Сахалинская область, Республика Кабардино-Балкария
Водопроводы, системы теплоснабжения и другие объекты ЖКХ	Краснодарский край, Магаданская и Сахалинская области, Республики Дагестан, Кабардино-Балкария и Ингушетия.
Автомобильные дороги, мосты и другие объекты автодорожной инфраструктуры	Алтайский, Краснодарский и Приморский края, Сахалинская область, Республики Дагестан, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Крым, Северная Осетия-Алания и Чеченская Республика.
Объекты железнодорожной инфраструктуры	Краснодарский, Приморский и Забайкальский края, Сахалинская область
Газопроводы	Краснодарский край, Республики Дагестан, Кабардино-Балкария и Северная Осетия – Алания.
Сельскохозяйственные объекты	Сахалинская область, Республики Дагестан, Кабардино-Балкария, Крым

На рис. 2 показано соотношение количества аварий, произошедших за рассматриваемый период на разных типах объектов инфраструктуры. Общее количество аварий превышает указанное выше число зарегистрированных событий – 64, поскольку природно-техногенные ЧС, как правило, носят комплексный, синергетический характер, когда одно и то же селевое событие может одновременно или последовательно вызвать несколько аварий на разных объектах.

Наибольшее число аварий или нарушений транспортного сообщения из-за воздействий селевых потоков было зафиксировано на объектах инфраструктуры автомобильного транспорта – 40 событий, за ними следуют системы энергоснабжения (ЛЭП) и объекты железнодорожной инфраструктуры – по 17 событий.

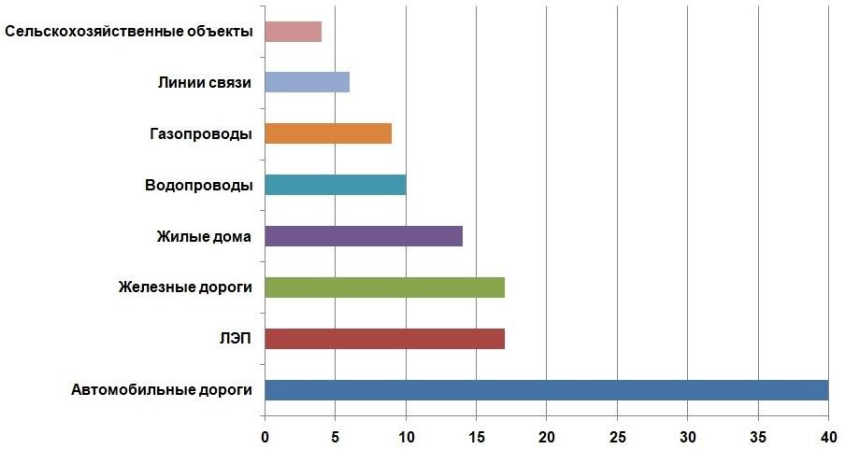


Рис. 2. Соотношение числа аварий, вызванных селевыми потоками на разных типах объектов инфраструктуры в России за 1991–2022 гг.

Типология природно-техногенных ЧС на объектах инфраструктуры, обусловленных селевыми потоками

В результате анализа всех зафиксированных в базе данных за рассматриваемый период природно-техногенных событий, обусловленных сходом селевых потоков, была предложена типология этих событий. Поскольку главным природным фактором возникновения всех анализируемых ЧС были селевые потоки, за основную типологическую характеристику был принят тип инфраструктурного объекта, на котором происходила данная ЧС.

Предложена следующая типологическая группировка ЧС на объектах инфраструктуры в результате селевых воздействий:

- обрушение различных зданий в результате ударного воздействия селевых потоков;
- нарушение электроснабжения вследствие повреждения селевыми потоками опор высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП), разрывов проводов ЛЭП, разрушения или отключения трансформаторных подстанций;
- нарушение коммуникации из-за повреждения селевыми потоками различных линий связи;
- нарушение водоснабжения, теплоснабжения и других систем жизнеобеспечения населения из-за повреждения селями водопроводов, канализации и других объектов ЖКХ;
- автомобильные аварии и нарушения автомобильного сообщения по причине попадания в селевые потоки автомобилей, повреждения или затопления обломочным материалом дорожного полотна, разрушения мостов и других объектов автотранспортной инфраструктуры;
- железнодорожные аварии и нарушения железнодорожного сообщения из-за повреждения или затопления селевыми потоками полотна железных дорог, разрушения мостов, линий электроснабжения, железнодорожной сигнализации и других объектов железнодорожной инфраструктуры;
- нарушение газоснабжения в результате повреждения селевыми потоками газопроводов;
- ЧС на объектах сельского хозяйства в связи с повреждением селевыми потоками сельхозугодий или разрушением различных сельскохозяйственных объектов.

Территории с наибольшим риском возникновения ЧС выделенных типов

За рассматриваемый период ЧС выделенных типов были зарегистрированы на территории 15 субъектов РФ. В их числе: Республика Дагестан, Бурятия, Ингушетия, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Крым, Северная Осетия–Алания и Чеченская Республика; Алтайский, Забайкальский, Краснодарский и Приморский края; Сахалинская и Магаданская области; Чукотский АО.

Наиболее велика среднемноголетняя повторяемость ЧС всех выделенных типов на территории следующих регионов РФ: Сахалинская область – более 0,4 ЧС в среднем за год (один раз в 2 года), Краснодарский край, Республика Дагестан и Северная Осетия – Алания – более 0,3 ЧС в среднем за год (один раз в 3 года) и Кабардино-Балкария – более 0,2 ЧС в среднем за год (один раз в 4–5 лет). На территории Сахалинской области были зарегистрированы события практически всех выделенных типов (за исключением аварий на газопроводах). В Краснодарском крае наиболее велика повторяемость транспортных ЧС (нарушений автомобильного и железнодорожного сообщения), а также повреждений селевыми потоками ЛЭП и трубопроводов. На территориях Республики Дагестан, Северной Осетии – Алании и Кабардино-Балкарии наиболее часто происходят нарушения автомобильного сообщения, разрушения систем энергоснабжения, газопроводов и сельскохозяйственных объектов.

Наиболее велик риск повторения этих событий в указанных регионах и в будущем, что связано как с высокой степенью селевой активности в них, так и с повышенной

уязвимостью по отношению к воздействиям селевых потоков расположенных на их территории объектов инфраструктуры.

Выводы

Селевые потоки относятся к числу наиболее опасных природных процессов и явлений, способных не только нанести значительный материальный, социальный и экологический ущерб, но и выступать в роли своеобразного «спускового крючка» для аварий на объектах инфраструктуры. Доля селевых потоков среди других природных факторов техносферных аварий, зафиксированных в авторской базе данных, составляет около 2%.

За рассматриваемый период в базе данных было зарегистрировано 64 события природно-техногенного характера, основной причиной возникновения которых были селевые потоки. Наиболее уязвимыми к селевым воздействиям оказываются линейные сооружения, такие как транспортные коммуникации (автомобильные и железные дороги), линии электропередачи и связи, водопроводы, газопроводы, а также некоторые другие объекты инфраструктуры.

Наибольшее число аварий и ЧС из-за воздействий селевых потоков было зафиксировано на объектах автотранспортной инфраструктуры – 40 событий, а также системы энергоснабжения (ЛЭП) и железнодорожной инфраструктуры – по 17 событий. Выделены основные типы ЧС, которые возникают на инфраструктурных объектах в результате селевых воздействий. К ним относятся обрушения зданий; нарушения электроснабжения и связи; нарушения автомобильного и железнодорожного сообщения; нарушения систем жизнеобеспечения населения и газоснабжения; ЧС на объектах сельского хозяйства.

Наиболее велика среднемноголетняя повторяемость и риск возникновения ЧС всех выделенных типов на территории Сахалинской области, Краснодарского края, Республики Дагестан, Северной Осетии–Алании и Кабардино-Балкарии.

Благодарности

Работа выполнена по ГЗ по теме 1.7 121051300175-4 «Опасность и риск природных процессов и явлений».

Список литературы

Calvo, B. and Savi, F.: A real-world application of Monte Carlo procedure for debris flow risk assessment, Comput. Geosci., 35, 967–977, https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.04.002, 2009.

Cesca, M. and D'Agostino, V.: Comparison between FLO-2D and RAMMS in debris-flow modelling: a case study in the Dolomites, in: Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows II, vol. I of WIT Transactions on Engineering Sciences, WIT Press, Southampton, UK, 197–206, https://doi.org/10.2495/DEB080201, 2008.

D'Agostino, V. and Tecca, P. R.: Some considerations on the application of the FLO-2D model for debris flow hazard assessment, in: Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows, vol. 1 of WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 90, WIT Press, Southampton, UK, 159–170, https://doi.org/10.2495/DEB060161, 2006.

Frank F, McArdell BW, Huggel C, Vieli A (2015) The importance of entrainment and bulking on debris flow runout modeling: examples from the Swiss Alps. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 15, 2569–2583, https://doi.org/10.5194/nhess-15-2569-2015.

Gregoretti C, Stancanelli L, Bernard M, Degetto M, Boreggio M, Lanzoni S (2019) Relevance of erosion processes when modeling in - channel gravel debris flows for efficient hazard assessment, Journal of Hydrology, 568, 575–591.

Hilker, N., Badoux, A., and Hegg, C.: The Swiss flood and landslide damage database 1972–2007, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 913–925, https://doi.org/10.5194/nhess-9-913-2009, 2009.

Jacob M and Hungr O (Eds) (2005) Debris-flow hazards and related phenomena. Springer, New York.

Lin, P.-S., Lee, J., and Chang, C.: An application of the FLO-2D model to debris-flows simulation – A case study of Song-Her district in Taiwan, Ital. J. Eng. Geol. Environ., 3, 947–956, https://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-03.B-103, 2011.

Marchi, L., Cazorzi, F., Arattano, M., Cucchiaro, S., Cavalli, M., and Crema, S.: Debris flows recorded in the Moscardo catchment (Italian Alps) between 1990 and 2019, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 21, 87–97, https://doi.org/10.5194/nhess-21-87-2021, 2021.

Naef, D., Rickenmann, D., Rutschmann, P., and McArdell, B. W.: Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 6, 155–165, https://doi.org/10.5194/nhess-6-155-2006, 2006.

Perov V., Chernomorets S., Savernyuk E. et al. Debris flow hazards in Russia: regional features and key events //Natural Hazards. 2017. V. 88. № 1. Suppl 1. P. S199–S235. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2841-3

Petrova E (2020) Natural hazard impacts on transport infrastructure in Russia, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 20, 1969–1983, https://doi.org/10.5194/nhess-20-1969-2020.

Pudasaini SP, Mergili M (2019) A multi-phase mass flow model. J. Geophys. Res. Earth Surf. 124, 1–23, https://doi.org/10.1029/2019jf005204

Riedel JL, Sarrantonio SM (2021) Debris flow magnitude, frequency, and precipitation threshold in the eastern North Cascades, Washington, USA. Nat Hazards 106, 2519–2544. https://doi.org/10.1007/s11069-021-04553-8

Rickenmann, D., Laigle, D., McArdell, B. W., and Hübl, J.: Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events, Comput. Geosci., 10, 241–264, https://doi.org/10.1007/s10596-005-9021-3, 2006.

Sosio, R., Crosta, G. B., and Frattini, P.: Field observations, rheological testing and numerical modelling of a debris-flow event, Earth Surf. Proc. Land., 32, 290–306, https://doi.org/10.1002/esp.1391, 2007.

Takahashi, T. Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2014.

Zegers, G., Mendoza, P. A., Garces, A., and Montserrat, S.: Sensitivity and identifiability of rheological parameters in debris flow modeling, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 20, 1919–1930, https://doi.org/10.5194/nhess-20-1919-2020, 2020.

Мягков С.М. География природного риска. М.: МГУ, 1995. 224 с.

Петрова Е.Г. Природно-техногенные ЧС в России: опыт составления и анализа базы данных. // Снежные лавины, сели и оценка риска. / Под ред. А.Л. Шныпаркова. Вып. 2. М: Университетская книга, 2009. С.152–162.

Особенности строения древних селевых конусов в верхней части долины р. Мзымта

А.А. Пономарев, А.А. Пономарев, О.В. Зеркаль

ООО «Инжзащита», Сочи, Россия, set092222@gmail.com

Аннотация. Долина реки Мзымта, впадающей в Черное море, находится в юго-западной части Западного Кавказа. В административном отношении данный регион находится в городе-курорте Сочи на юге России. Кавказская горная система расположена на юге Восточно-Европейской платформы и сформировалась в результате взаимодействия Евразийской и Аравийской литосферных плит.
В орографическом плане долина реки Мзымта, на рассматриваемом участке, представляет собой типичную долину горной реки, заложение которой подчинено общим закономерностям тектонического строения региона. В верхней части долина занимает днище межгорного понижения, заложенного в «общекавказском» северо-западном направлении, в средней части изменяет свое направление на юго-западное, а в районе хребта Ах-цу (нижняя часть) течет строго в северном направлении. Долину в ее среднем течении характеризуют крутые склоны, значительный размах рельефа, порожистый характер течения реки. В продольном профиле долины четко выражены участки переломов профиля, связанные с древними и современными оползневыми телами и селевыми конуса.

Ключевые слова: *древний сель, р. Мзымта, Западный Кавказ*

Ссылка для цитирования: Пономарев А.А., Пономарев А.А., Зеркаль О.В. Особенности строения древних селевых конусов в верхней части долины р. Мзымта. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 384–393.

Structural features of ancient debris flow cones in the upper part of the Mzymta River valley

A.A. Ponomarev, A.A. Ponomarev, O.V. Zerkal

“Engprotection” Ltd., Sochi, Russia, set092222@gmail.com

Abstract. The valley of the Mzymta River, which flows into the Black Sea, is located in the southwestern part of the Western Caucasus. This region is located in southern Russia. The Caucasian Mountain system is located in the south of the East European Platform and was formed as a result of the interaction of the Eurasian and Arabian lithospheric Plates.
In orographic terms, the valley of the Mzymta River, in the area under consideration, is a typical valley of a mountain river, the foundation of which is subordinated to the general patterns of the tectonic structure of the region. In the upper part, the valley occupies the bottom of the intermountain depression, laid down in the "all-Caucasian" north-westerly direction, in the middle part it changes its direction to the south-west, and in the area of the Ahtsu ridge (lower part) it flows strictly in a northerly direction. The valley in its middle course is characterized by steep slopes, a significant range of relief, and the rapid nature of the river flow. The longitudinal profile of the valley clearly shows areas of profile fractures associated with ancient and modern landslide bodies and debris flow cones.

Key words: *ancient debris flow, Mzymta river, Western Caucasus*

Cite this article: Ponomarev A.A., Ponomarev A.A., Zerkal O.V. Structural features of ancient debris flow cones in the upper part of the Mzymta River valley. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 384–393.

Введение

Цель данного исследования состояла в изучении геоморфологических, морфометрических и инженерно-геологических особенностей строения селевых конусов верхней части долины р. Мзымта на примере характерного участка.

Долина реки Мзымта, впадающей в Черное море, находится в юго-западной части Западного Кавказа. В административном отношении данный регион находится в городе-курорте Сочи на юге России (рис. 1).

Территория верхней части долины р. Мзымта отличается значительными темпами хозяйственного освоения. До середины двухтысячных годов регион выделялся низкой степенью антропогенного изменения естественных условий. Однако в рамках реализации строительства объектов горного кластера, предназначенных для проведения олимпийских игр 2014-го года, регион подвергся значительному техногенному вмешательству.

Краткий обзор проблемы

В пределах верхней части долины р. Мзымта на данный момент располагаются крупные горнолыжные курорты с развитой инфраструктурой. Инфраструктура курортов включает в себя горнолыжные трассы, автомобильные и канатные дороги, а также обширную сеть сооружений инженерной защиты.

В пределах верхней части долины р. Мзымта широко развиты склоновые процессы. Помимо многочисленных регулярных современных оползней, селей, камнепадов значительное влияние на современное состояние инженерно-геологических условий территории оказывают проявления древних склоновых процессов. В пределах верхней части долины существует множество древних оползневых и селевых тел. Тогда как крупные тела древних каменных лавин и оползней преимущественно развиты в верхних и средних частях бортов долины (1500–1700 м над уровнем моря), на более низких высотах залегают крупные конусы выносов древних селевых потоков. Объем конусов зачастую превышает десятки и сотни миллионов кубических метров. Конусы обладают сложным строением характерным для всего региона северо-западной части западного Кавказа. Благодаря благоприятным геоморфологическим условиям на конусах древних селей расположены наиболее крупные населенные пункты региона. Также в пределах конусов расположена основная часть наиболее важных объектов горнолыжной инфраструктуры. В рамках данной работы будут рассмотрены геоморфологические, морфометрические и инженерно-геологические особенности строения древних селевых конусов в верхней части долины р. Мзымта на примере одного из самых крупных и хорошо изученных участков (рис. 1).

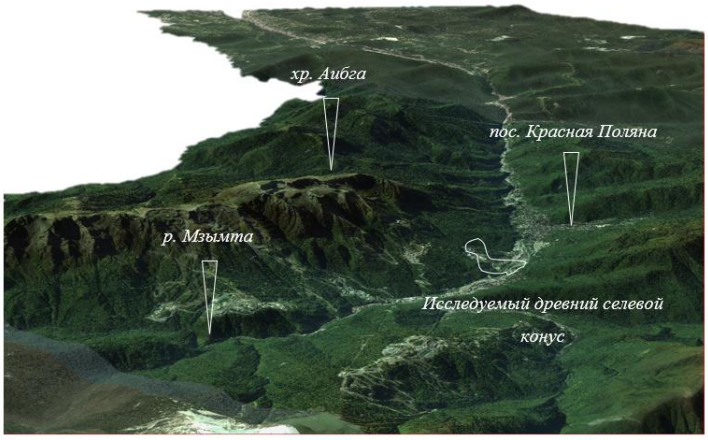


Рис. 1. Обзорная схема Верхней части долины р. Мзымта

Геоморфологические особенности исследуемого древнего селевого конуса

Региональная геоморфология

Район верхней части долины р. Мзымта является узлом сопряжения нескольких крупных общекавказских структурных зон. Здесь наблюдается резкая перестройка зоны значительного межгорного понижения, занятого долиной реки Мзымта и ориентированного в общекавказском направлении.

Основными элементами рельефа, к которым тяготеет исследуемая территория, представлены хребтом Аибга и сопряженной с ней долиной реки Мзымта. Хребет Аибга в районе Красной Поляны представляет собой линейную положительную структуру с максимальной высотой в 2470 м (III пик Аибги) и средними высотами хребта в 2200–2300 м. По облику хребет типично высокогорный с выраженными формами древнего оледенения, наличием выраженных эрозионных форм (кулуаров). В вертикальном разрезе склонов обращает на себя внимание наличие ступеней рельефа [*Аджгирей и др., 1976*].

В орографическом плане долина реки Мзымта, на рассматриваемом участке, представляет собой типичную долину горной реки, заложение которой подчинено общим закономерностям тектонического строения региона. В верхней части долина занимает днище межгорного понижения, заложенного в «общекавказском» северо-западном направлении, в средней части изменяет свое направление на юго-западное, а в районе хребта Ах-цу (нижняя часть) течет строго в северном направлении. Долину в ее среднем течении характеризуют крутые склоны, значительный размах рельефа, порожистый характер течения реки. В продольном профиле долины четко выражены участки переломов профиля, связанные с древними и современными оползневыми телами и селевыми конусами.

Современные геоморфологические и морфометрические характеристики исследуемого конуса выноса

Необходимо отметить, что в процессе строительства горнолыжной инфраструктуры при подготовке зимних олимпийских игр 2014 г. в г. Сочи геоморфологическое строение исследуемого участка претерпело значительные изменения. По этой причине описание геоморфологических и морфометрических характеристик исследуемого селевого конуса будет дано в естественном состоянии (рис. 2).

В геоморфологическом отношении участок исследований приурочен к эрозионно–денудационному склону подножия левобережного склона долины р. Мзымта расположенному между платообразным расширением гребня отрога второго порядка хр. Аибга (урочище «Медвежьи поляны»). Эрозионно-гравитационные склоны с активным и умеренным коллювиальным сносом прослеживаются в полосе 700–800 м вдоль подножия левого склона долины р. Мзымты. Они крутые (более 30°), имеют высоту до 300–350 м. Эрозионные склоны характерны также для бортов овражной сети, прорезающей северный склон хребта Аибга. Для них характерна значительная крутизна (более 30°), изрезанность мелкими бороздами. Склоны вогнутые или прямолинейные, обычно задернованные или же покрыты мелким кустарником. В пригребневой части местами наблюдаются выходы на поверхность коренных пород.

Оползневые тела приурочены к мощным делювиальным шлейфам. Микрорельеф оползневых тел ступенчатый, часто с вторичными оползневыми срывами и с активной мелкой овражно-балочной сетью с глубиной вреза 1–3 м. Крупные оползневые тела, вероятно, связаны с региональными геологическими разломами.

Генезис конусов выноса в устьях балок, прорезающих левый склон долины реки Мзымты считают пролювиально-селевым. Конуса выноса наложены на первую надпойменную террасу.

Абсолютные отметки поверхности конуса в естественном состоянии составляют от 500 м у подножия склона на границе с современным руслом р. Мзымта до 800 м в зоне питания. Экспозиция макросклона – северная. Длинна конуса от зоны отрыва до границы зоны аккумуляции (не затронутой эрозионными процессами р. Мзымта) составляет 1,3 км. Ширина конуса варьируется от 100 м в (наиболее узкой части – зона транзита) до 1000 м (в наиболее широкой части, зона аккумуляции, не затронутая эрозионными процессами р. Мзымта) (рис. 3).

Древний конус выноса сформировался по руслу безымянного ручья (условно назван ручей 1) и полностью изменил палеорельеф территории. Вновь сформировавшиеся русла ручьев 2 и 3 четко отсекают селевые образования от соседних склоновых массивов отрога второго порядка хр. Аибга (рис. 2).

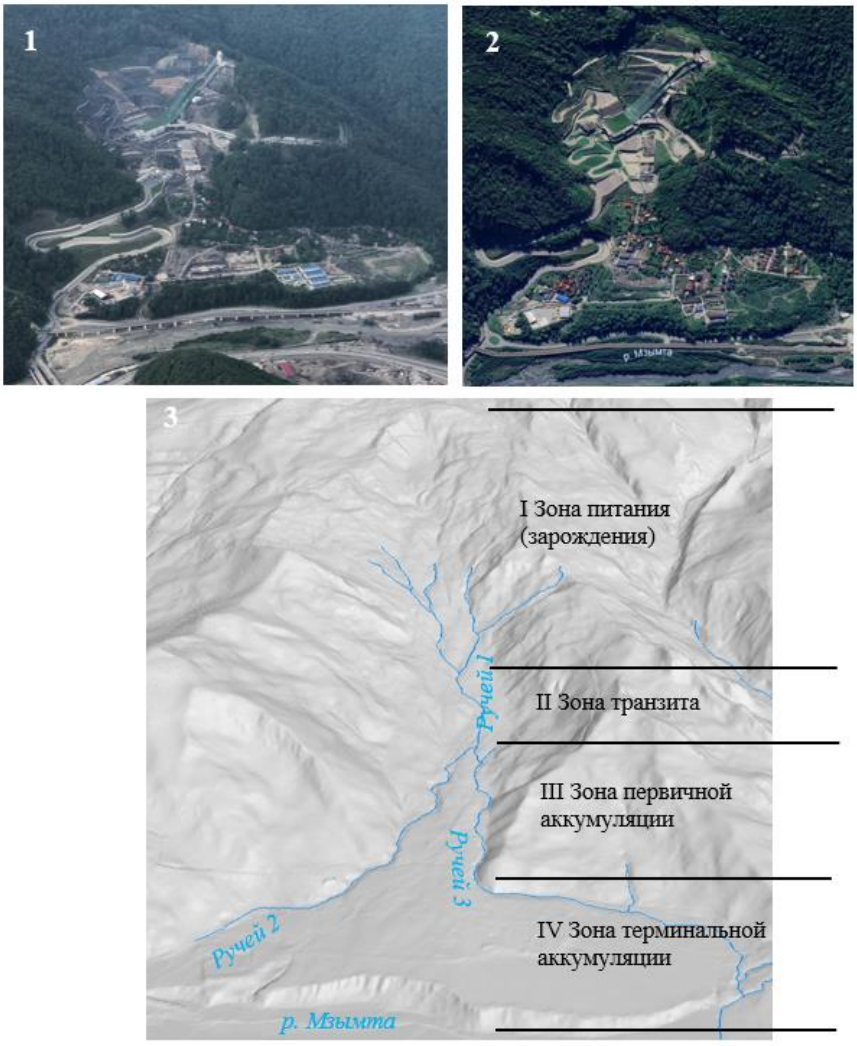


Рис. 2. Рельеф исследуемого конуса выноса на разных этапах антропогенного изменения: 1 – на момент 2012 г., 2 – на момент 2024 г., 3 – TIN модель конуса в естественном состоянии на момент 2009 г.

Морфометрические параметры исследуемого селевого конуса позволяют определить достаточно четкое зональное районирование по типу движения масс селя (рис. 3). На высотном профиле и профиле крутизны поверхности по конусу выноса можно выделить зону питания (зарождения), зону транзита, зону первичной аккумуляции, и зону терминальной аккумуляции.

Зона питания (зарождения) начинается с высоты 680 м и выше по профилю конуса и обладает протяженностью порядка 1000 м. Зона характеризуется значительными уклонами поверхности, в среднем 20–30 градусов. Формирование данной зоны и всего древнего селя в целом обусловлено накоплением значительного количества дисперсного материала в следствии схода крупномасштабной каменной лавины выше по склону, чей объем составлял порядка 20 млн м^3. Таким образом рассматриваемый древний сель является вторичным процессом по отношению к древней каменной лавине.

Зона транзита протяженностью порядка 250 м располагается в промежутке между абсолютными отметками поверхности 620 и 680 м н.у.м. Для зоны транзита характерны уклоны поверхности порядка 10–20 градусов.

Зона первичной аккумуляции располагается на высотных отметках 550–620 м н.у.м. по профилю конуса выноса и обладает протяженностью порядка 400 м. Для данной зоны характерны величины углов крутизны поверхности от 10 до 15 градусов. Данная зона была сформирована путем образования толщи пролювиальных отложений в пределах локального выполаживания в палеорельефе. По-видимому, русло р. Мзымта на данном участке имело изгиб в южном направлении и локальное выполаживание было приурочено ко второй цокольной надпойменной террасе.

Зона терминальной аккумуляции начинается с высоты 500 м н.у.м. и простирается до высот с абсолютными отметками 550 м по высотному профилю исследуемого конуса выноса. Для данной зоны характерны уклоны крутизны поверхности не более 10 градусов, поверхности в пределах данной зоны являются наиболее пологими участками в пределах всего исследуемого конуса выноса. Протяженность данной зоны составляет порядка 300 м. Во время своего формирования отложения данной зоны перекрывали русло р. Мзымта вплоть до противоположного берега и ее протяженность была значительно больше. В настоящее время зона терминальной аккумуляции исследуемого конуса выноса наложена на первую надпойменную террасу долины р. Мзымта. Зона активно подвержена боковой эрозии, о чем свидетельствуют крутые уклоны (до 50 градусов) по направлению к руслу р. Мзымта.

Морфометрические и геоморфологические особенности исследуемого конуса выноса позволяют четко выделить зоны его развития, а также определить наиболее вероятных механизм развития. В дальнейшем для каждой зоны будет описан ее литологический состав и подверженность вторичным геологическим и инженерно-геологическим процессам.

Рис. 3. Профиль по степени крутизны поверхности конуса выноса (в градусах) и высотный профиль конуса выноса с зональным разделением по типу движения селевых масс

Современные геологические и инженерно-геологические характеристики исследуемого древнего конуса выноса

В процессе подготовки зимних олимпийских игр 2014 г. в г. Сочи в пределах исследуемого конуса выноса был воздвигнут обширный комплекс объектов горнолыжной инфраструктуры. Сооружения и здания включают в себя автодороги, канатную дорогу, многочисленные сооружения инженерной защиты. Наиболее крупным сооружением в пределах исследуемого конуса выноса является уникальный комплекс трамплинов к-125 и к-95. В процессе строительства данных зданий и сооружений был выполнен обширный комплекс инженерных изысканий на разных участках исследуемой территории. Материалы инженерных изысканий легли в основу исследования геологических и инженерно-геологических характеристик исследуемого древнего конуса выноса.

Учитывая обширное антропогенное воздействие на геологические и инженерно-геологические условия исследуемой территории в качестве источника данных, были отобраны результаты предшествующих началу основных строительных работ изысканий. Расположение используемых для анализа геологических и инженерно-геологических условий выработок отображено на рис. 4. В рамках данного исследования геологические и инженерно-геологические условия будут описаны для каждой из выделенных характерных зон.

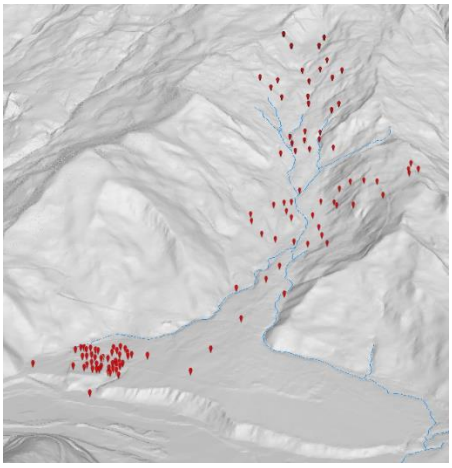


Рис. 4. Расположение используемых для анализа геологических и инженерно-геологических условий выработок

Прежде чем перейти к описанию геологических и инженерно-геологических особенностей каждой из зон исследуемого конуса выноса необходимо дать краткую характеристику грунтов коренной основы, подстилающих собой более поздние пролювиальные отложения.

Селевые отложения исследуемого конуса выноса подстилаются юрскими аргиллитами Эстосадокской (J1es) и Чвежипсинской свит (J1cv) (рис. 5). Грунты данных свит чрезвычайно схожи между собой и их четкое разделение затруднительно. Рассматриваемая толща имеет признак типичный для дистальной флишевой фации, а именно: преобладание пылеватой и глинистой фракции, что говорит о весьма большой глубине образования [*Фролов, 1988*].

Важнейшей особенностью исследуемых грунтов с инженерно-геологической точки зрения является их крайне низкая устойчивость к выветриванию. В результате выветривания в флишевой толще образуются прослои очень слабых пород – сильно выветрелых и разуплотненных тонкочешуйчатых, «глинизированных» аргиллитов (и даже глин), прочность которых в водонасыщенном состоянии еще более снижается [*Шадунц, 1975*].

Данные особенности грунтов коренной основы обуславливают их широкую вовлеченность в склоновые процессы путем формирования дополнительных потенциально неустойчивых склоновых массивов. По этой причине в литологическом строении исследуемого конуса выноса помимо характерных для пролювиальных отложений крупнообломочных грунтов, выделяется также большое количество дезинтегрированных элювиальных отложений коренных юрских аргиллитов.

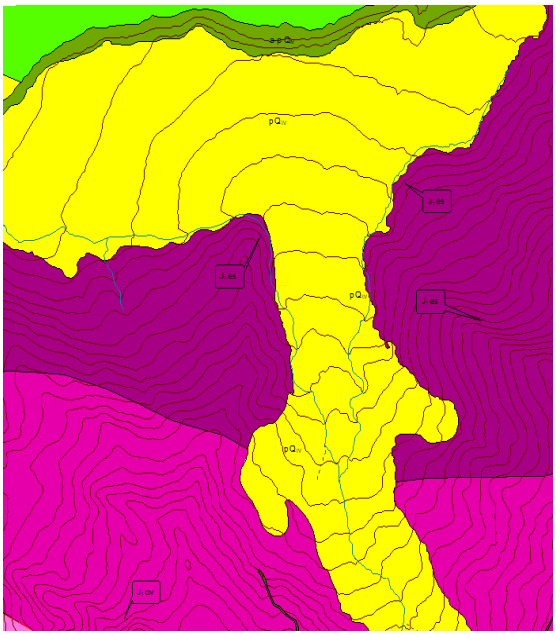


Рис. 5. Фрагмент оцифрованной государственной геологической карты российской федерации масштаба 1:200000 [*Государственная геологическая карта Российской Федерации, 2000*]

Зона питания (зарождения) характеризуется практически полным отсутствием в разрезе пролювиальных отложений. Как было представлено выше, данная зона располагается в пределах тела древней крупномасштабной каменой лавины. В процессе своего формирования древний селевой поток затронул лишь часть отложений оползневого тела.

Для зоны питания (зарождения) характерно залегание с поверхности значительных мощностей (более 20 м) делювиально-оползневых отложений. Данные грунты по разновидности относятся к щебенистым с суглинистым полутвердым заполнителем. Под оползневыми грунтами залегает дезинтегрированная элювиальная толща выветрелых юрских аргиллитов. По причине наличия в пределах участка изысканий значительного количества субвулканических тел (даек) литологически разделить юрские аргиллиты коренного залегания от вовлеченных в древний оползневой процесс крупнообломочных отложений весьма сложно. Для древних оползневых отложений характерны следующие показатели физико-механических характеристик: С=12,90 кПа; φ=25,77о; Е=35,06 Мпа.

Расчеты устойчивости по склонам в пределах верхней части зоны питания (зарождения) указывают на невысокий запас коэффициента устойчивости в естественном состоянии (в пределах единицы). Вторичные оползневые процессы в пределах данной зоны носят весьма широкое распространение.

Зона транзита характеризуется сложным и неоднородным литологическим составом. Суммарная мощность селевых отложений в пределах данной зоны значительно разнится от 0,5–1,5 до 7–10 м. Значительные мощности селевых отложений приурочены к локальным понижениям в палеорельефе. Для таких участков также характерно перекрытие селевых отложений образованиями более поздних оползней. Литологически пролювиальные отложения отделяются от оползневой более высокой дисперсности крупнообломочного материала. На некоторых участках транзитной зоны

оползневые отложения перекрыты более молодыми пролювиальными образованиями, что свидетельствует о регулярном развитии вторичных селевых процессов на исследуемой территории (рис. 6).

В целом в пределах зоны транзита как вторичные, так и первичные пролювиальные отложения представлены дресвяными грунтами с суглинистым полутвердым заполнителем. Что характерно в пределах зоны в селевых отложениях отсутствуют включения глыб. Данная особенность обусловлена высокой крутизной палеорельефа на данном участке. Пролювиальные отложения в пределах исследуемого конуса повсеместно обводнены и являются коллекторами. Современные склоновые процессы в пределах зоны транзита (до начала активного антропогенного воздействия) развиты слабо. Основные участки развития оползней приурочены к склонам отрогов хр. Аибга.

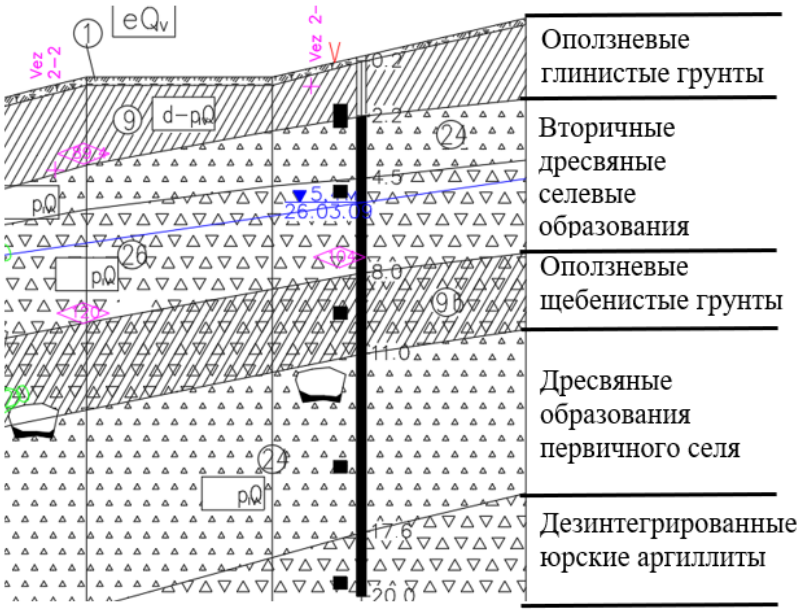


Рис. 6. Фрагмент инженерно-геологического разреза по профилю селевого конуса в пределах зоны транзита

Зона первичной аккумуляции характеризуется дальнейшим увеличением мощности селевых отложений. Средняя мощность составляет 20 м. В пределах нижней границы мощность пролювиальных отложений установить не удалось. Оползневые отложения в данной зоне либо отсутствуют, либо имеют спорадическое распространение. Толща пролювиальных грунтов представлена щебенистыми грунтами с суглинистым полутвердым заполнителем в нижней части разреза и щебенистыми суглинками в верхней. Литологический переход от щебенистых грунтов к суглинкам сохраняет тенденцию с уменьшением высот абсолютных отметок. Увеличение количества глинистого материала связано с делювиальными процессами по склону (рис. 7). Толща селевых отложений сильно обводнена. В пределах зоны первичной аккумуляции отсутствуют проявления современных склоновых процессов по причине низких значений углов наклона поверхности.

Зона терминальной аккумуляции по мощностям селевых отложений не сильно превосходит зону первичной аккумуляции. Мощность в пределах этой зоны составляет от 20 до 25 м, тем не менее на участках локальных понижений палеорельефа мощность может достигать 30 м. Селевые отложения в пределах зоны терминальной аккумуляции представлены щебенистыми грунтами с суглинистым полутвердым заполнителем в верхней части разреза и дресвяными грунтами с суглинистым полутвердым заполнителем в нижней. Глинистые селевые отложения в пределах зоны терминальной аккумуляции отсутствуют из-за низких темпов делювиальных процессов.

Подстилающими грунтами для селевых отложений в пределах зоны терминальной аккумуляции служат аллювиальные глыбовые отложения р. Мзымты (рис. 8). Согласно значениям абсолютных отметок по превышению русла данные отложения слагали первую надпойменную террасу р. Мзымта. Перекрытие селевых отложений первой террасы позволяет охарактеризовать возраст исследуемого конуса выноса как постголоценовый. В пределах зоны терминальной аккумуляции потенциально могут развиваться эрозионные процессы в связи с близостью русла р. Мзымты, однако широкая сеть берегоукрепительных сооружений сводит активность эрозионных процессов практически к нулю.

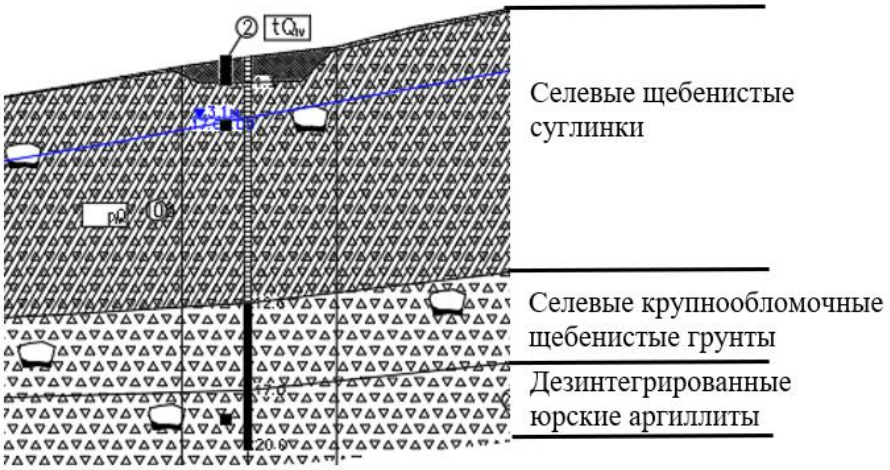


Рис. 7. Фрагмент инженерно-геологического разреза по профилю селевого конуса в пределах зоны первичной аккумуляции

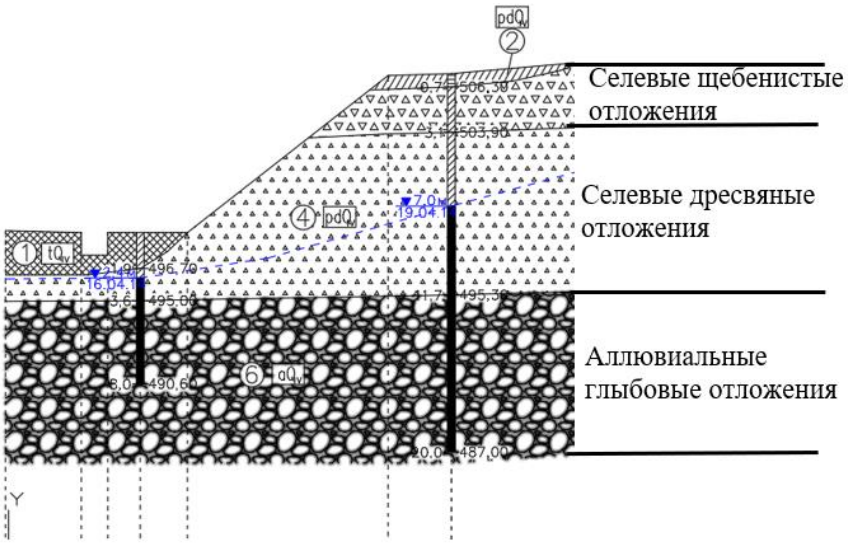


Рис. 8. Фрагмент инженерно-геологического разреза по профилю селевого конуса в пределах зоны терминальной аккумуляции

Заключение

На основе материалов инженерных изысканий, полевых маршрутов и пространственного моделирования в рамках данного исследования были описаны основные геоморфологические, морфометрические и инженерно-геологические

особенности селевых конусов в верхней части долины р. Мзымты на примере характерного участка.

В процессе схода древнего селя рельеф территории кардинально изменился, что показывает важность селеобразования как фактора влияния на геоморфологические условия региона. Выявлена четкая зональность исследуемого конуса по типу движения масс селя. Для каждой из зон характерны собственные геоморфологические и морфометрические характеристики оказывающие влияние на степень развития вторичных геологических и инженерно-геологических процессов.

Помимо геоморфологических и морфометрических параметров в рамках исследования были установлены особенности литологического строения и вертикальная зональность исследуемого конуса выноса.

Полученные в процессе исследования данные могут быть использованы для своевременного выявления инженерно-геологических особенностей территорий, где развиты древние селевые конуса выноса. Учитывая, что такие территории зачастую и используются для строительства зданий и сооружений в горных регионах, материалы данной работы отличаются высокой практической актуальностью.

Список литературы

Аджгирей Г.Д., Баранов Г.И., Корпачев С.М., Панов Д.И., Седренко С.М. Геология Большого Кавказа. Издательство "Недра", 1976. С.172–177.

Государственная геологическая карта российской федерации масштаба 1:200000. Серия кавказская. Лист к-37-v. Изд. второе. 2000

Фролов В.Т. Флишевая формация — уточнение понимания. Отделение геологии 1988.

Шадунц К.Ш. Осенняя Е.Д. Зос Э.Б. Генетические основы инженерно-геологического изучения горных пород. Издательство Московского Университета 1975. С.380–392.

Опыт Агентства Ага Хана по Хабитат (АКАН) в области оценки ледниковых озер и моделирования их прорывов в Таджикистане

Ю.Х. Раимбеков, Х.А. Имроншоев

Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе, Таджикистан, yusuf.raimbekov@akdn.org

Аннотация. В статье дан обзор материалов, характеризующих исследования высокогорных озер, проводимые Агентством Ага Хан по Хабитат совместно с коллегами из МГУ имени М.В. Ломоносова (Россия) и специалистами Агентства по гидрометеорологии Комитета по охране окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан. Приведена диаграмма из отчета мирового банка, где показано, что Республика Таджикистан подвержена наибольшей уязвимостью среди различных стран Европы и Центральной Азии в отношении изменения климата. Показано, что были проведены батиметрическая съемка и математическое моделирование вероятного прорыва 42 высокогорных озер на территории Республики Таджикистан. Приведена методика этих работ, перечисляются адаптационные мероприятия, проводимые Филиалом Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан.

Ключевые слова: *Таджикистан; АКАН; батиметрическая съемка; адаптация*

Ссылка для цитирования: Раимбеков Ю.Х., Имроншоев Х.А. Опыт Агентства Ага Хана по Хабитат (АКАН) в области оценки ледниковых озер и моделирования их прорывов в Таджикистане. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 394–400.

Experience of the Aga Khan Agency for Habitat (AKAH) in glacial lakes' analysis and their outbursts' simulations in Tajikistan

Yu.Kh. Raimbekov, Kh.A. Imronshoev

Branch of Aga Khan Agency for Habitat in Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, yusuf.raimbekov@akdn.org

Abstract. The article provides an overview of materials characterizing studies of high-mountain lakes conducted by the Aga Khan Agency for Habitat together with colleagues from Lomonosov Moscow State University (Russia) Agency for hydrometeorology (The Committee of Environmental Protection under the Government of the Republic of Tajikistan). A chart from a World Bank report shows that the Republic of Tajikistan is the most vulnerable among various European and Central Asian countries to climate change. It is shown that a bathymetric survey and mathematical simulation of the probable outburst of 42 high-mountain lakes on the territory of the Republic of Tajikistan were carried out. The methodology for these works is given, and the adaptation activities carried out by the Aga Khan Agency for Habitat Branch in the Republic of Tajikistan are listed.

Key words: *Tajikistan; AKAH; bathymetric survey; adaptation*

Cite this article: Raimbekov Yu.Kh., Imronshoev Kh.A. Experience of the Aga Khan Agency for Habitat (AKAH) in glacial lakes' analysis and their outbursts' simulations in Tajikistan. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 394–400.

Введение

На глобальном уровне программа и проекты АКАН (Aga Khan Agency For Habitat) разрабатываются и реализуются в соответствии с Целями Устойчивого Развития на период до 2030 г., а также Сендайской рамочной программой по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. На национальном уровне АКАН поддерживает реализацию таких стратегических документов как Национальная Стратегия Республики Таджикистан на период до 2030 г., Программа Среднесрочного Развития Республики Таджикистан на период 2016–2020 гг. и Национальная Стратегия Республики Таджикистан по снижению риска бедствий на период 2017–2030 гг.

Главными партнерами организации АКАН при реализации проектов по снижению риска и уязвимости являются государственные институты и учреждения, в том числе:

1. Главное геологическое управление при Правительстве Республики Таджикистан.
2. Комитет по чрезвычайным ситуациям и гражданской обороны Республики Таджикистан.
3. Агентство по гидрометеорологии Комитета по охране окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан.

Изменения климата, считается генерирующим фактором возрождающихся стихийных бедствии – связанные с водно-гравитационными и водно-эрозионными процессами (активизации селевых потоков, угроза процессов наводнения и затопление) на территории ГБАО (Горно-Бадахшанская автономная область), Таджикистан. Из-за дефицита земель в этом горном регионе основные жилые зоны (села, поселки и города), важные объекты и инфраструктуры расположены на конусах выноса боковых притоков основных долин, вблизи пойменной и низко надпойменных террас основных рек, у подножия склонов и на поверхности древних оползневых тел, что являются очень уязвимым от природных угроз, имеющих локальные и отдаленный характер проявления.

Обзор проблемы

Последствием глобального потепления в Центральной Азии является таяние ледников и образование ледниковых озер. Тающие ледники представляют угрозу безопасности на местном, национальном и региональном уровнях. Из-за таяния ледников и образования новых ледниковых озер, повышается опасность наводнений из-за их прорыва. Определение потенциально опасных озер и ледников, а также слежение за наиболее опасными объектами является критически важным.

Республика Таджикистан внесла предложение объявить период с 2018 по 2028 г. Международным десятилетием действий «Вода для устойчивого развития». Данная инициатива была единодушно одобрена всеми государствами — членами ООН. Наступившее десятилетие предоставит важную платформу для политического диалога и обмена информацией и опытом с целью содействия достижению международных целей и задач, связанных с водными ресурсами, в том числе целей и задач, перечисленных в Повестке дня в области устойчивого развития на период до 2030 г.

За последние 40 лет число ледниковых озер и случаев их прорыва возросло во всем мире, и эта угроза, как ожидается, в дальнейшем будет увеличиваться. Из-за таяния ледников и формирования новых ледниковых озер возрастает опасность возникновения паводков от их прорыва. Наиболее ярко выраженным эффектом глобального потепления в ЦА является таяние ледников и связанное с этим образование ледниковых озер. В связи с этим возрастает необходимость изучения высокогорных озер – определение их геоморфологических параметров, выяснение состояния плотины и так же геологического картирования водосборного бассейна в целом.

Согласно отчету Всемирного банка «Адаптация к изменению климата в странах Европы и Центральной Азии (ЕЦА)», Таджикистан является наиболее уязвимой к изменению климата страной в регионе ЕЦА (Европа и Центральная Азия)». За последние десятилетия количество стихийных бедствий в стране увеличилось в разы, что

представляет серьезную угрозу как благосостоянию жителей страны, так и всего региона (рис. 1.) [*Информационный бюллетень…, 2009*].

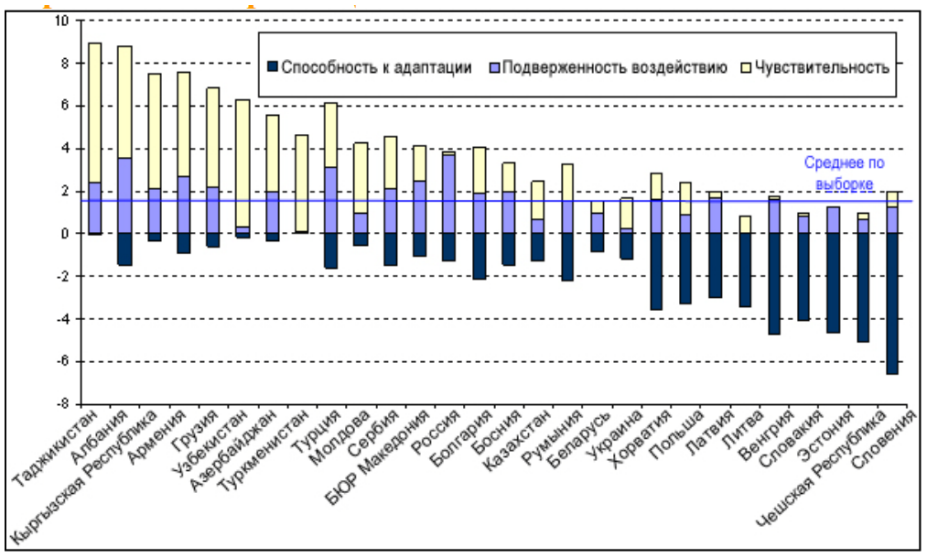


Рис. 1. Факторы, влияющие на уязвимость различных стран ЕЦА в отношении изменения климата. Источник: [*Fay and Patel, 2008*]

Опыт оценки опасности и прорыва ледниковых озер

В Таджикистане насчитывается около 1300 озер общей площадью 705 км^2. Большинство озер представлено водоемами с площадью зеркала менее 1 км^2 и на их долю приходится 97,5% общего числа озер и лишь 9% суммарной площади, что делает их весьма уязвимыми к будущим антропогенным и техногенным воздействиям.

Основное количество озер (80%) сосредоточено в горах Памиро-Алая в интервале высот 3500–5000 м. над уровнем моря. Низка степень насыщенности озерами низкогорной и предгорной зоны, где расположено около 30 озер общей площадью 2,4 км^2. В озерах Таджикистана содержится более 46,3 км^3 воды, из которых 20 км^3 являются пресными [*Министерство энергетики и водных ресурсов Таджикистан*].

Ледники и вечные снега Таджикистана являются главными источником питания рек бассейна Аральского моря. Ледники занимают площадь 8,0±0,4 тыс. км^2, что составляет 6% территории всей страны. Основные массы льда сосредоточены в горах Западного Памира [*Махмадалиев и др., 2003*].

В связи с этим возрастает необходимость изучения высокогорных озер – определение их геоморфологических параметров, выяснение состояния плотины и так же геолого-геоморфологического картографирования водосборного бассейна в целом.

Для решения вышеназванных задач Агентство Ага Хана по Хабитат совместно с коллегами из МГУ и специалистами гидрометеорологии Республики Таджикистан провели оценку опасности 42 высокогорных прорывоопасных озер на территории Таджикистана. Проведены рекогносцировочные маршруты вдоль государственной границы в Исламской Республике Афганистан по выявлению потенциально опасных высокогорных озер, прорыв которых может иметь трансграничный характер. В 2017 г. в кишлаках Хостав и Ширговад Республики Таджикистан, которые расположены на границе с Исламской Республикой Афганистан, перенесли катастрофическое затопление территорий. Источником затопления стало сход гляциальных селей в соседнем государстве – Афганистан, в связи с повышением температуры и последующих обильных дождей, которые стали триггером для начало этих процессов. В результате на какое-то время образовалась запруда из материалов селей на трансграничной реке Пяндж, которое вызвало подъем уровня воды в реке приведшее к значительному

затоплению жилой зоны кишлаков, перекрытию международной трассы Таджикистан – Киргизстан – Китай. В результате этой катастрофы пострадали 22 дома в кишлаке Хостав и 5 домов в кишлаке Ширговад. Силами КЧС (Комитет чрезвычайных ситуации) Республики Таджикистан и Агентством Ага Хана по Хабитат в Таждикистане и Афганистана были налажены спасательные работы, и организация эвакуации этих кишлаков.

Методика работы

Для исследования высокогорных озер и их долин формируется экспедиция, состоящая из геологов, гидрогеологов, оператора дрона и специалиста геоинформационных систем. Оборудование доставляется к озерам вьючным транспортом. Проводится батиметрическая съемка озера с надувной лодки эхолотом Lowrance Hook, геологами проводится геоморфологическое обследование всей долины, фиксируются все запруды, заторы и другие препятствия в русле ручья, исследуется состояние плотины озера, используется дрон eBee-senseFly для высокоточной съемки акватории озера и наиболее важных участков долины, жилой зоны кишлаков и получения высокоточного оротофотоплана и цифровой модели местности.

По результатам батиметрической съемки проводится математическое моделирование вероятного прорыва высокогорных озер в программе FLO-2D, разработанная Дж. О'Брайеном и соавторами [*O'Brien et al., 1993*]. Исходными данными для моделирования являются следующие:

- цифровая модель рельефа PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) с разрешением 12,5 м;
- высокоточная модель рельефа, полученная от съемки дрона, разрешением 1 м;
- топографические карты масштаба 1:50000;
- космические снимки Landsat_8 и Sentinel_2;
- данные полевых исследований (батиметрическая съемка, GPS-обходы контуров;
- озер, фотографии).

В качестве основных данных о рельефе территории использовалась ЦМР (цифровая модель рельефа) PALSAR и съемка с дрона. Для речных долин проводилась проверка корректности рельефа путем построения изолиний с использованием программы ArcGIS Pro и анализа продольных профилей речных долин. Вдоль русел рек отметки высот были проинтерполированы с более детальным шагом для корректного отображения речных русел в ЦМР. Для горных ледниковых озер первоначальных оценок возможного максимального расхода воды Q_{max} (м^3/с) используются различные эмпирические зависимости, например, (1) [*Huggel, 2004*]:

$$Q_{max} = W/t,$$

где W – объем озера, м^3, а t – время перелива в секундах. Для применения формулы на практике рекомендовано использовать t = 1000 с для максимальных оценок, поскольку величины t = 1000–2000 с были эмпирически получены при исследовании прорывов озер в Швейцарских Альпах [*Haeberli, 1983*]. Гидрограф рекомендуется рисовать треугольный. На рис. 2 приведены исследованные озера.

При построении модели рассматриваются разные сценарии прохождения паводков и селевых потоков. Для расчета баллов потенциальной опасности в речных долинах использовались полученные на основе моделирования данные о скоростях и глубинах потока в каждой ячейке расчетной области.

Результатами моделирования являются – плановое распределение глубин затопления, скоростей течения и потенциальной опасности в горных долинах ниже прорывоопасных озер, время добегания паводков. Составляются карты глубин затопления, скоростей течения и опасности, на основе которых создается карта, где показывается инфраструктура, жилые дома, приусадебные участки, пахотные земли и

другие объекты народного хозяйства попадающие в зону затопления. Это информация передается в КЧС и в Главное Управление Геологии Республики Таджикистан.

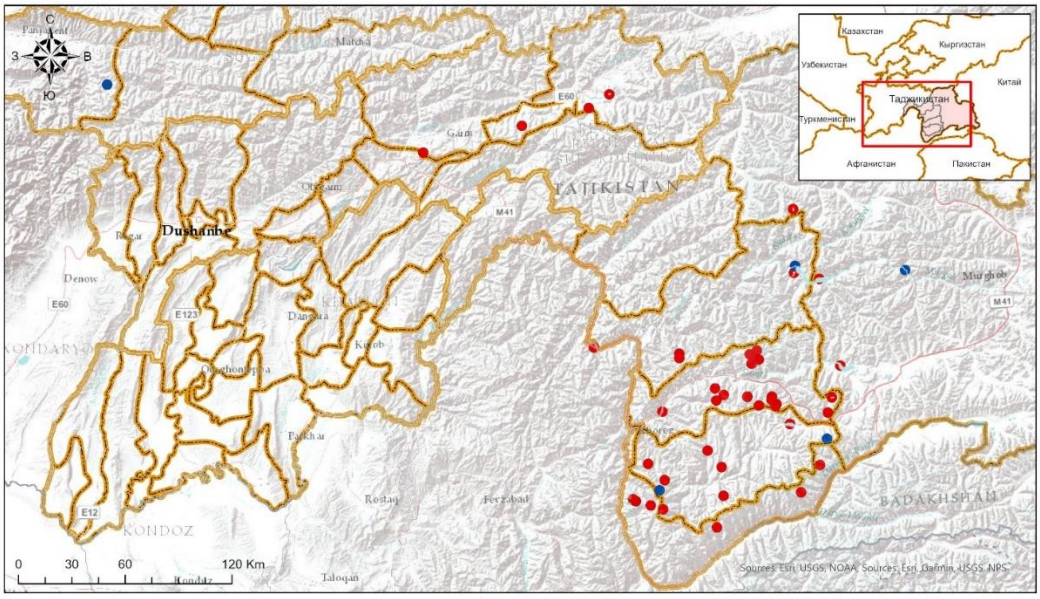


Рис. 2. Исследованные высокогорные прорывоопасные озера в Таджикистане (красные-обследованные озера, зеленые-планируемые к исследованию озера)

Реализация мер по адаптации

Глобальное изменение климата повлечет за собой крайне серьезные последствия для всех стран Центральной Азии. Национальные сообщения стран называют по мимо других общих для региона, проблемы, одну из важных – это увеличение риска опасных и экстремальных гидрометеорологических явлений, таких как град, засуха, экстремально-высокие или низкие температуры и т.д., что вызовет учащение чрезвычайных ситуаций, включая ливневые осадки, селевые паводки, оползни, сход снежных лавин, наводнения и засухи, землетрясения. Таджикистан является одной из стран региона, наиболее подверженных воздействию стихийных бедствий. Крайняя бедность (64% населения живет ниже уровня бедности) и ограниченная возможность реагирования на чрезвычайные ситуации усугубляют масштаб проблемы [*Всемирный банк, 2005*]. А т.к. в Таджикистане количество дней в году, когда температуры воздуха достигают 40°С и выше, будет и дальше увеличиваться, к проблемам присоединится и такое явление, как пыльные бури [*Генина и др., 2011*].

Исходя из вышесказанного, Агентство Ага Хан по Хабитат в Таджикистане по мимо изучения риска прорыва высокогорных опасных озер, прорыв которых является триггером для других природно-геологических угроз, такие как сели, наводнения, затопления, береговая эрозия и оползни, которые иногда приводят к катастрофическим последствиям, нанося огромный урон в виде потер человеческих жизней и разрушения жилых домов, инфраструктуры, приусадебных участков и пахотных земель. Агентство проводит работы по смягчению и реагированию на чрезвычайные ситуации.

На уровне джамоатов[6] Агентством Ага Хана по Хабитат в Таджикистане подготовлено 178 команд реагирования на чрезвычайные ситуации общим количеством 5340 волонтеров, из них мужчин – 2865 человек и женщин – 2475 человек. Так же сформированы 193 команды реагирования на лавинную опасность, общим количеством 1930 волонтеров, из них мужчин – 1477 человек, женщин – 453. Все эти команды оснащены всем необходимым оборудованием первой помощи. С этими командами

[6] Административная единица сельских общин в составе районов.

проводятся регулярные занятия и полевая подготовка совместно с сотрудниками КЧС Республики Таджикистан. Установлены 84 склада с непродовольственным запасом, которыми население может пользоваться во время чрезвычайной ситуации (рис. 3.). Агентство проводит работу по картографированию геолого-природных угроз на уровне жилой зоны кишлаков[7] и водосборных бассейнов. По результатам этих исследовании составляются отчеты и карты опасности, которые передаются в КЧС, местную администрацию, а также в Главное Управление Геологии Республики Таджикистан. Совместно с сотрудниками КЧС проводятся семинары и треннинги с местным населением по осведомлению населения об геолого-природных угроз кишлака, определяются безопасные участки кишлака для целей эвакуации. Происходит выпрямление и отчистка селевых и паводковых русел долины, берегоукрепительные работы и другие инженерные решения для смягчения последствии угрозы. Проводятся работы по обеспечению чистой питьевой воды населенных пунктов, которые не имеют доступа к воде. Строятся пешеходные эвакуационные мости. Установлены 264 радиостанции КВ- и УКВ-диапазона, которые переданы на баланс КЧС на безвозмездной основе. Развернуты 21 метеостанции и 3 автоматических станции. Агентство проводит эти проекты почти на всей территории Таджикистана (рис. 4.).

Рис. 3. Расположение складов с непродовольственным запасом (красное- склады, зеленое- административные центры районов)

Заключение

Ссылаясь на опубликованный РЭЦЦА (Региональный экологический центр Центральной Азии) в 2009 г. «Анализ возможностей для деятельности РЭЦЦА в области изменения климата и энергоэффективности в Центральной Азии», можно сделать вывод, что глобальное изменение климата повлечет за собой крайне серьезные последствия для всех стран Центральной Азии. Так же согласно отчету Всемирного банка «Адаптация к изменению климата в странах Европы и Центральной Азии (ЕЦА)», Таджикистан является наиболее уязвимой к изменению климата страной в регионе ЕЦА (Европа и Центральная Азия)».

[7] Сельский населенный пункт в Средней Азии.

Рис. 4. Зона охвата проектов АКАН в Таджикистане, показано зеленым цветом

Исходя из вышесказанного становится актуальным дальнейшее изучения прорывоопаснных высокогорных гляциальных озер в Таджикистане. Математическое моделирование возможных прорывов, основанное на детальной информации о батиметрии озер и геоморфологического картографирования долины ниже озер. Использование дрона может дать возможность получить ортофотоснимки высокого разрешения, на основе которых производится цифровая модель местности высокого качества, которая дает возможность, более точно проводит моделирование стока. Полученные по результатам моделирования карты дают возможность проводит митигационные мероприятия в виде обустройства селенаправляющих, отчистки русел, берегоурепительных работ и других инженерных решений для защиты домов и инфраструктуры с учетом карты затопления территории. Становится необходимым создание спасательных команд первой помощи и реагирования на чрезвычайные ситуации. Так же актуальным является проведение семинаров и треннингов по осведомлению населения о возможных природных угрозах на территории их проживания и обучения действии во время чрезвычайной ситуации. Государственные структуры, вовлеченные в эту проблематику, получают всю собранную информацию необходимую для принятия решений и будущего планирования работ.

Список литературы

Генина М., Лесли Брайтнер Зума., Умирбеков А., Исаева Г., Мусагажинова А., «Анализ деятельности в области адаптации к изменению климата в Центральной Азии» потребности, рекомендации, практики. Алматы 2011 г. URL. https://carececo.org/upload/27.pdf

Махмадалиев Б.У., Новикова В.В., Каюмов А.К., Каримова У.Х., Пердомо М. «Национальный план действий Республики Таджикистан по смягчению последствий изменения климата» Душанбе 2003 г. URL. https://unfccc.int/resource/docs/nap/tainap01r.pdf

Информационный бюллетень Регион Европы и Центральной Азии 50772. Июнь 2009. Выпуск 5. URL.https://documents1.worldbank.org/curated/ru/920411468256514402/pdf/507720BRI0RUSS0BLIC00KL0Brief0V50RU.pdf

Селевые процессы на арктических островах

Ф.А. Романенко

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, faromanenko@mail.ru

Аннотация. В докладе рассматриваются характеристики селевых процессов на архипелагах Новая Земля, Земля Франца-Иосифа, Шпицберген и о. Исландия, собранные автором в экспедициях и обнаруженные в опубликованных материалах. Немногочисленность известных сведений связана с малонаселенностью и труднодоступностью островов. Приведены качественные данные как о классических селевых процессах, формирующихся в результате падения несущей способности снега и интенсивных дождей, так и о грязевых потоках (оползнях-сплывах), возникающих при таянии подземных льдов и после дождей. Селевые процессы – мощный геологический агент в прошлом, что необходимо учитывать при стратиграфическом расчленении четвертичных отложений. Выявлены убывание интенсивности селей в восточном полушарии с запада на восток (от Исландии к Новосибирским островам), что связано с уменьшением количества жидких и твердых осадков и увеличением общей суровости климата. Предполагается, что современные климатические изменения будут способствовать усилению селевых процессов на арктических островах, что необходимо учитывать при расширяющемся освоении этих высокоширотных регионов.

Ключевые слова: *селевые процессы, Арктика, оползни-сплывы*

Ссылка для цитирования: Романенко Ф.А. Селевые процессы на арктических островах. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 401–407.

Debris flow processes on Arctic islands

F.A. Romanenko

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, faromanenko@mail.ru

Abstract. The report examines the characteristics of debris flow processes on the archipelagos of Novaya Zemlya, Franz Josef Land, Spitsbergen and the Iceland, collected by the author on expeditions and found in published materials. The paucity of published data is due to the sparse population and inaccessibility of the islands. Qualitative data are presented both on classical debris flow processes formed as a result of a drop in the bearing capacity of snow and intense rains, and on mud flows (landslides) that occur when underground ice melts and after rains. Debris flow processes were a powerful geological agent in the past, which must be taken into account when stratigraphically subdividing Quaternary deposits. A decrease in the intensity of debris flows in the eastern hemisphere from west to east (from Iceland to the New Siberian Islands) was revealed, which is associated with a decrease in the amount of liquid and solid precipitation and an increase in the overall severity of the climate. It is assumed that modern climate changes will contribute to the intensification of debris flow processes on the Arctic islands, which must be taken into account during the expanding development of these high-latitude regions.

Key words: *debris flows, Arctic, landslides*

Cite this article: Romanenko F.A. Debris flow processes on Arctic islands. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 401–407.

Введение

Традиционно считается, что динамика рельефа арктических островов существенно менее интенсивна, чем в более южных широтах. И, главным образом, потому, что их поверхность освобождается от снега, а берега – от припайного льда, всего на один-три месяца, и не каждый год, а мощность деятельного слоя не превышает 0,2–0,5 м. Действительно, перечисленное ограничивает развитие термоэрозии, термокарста, термоабразии, термоденудации, суффозии, эоловых процессов и т.д. Но для некоторых процессов данные ограничения не столь важны, потому что в их развитии главную роль играют иные факторы, и в том числе как раз снежный покров и наличие подземных залежей льдов. Среди таких процессов своей интенсивностью отличаются селевые.

Распространению и морфологии подобных форм на далеких затерянных в ледяных морях островах и посвящен предлагаемый доклад, основанный на многолетних (1985–2023) полевых работах автора на арктических островах (от Шпицбергена до Врангеля), опубликованных и фондовых материалах.

На островах встречаются два главных вида селевых процессов. Один, так сказать, сели в традиционном понимании, водо-грязе-снежно-каменные потоки, или, по определению В.Ф. Перова [*2012, с. 5*] – «стремительные русловые потоки, состоящие из смеси воды и обломков горных пород, внезапно возникающие в бассейнах небольших горных рек».

Но подобными высокими скоростями («стремительностью»), кроме селевых, отличаются и своеобразные грязе-каменные потоки или просто грязевые потоки, давно и широко известные в литературе под именем «оползней-сплывов» или «посткриогенных сплывов» [*Жигарев, 1975*] или «криогенных оползней скольжения» (КОС) или «течения» (КОТ) [*Лейбман, 2005; Лейбман, Кизяков, 2007*]. В.Ф. Перов [*2012*] относил их к селевым потокам высокой плотности – оползням течения (оползни-потоки, сплывы, оплывины). То есть, по сути, это очень близкие процессы. Они сходны с селевыми потоками не только высокими скоростями, но и насыщенностью грубообломочным материалом (по Перову, от 10 до 75%), которая, правда, определяется составом субстрата, наличием «выбросов селевой смеси на крутых поворотах русла», нерегулярностью схода, пульсационным характером. Главным отличием первого типа селей от второго нам видится источник воды и механизм. Классические сели питаются дождевой водой или тающим снегом, который теряет свои несущие свойства, а источник воды для оползней-сплывов – тающие внутригрунтовые льды, реже – дожди, но сходят они обычно по кровле мерзлоты. По М.О. Лейбман [*2005*], КОС – «следствие потери устойчивости переувлажненных пород сезонно-талого слоя (СТС) и их вязкое или вязкопластическое смещение по поверхности льда или ледогрунта». То есть потеря устойчивости или несущих свойств разных субстратов – главное условие обоих типов селей.

На многих арктических островах низкогорья и среднегорья занимают значительные площади (Шпицберген, Баффинова Земля, Элсмир, Гренландия, Ян-Майен, Новая Земля, Врангеля и др.), в то время как для других (Земля Франца-Иосифа, Северная Земля) характерны обширные крутые (до 40° и даже более) склоны платообразных возвышенностей и плато, разбитых трещинами и расселинами, окруженные низменными равнинами (Новосибирские острова). Рельеф способствует накоплению больших снегозапасов. Теплые циклоны, которые все чаще проникают в самые высокие широты даже зимой [*Романенко и др., 2015*], способствуют внезапному насыщению снежных масс водой, в результате чего они теряют несущую способность и устремляются вниз в виде многочисленных водоснежных потоков (ВСП) или водокаменных селей. Из-за отсутствия растительного покрова и крутых склонов ВСП приобретают значительную скорость и мощность. В результате на склонах появляются целые сети селевых лотков иди ложбин, расстояние между которыми часто не превышает 50–70 м.

В.Ф. Перов (2012) выделяет в России внутри холодной селеопасной зоны арктический селеопасный регион, куда включает две селеопасные области: Таймырскую

и Полярно-островную (Земля Франца-Иосифа, Новая Земля, Северная Земля, о. Врангеля). Период селеопасности в обоих областях ограничивается тремя летними месяцами (июнь-август). Но в Полярно-островной области «селевой процесс в целом развит слабо» [*ibid, c. 193*]. Там выделяются снеговые сели, селевые паводки, грязекаменные микросели, в частности, возникающие при прорыве временных наледниковых озер и снежных перемычек в узких приледниковых долинах. Даже в этом коротком перечне объединены селевые потоки обоих типов.

Рассмотрим региональные особенности селей на арктических островах.

Новая Земля

Данные по селям этого архипелага практически отсутствуют из-за его нынешней ненаселенности и труднодоступности. Есть упоминание [*Перов, 2012*] о наблюдениях первого (1957–1958) начальника Новоземельской экспедиции Института географии АН СССР в период МГГ в Русскую Гавань Н.М. Сваткова за грязекаменным микроселем на склоне моренной гряды ледника Шокальского на Северном острове Новой Земли 29 июля 1958 г. Судя по нашим наблюдениям на этом же леднике в 2012 г., здесь мы имеем дело не с классическим селем, а с оползнем-сплывом, возникшим при протаивании массива «мертвого льда». Действительно, короткие (менее 100 м) оползни-сплывы или «криогенные оползни течения» (КОТ) по М.О. Лейбман, часто встречаются на молодой (последние 50 лет) боковой морене, образовавшейся после заметного (на несколько километров) отступания ледника Шокальского.

Можно уверенно утверждать, что и классические сели тоже есть на гористой и ледниковой Новой Земле, но их описания в настоящее время отсутствуют.

Земля Франца-Иосифа

В первой подробной характеристике современных геоморфологических процессов архипелага [*Суходровский, 1967*] упоминания о селевых процессах отсутствуют, хотя автор выделяет на карте комплекс склоновых гравитационно-криогенных процессов. Во время зимовки экспедиции Института географии АН СССР в бухте Тихой в 1957–1959 гг. по программе Международного геофизического года (МГГ), которой как раз и руководил В.Л. Суходровский, некоторые виды селей, в том числе водоснежные потоки (ВСП), еще не были детально изучены.

А именно они здесь преобладают. По наблюдениям наших экспедиций 2012–2013 гг. на 42 островах архипелага, следы ВСП встречаются достаточно часто, хотя распределены в архипелаге весьма неравномерно. Так, густая сеть селевых ложбин рассекает склон плато высотой до 300 м на южном берегу о. Нортбрук в районе знаменитого мыса Флора. Склон образован вертикальными базальтовыми уступами и россыпями базальтовых глыб в верхней части, мезозойскими песчаниками, алевролитами и аргиллитами с прослоями бурых углей – в средней и нижней. Опирается склон на голоценовые морские цокольные (на мезозойских осадочных породах) террасы высотой до 15 м, перекрытые чехлом морских галечников. Селевые ложбины максимальной глубиной до 1,5 м начинаются непосредственно ниже базальтовых уступов, разветвляются, сливаются, образуют обширные конусы внизу склона. Некоторые из них обвалованы (высота валов не более 1 м). Днище ложбин выстлано базальтовыми глыбами, которые составляют и основу валов. Селевой шлейф в тыловой части морских террас прерывается нерасчлененными участками склонов. Превышения между тыловой частью террасы и началом лотков не более 150 м.

Аналогичные селевые ложбины на соседних о-вах Белл и Мейбел прорезают мелкоглыбовый склоновый чехол с небольшим количеством более тонкого материала. Часто зона торможения ВСП – конус или язык, нацело сложенный остроугольными обломками базальта – глыбами и щебнем. В то же время на склонах, целиком сложенных глыбами со щебнем, ВСП не образуются (например, на о. Джексона над местом зимовки Нансена-Иохансена в 1895–1896 гг.).

Весной 1959 г. В.Л. Суходровский [*1967, с. 50–52*] обследовал следы двух «влажных лавин» в окрестностях полярной станции Бухта Тихая на о. Гукера, которые вынесли на морской лед значительное количество глыб, щебня, мелкозема (снесенных со склона плато) и окатанных глыб, захваченных на морских террасах. Они сошли по эрозионным (так в оригинале), скорее лавинно-камнепадным желобам. Можно предположить, что это были не просто лавины, а именно ВСП, судя по отсутствию сортировки материала и его крупности, а также по такой характеристике, как «влажные» лавины. Площадь, перекрытая снесенными со склона отложениями, достигла 10 тыс. м^2. (30 м^3) у одного потока и 24 тыс. м^2 – у другого (55 м^3). Пока эти измерения В.Л. Суходровского – единственная на ЗФИ оценка количества вынесенного селевыми потоками обломочного материала.

На о. Винер-Нейштадт к юго-востоку от мыса Тироль селевые ложбины рассекают более пологий (до 15°) склон, сложенный рыхлыми мезозойскими породами и перекрытый молодой мореной, образовавшейся при отступании ледника, покрывающего практически весь остров. Судя по хаотическому расположению ложбин и субпараллельных им валов высотой до 2–3 м, ВСП здесь – главный рельефообразующий процесс. Состав поверхностных отложений – песчано-валунно-щебнистый диамиктон. Причем ВСП у мыса Тироль – не катастрофический процесс в традиционном понимании, он не меняет свойств геоморфологической системы, здесь это норма жизни.

Совершенно сходная ситуация на соседнем о. Чамп (мыс Триест), известном своими сферолитами. Здешние ВСП связаны не только с весенним таянием снега, но и с процессами деградации ледника, который окружает сравнительно небольшой участок (длиной не более 1,5 км и шириной 300–400 м) пологого (до 10°) склона, перекрытого песчано-валунными образованиями – делювием и коллювием мезозойских отложений.

Сход водоснежного потока был отмечен на о. Брайса в 1956 г. [*Перов, 2012*]. Вероятно, для данного острова ВСП – процесс редкий, потому что наше обследование северной части острова следов свежих селей не выявило. И рельеф острова не самый благоприятный для формирования ВСП – крутые (до 40°) склоны с фрагментами субвертикальных базальтовых уступов, перекрытые глыбовым чехлом.

Лавинно-камнепадные желоба, к которым приурочены и селевые процессы, встречаются на склонах платообразных возвышенностей высотой до 430 м в центральной части о. Алджер [*Романенко и др., 2015*]. По облику и строению они сходны с таковыми на мысе Флора.

Анализируя факторы селеобразования на Земле Франца-Иосифа, можно заключить, что селеопасными являются склоны крутизной 10–40°, перекрытые мелкоглыбово-щебнистым, песчано-щебнисто-глыбовым делювием/коллювием/мореной и имеющие в верхней части денудационные ниши (как правило, выработанные по трещинам в базальтах), где накапливается снег. Можно отметить, что важную роль играют экспозиция – на поверхностях южной экспозиции селевые процессы происходят чаще, и близость к краям тающих ледников, где сели играют ведущую роль в современном преобразовании рельефа.

Шпицберген

Но, если на ЗФИ под склонами нет и никогда не было долговременных постоянных поселений (исключение – зимовки британских полярников Б. Ли-Смита в 1881–1882 и Ф. Джексона в 1894–97 гг. на мысе Флора), то на **архипелаге Шпицберген** селевые потоки доставляют много хлопот администрации столицы Шпицбергена – поселка Лонгйирбюен. Ими рассечены оба борта долины Лонгйирэльвы на Земле Норденшельда, прорезающей еще более высокие (до 500 м) плоские горные вершины Ninavarden и Gruvefjellet. Многочисленны следы селевых потоков также на южном склоне горы Пирамиды над одноименным поселком в Биллефьорде на Земле Диксона. Северный берег Биллефьорда – арена многочисленных ВСП, рассекающих склоны плато максимальной высотой 500–600 м и крутизной 20–40°, сложенных рыхлым щебнистым

коллювием осадочных пород верхнего палеозоя. Языки и валы смещенного материала достигают 2 м мощности (например, по берегам Skansbukta).

Климат Шпицбергена более благоприятен для развития селей, ибо архипелаг находится ближе к Северной Атлантике и его берега омываются теплым Шпицбергенским течением – ветвью Северо-Атлантического течения – продолжения Гольфстрима. Здесь и припайный лед устанавливается позже и вскрывается раньше, и южные циклоны, приносящие оттепели, приходят чаще. Из-за наличия вечной мерзлоты интенсивность селеформирующих осадков всего 2,5 мм/ (31 мм/сут, по В.Ф. Перову [*2012*]), сильные дожди не уникально редкое явление, как на остальных арктических архипелагах, а вполне обычное. В.Ф. Перов [*2012*] отмечает в архипелаге как снеговые, так и дождевые сели с объемом выносов до 6,4 тыс. м^3 и средней повторяемостью раз в 8–10 лет.

Водоснежный поток 11 июня 1953 г. в пос. Лонгйирбюен привел к гибели трех человек, дождевые сели фиксировались также в июле-августе 1972, 1981 и 1989 гг. [*Перов, 2012*]. Многочисленные селевые потоки после катастрофических дождей 10–11 июля 1972 г. затопили улицы Лонгйирбюена, которые смогли расчистить только через трое суток [*Thiedig, Kresling, 1973*]. Причем значительную часть селевых выносов составил материал отвалов угольных шахт, в том числе уже законсервированных, и по мере удаления от поселка число и мощность селей убывали.

Сели сходили по обоим бортам долины, и большая их часть не использовала ранее образовавшиеся эрозионные формы. Они были детально изучены по свежим следам С. Ларссоном (1982), который насчитал 80 форм и рассчитал объем сноса каждой. Он колебался от 1 до 1800 куб. м. Общий объем сноса составил 7054 куб. м, т.е. примерно 1 мм/год (за один дождь!). Причем сели развивались на склонах всех экспозиций, кроме интервала 337–61°, то есть склоны северной экспозиции селям не подверглись.

Проблема охраны инфраструктуры Лонгйирбюена стоит перед администрацией поселка в течение десятилетий. В связи с организацией в 1993 г. Университетского центра Свальбарда (UNIS) и ежегодного роста международного туризма поселок значительно разрастается, в том числе вверх по селеопасной долине Лонгйирдален, включая ее правый приток селеопасную долину Vannledningsdalen. Поэтому мэрия разрабатывает серию защитных проектов, предусматривающих строительство нескольких крупных противолавиннных и, одновременно, противоселевых и противооползневых сооружений над жилыми и общественными зданиями [*Как защитить…, 2018*]. Действительно, как показывают современные исследования [*de Haas et al., 2015*], усиление летних осадков и смена направления зимних ветров могут усилить и селевую, и лавинную активность. Кроме того, возможно увеличение частоты оползней-сплывов в связи с увеличением таяния мерзлоты и понижением кровли деятельного слоя. Но подобный процесс больше характерен не для гор Шпицбергена, где преобладают скальные породы, а для прибрежных низменностей. Там существенно больше подземных залежей льдов, как современных полигонально-жильных, так и массивов «мертвого льда» после отступания ледников.

Исландия

Еще более благоприятные условия для образования селевых потоков существуют на **острове Исландия**. Здесь и дождей бывает много, и снег выпадает часто, особенно в горах, и теплые атлантические воздушные массы вызывают оттепели даже в холодный период. Дополнительный фактор селеобразования – извержения вулканов, вызывающие лахары и йекульхлейпы (йекульхлаупы). Они характерны для вулканов Катла, Грисветн, Эйяфьядлайекюдль и др. Поэтому В.Ф. Перов (2012) выделяет здесь сели трех типов: вулканогенные (1755, 1934, 1996, 2010 и др.), ледниковые и снеговые. Рельефообразующая роль селей в Исландии огромна. Они формируют глубокие (до 30 м) обвалованные долины, селевые отложения перекрывают обширные участки низменных равнин протяженностью десятки километров (например, на южном берегу острова южнее ледников Ватнайокудль и Мирдасйокудль. В море выносится большое

количества обломочного материала, шлейф которого шириной десятки километров окаймляет берег.

Снеговые сели более характерны для крутых платообразных гор Западных фьордов. Многочисленные каровые ниши рассекают бровку плато, и там формируются большие снегозапасы. В зависимости от конкретных погодных условий возникают то снежные лавины (например, крупные лавины в Судавике в январе 1983 и, особенно, в январе 1995, вызвавшие человеческие жертвы и перенос части поселка) и водоснежные потоки. В том же январе 1983 г. водоснежные потоки, вызванные сильными дождями, повредили 20 домов в поселках Патрексфьордур и Талкнафьордур, погубив четырех человек [*Tomasson, Hestnes, 2000*]. Интенсивность осадков, по данным метеостанции Kvigindisdalur, достигла 123 мм/сут. То есть практически в одно и тоже время в Исландии возможны и ВСП, и лавины. Для этого острова они представляют серьезную и постоянную опасность.

Другие острова

Данные о селях на островах восточнее Новой Земли и западнее Гренландии единичны, что связано исключительно с их малонаселенностью и труднодоступностью. На Северной Земле возможны ледниковые сели и ВСП, на Новосибирских островах, в связи с высокой льдистостью четвертичных отложений «ледового комплекса» – грязевые оползни-сплывы. На о. Врангеля ВСП в горах и оползни-сплывы на равнинах также весьма вероятны, хотя их описаний нам найти пока не удалось.

В Гренландии описаны водоснежные потоки на северо-западе и северо-востоке острова [*Перов, 2012*]. На Баффиновой Земле экспедиция Арктического института Северной Америки наблюдала летом 1950 г. в северной части острова ВСП в начале таяния снега на ледниково куполе Барнса [*Baird et al., 1952*]. Снег синел, насыщаясь водой, и начинал смещаться волнами в долинах с уклонами всего в 1°. При этом поверхность потока возвышалась нал окружающей снежной равниной. Вода начинала затем стекать в русло, и через два часа поток превращался в обычную реку с ледяными берегами, которая дренировала окружающий, насыщенный водой снег. Следы подобного процесса можно видеть и на современных космических снимках, например, у юго-западного края ледника.

Но описаний селевых процессов на островах Канадского арктического архипелага также очень немного.

Подводя итоги, можно заключить, что:

- на арктических островах селевые потоки разных видов встречаются довольно часто, как в горных районах (снеговые, вулканогенные, ледниковые сели), так и на равнинах (грязевые оползни-сплывы или криогенные оползни течения);
- селевые процессы – мощный геологический агент в прошлом (например, [*Syvitski, Normandeau, 2023*]) и это становится необходимым учитывать при стратиграфическом расчленении четвертичных отложений: может быть, часть горизонтов, традиционно интерпретируемых как ледниковые, на самом деле – селевые?
- главными факторами распространения классических типов селей можно считать климатический (сильные дожди, высокие снегозапасы, резкие оттепели), грязевых потоков (оползней-сплывов) – геологический (наличие подземных залежей льда);
- в целом интенсивность селей убывает в восточном полушарии с запада на восток (от Исландии к Новосибирским островам), что связано с климатическими условиями: уменьшением количества жидких и твердых осадков и увеличением общей суровости климата;
- поэтому распространение селей на арктических островах имеет некоторую зональность, определяемую физико-географической обстановкой;

– современные климатические изменения будут способствовать усилению селевых процессов на арктических островах, что необходимо учитывать при расширяющемся освоении этих высокоширотных регионов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы госзадания кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Эволюция природной среды в кайнозое, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования» (№ 121040100323-5).

Список литературы

Жигарев Л.А. Термоденудационные процессы и деформационное поведение протаивающих грунтов. М.: Наука, 1975. 107 с.

Как защитить Лонгьир от лавин// Русский вестник Шпицбергена. 2018. № 6. С.13.

Лейбман М.О. Криогенные склоновые процессы и их геоэкологические последствия в условиях распространения пластовых льдов. Автореф. дис. … д-ра геол.-мин. наук. Тюмень: Ин-т криосферы Земли, 2005. 52 с.

Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М.: Типография Россельхозакадемии, 2007. 206 с.

Перов В.Ф. Селеведение. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.

Романенко Ф.А., Шиловцева О.А., Шабанова Н.Н., Кононова Н.К. Изменения климата в Арктике, катастрофические природные процессы и динамика рельефа на Земле Франца-Иосифа//Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики. М.: Лига-Вент, 2015. С.58–73.

Суходровский В.Л. Рельефоообразование в перигляциальных условиях (на примере Земли Франца-Иосифа). М.: Наука, 1967. 120 с.

Baird P. D., Ward W. H., Orvig S. The glaciological studies of the Baffin Island Expedition, 1950// Journal of Glaciology, 2. 1952. Pp.2–23.

de Haas T., Kleinhans M.G., Carbonneau P.E., Rubensdotter L., Hauber E. Surface morphology of fans in the high-Arctic periglacial environment of Svalbard: Controls and processes// Earth-Science Reviews. Vol.146. 2015. Pp. 163–182

Larsson S. Geomorphological effects on the slopes of Longyear Valley, Spitsbergen, after a heavy rainstorm in July 1972 // Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography. Vol. 64. № ю¾. 1982. Pp. 105–125.

Syvitski J., Normandeau A. Sediment redistribution processes in Baffin Islands fjords//Marine Geology. Vol. 458. 2023.

Thiedig F., Kresling A. Meteorologische und geologische Bedingungen bei der Entstehung von Muren im Juli 1972 auf Spitzbergen // Polarforschung. 40 (1/2). 1973. Pp.40–49.

Tomasson G.G., Hestnes E. Slushflow Hazard and Mitigation in Vesturbyggd, Northwest Iceland// Nordic Hydrology. 31 (4/5). 2000. Pp.399–410

Особенности формирования селеопасных районов в переходных зонах «материк – океан» на примере о. Сахалин

С.В. Рыбальченко

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, rybalchenko_sv@mail.ru

Аннотация. В данной работе рассмотрено положение острова Сахалин в современной зоне перехода между Азиатским материком и Тихим океаном, включающую вулканогенные пояса, окраинные моря и островные дуги. Именно благодаря истории развития островного поднятия Сахалина, как части переходной зоны от материка к океану, активно проявляются экзогенные геодинамические процессы, в том числе селевые. Определены пространственно-временные условий селеформирования, которые обусловлены не только географическим положением территории, но и ее геопространственным положением на поверхности Земли с учетом современных и прошлых эндогенных и экзогенных процессов, воздействующих на указанную территорию.

Ключевые слова: *селевой поток, переходная зона, селевой режим, селевая опасность, Сахалин*

Ссылка для цитирования: Рыбальченко С.В. Особенности формирования селеопасных районов в переходных зонах «материк – океан» на примере о. Сахалин. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 408–417.

Features of the formation of debris flow-prone areas in the transition zones “mainland – ocean” (a case of the of Sakhalin Island)

S.V. Rybalchenko

Special Research Bureau for Automation of Marine Researchers FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, rybalchenko_sv@mail.ru

Abstract. In this paper, the position of Sakhalin Island in the modern transition zone between the Asian mainland and the Pacific Ocean, including volcanic belts, marginal seas and island arcs, is considered. It is thanks to the history of the development of the Sakhalin Island uplift, as part of the transition zone from the mainland to the ocean, exogenous geodynamic processes, including debris flows, are actively manifested. The spatial and temporal conditions of debris flow forming are determined, which are determined not only by the geographical location of the territory, but also by its geospatial position on the Earth's surface, taking into account modern and past endogenous and exogenous processes affecting the specified territory.

Key words*: debris flow, transition zone, debris flow regime, debris flow hazard, Sakhalin*

Cite this article: Rybalchenko S.V. Features of the formation of debris flow-prone areas in the transition zones “mainland – ocean” (a case of the of Sakhalin Island). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 408–417.

Введение и постановка задачи

Большой научный интерес представляет изучение зон сочленения континентов с океанами, в пределах которых происходят сложные геодинамические процессы, обусловленные взаимодействием этих крупнейших структур земной коры. В данной работе рассмотрено положение острова Сахалин в современной зоне перехода между Азиатским материком и Тихим океаном, включающую вулканогенные пояса, окраинные моря и островные дуги. Именно благодаря истории развития островного поднятия Сахалина, как части переходной зоны от материка к океану, активно проявляются экзогенные геодинамические процессы, в том числе селевые.

Территория о. Сахалин обладает значительной селеопасностью, что обусловлено высокой площадной пораженностью территории селевыми процессами, частотой селеформирования, высокими потенциальными ущербами и рисками.

Вещественный состав, структурно-реологический тип и механизм формирования селей на территории Сахалина различны. Помимо связанных грязевых и грязекаменных селей, приуроченных преимущественно к бассейнам горных рек и участкам рассредоточенного формирования склоновых селей на горных склонах и склонах террас, в речных долинах отмечается формирование наносоводных потоков и селевых паводков. Кроме селевых процессов, широко распространены генетически близкие селям склоновые экзогенные процессы: оползни-потоки и др.

Для развития селевых процессов необходим комплекс природных условий и компонентов, формирующих специфическую, открытую геосистему селевого бассейна, в пределах которой происходит активный обмен компонентов геосистемы путем обмена веществом и энергией. Основным энергетическим источником данной геосистемы является потенциальная энергия рельефа территории, основным вещественным источником являются потенциальные селевые массивы в очагах твердого питания, сложенные выветрелыми рыхлообломочными нестойкими горными породами. Для формирования селевых потоков также необходим жидкий агент переноса твердого вещества, наличие которого обусловлено циркуляцией атмосферы и гидросферы. Стоит отметить, что аналогичные природные условия необходимы и для развития иных склоновых экзогенных процессов (оползней, осыпей и др.), в связи с чем, в пределах геосистемы селевого бассейна, как правило, склоновые экзогенные процессы протекают совместно, чем обусловлена их генетическая связь.

В пределах геосистемы селевого бассейна происходит трансформация потенциальной энергии рельефа в кинетическую энергию геодинамических процессов, в том числе селей, под воздействием гравитационных сил и жидкого агента переноса.

Таким образом, среди основных формирующих компонентов геосистемы селевого бассейна стоит выделить рельеф территории, геологическую среду и жидкий агент переноса.

Именно в связи с наличием данных природных компонентов на территории о. Сахалин формируется множество подобных комплексов селеформирования, которые зачастую сливаются в обширные селеопасные районы, обуславливая высокую селевую опасность территории. Наличие природных компонентов селеформирования на территории о. Сахалин имеет широкое распространение и носит неспорадический характер, следовательно, закономерность их существования предопределена. Помимо территории о. Сахалин селеформированию подвержены множество районов тихоокеанского побережья со схожими природно-территориальными условиями.

Целью данного исследования является определение причин возникновения комплексов селеформирования на территории о. Сахалин и схожих территориях.

Задачами данной работы является определение пространственно-временных условий селеформирования, которые обусловлены не только географическим положением территории, но и ее геопространственным положением на поверхности Земли с учетом современных и прошлых эндогенных и экзогенных процессов, воздействующих на указанную территорию.

Материалы и методы исследования

Материал, положенный в основу работы, был собран автором при полевых исследованиях в различных районах о-ва Сахалин и Курильских о-вов в период с 2007 по 2022 гг. Обобщение многочисленных литературных данных и материалов геологических съемок по районам, в которых автору не удалось побывать, позволило в совокупности с оригинальным материалом воссоздать общую картину геологического строения и тектонической истории острова. Работы проводились в рамках научной деятельности, научно-технического сопровождения инженерных изысканий в части опасных экзогенных процессов. В ходе работ были выполнены наблюдения за селевыми процессами, а также другими склоновыми экзогенными процессами. Обработан большой массив инженерно-геологических и метеорологических данных, морфометрических и морфологических характеристик селевых бассейнов.

Селевой режим на реках о. Сахалин

Селевой режим о. Сахалин, в первую очередь, определяется геологическими и геоморфологическими факторами селеобразования, гидрометеорологические факторы выполняют второстепенную роль и, как правило, служат лишь спусковым механизмом для активизации селевых процессов [*Казаков, 2008*]. В связи с особенностями осадконакопления селевые бассейны характеризуются цикличным селеформированием, что обусловлено необходимостью предварительной подготовки материала селевого бассейна при активном выветривании горных пород.

При выпадении обильных осадков могут отмечаться как единичные, так и массовые случаи селеформирования в зависимости от степени предварительного выветривания и обводнения потенциальных селевых массивов в пределах селевых бассейнов. Частота селеформирования в среднем составляет 1 раз в 3–5 лет для небольших селевых бассейнов (врезов, долин ручьев), для крупных селевых бассейнов 1 раз в 5–10 лет (для малых рек) [*Казаков, 2008, Генсиоровский, 2008, Рыбальченко, 2013*]. В отдельных молодых и активно растущих селевых бассейнах сели могут отмечаться ежегодно, также возможно формирование нескольких селей в течение года во время весенних и летне-осенних пиков активизации геодинамических процессов.

Для районов селеформирования приуроченных к морским террасам средние объемы селей составляют 1–5 тыс. м^3, в отдельных случаях могут достигать первых десятков тысяч кубических метров. Для горных районов объемы селей составляют десятки тысяч кубических метров, отдельные крупные горные реки способны выносить селевые потоки объемом сотни тысяч кубических метров, до 500 тыс. м^3 и более [*Казаков, 2008*]. Несмотря на высокую интенсивность селевых процессов и потенциальную селевую опасность катастрофические сели на территории о. Сахалин формируются крайне редко. В целом большая часть территория о. Сахалин характеризуется наличием природных условий благоприятных для активного развития опасных экзогенных процессов, в том числе селей.

Рельеф селеопасных районов Сахалина

Рельеф территории является энергетическим источником геодинамических процессов, в том числе селей. Стоить отметить, что формирование селей возможно даже при относительно небольших уклонах местности. Так сели оползневого зарождения при развитии сдвигового селевого процесса при соответствующих инженерно-геологических и гидрогеологических условиях могут образовываться уже при уклонах местности свыше 15°–20°. В данном случае сель проходит соответствующие стадии развития сдвигового селевого процесса, начиная со стадии потери устойчивости потенциального селевого массива, начала его движения в виде оползневого тела, последующей трансформации в оползень-поток и преобразование в связанный структурированный селевой поток.

При развитии эрозионно-сдвигового селевого процесса формирование селей происходит при уклонах 10°–15°, в результате превышения жидким агентом переноса не размывающих скоростей: 0,2–1 м/с для тонкодисперсных грунтов (глина, суглинок, супесь, песок), 1–3 м/с для грубодисперсных грунтов (дресва, щебень, мелкий валун).

Формирование несвязанных наносоводных потоков происходит при развитии эрозионно-транспортного селевого процесса в руслах и тальвегах при уклонах 5° и менее. Определяющую роль в данном типе селевого процесса также имеет скорость движения жидкого агента переноса, которая напрямую влияет на скорость вовлечения и объемную концентрацию твердой фазы в наносоводном потоке.

В связи с относительно невысокими пороговыми значениями уклонов местности для развития селевых процессов, сели распространены повсеместно и встречаются, в том числе и на равнинных территориях, преимущественно спорадически. Однако интенсивность проявления селевых процессов и динамические характеристики селевых потоков напрямую связаны с относительными уклонами селевых бассейнов и селевых русел, в связи с чем, наиболее подвержены селеформированию именно горные районы, а также иные территории с высокой энергией рельефа, обусловленной значительными уклонами и относительными превышениями рельефа.

Для территории селеопасных районов о. Сахалин характерны ландшафты с относительно высокой энергией рельефа, что обуславливает активное развитие геодинамических процессов: оползней, осыпей, селей и т.д.

Современный рельеф Сахалина сформирован преимущественно третичным орогенезом, молодыми четвертичными движениями и типичен для двойных островодужных систем, в том числе Сахалино-Японской островной дуги. В геоморфологическом отношении территорию острова можно разделить на северную равнинную область, горную область южного и среднего Сахалина и юго-восточную область со сложной структурой рельефа.

Наиболее крупные орографические элементы о. Сахалин совпадают с геотектоническими структурами. Складчатые структуры разбиты сбросами продольного, поперечного и диагонального простираний, ими обусловлены конфигурация острова, прямолинейность береговой линии, а также направление основных орографических элементов.

Наиболее селеопасные районы острова приурочены к горным районам Среднего и Южного Сахалина, в связи с высокой энергией рельефа, глубиной и частотой его расчленения. Основными орографическими единицами данной области, обуславливающими ее макрорельеф, являются субмеридиональные горные сооружения Западно- и Восточно-Сахалинских гор, протянувшиеся вдоль западного и восточного побережья соответственно (рис. 1). Орогенез данных горных систем приурочен к Мезо-кайнозойской тектоно-магматической эпохе Альпийской складчатости, хотя в пределах эпохи данные альпиды формировались в различные фазы тектоногенеза и зачастую наследовали реликты рельефа [*Александров, 1973*].

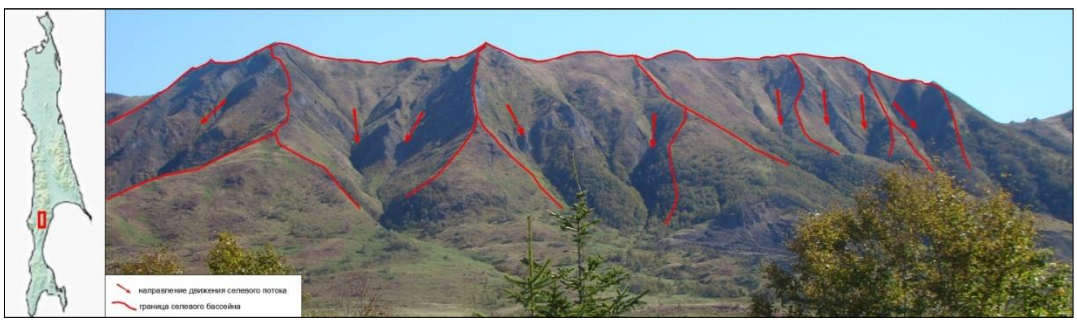


Рис. 1. Западно-Сахалинские горы. Хребет Жданко. Селевые бассейны

Селеопасными также являются протяженные участки побережья, представленные древними морскими аккумулятивными и цокольными террасами, сформированными под воздействием цикличной трансгрессии и регрессии уровня Мирового океана (рис. 2). На данных прибрежных территориях активно развиты процессы рассредоточенного селеформирования склоновых селей.

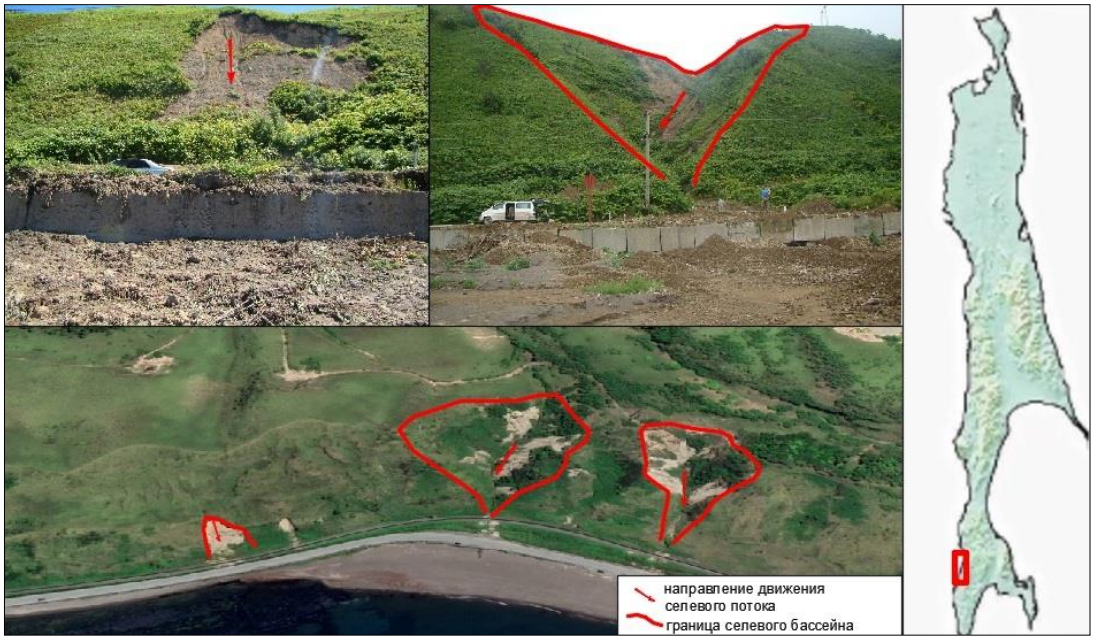


Рис. 2. Морская абразионная терраса на участке г. Невельск – п. Шебунино. Селевые очаги

Помимо макрорельефа территории, сформированного эндогенными процессами (тектоногенезом, орогенезом и др.), геоморфологические условия селеформирования обусловлены и мезорельефом территории, формирование которого, прежде всего, связано с активным развитием экзогенных процессов на территории острова, которые имеют широкое распространение и активно формируют эрозионно-денудационные формы мезорельефа (врезы, долины, оползневые цирки, овраги и т.д.), являющиеся селевыми бассейнами. Территория Сахалина занимает первое место на территории РФ по среднему относительному понижению рельефа территории (0,4 см/год согласно Г.В. Полунину), а также второе место по густоте речной сети (1,22 км/км^2 при средней густоте речной сети по России – 0,49 км/км^2), что свидетельствует об активном развитии экзогенных процессов гравитационного, водно-гравитационного и флювиального характера на данной территории.

Стоит отметить, что селевые процессы активно развиваются не только в горных районах острова и на уступах морских террас, но и на участках обширных слабонаклоненных предгорных долин, примыкающих к макросклонам горных сооружений. Сильно расчлененные горные сооружения острова, образуют множество V-образных долин водотоков первых порядков и врезов, которые при выходе в долинную часть (предгорные долины и педиплены) сохраняют свою селеносность.

Значительная часть большинства притоков крупнейших рек Сахалина (Тымь, Поронай, Сусуя), занимающих крупные седиментационные бассейны на территории острова, протекает в горной местности. Значительные уклоны в верховьях рек способствуют активному развитию склоновых экзогенных процессов (оползней, селей, осыпей и др.) в бортах долин, обеспечивающих поступление из очагов твердого питания рыхлообломочных горных пород в русла и тальвеги, и последующий вынос их в долинную часть рек во время паводков и формирования наносоводных потоков. На участках предгорных долин в реках также отмечается формирование наносоводных потоков и селевых паводков при выходе крупных консистентных грязевых и

грязекаменных селей из горной части, их последующем движении по руслу и осветлению.

Значительные уклоны водосборных бассейнов и русел (средневзвешенный уклон русла – 40–60‰; максимальный уклон – более 100‰, уклоны водосборов малых рек могут достигать 500 ‰) в период паводков обеспечивают минимальное время добегания и резкое увеличение скоростей и расходов при залповых выбросах, что особенно часто проявляется в период летних циклонов. Речной поток превышает неразмывающие скорости русловых и пойменных аллювиальных отложений, что приводит к перемещению значительного объема влекомых наносов, увеличению глубинной и боковой эрозии русла, абразии берегов влекомыми наносами. Прогрессирующее увеличение концентрации твердой фазы в потоке приводит к развитию эрозионно-транспортного селевого процесса, срыву аллювиальной отмостки русла и формированию несвязанных наносоводных потоков.

Геологическая среда селеопасных районов Сахалина

Геологическая среда зачастую является определяющим фактором для формирования селей. Многолетние наблюдения показывают, что возникновению селя при развитии сдвигового и эрозионно-сдвигового селевого процесса, зачастую, предшествует период длительной подготовки рыхлообломочного материала в селевых очагах. Потенциальные селевые массивы на территории Сахалина формируются преимущественно под воздействием сил физического выветривания. Как правило, мощность потенциального селевого массива соответствует глубине деятельного слоя сезонного замерзания-оттаивания и составляет 1,5–2 м. Таким образом, обеспеченность расхода селевого потока далеко не всегда соответствует обеспеченности расхода сформировавшего его водного потока. Данная закономерность превышения селевого расхода над расходом сформировавшего его паводка наблюдается и в других селеопасных районах тихоокеанского побережья, а также в континентальных горных районах.

Геологическая среда на территории о. Сахалин благоприятна для развития экзогенных процессов, в том числе селей. Потенциальные селевые массивы формируются преимущественно в неогеновых отложениях различного генезиса (пролювиальных, аллювиальных, коллювиальных, делювиальных), представленных раздельнозернистыми и слабо литифицированными горными породами (глинами, супесями, суглинками, алевролитами, аргиллитами и др.), а также в четвертичных и третичных отложениях аналогичного литологического состава. Данные горные породы характеризуется низкими физико-механическими свойствами и малой стойкостью к выветриванию, что приводит к их активному вовлечению в экзогенные процессы, в том числе селевые.

В геологическом отношении Сахалин сложен преимущественно третичными (реже мелового возраста) осадочными горными породами и в меньшей степени изверженными породами, на палеозойском складчатом фундаменте.

Палеозойские отложения состоят из стойких кристаллических и метаморфических сланцев нижнепалеозойского возраста, прорванных гранитами и порфиритами, кварцитов, туфогенных песчаников и мраморовидных известняков карбона. Фундамент представлен субконтинентальной корой уменьшенной толщины, что характерно для зон субдукции, в которых происходит стесывание нижней части континентальной коры при погружении океанической плиты под континентальную.

Меловые отложения имеют мезо-кайнозойскую складчатую структуру, образованы хорошо литифицированными стойкими осадочными породами – конгломератами, песчаниками, углистыми сланцами.

Третичные отложения широко развиты и достигают мощности 7–9 км. Они состоят из пресноводных прибрежных и морских осадков. Третичные породы также прорваны интрузиями диоритов, сиенитов и дайками базальтов и андезитов. Особенностью третичных отложений на территории Сахалина является их цикличный характер

отложения регрессивных и трансгрессивных свит морских и континентальных осадков, ритмично прослеживающийся на больших площадях. Подавляющая часть этих осадочных пород отлагалась или накапливалась на дне глубоководных морей и океанов, причем наиболее древние из этих пород отлагались на дне глубоководного океана, аналогичного современному Тихому океану. В более позднее время глубоководные океанические условия осадконакопления на месте Сахалина постепенно сменились более мелководными морскими, а затем прибрежно-морскими и даже пресноводно-континентальными угленосными.

Начиная примерно 60 млн лет назад, накапливавшиеся на территории современного Сахалина горные породы, формировались в периодически неоднократно сменявшихся морских сравнительно глубоководных условиях мелководными прибрежно-морскими и даже пресноводно-континентальными (угленосными) условиями осадконакопления.

Наиболее полно разрез третичных отложений представлен на западном побережье острова вблизи задугового бассейна, поскольку здесь фаза размыва, сменяющая фазу осадконакопления, протекала менее интенсивно. Наиболее подвержены развитию экзогенных процессов слабо литифицированные относительно молодые трансгрессивные свиты: мураямская (плиоцен) и холмская (миоцен), характеризующиеся морским мелководным характером накопления осадков. Данные свиты широко представлены в наиболее селеопасных районах территории о. Сахалин: Макаровском, Холмском и Невельском районах, и сложены горными породами, вмещающими наиболее активные селевые бассейны острова.

Следы морской деятельности отчетливо сохранились в морфологии и в геологии основных седиментационных бассейнов: они сложены морскими галечниками и песками, с прослойками глин, перекрытыми регрессивными толщами аллювиально-пролювиальных отложений. Во время паводков русловой и пойменный аллювий в пределах седиментационных бассейнов является основным источником твердого питания крупных наносоводных потоков, формирующихся при развитии эрозионно-транспортного селевого процесса.

Гидрологический и гидрогеологический режим селеопасных районов Сахалина

По своему агрегатному состоянию селевая масса является полиминеральной полидисперсной суспензией, состоящей из твердой фазы и жидкой среды. Таким образом, жидкий агент переноса является неотъемлемым компонентом геосистемы селевого бассейна, в связи с чем, селевые процессы относятся к экзогенным процессам водно-гравитационного или флювиального характера.

В пределах потенциальных селевых массивов, являющихся очагами твердого питания селей, при обводнении происходит значительное снижение физико-механических характеристик грунтов и как следствие потеря их устойчивости. Так, по мнению Ю.Б. Виноградова формирование селей при развитии сдвигового селевого процесса происходит при полном затоплении грунтов потенциального селевого массива, взвешивании их под действием силы Архимеда, последующем разуплотнении при гидростатическом взвешивании и потери сцепления частицами грунта (C=0) [*Виноградов, 1976*]. Iverson R.M. считает, что формирование селей происходит вследствие скачкообразного увеличения порового давления воды в грунтовом массиве, в том случае, когда поры полностью заполнены водой, а поступающая с водосборной площади в потенциальный селевой массив вода за счет не сжимаемости жидкости, заключенной в порах, приводит к резкому увеличению порового давления и разуплотнению грунтового массива [*Iverson, 1997*]. В данных случаях при развитии сдвигового селевого процесса, формируемые связанные грязевые и грязекаменные сели относятся к экзогенным процессам водно-гравитационного характера.

При развитии эрозионно-сдвигового и эрозионно-транспортного селевого процесса, формируемые связанные и несвязанные сели относятся к экзогенным процессам флювиального характера. Механизм превышения набегающего водного

потока неразмывающих скоростей впервые подробно описан в работах В.И. Тевзадзе [*Натишвили, 2007*]. В работах самого автора рассмотрено движение твердой фазы в селевом потоке, в том числе механизм вовлечения частиц в поток, их перемещения, многократного взвешивания и осаждения, а также контактные взаимодействия частиц в самом потоке.

Гидрометеорологические факторы обусловлены геопространственным окраинным положением о. Сахалин, расположенным в непосредственной близости от траектории движения тропических циклонов. В течение года над Сахалином проходит около 100 циклонов, вызывающих усиление ветра, пасмурную с осадками погоду, а в конце лета и начале осени наблюдаются выходы глубоких тропических циклонов (тайфунов), зарождающихся вблизи экватора.

Так, например, при прохождении тайфуна в сентябре 1947 г. в г. Долинск за сутки выпало 222 мм осадков при месячной норме 120 мм, в г. Южно-Сахалинск – 107 мм при месячной норме 106. Во время тайфунов «Оджин» и «Филлис» сумма осадков за период с 1 по 7 августа 1981 г. в г. Макаров составила 215 мм при месячной норме 99 мм, в Южно-Сахалинске – 220 мм, за этот же период в горной местности в пределах Сусунайского хребта на абсолютных отметках 400–500 м была зафиксирована сумма выпавших осадков 800–1200 мм [*Казаков,2008*].

Годовые суммы осадков в днищах долин и на морском побережье о. Сахалин изменяются от 400–500 мм на севере до 800–1200 мм на юге (согласно данным справочника «Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18 Дальний Восток»). В теплый период выпадает 65–80% годовой суммы осадков.

Геопространственное положение о. Сахалина

В геопространственном отношении территория о. Сахалин относится к Тихоокеанскому подвижному поясу, являющемуся переходной зоной от континента к океану, в пределах которой активно протекает конвергентное взаимодействие литосферных плит (океанической и континентальной) в виде субдукции – поддвига океанской коры под континентальную, ее погружение и плавление в мантии. Для данных зон характерен орогенез с формированием складчатых структур горных сооружений альпийского типа (альпидов) и прогибов, активно заполняющихся толщами терригенных отложений, а также развитая система глубоководных желобов, осложненных грабенами. Помимо складчатых структур в зонах активного магматизма происходит блоковая дислокация горных пород и формирование интрузивов, в том числе в виде протяженных островных дуг.

Зоны субдукции Тихоокеанского подвижного пояса обладают специфичным и закономерным проявлением процессов седиментации, магматизма, метаморфизма и тектонических деформаций, которые обусловливают проявление структурной, петрологической и металлогенической зональности.

Сахалин относится к западной части северо-западного сегмента Тихоокеанского подвижного пояса, и расположен в пределах Хоккайдско-Сахалинской геосинклинально-складчатой системы, которая отличается своей кайнозойской историей развития с преобладание процессов осадконакопления и редким, локализованным магматизмом. К примеру, в отличие от западной части северо-западного сегмента его восточная часть – Курило-Камчатская геосинклинально-островодужная система характеризуется кайнозойскими блоковыми дислокациями и активным магматизмом, что существенно повлияло на различие структурно-вещественных комплексов горных пород восточной и западной частей данного сегмента Тихоокеанского подвижного пояса.

Формирование современного макрорельефа территории о. Сахалин, его террейна и геологической среды происходило в период активных неотектонических движений. «Отделение» острова Сахалин от материка в географическом плане произошло при формировании задугового бассейна Татарского пролива, который активно раскрывался вместе с образованием центральной котловины Японского моря в период эоцен-

плейстоцена (50–1,8 млн л.н.), что сопровождалось обильным накопление терригенных толщ в осадочных бассейнах. В четвертичный период около 1,8 млн л. н. произошла инверсия, связанная со сменой северо-восточного направления регионального сжатия тектонических плит по направлению со стороны континента на широтное, что в значительной мере повлияло на рельеф территории острова и привело к формированию горных сооружений перекрытых мощными толщами легкоразмываемых терригенных пород.

Выводы

В пределах переходных зон «материк-океан» в связи с особенностями геопространственного положения, обуславливающим активный тепломассоперенос в гидросфере, атмосфере, литосфере и астеносфере, формируется специфический комплекс природных условий селеформирования.

Обширные селеопасные районы зачастую представлены множеством соседствующих или перекрывающих друг друга селевых бассейнов различных классов и стадии развития от элементарных склоновых селевых бассейнов в виде промоин и селевых рытвин на склонах, до крупных долинных селевых бассейнов, заложенных в горных врезах и долинах селеносных рек. Вне зависимости от размера и стадии развития селевой бассейн является открытой геосистемой, среди компонентов которой можно выделить рельеф в качестве основной энергетической составляющей, геологическую и гидрологическую среду как основной вещественный источник, а также агент переноса вещества и силового импульса.

На территории Сахалина, а также на схожих территориях Тихоокеанского подвижного пояса, именно благодаря геопространственному положению в переходной зоне «материк-океан» специфический комплекс пространственно-временных природных условий формирует компоненты геосистем селевых бассейнов.

Геопространственным положением Сахалина обусловлена высокая энергия мезорельефа территории (наличие горных сооружений, относительно высоких склонов морских и речных террас, долин, оврагов, врезов и др.), большая мощность и специфический состав слабо литифицированных горных пород в результате их цикличного осадконакопления в условиях переменного уровня Мирового океана, развитая гидрологическая сеть, высокая водность и общая увлажненность территории, а также сложные гидрогеологические условия в связи с окраинным положением региона его преобладающим муссонным климатом с высокой циклонической активностью.

Благодарности

Представленные результаты получены при финансовой поддержке государственного задания FWWW-2022-0001.

Список литературы

Александров С.М. Остров Сахалин. Москва: Наука. 1973. 182 с.

Виноградов, Ю. Б. Эрозионно-сдвиговый селевой процесс. // Селевые потоки. 1976. Сборник 1. С. 114–121.

Виноградов, Ю. Б. Сдвиговый селевой процесс и возникновение очагов. // Селевые потоки. 1977. Сборник 2.С. 27–39.

Генсиоровский Ю.В., Казаков Н.А., Рыбальченко С.В. Гидрометеорологические условия периодов массового селеобразования на о. Сахалин. // Труды Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Пятигорск. 2008. С. 95–98.

Геология СССР. Москва: Недра. 1970. Т. 33. Ч.1. 432 с.

Земцова А.И. Климат Сахалина. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1968. 197 с.

Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В. Грязекаменные сели катастрофических объемов в низкогорье острова Сахалин. // Труды Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Пятигорск. 2008. С. 45–48.

Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. Основы динамики селей. Тбилиси. 2007. 213 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. Т.18 Дальний Восток. Выпуск 4. Сахалин и Курилы. Под ред. М.Г. Васьковского. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 262 с.

Рыбальченко С.В. Селевая опасность для населенных пунктов сахалинской области. // ГеоРиск. 2013. № 3. С. 40–44.

Iverson R.M. The physics of debris flows // Reviews of Geophysics. 1997. Vol. 35. P. 245–296.

Овраги и оползни как один из факторов возникновения селей в условиях равнинных территорий

И.И. Рысин, И.И. Григорьев

Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия,
rysin.iwan@yandex.ru

Аннотация. Приводятся примеры селевых (селеподобных) потоков в условиях равнинной территории юга Вятско-Камского междуречья на востоке Русской равнины. Линейные, площадные и объемные показатели размывов в оврагах, оползнях и руслах малых водотоков рассчитывались на основе геодезических съемок с применением электронных тахеометров и беспилотных летательных аппаратов. Представлены данные о селевом потоке на пойменном овраге, возникшем вследствие прорыва искусственно созданных земляных плотин двух прудов в днище балки, когда объемы переносимого материала с водосборной площади в 164 га превышали 1000 м^3. Аналогичные процессы описаны для техногенных оврагов, возникших вследствие залпового прорыва весной большого объема водной массы, накопленного на водосборе площадью более 100 га, созданном дорожной насыпью. В результате максимальный прирост одного оврага составил 80,3 м, а другого, соответственно – 204 м. Приведены примеры размыва берегов малых рек в результате прорыва прудов, а также аномально высоких половодий и ливневых паводков на реках Агрызка и Кырыкмас. Для второй реки в табличной форме даны величины среднегодовых линейных, площадных и объемных размывов за последние 20 лет. Впервые приводятся результаты исследований оползня на левом склоне долины р. Вятка, начатые еще в начале 2000-х гг. Представлены результаты тахеометрической съемки за период с 2003 по 2023 г. Максимальные величины отступания стенки срыва оползня зарегистрированы в 2012 г. (17,1 м) и в 2005 г. (16,9 м). Суммарная величина отступания стенки срыва за прошедшие 20 лет составила 42,21 м.

Ключевые слова: *селевые потоки, овраги, русловые размывы, оползень, тахеометрическая съемка, Удмуртская Республика*

Ссылка для цитирования: Рысин И.И., Григорьев И.И. Овраги и оползни как один из факторов возникновения селей в условиях равнинных территорий. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 418–428.

Gullies and landslides as one of the factors of debris flows occurrence in the conditions of plain territories

I.I. Rysin, I.I. Grigoriev

Udmurt State University, Izhevsk, Russia, rysin.iwan@yandex.ru

Abstract. Examples of debris (debris flow-like) flows in the conditions of the plain territory of the south of the Vyatka-Kama interfluve in the east of the Russian Plain are given. Linear, area and volume indices of scour in ravines, landslides and small watercourse beds were calculated on the basis of geodetic surveys using electronic total stations and unmanned aerial vehicles. Data are presented on a debris flow on a floodplain gully, which occurred as a result of a breach of man-made created earthen dams of 2 pounds in the bottom of a beam, when the volume of transported material from a catchment area of 164 ha exceeded 1000 m^3. Similar processes have been described for technogenic gullies resulting from the volley bursting in spring of a large volume of water mass accumulated on a catchment area of more than 100 ha created by a road embankment. As

a result, the maximum growth of one gully was 80,3 m and the other, respectively, 204 m. Examples of erosion of small river banks as a result of pond bursting, as well as abnormally high floods and flash floods on the Agryzka and Kyrykmas rivers are presented. For the second river the values of average annual linear, area and volume scour for the last 20 years are given in tabular form. For the first time the results of the research of the landslide on the left slope of the Vyatka River valley, started in the early 2000s, are given. The results of total station survey for the period from 2003 to 2023 are presented. The maximum values of the landslide wall retreat were registered in 2012 (17,1 m) and in 2005 (16,9 m). The total retreat of the landslide wall over the past 20 years amounted to 42,21 m.

Key words: *debris flows, gullies, channel erosion, landslide, total station survey, Udmurt Republic*

Cite this article: Rysin I.I., Grigoriev I.I. Gullies and landslides as one of the factors of debris flows occurrence in the conditions of plain territories. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 418–428.

Введение

Сели характерны для горных территорий, но селеподобные процессы могут возникать и в условиях равнин. Селеподобные процессы на равнинных территориях обычно образуются при прорывах земляных плотин прудов, водохранилищ, а также при экстремальных паводках (в результате редких интенсивных ливней) и половодьях. В последние годы появляется все больше публикаций, подтверждающих наличие селевых (селеподобных) потоков на Восточно-Европейской равнине, «возникавших в результате обвально-осыпных гравитационных процессов, за счет интенсивного мелко-струйчатого смыва происходил лавинный «сброс» материала как с крутых бортов оврагов и балок, так и с прилегавших к ним поверхностей плакоров. Переувлажненный материал, скопившийся в днищах склоновых эрозионных форм рельефа, на участках крутого продольного профиля, под воздействием гравитации, превращался в очень динамичный селевой поток» [*Лаврушин и др., 2015, с. 71–72*]. Так, некоторые исследователи утверждают, что «многие паводки, проходящие по оврагам, балкам и мелким водотокам на Европейской части России, несущие карчи, наносы и мелкие камни, по своему составу являются не водными потоками, а несвязными селями» [*Виноградов, Виноградова, 2016, с. 50*]. Авторы приводят примеры несвязных селей в г. Киеве, в бассейне реки Оки и паводок, прошедший в ночь с 6 на 7 июля 2013 г. в Валдайском районе Новгородской области. Некоторые авторы [*Лапердин, Качура, 2010*; *Казаков, Генсиоровский, 2012*] относят карчеход к разновидности селевого потока, аргументируя это тем, что в обоих случаях в потоке имеется твердая составляющая.

В работе Е.Ю. Ликутова [*2016*] представлен анализ склоновых процессов равнинных территорий и их селеформирующих возможностях, которые сильно различаются. По селеформирующим возможностям он все склоновые процессы подразделил на пять групп: от наибольших до нулевых. К первой группе им отнесены «обвальные, осыпные, лавинные, солифлюкционные – самостоятельно и во взаимодействии с дефлюкцией процессы». В пятую, нулевую группу включен делювиальный смыв, отличающийся тонким механическим составом отложений и незначительным объемом их поступления в русловые потоки [*Ликутов, 2016, с. 147*].

Материалы и методы

Современные экзогенные геоморфологические процессы, как один из факторов развития селей, на территории Удмуртской Республики (УР) представлены различными видами (рис. 1). Прежде всего выделяется активным развитием почвенная и овражная

эрозия, русловые размывы берегов рек. Менее активно развиваются оползневые и абразионные процессы, крип и другие.

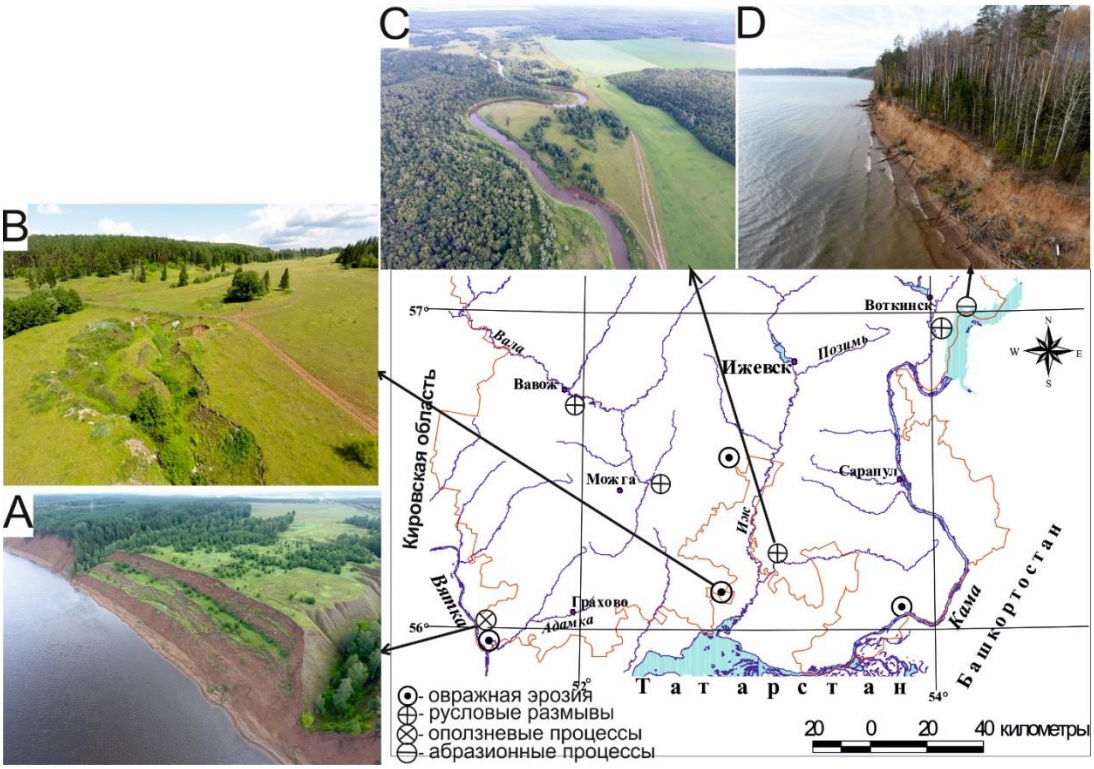


Рис. 1. Расположение участков по мониторингу современных экзогенных процессов на юге Удмуртии: A – оползень на р. Вятка (снимок с квадрокоптера 2019 г.), B – пойменный овраг на ключевом участке у д. Юмьяшур (2019 г.), C – размываемый участок р. Кырыкмас у д. Тавзямал (2019 г.), D – абразионный участок Воткинского водохранилища у д. Галево (2021 г.)

В работе использованы материалы многолетних наблюдений за развитием более 150 оврагов в пределах 28 ключевых участков в период с 1978 по 2023 г. на юге Вятско-Камского междуречья [*Рысин, 1998; Рысин и др., 2018, 2023*]. Наряду с мониторингом овражной эрозии нами осуществляются исследования горизонтальных русловых деформаций на реках разной величины и водности в пределах 55 ключевых участков, начиная с 1999 г. [*Рысин, Петухова, 2006; Рысин и др., 2020*]. Оползневые процессы на территории Удмуртии представлены преимущественно на крупных реках (Чепца, Вятка, Кама) и характеризуются чаще всего наличием большого количества относительно небольших блоков оползания. Изучение оползневых процессов проводится на примере размываемого участка левого берега р. Вятка (пр. приток р. Кама) с 1999 г. у с. Крымская Слудка Кизнерского района УР. Данные ежегодных полевых исследований дополняются гидрометеорологической информацией, предоставляемой Удмуртским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УЦГМС).

Методы исследования предусматривают плановую геодезическую съемку вершинной части оврагов, включая уступы, бровки, тальвег и поперечные профили с применением электронного тахеометра. На основе повторной тахеометрической съемки оцениваются линейный прирост и изменения плановой конфигурации бровок и тальвегов, их поперечного сечения по длине оврага. Кроме того, в наших исследованиях подсчитывался объем выносимого материала в пределах активно размываемой вершинной части оврагов. Объемный прирост оврагов определялся двумя методами:

1) классический метод с помощью построения поперечных профилей через равные расстояния (5–10 м) электронным тахеометром. С помощью программного комплекса «Кредо» (Россия) создается цифровая модель рельефа (ЦМР) (метод триангуляции).

Объем вычисляется как разница двух поверхностей – по бровке и по дну. В результате получаем картограмму или по сетке квадратов или по контуру. Рассчитанные значения сравниваются с предыдущими. Получаемая разница и будет объемом вынесенного материала за текущий календарный год [*Григорьев, 2009*];

2) фотограмметрический метод с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). В результате обработки снимков БПЛА в программе Agisoft Metashape Professional (Россия) получаем ортофотоплан и ЦМР, жестко привязанную к требуемой системе координат (СК) (условная СК при использовании своих реперов или МСК-18 (местная система координат региона 18) при использовании ГНСС-приемников EFT M1 (Россия). В дальнейшем ортофотоплан можно использовать в качестве подложки для проведения линейных измерений в различных ГИС (MapInfo, ArcGis и т.п.) и САПР (Автокад, Кредо). ЦМР можно использовать для вычисления объемов в программе «Кредо» (1-й метод). Фотограмметрический метод используется в наших исследованиях с 2019 г.

Определение темпов линейного прироста на большинстве оврагов производится путем измерения расстояния от вершины оврага до предварительно установленного репера. Точность измерений составляет ±0,01 м. На большинстве участков (126 вершин оврагов) наблюдения проводятся один раз в год (летом), а на девяти ключевых участках (42 оврага) измерения осуществляются дважды: в мае, после снеготаяния и в октябре или начале ноября, после окончания сезона летнее-осенних ливней [*Рысин, 1998*].

Одним из методов изучения динамики рельефа является метод стержней и марок. Сущность его заключается в проведении повторных замеров расстояний до неподвижных стержневых реперов или марок. Металлические стержни (реперы) забиваются вертикально в грунт на такую глубину, чтобы обеспечить полную их устойчивость и на такое расстояние от береговой линии, чтобы они могли длительно существовать в условиях размыва (от 15 до 25 м). Измерения осуществляются по строго определенному направлению с помощью мерной ленты. В зависимости от длины размываемого участка излучины количество реперов (или марок) варьировалось от 2–3 до 5–10. Для определения скоростей размыва на всех ключевых участках было заложено около 300 реперов и марок, а в пределах 30 участков осуществлялась тахеометрическая съемка размываемого берегового уступа. Геодезические приборы для проведения указанных работ регулярно совершенствовались. В период 1978–2002 гг. это были оптико-механические геодезические инструменты (теодолиты Т30 и 2Т30). С 2003 г. начали использовать электронные инструменты с лазерными дальномерами (тахеометры «Trimble 3305», затем «Nikon NPR-332»).

С 2019 г. для изучения эрозионных процессов на большинстве ключевых участков нами применяется спутниковый приемник «EFT» вместе с квадрокоптерами «DJI Phantom 4» и «Autel Evo II PRO». Снимки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) отличаются сверхвысоким пространственным разрешением и имеют высокую скорость получения. Имеются и определенные недостатки: время полета ограничено емкостью батареи (20–30 мин в зависимости от модели), площадь исследуемого участка относительно небольшая (до 100 га), зависимость от погоды (ветер, осадки). Тем не менее, для изучения экзогенных процессов данные параметры вполне удовлетворяют. Для повышения точности ортофотопланов нами используется привязка к наземным маркерным пунктам, координаты которых определяются с помощью спутниковых приемников. Таким способом точность ортофотопланов достигает 5–10 см. Для производства аэрофотосъемочных работ имеющимися в нашем распоряжении квадрокоптерами применялись следующие параметры: высота полета в диапазоне 50–80 м, перекрытие снимков в продольном направлении – не менее 80%, в поперечном – не менее 70%. Для съемки линейных объектов требуется выполнение не менее 3 галсов. Последующая обработка аэрофотоснимков проводится нами в программе Agisoft Metashape Professional. В исследовании выполнялось построение 3d-моделей, ортофотопланов и цифровых моделей местности. Подготовка топографических планов, расчет площадей и объемов размывов осуществляется с использованием программного комплекса «Кредо» [*Григорьев, Рысин, 2023*].

Результаты и их анализ

Селеподобные процессы нами были зафиксированы на овраге, возникшем на пойме р. Варзинка (пр. приток р. Иж, впадающей справа в р. Кама) у д. Юмьяшур Алнашского района УР. Овраг возник вследствие прорывов искусственно созданных земляных запруд в устьевой и в средней части балки. Площадь нижнего пруда около 1 га, средняя глубина не более 0,5 м, максимальная у плотины – 1,2 м. На расстоянии около 600 м выше от 1-й плотины расположен 2-й пруд, площадью зеркала воды летом (июль) около 0,8 га, а весной, возможно до 1,5–2 га (рис. 2). На рисунке хорошо различается место прорыва верхней дамбы в южной части, такая же картина сохраняется на космических снимках в июле 2016 и 2020 гг. Более поздние снимки плохо читаются из-за наличия облаков. Общая площадь овражного водосбора – 164 га. Абсолютная высота ближайшего водораздела равна 162,6 м, а отметка уреза реки, где возник овраг, составляет 70 м. Глубина местного базиса эрозии здесь превышает 90 м. Разница отметок вершины оврага относительно его устья – 8 м. До 2011 г. овраг активно рос одной вершиной, в 2012 г. появилась 2-я вершина, а с 2013 г. прирост осуществляется тремя отвершками [*Григорьев, Рысин, 2022*]. Максимальная глубина его при вершине в 2023 г. составила 2,5 м, а ширина в трех метрах от вершин – чуть более 7 м, в 25 м от вершин ширина оврага достигает 22 м, а глубина – 4 м. Глубина оврага в вершинной части в последние 3 года уменьшается, а ширина, наоборот – возрастает.

Рис. 2. Место расположения двух земляных запруд в балке и вид пойменного оврага на космоснимке в июле 2013 г.

Суммарный линейный прирост оврага за 2007–2023 гг. составил 155,6 м, а в первый год прорыва земляных запруд в 2007 г. он вырос на 53 м. Второй максимум прироста был зарегистрирован на следующий 2008 г. (38 м), что было связано с повторным прорывом двух земляных дамб (рис. 3). При этом в овраге возникали селеобразные потоки с высокой концентрацией твердого материала (размытые суглинки, древесина, солома, коммунальные бытовые отходы), выносимого в русло малой реки. Конуса выноса в устье оврага не было зафиксировано, поскольку весь твердый материал выносился руслом реки.

Если до 2011 г. для оврага определялся в основном годовой линейный прирост, а также ширина и глубина оврага при вершине, то начиная с 2012 г. на овраге стала проводиться детальная тахеометрическая съемка с получением линейного, площадного и объемного прироста оврага (таблица 1). Анализ данных показывает, что за последние 11 лет активность роста оврага сокращается, что возможно объясняется отсутствием средств у владельца прудов на ремонт верхней земляной плотины, где не происходит

накопления достаточных объемов водной массы. Если максимальные скорости линейного прироста отмечены в 2015 (8,1 м) и в 2013 гг. (6,3 м), то минимальный зарегистрирован в 2020 г. (0,3 м). Аналогичным образом изменялись площадные и объемные величины приростов: так, в 2015 г. площадь оврага возросла на 112,8 м^2, а объем, соответственно, на 242,8 м^3. Рассчитанный коэффициент корреляции подтвердил очень высокую связь между линейным и площадным приростом оврага (r = 0,939), еще более высоким коэффициент связи получился между линейным и объемным приростом (0,966), что хорошо демонстрирует график связи между ними (рис. 4).

A B

Рис. 3. Овраг на пойме р. Варзинка, возникший в результате прорыва двух земляных дамб прудов: А – июль 2008 г.; В – июль 2023 г.

Таблица 1. Результаты многолетних наблюдений за линейным, площадным и объемным приростом оврага на пойме р. Варзинка

Год	Линейный прирост, м	Прирост площади, м^2	Прирост объема, м^3
2013	6,3	103,4	226,6
2014	2,5	47,2	90,2
2015	8,1	112,8	242,8
2016	2,4	39,9	80,3
2017	0,8	19,3	43,3
2018	1,0	13,8	24,1
2019	1,8	20,8	40,4
2020	0,3	1,0	2,6
2021	1,5	17,9	31,5
2022	4,9	36,9	108,7
2023	1,7	14,5	27,4

На основе полученного уравнения связи между объемом размываемого почвогрунта в овраге и его годовым линейным приростом нами были рассчитаны объемы вынесенного твердого материала в 2007 и 2008 г., когда были отмечены экстремальные приросты. Объем вынесенного из оврага размытого материала весной 2007 г. составил 1659 м^3, а весной 2008 г., соответственно – 1188 м^3. Сюда не включены объемы твердых бытовых отходов, выбрасываемых местными жителями в вершины оврагов. Объемы весенних селевых потоков в пойменном овраге значительно превышают объемы селевого потока, описанные в двух ручьях Новгородской области в результате аномального ливня в июле 2013 г. [*Виноградов, Виноградова, 2016, с. 52–53*].

Подобный процесс мы зафиксировали также весной 2011 г. на овраге у с. Тарасово Сарапульского района УР, когда неглубокая лощинообразная балка была превращена в активный овраг длиной 204 м, возникший за счет залпового сброса талых, буровых вод и нефти (рис. 5*А*). Глубина оврага в средней части порядка 2–2,5 м, ширина его в устьевой части изменялась в пределах от 5–6 до 10–12 м, а глубина достигала 3–4 м [*Григорьев, Рысин, 2017*]. Вершина оврага заканчивалась у бетонного водопропуска, сооруженного на асфальтированном шоссе. Насыпь автодороги высотой около 2 м создает искусственный водосбор площадью около 100 га. В пределах водосбора находились добывающие нефть скважины и буровые, окруженные в основном

пахотными угодьями. Возможно, что утечка нефти произошла вследствие порыва трубопроводов, вскрытых оврагом. Следы нефти отчетливо сохранялись в днище и на стенках оврага вплоть до лета 2012 г., а в июле 2013 г. следов нефти в овраге обнаружено не было. В настоящее время развитие оврага продолжается за счет размывания ежегодно насыпаемых грунтов при его вершине, а склоны его в средней и нижней части постепенно зарастают.

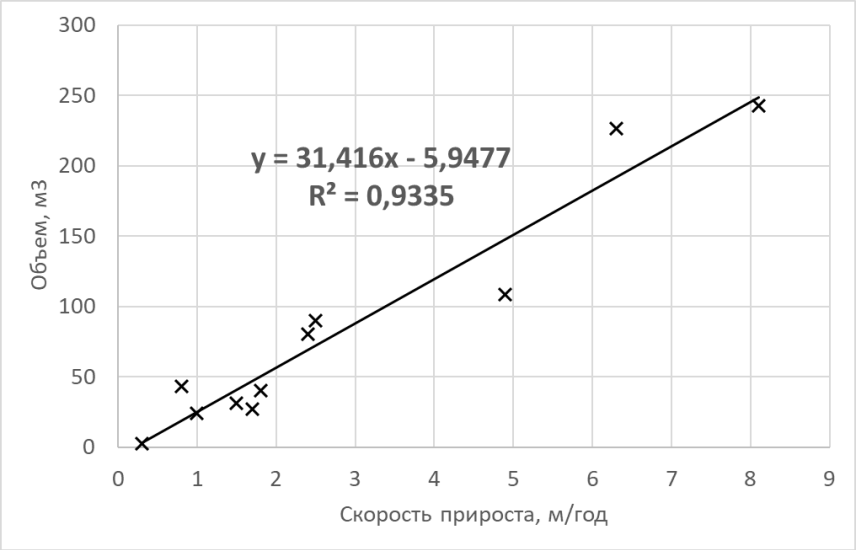


Рис. 4. График зависимости между объемом размываемого грунта в овраге и скоростью его линейного прироста за 2013–2023 гг.

В условиях аномального весеннего половодья и интенсивных ливней селеподобные потоки в оврагах способны разрушать и перемещать бетонные сооружения, что нами было зафиксировано летом 2001 г. в одном из оврагов близ с. Соколовка Сарапульского района УР, развивающегося на крутом правом склоне долины р. Камы (рис. 5*B*).

Вторым рекордсменом в линейном приросте является приводораздельный овраг, развивающийся в делювиально-солифлюкционных лессовидных суглинках в 0,5 км восточнее с. Мушак Киясовского района УР. Его среднегодовая скорость роста за 15-летний период развития (1982–1997 гг.) составила 38,3 м/год (рис. 6*A*). Длина его от устья до вершины, измеренная по тальвегу в 1997 г., была равна 574,5 м. Глубина вреза в нижней части достигает 12–15 м, ширина до 20–25 м, крутизна стенок иногда превышает 50°. Овраг вскрыл водоносный горизонт и на его дне образовался постоянный водоток. Овраг образовался весной 1982 г. вследствие строительства дороги с земляной насыпью высотой около 2 м, поскольку водопропуски не были предусмотрены проектом, то весной земляная дамба образовала водосборный бассейн, площадью около 110 га. Если в 1982 и 1983 г. запасы накопленных на водосборе талых вод были незначительные, то ниже прорыва дамбы возник овраг длиной 36,8 м, на следующий год он вырос еще на 20,8 м. Аномальные приросты оврага были отмечены в 1984 (63,2 м) и в 1985 гг. (80,3 м), когда максимальные расходы половодья на большинстве рек УР превышали средние многолетние значения в 10–11 раз [*Рысин, 1998*]. Объемы выносимого материала из оврага в то время нами не рассчитывались, но судя по размерам оврага, они были достаточными, чтобы формировать настоящий селевый поток. В 2001 г. указанную дорогу реконструировали и в месте прорыва дамбы был сооружен бетонный водопропуск с водонакопителем, в результате чего активная стадия развития оврага завершилась, и он начал постепенно зарастать (рис. 6*B*). Среднегодовая скорость его роста за 1998–2023 гг. составила всего 1,87 м/год. Если в 1998–2000 гг. овраг еще активно

развивался со средней скоростью около 6 м/год, то с 2001 г. темпы годового прироста были незначительные, часто близкие к нулевым.

А В

Рис. 5. Последствия катастрофического роста придорожного оврага ниже водопропуска весной 2011 г. у с. Тарасово Сарапульского района УР (А), вершина активного оврага с разрушенным бетонным водопропуском на правом крутом склоне долины р. Кама (В)

Селевые потоки могут возникать в оврагах и во время выпадения аномально интенсивных ливней. Подтверждением тому может послужить ливень 19 июня 2012 г., когда за 12 часов по данным УЦГМС в г. Ижевске выпало 75 мм осадков. В результате в отдельных районах города образовались овраги протяженностью около 20 м и глубиной до 1,5 м, а на некоторых асфальтированных улицах появились даже промоины [*Григорьев, Рысин, 2017*].

А В

Рис. 6. Верхняя часть активно растущего оврага перед дорожной насыпью в 1999 г. (А) и его зарастающая средняя часть в 2014 г. (В)

Наряду с оврагами, селевый поток может возникнуть на малых и очень малых реках в результате размывов берегов во время экстремальных половодий или ливневых паводков. В этих условиях дополнительным поставщиком твердого материалы с водосбора малой реки выступают овражно-балочные системы с наличием земляных запруд. Примером такого размыва может послужить р. Агрызка (пр. приток р. Иж), имеющей длину 33,5 км с меженным расходом 95% обеспеченности в устье 0,054 м^3/с (г. Агрыз). Наблюдения за размывом осуществляются у д. Баграш-Бигра с 2001 г. Если средние годовые размывы обычно варьируют в пределах 0,1–0,4 м, то максимальная величина размыва в 2003 г. достигла 8,1 м, что явилось результатом прорыва земляной плотины пруда, расположенной выше ключевого участка на расстоянии около 1 км.

О величине объемов размытого материала на малых реках, где осуществляется тахеометрическая съемка, могут послужить данные по р. Кырыкмас (лев. приток р. Иж), где наблюдения проводятся с 2003 г. у д. Тавзямал Киясовского района УР (рис. 1*В*). Длина реки 107,8 км, меженный расход 95% обеспеченности в устье составляет 0,734 м^3/с. Ключевой участок расположен около 10 км выше устья реки. Максимальная длина съемки береговой линии в 2003 г. составила 351 м, средняя высота размываемого берегового уступа, соответственно 6,8 м (рис. 7*А*). Наибольшие величины объемов

размыва были отмечены во время высоких половодий в 2010 (2367 м^3), в 2012 (2136 м^3) и в 2021 г. (4058 м^3). Вместе с размытым суглинистым материалом в водном потоке переносился и древесный материал в виде карчи (рис. 7*B*). Площади размывов в указанные годы изменяются от 300–500 м^2 и более. Максимальные линейные размывы (ширина) варьируют в пределах 4,7–8,1 м (таблица 2).

A

B

Рис. 7. Интенсивно размываемый участок на р. Кырыкмас в июле 2023 г. (А) и размыв деревьев с корневой системой р. Пызеп (пр. приток р. Чепца) у д. Бани Балезинского района УР (В)

Таблица 2. Данные тахеометрической съемки на р. Кырыкмас

Годы	Показатели участка				
	Длина линии размыва вдоль русла, м	Средняя ширина размыва, м	Максимальная ширина размыва, м	Площадь размыва, м^2	Объем размыва, м^3
1	2	3	4	5	6
2004	284,2	0,75	2,76	213,43	1088
2005	145,6	0,42	2,34	60,64	416
2006	128,3	0,74	2,41	94,77	646
2007	147,5	0,71	3,82	104,96	712
2008	102,5	0,99	3,06	101,53	690
2009	182,1	0,46	1,52	84,14	570
2010	148,78	2,34	4,74	348,81	2367
2011	173,26	1,24	3,08	214,5	1461
2012	209,4	1,5	5,01	313,9	2136
2013	170,6	0,88	3,04	149,57	1021
2014	142,33	0,71	1,98	100,99	687
2015–2016	189,47	2,12	5,16	402,14	2731
2017	192,34	1,16	2,43	222,28	1518
2018	129,12	0,42	1,7	53,96	369
2019	228,7	0,75	3,59	174,1	1184
2020	121,8	0,44	1,38	54,1	368
2021	244,2	2,44	8,14	596,8	4058
2022–2023	276,8	0,77	3,4	212,2	1443

Селевый поток может возникнуть и на крутых склонах речных долин, в местах возникновения оползней. Такой оползень образовался в 2001 г. на левом склоне долины р. Вятка, сложенном плейстоценовыми лессовидными суглинками, расположен на северной окраине с. Крымская Слудка Кизнерского района УР (рис. 1*A*, 8).

Тахеометрическая съемка оползня ежегодно проводится с 2003 г., в этот год его объем составил 101 110 м^3, а площадь, соответственно – 12 138 м^2. В 2022 г. объем увеличился до 112 770 м^3, а площадь – до 14670 м^2. Относительная высота бровки склона над урезом воды составляет в среднем 37 м. Крутизна верхней стенки срыва оползня в 2003 г. была практически отвесной и составляла порядка 60–70°, в 2022 г. она оказалась сильно выположенной, изменяясь в пределах 40–50°.

А В

Рис. 8. Вид оползневого тела со стенкой срыва на склоне долины р. Вятка в июле 2001 г. (А), общий вид верхней ступени оползня и стенки срыва в июле 2013 г. (В)

Результаты исследований показывают, что длина оползневого тела постепенно увеличивается, если в 2003 г. она была лишь 220 м, то в 2023 г. уже составила 290 м. Максимальные величины отступания стенки срыва оползня зарегистрированы в 2012 (17,1 м) и 2005 г. (16,9 м). Существенными они были также в 2011 (7,8 м), в 2009 (5,8 м) и 2023 г. (5,5 м). В указанные годы значительными были и площади оползневого тела. Суммарная средняя величина отступания стенки срыва за прошедшие 21 год составила 42,21 м.

Выводы

1. На основе приведенных выше данных можно сделать заключение о наличии селевых (селеподобных) потоков и в условиях равнинных территорий Восточно-Европейской (Русской) равнины.
2. Экстремальные половодья и паводки, проходящие по оврагам, балкам, малым и очень малым водотокам на Русской равнине, способные переносить большие объемы карчи, твердых наносов и всевозможных бытовых отходов, по своему составу и характеру проявления можно отнести к селеподобным явлениям.
3. Необходимое условие образования селеподобных явлений на равнинах – экстремальные половодья весной, аномально интенсивные осадки в летне-осенний период и наличие дополнительных объемов воды, накопленных в прудах овражно-балочных водосборов.
4. Наряду с оврагами и малыми водотоками, высокими селеформирующими возможностями обладают оползни, возникающие на крутых и высоких склонах крупных речных долин.
5. В связи с большим ущербом, который наносят селевые процессы окружающей среде и хозяйственной деятельности, их изучение на равнинах имеет как научную, так и практическую значимость, особенно в целях защиты и прогнозирования.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00194, https://rscf.ru/project/23-27-00194.

Список литературы

Виноградов А.Ю., Виноградова Т.А. Селевые явления на равнинных территориях (на примере Новгородской области) // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Материалы IV Международной конференции (Россия, г. Иркутск – пос. Аршан (Республика Бурятия), 6–10 сентября 2016 г.). – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. – С. 50–54.

Григорьев И.И. Использование программного комплекса «Credo» для определения объемов и площадей оврагов // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2009. Вып. 2. С. 141–145.

Григорьев И. И., Рысин И. И. Использование беспилотных авиационных систем в исследовании опасных эрозионных процессов на территории Удмуртии. // Природные опасности: связь науки и практики: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., посвящен. 150-летию Михаила Ивановича Сумгина (Саранск, 18–19 мая 2023 г.) / отв. ред. Д. Е. Глушко. – Саранск: Изд-во Морд. ун-та, 2023. – С. 136–142.

Григорьев И.И., Рысин И.И. Многолетняя динамика линейного, площадного и объемного прироста оврагов на территории Удмуртии // Геоморфология, 2022, том 53, № 4, с. 56–74.

Григорьев И.И., Рысин И.И. Техногенные овраги на территории Удмуртии. – Казань: Изд-во Удмурт. ун-та, Изд-во АН РТ, 2017. – 190 с.

Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В. Паводки на малых реках низкогорья южного и среднего Сахалина как несвязные селевые потоки. Труды Второй конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». М., Изд. МГУ, 2012 – С. 49–50.

Лаврушин Ю.А., Бессуднов А.Н., Спиридонова Е.А., Кураленко Н.П., Недумов Р.И., Холмовой Г.В. Палеозоологические катастрофы в позднем палеолите центра Восточной Европы. – М.: ГЕОС, 2015. – 88 с.

Лапердин В.К., Качура Р.А. Геодинамика опасных процессов в зонах природно-техногенных комплексов Восточной Сибири. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010. – 312 с.

Ликутов Е.Ю. Селеформирующие возможности склоновых процессов // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Материалы IV Международной конференции (Россия, г. Иркутск – пос. Аршан (Республика Бурятия), 6–10 сентября 2016 г.). – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. – С. 143–148.

Рысин И.И. Овражная эрозия в Удмуртии: монография / И. И. Рысин, Удмурт. гос. ун-т. – Ижевск: Изд-во Удмурт. ун-та, 1998. – 274 с.

Рысин И.И., Голосов В.Н., Григорьев И.И., Зайцева М.Ю. О причинах современного сокращения темпов роста оврагов в Удмуртии // Геоморфология, 2018, № 1. С. 75–87.

Рысин И.И., Григорьев И.И., Пермяков М.А. О результатах многолетних исследований овражной эрозии на юге Вятско-Камского междуречья // XXXVII пленум геоморфологической комиссии Российской академии наук: тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Иркутск, 5–10 сент. 2023 г.) / отв. ред. Ю. В. Рыжов. – Иркутск: Изд-во Ин-та земной коры СО РАН, 2023. – С. 293–298.

Рысин И.И., Петухова Л.Н. Русловые процессы на реках Удмуртии (монография). Ижевск: Ассоциация «Научная книга», 2006. – 176 с.

Рысин И.И., Григорьев И.И., Петухова Л.Н., Андреев О.Н. Результаты многолетних исследований русловых размывов на реках Удмуртии // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 7. Сборник трудов / под ред. Р.С. Чалова. М.: Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. 2020. С. 269–280.

Debris flow phenomenon: A potential outcome of the changing climatic pattern in Northern Pakistan

S. Sadiq, M.A. Janjua, H. Ali, A.A. Awan

Geological Survey of Pakistan, Islamabad, Pakistan, simonsadiq@yahoo.com

Abstract. Climate change is not a theory, we are currently undergoing an era where it is being experienced. The 2022 catastrophic rains and the resultant destruction they caused in Pakistan are seen by the experts as a glimpse of what lies ahead. Like other parts of the world, the changing climatic patterns are going to influence Pakistan in a number of ways including their impact on natural disasters in the country. Studies have projected the rates of warming in Pakistan greater than the global average. The 2022 field campaign of Geological Survey of Pakistan carried out in Gilgit-Baltistan observed that debris flows constituted about 75% of the mass-movement hazards in response to July-August catastrophic rains; about 100% of the mass-movement related casualties were caused by the debris flow phenomenon; anthropogenic activities further aggravate the situation by inducing the mass movement phenomenon. The increasing debris flow events will not only affect the local communities but will also have long-term effects on the downstream communities e.g., enhanced rates of sedimentation will reduce the storage capacities of downstream water reservoirs. A clear relationship has been observed between debris flow events and the stream gradient but a number of other factors need to be considered as well. Much more work needs to be done for a reliable debris flow hazard assessment and mitigation strategies in northern Pakistan.

Key words: *debris flow, climate change, precipitation, catchment, digital elevation model*

Cite this article: Sadiq S., Janjua M.A., Ali H., Awan A.A. Debris flow phenomenon: A potential outcome of the changing climatic pattern in Northern Pakistan. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 429–444.

Феномен селевых потоков: потенциальный результат изменения климатического режима в Северном Пакистане

С. Садик, М.А. Джанджуа, Х. Али, А.А. Аван

Геологическая служба Пакистана, Кветта, Пакистан, simonsadiq@yahoo.com

Аннотация. Изменение климата — это не теория, в настоящее время мы переживаем эпоху, когда это происходит на собственном опыте. Катастрофические дожди 2022 г. и вызванные ими разрушения в Пакистане рассматриваются экспертами как проблеск того, что ждет нас впереди. Как и в других частях света, изменение климатических условий будет влиять на Пакистан различными способами, включая воздействие стихийных бедствий в стране. Согласно исследованиям, темпы потепления в Пакистане превышают среднемировые. В ходе полевой кампании Геологической службы Пакистана, проведенной в Гилгит-Балтистане в 2022 г., было отмечено, что селевые потоки составляют около 75% опасных массовых явлений, вызванных катастрофическими дождями в июле-августе; около 100% жертв, связанных с массовым движением, были вызваны селевыми потоками; антропогенная деятельность еще больше усугубляет ситуацию, провоцируя массовое движение. Участившиеся случаи схода селевых потоков не только затронут местное население, но и окажут долгосрочное воздействие на расположенные ниже по течению населенные пункты, например, увеличение скорости осадконакопления приведет к снижению емкости водохранилищ,

расположенных ниже по течению. Наблюдается четкая взаимосвязь между селевыми потоками и уклоном потока, однако необходимо учитывать и ряд других факторов. Для достоверной оценки опасности селевых потоков и разработки стратегий смягчения их последствий в северном Пакистане необходимо проделать еще много работы.

Ключевые слова: *Селевые потоки, изменение климата, осадки, водосбор, цифровая модель рельефа*

Ссылка для цитирования: Садик С., Джанджуа М.А., Али Х., Аван А.А. Феномен селевых потоков: потенциальный результат изменения климатического режима в Северном Пакистане. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 429–444.

Introduction

Pakistan being located in a tectonically active regime present the development of plate boundaries that involve collision, subduction, obduction and strike-slip faulting a variety of plate boundaries [*Farah et al., 1984*]. Northern Pakistan is prone to seismic and mass movement hazards due to its particular terrain and tectonic setup; mass movement phenomenon ranges from rockfall, slides, debris flow, snow avalanche and Glacial Lake Outburst Flood (GLOF). Many studies have documented the plenty of landslides in the region [*Ahmed et al., 2015; Akhtar et al., 2017; Basharat et al., 2014; Hewitt, 1998, 1999; Hussain & Awan, 2009; Latif et al., 2013, 2015, 2016; Nash et al., 1985; Owen et al., 1996; Sadiq et al., 2012, 2021; Sadiq & Momose, 2017; Sadiq & Shah, 2016a, 2016b; Sato et al., 2007; Shroder & Bishop, 1998; Torizin et al., 2018*]. These hazards continuously pose a threat to life and infrastructure in Gilgit-Baltistan, Azad Kashmir and Khyber Pakhtunkhwa regions of Pakistan; they not only transform the landform through slope denudation [*Gilchrist et al., 1994*] also affect the communities either through stream blockage and/or excessive sedimentation [*Hewitt, 2006; Korup, 2004, 2005; Roering et al., 2005*].

The areas affected by mass movement induced by 2022 catastrophic rains in Gilgit-Baltistan province were visited on the basis of information gathered from local administration. Almost all the cases were reported along the Karakoram Highway (KKH), Nagar District (Nagar and Bar valleys), Ghizer Valley, Ishkomen Valley and Yasin Valley; so, these areas were covered through brief field visits at each site to gather first-hand information of the events. All these areas are drained by Ghizer and Hunza rivers (Gilgit River is another name for the Ghizer River). Fig. 1 presents the location plan of the above-mentioned areas in the context of Pakistan's country map.

Gilgit-Baltistan's elevation ranges from 918-8392 meters above sea level (Fig. 1*b*). The climate greatly impacted by its mighty mountain ranges; the eastern portion comprising western Himalayas is relatively moist but northern and north-western parts comprising Karakoram and Hindukush ranges are out of the reach of monsoon rains, and present a dry climate [*Ashraf et al., 2014*]. The Himalayan regions may be classified as semi-arid while the northern and north-western drier regions represent an arid climate. Based on the 1930–2019 data, the mean annual rainfall in Gilgit-Baltistan has been calculated 208 mm with April as the wettest month with 35 mm while the driest month is November that experiences only 5mm of average rainfall; similarly, the hottest month is July with 27.2 ºC average temperature while January being the coldest month has an average monthly temperature of 1.8 ºC [*Khan et al., 2020*]. Again, the mountainous terrain offers much variation in precipitation level over a short geographic distance. The total ice reserves in Pakistan contributed by Karakoram, Hindukush and Himalayan ranges are 87%, 10% and 3% respectively [*Ashraf et al., 2014*].

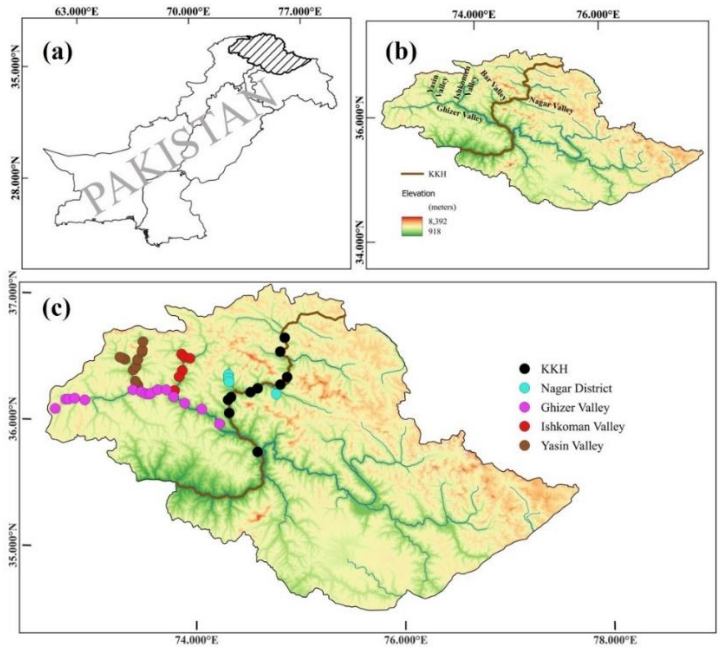


Fig. 1. Location map of the study area (a) map of Pakistan with Gilgit-Baltistan province as shaded area (b) location of KKH, Nagar, Bar, Ghizer, Ishkoman and Yasin valleys in Gilgit-Baltistan (c) location map of the sites visited during the current study

Problem statement

Climate change is a reality and a huge majority of climate scientists (97%) believe in human induced climate change [*AAAS, 2014*] while another study shows the percentage of earth scientists having consensus on the issue ranges from 91% to 100% [*Myers et al., 2021*]. Globally, the surface temperature has risen by 1.1ºC during 2011–2020 than that during 1850–1900 with notable rises over land as compared to over ocean [*IPCC, 2023*]. The Paris agreement emphasizes that increase in global average temperature should be curtailed below 2ºC while continuous efforts should be made to limit this increase to 1.5ºC [*Delbeke & Vis, 2019*]. Studies suggest that the world needs to drop the emissions at a rate of 2.7% annually (2020–2030) to meet the target of 2ºC and 7.6% annually for a 1.5ºC goal [*UNEP, 2019*]. Recently, a research organization presented very alarming results of their findings that the year 2023 being the warmest on the planet earth since 1850 have crossed the 1.5ºC threshold as 2023 was 1.54ºC (± 0.06ºC) warmer than the pre-industrial levels, commonly referred as the years between 1850–1900 [*Berkeley Earth, 2024*].

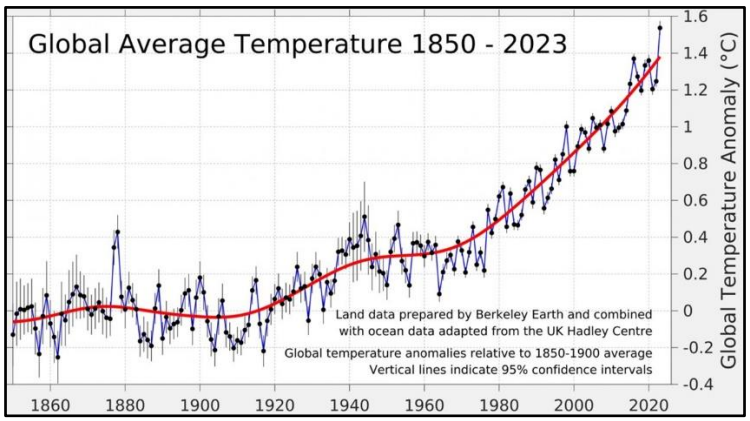


Fig. 2. Data presents the year 2023 as the warmest year since pre-industrial levels, crossing the much-debated threshold of 1.5ºC [*Berkeley Earth, 2024*]

Indus river basin partially shared by four countries (Pakistan, India, China and Afghanistan) falls mostly (about 52%) in Pakistan; mountainous terrain of Himalayas, Karakoram and Hindukush constitute the upper Indus basin while the southern plains form the lower Indus basin; projected values suggest an increase in temperature and precipitation in the Indus River basin [*Rajbhandari et al., 2015*]. The same study predicts that rainy days will increase in number in the upper basin while an increase in rainfall intensity associated with a decrease in the number of rainy days in the areas lying between the upper and lower basins. Although there are reservations about precipitation projections but most climate models suggest an increase in monsoon rainfall in Pakistan [*UNDP, 2017*]. Estimated increase in temperature is much higher in Pakistan that the projected global values [*Climate Risk Country Profile: Pakistan, 2021*]. In Pakistan 2022 Monsoon rains were exceptionally high, and experts saw it as a glimpse of what lies ahead in the scenario of changing climatic patterns. The rainy season prevailed during July-September with somewhat continuous precipitation in July and August; the Monsoon rains in 2022 were 175% above average rainfall in the country [*PMD, 2022*]; the total damage due to resultant flood have been estimated at USD 14.9 billion with a total loss of USD 15.2 billion [*Ministry of Planning Development & Special Initiatives, 2022*].

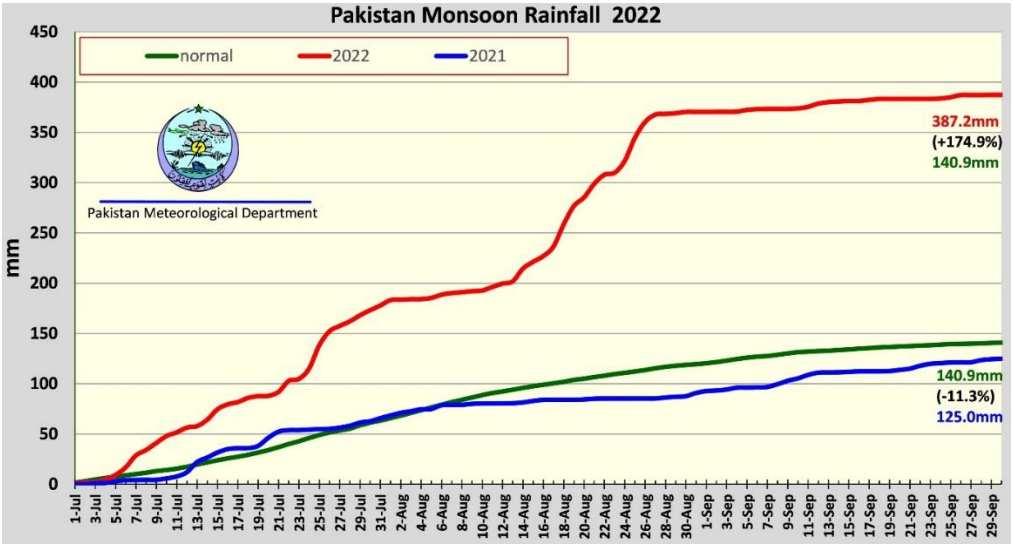


Fig. 3. Comparative rainfall during 2021 and 2022 versus the normal rainfall [*PMD, 2022*]

Now the anthropogenically induced change in climatic patterns is like a slow poison to the planet earth; a devastation comparable to any other in the earth's history; the situation may be compared with hydrogen bomb which may explode if current emission scenario is not dealt with [*Pierrehumbert, 2006*].

The climate change is going to affect the factors that impact our planet and life on it e.g., ecosystem, natural disasters, food and water availability, economy etc. Although it is difficult to build a relationship between landslides and climate as both operate on different scales (temporal and geographical) but an increase in rainfall frequency and intensity will trigger more landslides at least the shallow, rapid landslides (more deadly as giving less time to escape) including rockfall, debris flows, soil slips, small rock slides [*Gariano & Guzzetti, 2016; Jakob, 2021; Nyaupane & Chhetri, 2009; Palmer, 2020; Petley, 2012*]. Field visit in 2022 presented a very terrible picture of mass movement issues related to the abnormally high disastrous rains (Fig. 4).

Methodology

After collecting the available information through reconnaissance fieldwork, the data was analyzed; individual events were identified and organized (as far as possible) on the basis of mass movement type, disastrous impact, past history, and future potential. Being the far

dominant mass movement type, debris flow was particular area of interest. Based on the available information, a weighing/ranking criterion for individual event was devised based on two parameters: (i) frequency of the event (ii) extent of destruction and volume of debris (2022 and prior known events). Each of the two parameters were further categorized into three classes: low, medium and high. For example, an event with less known frequency was placed in 'low' category of frequency and those with the highest frequency were placed in the 'high' category. Similarly, three classes were used for the second parameter. Each class was assigned a particular numeric value. The numeric values of 4, 7 and 10 were reserved for low, medium and high respectively. Then the weights were added for each event and the event was assigned a specific color based on the level of activity. Green, yellow and red colors represented low, medium and high levels of activity.

Fig. 4. A few glimpses of the destruction caused by 2022 rains

The ruggedness for individual catchments was calculated in the simplest way [*Melton, 1965*] by using the following ratio:

$$R = \frac{H}{\sqrt{A}},$$

where R is the ruggedness commonly termed as the Melton Ratio, H is the vertical relief of the catchment, A is the catchment area. Terrain Analysis toolbox (Channels and Hydrology) of the SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) was applied on Digital Elevation Model (DEM) to derive stream network, catchment, area and relief in order to calculate the Melton Ratio of individual catchments. After calculating Melton Ratio for every watershed, the mean values of Melton Ratio were calculated for the catchments falling in low, medium and high categories mentioned above.

Data

Stream information and basin ruggedness (Melton Ratio) form the basis of current study. Stream data was collected through fieldwork in the study area while temporal data from Google Earth was also used to identify some past debris flow events. 15 tiles of ALOS PALSAR were downloaded as elevation data for the calculation of Melton Ratio. For the generation of DEM for the whole Gilgit-Baltistan (Fig. 1*b* 28 tiles of SRTM were downloaded. Table 1 presents the details of the datasets used for the current studies.

Table 2. Data used in the current study

Data category	Name	Description	Source
Event Information	-	Occurrence time, causative factors, extent, damage caused, prior history	Field data collection including community interviews
			Google Earth
Digital Elevation Model	ALOS PALSAR	High resolution terrain corrected, 12.5 m resolution. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) or National Elevation Dataset (NED) resampled DEM used for Radiometrically Terrain Correction (RTC) processing	Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
Digital Elevation Model	SRTM	SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 1 Arc-Second Global, version 3, 30m resolution.	USGS EarthExplorer

Analysis

10 events were recorded along KKH, 5 in Nagar District, 19 in Ghizer Valley, 10 in Ishkoman Valley and 16 in Yasin Valley (Table 2). Out of the 60 events in total, 52 corresponded to debris flow 6 to rock fall and 1 each to rockslide and land creep. Debris flow cover about 87% of the events, rock fall accounts for 10% while rockslide and land creep for 1% each (Fig. 5). Moreover, debris flow phenomenon was responsible for all the mass movement related casualties (17 casualties) in the visited areas.

Table 3. Area wise summary of mass movement types observed in the visited areas

Area (1st row) Mass movement type (1st column)	KKH	Nagar District	Ghizer Valley	Ishkoman Valley	Yasin Valley	Total
Debris Flow	8	5	15	8	16	52
Rockfall	1	–	3	2	–	6
Rock slide	1	–	–	–	–	1
Land creep	–	–	1	–	–	1
Total	10	5	19	10	16	60

As per ranking scheme mentioned in the methodology section, each and every debris flow event was classified in one of the three classes: low, medium and high represented by green, yellow and red colors respectively. As the study was focused on the disastrous events so the Table 3 is greatly dominated by red color while the green color is very rare. Out of 52 debris flow events 43 have been categorized as high hazard (red), 7 as medium hazard (yellow) and 2 as low hazard (green).

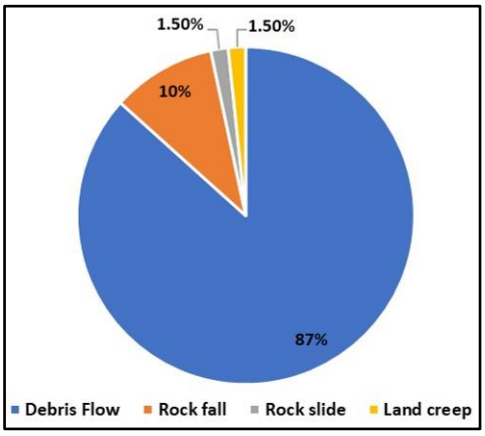


Fig. 5. Pie chart showing percentage of each mass movement type

Table 4. Categorization of individual debris flow events on the basis of parameters

Area	Locality		Type	Extent of destruction or debris transported (2022 and before)	Frequency	Overall rating	Loss of human lives in 2022	Level
KKH	Parri		Debris flow	10	7	17	–	
	Nomal		Rockfall	–	–	–	–	
	Goru		Debris flow	10	7	17	–	
	Jaglot Tunnel		Debris flow	7	10	17	–	
	Pissan village		Debris flow	–	–	–	–	
	Murtazabad Pyen		Debris flow	4	7	11	–	
	Attabad Tunnel-1		Rock slide	–	–	–	–	
	Shishkat		Debris flow	10	7	17	–	
	Khyber_2		Debris flow	7	7	14	–	
	Sost		Debris flow	10	7	17	–	
Nagar District	Hoper		Debris flow	10	7	17	–	
	Barbais		Debris flow	10	10	20	–	
	Bardas Nala		Debris flow	10	10	20	–	
	Barkot Nala		Debris flow	10	10	20	–	
	Dupas Nala		Debris flow	10	7	17	–	
Ghizer Valley	Henzal		Debris flow	4	7	11	–	
	Sherqilla Nala	Sherqilla	Debris flow	7	10	17	–	
		Bichar		10	7	17	7	
	Bubur		Debris flow	10	4	14	10	
	Gahkuch		Debris flow	4	7	11	–	
	Hoper Nala		Debris flow	10	10	20	–	
	Sumal Gah		Debris flow	7	7	14	–	
	Saro Gah		Debris flow	7	7	14	–	
	Raushan Gah		Debris flow	10	10	20	–	
	Gawote	Gawote-1	Debris flow	7	7	14	–	
		Gawote-2	Debris flow	10	10	20	–	
	Gupis		Debris flow	10	10	20	–	

Area	Locality		Type	Extent of destruction or debris transported (2022 and before)	Frequency	Overall rating	Loss of human lives in 2022	Level
	Khalti		Debris flow	10	10	20	–	
	Phander		Rockfall	–	–	–	–	
	Teru Bahach		Debris flow	4	7	11	–	
	Teru Bahach		Rockfall	–	–	–	–	
	Hilthi Nalah		Debris flow	7	10	17	–	
	Barsat		Rockfall (also a snow avalanche site)	–	–	–	–	
	Langar Nalah		Debris flow	10	7	17	–	
Ishkoman Valley	Hurakish		Rockfall	–	–	–	–	
	Daeen		Land creep	–	–	–	–	
	Asumber Nalah		Debris flow	7	4	11	–	
	Ishkamitar		Debris flow	10	7	17	–	
	Ishko-men Debris Flow Zone	Isk-DF1	Debris flow	7	10	17	–	
		Isk-DF2	Debris flow	7	10	17	–	
		Isk-DF3	Debris flow	7	10	17	–	
	Immit Mass Wasting Zone	Immit Rockfall Zone	Rockfall	–	–	–	–	
		Immit-1	Debris fall	10	7	17	–	
		Immit-2	Debris fall	10	7	17	–	
		Immit Halbar Gol	Debris fall	10	10	20	–	
Yasin Valley	Haltar Nalah		Debris flow	10	10	20	–	
	Damalgan Nalah		Debris flow	10	7	17	–	
	Gindai Nalah		Debris flow	7	4	11	–	
	Noah Nalah		Debris flow	10	10	20	–	
	Taus Chashma		Debris flow	10	7	17	–	
	Asumber Nala	Asumber Main	Debris flow	10	7	17	–	
		Miner-berg	Debris flow	10	7	17	–	

Area	Locality	Type	Extent of destruction or debris transported (2022 and before)	Frequency	Overall rating	Loss of human lives in 2022	Level
	Brum-berg	Debris flow	10	7	17	–	
	Shyote Nalah	Debris flow	10	10	20	–	
	Gunu Nalah	Flash flood, debris flow	4	4	8	–	
	Daspar Nalah	Flash flood, debris flow	4	4	8	–	
	Khaimith	Flash flood, debris flow	7	7	14	–	
	Garmish Barkulti	Debris flow	10	10	20	–	
	Silpi Nalah	Debris flow	7	4	11	–	
	Tarsat	Debris flow	10	10	20	–	
	Umalsat	Debris flow	10	10	20	–	
	Darkot_Nala	Debris flow	10	7	17	–	
	Dalgiram	Debris flow	10	10	20	–	

Average Melton Ratios of the catchments for events categorized in green, yellow and red categories was calculated as 0.5, 0.78 and 0.97 respectively (Table 4).

Table 5. Comparison of Melton Ration for catchments categorized as green, yellow and red

Area	Catchment name	Overall rating	Level	Melton ratio
Yasin Valley	Gunu Nalah	8		0.71
	Daspar Nalah	8		0.29
Mean Melton Ratio		0.50		
KKH	Murtazabad Pyen	11		1.74
Ghizer Valley	Gahkuch	11		0.65
–	Teru Bahach	11		0.63
Ishkoman Valley	Asumber Nalah	11		0.33
Yasin Valley	Gindai Nalah	11		0.73
	Silpi Nalah	11		0.61
Mean Melton Ratio		0.78		
KKH	Parri	17		0.86
	Goru	17		0.77

Area	Catchment name		Overall rating	Level	Melton ratio
	Jaglot Tunnel		17		2.08
	Shishkat		17		0.59
	Khyber-2		14		1.39
	Sost		17		0.43
Nagar District	Hoper Nalah		17		0.86
	Barbais Nalah		20		1.20
	Bardas Nalah		20		1.41
	Barkot Nalah		20		0.82
	Dupas Nalah		17		0.61
Ghizer Valley	Sherqilla	Sherqilla Nalah	17		0.28
		Bichar Nalah	17		0.55
	Bubur		14		0.61
	Hoper		20		0.71
	Sumal Gah		14		0.57
	Saro Gah		14		0.54
	Raushan Gah		20		1.42
	Gawote	Gawote-1	14		1.60
		Gawote-2	20		1.99
	Gupis		20		1.09
	Khalti		20		0.89
	Hilthi Nalah		17		0.49
	Langar Nalah		17		0.97
Ishkoman Valley	Ishkamitar		17		0.69
	Ishkomen Debris Flow Zone	Isk-DF1	17		1.75
		Isk-DF2	17		2.26
		Isk-DF3	17		1.59
	Immit Mass Wasting Zone	Immit-1	17		1.41
		Immit-2	17		1.95
		Immit Halbar Gol	20		0.60
Yasin Valley	Haltar Nalah		20		0.94
	Damalgan Nalah		17		0.57
	Noah Nalah		20		1.07
	Taus Chashma		17		0.81
	Asumber Nalah	Asumber Main	17		0.28
		Minerberg	17		1.16
		Brumberg	17		1.35
	Shyote Nalah		20		0.91
	Khaimith		14		0.21
	Garmish Barkulti		20		0.33
	Tarsat		20		0.92
	Umalsat		20		0.72
	Darkot Nalah		17		0.28
	Dalgiram		20		1.07
Mean Melton Ratio			0.97		

Discussion

As the 2022 rains in Pakistan were an extraordinary event and people link it with climate change so we may expect that the resultant mass movement behavior is likely to prevail in the coming years that are likely to go through a changing climate. Debris flow is the most dominant type of mass movement that the northern Pakistan is going to experience in the coming years; the phenomenon will be followed by certain types of shallow landslides including rock fall, soil slips, small rock slides (Fig. 4). Our evaluation about expected mass movement types due to climate change are in line with the findings by other researchers [*Gariano & Guzzetti, 2016; Jakob, 2021*]. Although soil slips are not recorded in our data but we think that there were some soil slips that got unnoticed due to the fact that our attention was diverted only to events that directly affected the community in some way. Similarly, our recorded event of land creep is an already existing that was accelerated due to prolonged precipitation.

The authors suggest that there would be more parameters while ranking a stream/catchment for future debris flow assessment. A detailed analysis of the catchment including its sediment supply for generating debris flow needs to be carried out for a more reliable assessment [*Bovis & Jakob, 1999; Jakob, 1996, 2021*]. The role of tectonics should also be considered while assessing the sediment supply for a particular catchment; the Hoper Nalah (Nagar District) debris flow transported huge boulders of breccia suggesting that the presence of fault line in the catchment might have facilitated the supply of material for a debris flow (Fig. 6).

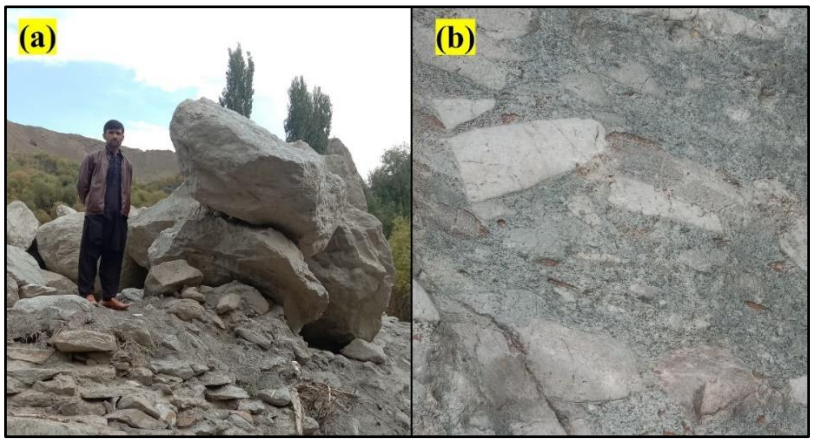


Fig. 6. Huge boulders transported by Hoper debris flow in Nagar District (a) and some of the huge size transported boulders consist of breccia (b)

Based on the currently available information two relative parameters i.e., ‘Extent of Destruction or debris transported (2022 and before)’ and event ‘frequency’ were devised in this study for carrying out a preliminary assessment. In the absence of a record of past debris flow events the actual frequency was difficult to estimate so only a frequency level (low, medium or high) was estimated through interviews by local communities and Google Earth (temporal resolution). Both the parameters are relative to the observed events; in future when more streams and catchments will be included the current rankings may be revised to fit in the system. As already discussed, the visited areas are only the selected ones based of the level of destruction and effect on the community. Debris flow in streams that lie in far flung or uninhabited areas normally go unnoticed. For example, usually the community lives along the stream bank where there passes some road so the tributaries and their watersheds along the opposite (uninhabited) bank remain unnoticed. It is quite possible that one of those tributaries my generate a debris flow of the level that it may block the main stream for a while and in turn adversely affect the downstream communities on both sides of the stream. Moreover, the current work was focused on the so called ‘high hazard’ events. The inclusion of a variety of scenarios (e.g., less disastrous catchment) will increase the authenticity of the research. A more

detailed study both in terms of parameters and geographical extent is advisable for a more comprehensive assessment.

Table 4 presents a positive correlation between 'hazard level' and Melton Ration of the catchments. But Melton Ratio is not the only parameter that indicates the probability of a debris flow. The Melton Ration for Sherqilla Nalah has been calculated as 0.28 that is far low to be considered for a debris flow [*Bovis & Jakob, 1999; Jackson et al., 1987*]. But it is the same stream that responsible for a debris flow that claimed 7 lives. To identify the sub-basin that actually generated the debris flow the main basin was divided into five sub-basins i.e., A, B, C, D and E (Fig. 7); Melton Ratio, R of each sub-basin was calculated separated. R values of A, B, C, D and E were calculated as 0.34, 0.47, 0.65, 1.05 and 0.55. Initially one would expect that the sub-basins C or D with the highest values of R would be more suitable candidates but field work confirmed that the sub-basin E with the R value of 0.55 was the sub-basin that generated the debris flow. Although a reconnaissance level fieldwork was carried out but at some places the influence of readily available sediments was observed. For example, the Parri debris flow blocked about 1 km stretch of KKH by dumping about 12 feet high body of debris on August 21, 2022 at location: 35º 46′ 07″N, 74º 34′ 32″E; the traffic had to be diverted to an alternate route after a complete disruption for 4 h. A visit to its upper catchment revealed the availability of loose material on its slopes (Fig. 8).

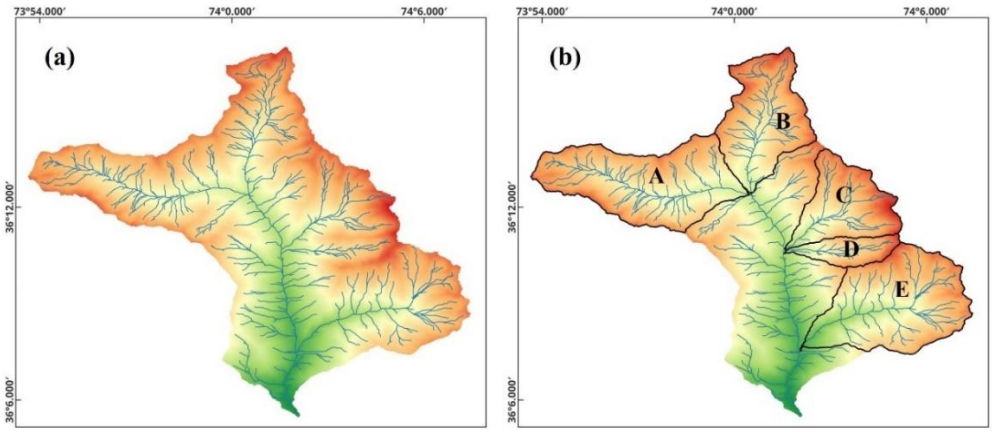


Fig. 7. The Sherqilla Nalah generated a debris flow that claimed 7 lives. Sherqilla watershed as a whole (a) watershed divided into 5 sub-basins (b)

Another important issue is the access to high resolution DEM. Henzal debris flow is produced by a small catchment in moraine deposits, blocks the road and covers the agricultural land (Fig. 9). The catchment is identified by red outline whereas the drainage network derived from ALOS PALSAR is shown in blue color. It is evident that the derived drainage network does not conform to the small catchment. So, the availability of high-resolution DEM is of prime importance for a reliable analysis of small basins.

In the recent history 2010 and 2022 were the most disastrous years in Gilgit-Baltistan in terms of mass movement particularly debris flow hazard. Interviews with the affected communities apprise that 2010 rains were more intense, less prolonged but 2022 rains were less intense more prolonged. It suggests that an increased precipitation in both ways (either in intensity or duration) have capacity to boost the debris flow phenomenon.

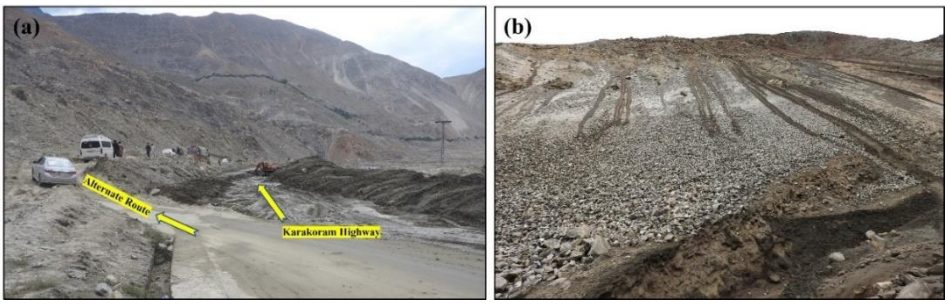


Fig. 8. Karakoram Highway blocked in August 2022 by Parri debris flow (a) and loose material along the slopes of upper reaches of the catchment, readily available for a debris flow (b)

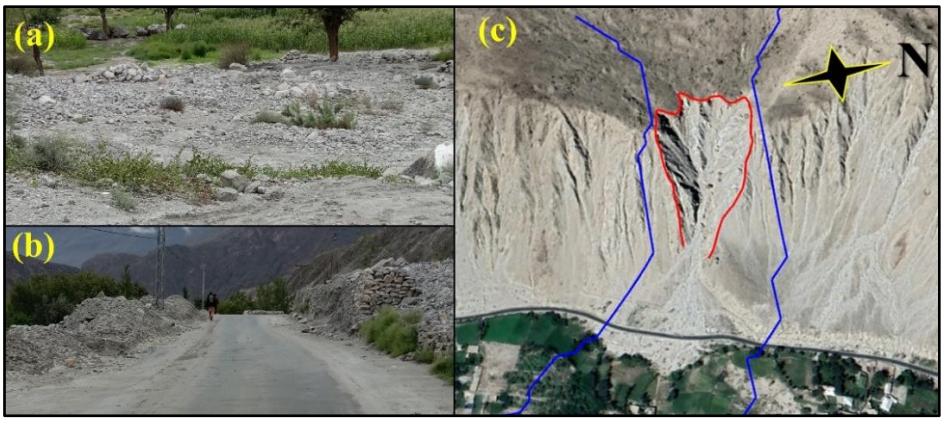


Fig. 9. Henzal debris flow covered the agricultural land (a) and blocked the road (b) and the small catchment with red outline (c), drainage network derived from DEM (in blue)

Although climate change and its adverse effects on mass movement hazards is a reality but sometimes, we blame it more than it actually deserves. Bubur debris flow in Ghizer Valley claimed 10 lives and destroyed 8 houses. As the catchment doesn't have a history of debris flows so one may very comfortably hold climate change accountable for the disaster in 2022. But anthropogenic activities got sometimes unnoticed in the hue and cry attributed to climate change (Fig. 10). The current channel width at downstream of the tragic event varies from 4–5 m; the local community has informed that it was once 10 m wide but now encroachments have restricted it to the current width. Similarly, the Khalti Nalah in Ghizer Valley was once 13 m wide but now it has been reduced to 5–6 m at places. It is very tricky to draw a clear line between the impact of climate change and that of anthropogenic activities on debris flow hazard.

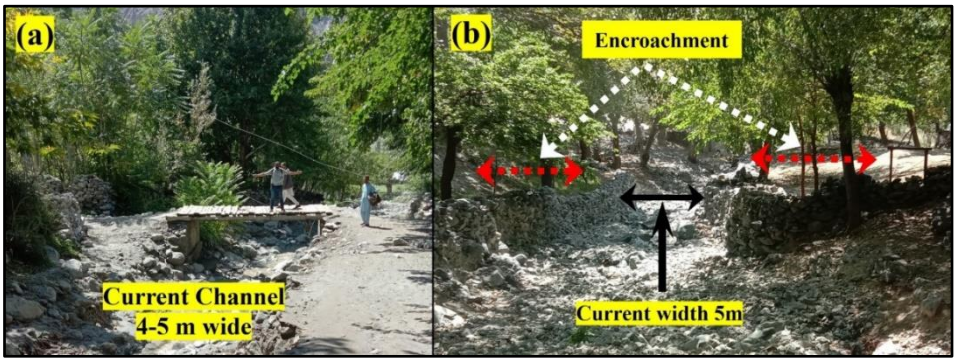


Fig. 10. Actual stream course of Bubur Nala in Ghizer Valley was once 30 ft but now reduced to about half of its original width (a). Original stream course of Khalti Nalah in Ghizer Valley now reduced to just 5–6 ft at places (b)

Conclusions

Climate change is a reality that needs to be addressed on top priority to hand over a better future to our coming generations. Projections show that the temperature increase in Pakistan would be more than the global average; rainfall duration is also expected to increase while some areas will experience an increase in intensity. Experience of 2010 and 2022 events suggest that increase in rainfall (either in intensity or duration) would trigger more mass movement events. Although it is not simple to assess the impact of changing climate on mass movement hazards but it is highly probable that more landslides will be triggered specially the shallow landslides including debris flows, rock falls, soil slips, small rock slides. Although Melton Ration gives a good first estimation about the streams capable of generating debris flow but a lot of other parameters are also important, they need to be addressed as well. A lot of work needs to be done for a reliable hazard assessment in the country. In fact, the individual catchments need to be studied in more detail on sub-basin level to identify the problematic sub-basins.

Acknowledgements

The fieldwork for current study was financed by Government of Pakistan through its Public Sector Development Program “Pakistan National Research Program on Geological Hazards (Earthquakes and Landslides), Data Acquisition along Active Faults and Identification of Potential Landslide Hotspot Zones”.

References

AAAS. (2014). What We Know: The Reality, Risks, and Response To Climate Change.

Ahmed, M. F., Rogers, J. D., & Ismail, E. H. (2015). Historic Landslide Dams along the Upper Indus River, Northern Pakistan. Natural Hazards Review, 16(3), 04014029. https://doi.org/10.1061/(asce)nh.1527-6996.0000165

Akhtar, S. S., Awan, A. A., & Sadiq, S. (2017). Seismotectonic and Anthropogenic Causes for Potential Hazard of Slope Failure in Miachar Village, District Hunza Nagar, Gilgit-Baltistan, Pakistan. Geological Survey of Pakistan, Information Release No. 1020.

Ashraf, A., Roohi, R., Naz, R., & Mustafa, N. (2014). Monitoring cryosphere and associated flood hazards in high mountain ranges of Pakistan using remote sensing technique. Natural Hazards, 73(2), 933–949. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1126-3

Basharat, M., Rohn, J., Baig, M. S., Khan, M. R., & Schleier, M. (2014). Large scale mass movements triggered by the Kashmir earthquake 2005, Pakistan. Journal of Mountain Science, 11(1), 19–30. https://doi.org/10.1007/s11629-012-2629-6

Berkeley Earth. (2024). Global Temperature Report for 2023. https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2023/

Bovis, M. J., & Jakob, M. (1999). The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. Earth Surface Processes and Landforms, 24(11), 1039–1054. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199910)24:11<1039::AID-ESP29>3.0.CO;2-U

Climate Risk Country Profile: Pakistan. (2021). The World Bank Group and the Asian Development Bank.

Delbeke, J., & Vis, P. (Eds.). (2019). Towards a Climate-Neutral Europe. Routledge. https://doi.org/10.4324/9789276082569

Farah, A., Lawrence, R. D., & DeJong, K. A. (1984). An overview of the tectonics of Pakistan. In B. U. Haq & J. D. Milliman (Eds.), Marine geology and oceanography of Arabian Sea and coastal Pakistan. Van Nostrand Reinhold/Scientific and Academic Editions.

Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. Earth-Science Reviews, 162, 227–252. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011

Gilchrist, A. R., Summerfield, M., & Cockburn, H. A. P. (1994). Landscape dissection, isostatic uplift and the morphologic development of orogens. Geology, 22, 963–966.

Hewitt, K. (1998). Catastrophic landslides and their effects on the Upper Indus streams, Karakoram Himalaya, northern Pakistan. Geomorphology, 26(1–3), 47–80. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00051-8

Hewitt, K. (1999). Quaternary moraines vs catastrophic rock avalanches in the Karakoram Himalaya, Northern Pakistan. Quaternary Research, 51(3), 220–237. https://doi.org/10.1006/qres.1999.2033

Hewitt, K. (2006). Disturbance regime landscapes: Mountain drainage systems interrupted by large rockslides. Progress in Physical Geography, 30(3), 365–393. https://doi.org/10.1191/0309133306pp486ra

Hussain, S. H., & Awan, A. A. (2009). Causative Mechanisms of Terrain Movement in Hunza Valley. Geological Survey of Pakistan, Information Release No. 925.

IPCC. (2023). Summary for Policymakers. In Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)] (pp. 1–34). IPCC, Geneva, Switzerland. https://doi.org/doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Jackson, L. E., Kostaschuk, R. A., & MacDonald, G. M. (1987). Identification of debris flow hazard on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains. GSA Reviews in Engineering Geology, 7, 115–124. https://doi.org/10.1130/REG7-p115

Jakob, M. (1996). Morphometric and Geotechnical Controls of Debris Flow Frequency and Magnitude in Southwestern British Columbia (Issue October). University of British Columbia.

Jakob, M. (2021). Landslides in a changing climate. In T. Davies, N. Rosser, & J. F. Shroder (Eds.), Landslide Hazards, Risks, and Disasters (Second, Vol. 162, pp. 505–579). Elsevierice j. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818464-6.00003-2

Khan, S., Javed, Hussain, Z., Wahid, A., Ranjha, Naveed, A., & Hasan, Ul, M. (2020). Climate of Gilgit Baltistan Province Pakistan. Int. J. Econ. Environ. Geol., 11(January).

Korup, O. (2004). Landslide-induced river channel avulsions in mountain catchments of southwest New Zealand. Geomorphology, 63(1–2), 57–80. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.03.005

Korup, O. (2005). Large landslides and their effect on sediment flux in South Westland, New Zealand. Earth Surface Processes and Landforms, 30(3), 305–323. https://doi.org/10.1002/esp.1143

Latif, M., Akhtar, S. S., Sadiq, S., & Khan, M. Q. (2015). Preliminary Report on 2005 Kashmir Earthquake Related Mass Movement Hazards in Neelum Valley, Azad Jammu & Kashmir. Geological Survey of Pakistan, Information Release No. 968.

Latif, M., Akhtar, S. S., Sadiq, S., & Shah, M. N. (2013). A Quick Report on Slope Failure in Shulja, Dilkushan and Daeen Areas of Chatorkhand, District Ghizer, Gilgit-Baltistan, Pakistan. Geological Survey of Pakistan, Information Release No. 937.

Latif, M., Hussain, S. H., & Sadiq, S. (2016). Study of Hazardous Areas of Hunza-Nagar District, Gilgit-Baltistan, Pakistan. Geological Survey of Pakistan, Information Release No. 967.

Melton, M. A. (1965). The Geomorphic and Paleoclimatic Significance of Alluvial Deposits in Southern Arizona. The Journal of Geology, 73(1), 1–38.

Ministry of Planning Development & Special Initiatives. (2022). Pakistan Floods 2022 – Post-Disaster Needs Assessment: Main Report.

Myers, K. F., Doran, P. T., Cook, J., Kotcher, J. E., & Myers, T. A. (2021). Consensus revisited: quantifying scientific agreement on climate change and climate expertise among Earth scientists 10 years later. Environmental Research Letters, 16(10), 104030. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2774

Nash, D. F. T., Brunsden, D. K., Hughes, R. E., Jones, D. K. C., & Whalley, B. F. (1985). A Catastrophic Debris Flow near Gupis, Northern Areas, Pakistan. 111th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (San Francisco).

Nyaupane, G. P., & Chhetri, N. (2009). Vulnerability to Climate Change of Nature-Based Tourism in the Nepalese Himalayas. Tourism Geographies, 11(1), 95–119. https://doi.org/10.1080/14616680802643359

Owen, L. A., Sharma, M. C., & Bigwood, R. (1996). Landscape modification and geomorphological consequences of the 20th October 1991 earthquake and the July-August 1992 monsoon in the Garhwal Himalaya. Zeitschrift Fur Geomorphologie, Supplementband, 103(January 2018), 359–372.

Palmer, J. (2020). A Slippery Slope: Could Climate Change Lead to More Landslides? Eos, 101(August). https://doi.org/10.1029/2020EO151418

Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. Geology, 40(10), 927–930. https://doi.org/10.1130/G33217.1

Pierrehumbert, R. T. (2006). Climate Change: A Catastrophe in Slow Motion. Chicago Journal of International Law, 6(2), 573–596.

PMD. (2022). Pakistan Meteorological Department – Pakistan Monsoon 2022 Rainfall Report.

Rajbhandari, R., Shrestha, A. B., Kulkarni, A., Patwardhan, S. K., & Bajracharya, S. R. (2015). Projected changes in climate over the Indus river basin using a high resolution regional climate model (PRECIS). Climate Dynamics, 44(1–2), 339–357. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2183-8

Roering, J. J., Kirchner, J. W., & Dietrich, W. E. (2005). Characterizing structural and lithologic controls on deep-seated landsliding: Implications for topographic relief and landscape evolution in the Oregon Coast Range, USA. Bulletin of the Geological Society of America, 117(5–6), 654–668. https://doi.org/10.1130/B25567.1

Sadiq, S., Latif, M., Shah, M. N., & Akhtar, S. S. (2012). Gyari Avalanche Mapping, Siachen Glacier Region, Gilgit-Baltistan. Geological Survey of Pakistan Information Release No. 938.

Sadiq, S., & Momose, Y. (2017). Monitoring of geohazards related to 2005 Kashmir Earthquake in Muzaffarabd area during monsoon 2006. Geological Survey of Pakistan, Information Release No. 1012.

Sadiq, S., Muhammad, U., & Fuchs, M. (2021). Investigation of landslides with natural lineaments derived from integrated manual and automatic techniques applied on geospatial data. Natural Hazards. https://doi.org/10.1007/s11069-021-05028-6

Sadiq, S., & Shah, M. N. (2016a). Geohazard Assessment of Selected Sites in Gilgit District, Gilgit-Baltistan, Pakistan. Geological Survey of Pakistan, Information Release No. 1024.

Sadiq, S., & Shah, M. N. (2016b). Geohazard Assessment of Vulnerable Localities in Ghizer District, Gilgit-Baltistan, Pakistan. Geological Survey of Pakistan, Information Release No. 1023.

Sato, H. P., Hasegawa, H., Fujiwara, S., Tobita, M., Koarai, M., Une, H., & Iwahashi, J. (2007). Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 Northern Pakistan earthquake using SPOT 5 imagery. Landslides, 4(2), 113–122. https://doi.org/10.1007/s10346-006-0069-5

Shroder, J. F., & Bishop, M. P. (1998). Mass movement in the Himalaya: New insights and research directions. Geomorphology, 26(1–3), 13–35. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00049-X

Torizin, J., Wang, L. chao, Fuchs, M., Tong, B., Balzer, D., Wan, L. qin, Kuhn, D., Li, A., & Chen, L. (2018). Statistical landslide susceptibility assessment in a dynamic environment: A case study for Lanzhou City, Gansu Province, NW China. Journal of Mountain Science, 15(6), 1299–1318. https://doi.org/10.1007/s11629-017-4717-0

UNDP. (2017). The Vulnerability of Pakistan's Water Sector to the Impacts of Climate Change: Identification of Gaps and Recommendations for Action.

UNEP. (2019). United Nations Environment Programme – Emissions Gap Report 2019. UNEP, Nairobi.

Mapping the territories of the mountain-foothill zone of Tajikistan exposed to natural hazards

M. Safarov[1,2], A. Fazylov[3], S. Kang[1,4], M. Gulayozov[2], H. Navruzshoev[5,6], A. Banerjee[1], Y. Mamadjonov[2]

[1]Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Lanzhou, China, shichang.kang@lzb.ac.cn; mustafo-2010@mail.ru

[2]Research Center for Ecology and Environment of Central Asia (Dushanbe), Dushanbe, Tajikistan

[3]Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

[4] University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

[5]University of Central Asia, Dushanbe, Tajikistan

[6]State Scientific Institution "Center for Glacier Studies of the National Academy of Sciences of Tajikistan", Dushanbe, Tajikistan

Abstract. In recent years, debris flows have emerged as a significant threat to infrastructure and lives in Tajikistan, with their frequency and severity on the rise. This study focused on analyzing hazardous natural phenomena, specifically debris flows, in the mountain-foothill zone of Tajikistan between 2020 and 2023. Monitoring and research were conducted using a QC-2 Micro UAV and a DJI Phantom 4 quadcopter. Aerial photographic techniques were employed in various districts, revealing the destructive impact of debris flows. Furthermore, changes in the study area were observed through pre- and post-event Sentinel-2 images using the Normalized Difference Water Index (NDWI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) techniques to assess the effectiveness of automatic detection of debris flow-prone areas. The study identified 49 districts and cities in Tajikistan affected by debris flows during the study period, with an estimated 30.2 million US dollars in damages. Notable changes were observed in Khuroson, Tojikobod, and Lakhsh districts, where significant alterations were detected using both NDWI and NDVI. The study also revealed that the foothills zones primarily experience rain-induced debris flows, while the mountain zones are characterized by rain-snow-induced and glacial-induced mudslides triggered by outbursts of glacial lakes. The composition of the debris flows in the six studied areas was mostly clay, with some areas covered by mud-stone, and a few places with a mixture of clay and mud-stone. Integrating UAV and remotely sensed technologies provides crucial data for analyzing damage, identifying vulnerable areas, informing emergency response efforts, and is also imperative for disaster risk management in Tajikistan.

Key words: *disaster, debris flows, remote sensing, unmanned aerial vehicles, Tajikistan*

Cite this article: Safarov M., Fazylov A., Kang S., Gulayozov M., Navruzshoev H., Banerjee A., Mamadjonov Y. Mapping the territories of the mountain-foothill zone of Tajikistan exposed to natural hazards. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 445–457.

Картографирование территорий горно-предгорной зоны Таджикистана, подверженных опасным природным явлениям

М. Сафаров[1,2], А. Фазылов[3], С. Канг[1,4], М. Гулаезов[2], Х. Наврузжоев[5,6], А. Банерджи[1], И. Мамаджонов[2]

[1]Северо-Западный институт экологии и ресурсов, Ланьчжоу, Китай, shichang.kang@lzb.ac.cn; mustafo-2010@mail.ru

[2]Научно-исследовательский Центр экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе), Душанбе, Таджикистан

[3]Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

[4]Университет Китайской академии наук, Пекин, Китай

[5]Университет Центральной Азии, Душанбе, Таджикистан

[6]Государственное научное учреждение «Центр изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана», Душанбе, Таджикистан

Аннотация. В последние годы сели превратились в серьезную угрозу инфраструктуре и жизни людей в Таджикистане, причем их частота и серьезность растут. Данное исследование было посвящено анализу опасных природных явлений, в частности селевых потоков, в горно-предгорной зоне Таджикистана в период с 2020 по 2023 г. Мониторинг и исследования проводились с использованием беспилотного летательного аппарата QC-2 Micro и квадрокоптера DJI Phantom 4. В различных районах были применены методы аэрофотосъемки, позволяющие выявить разрушительное воздействие селей. Кроме того, изменения в исследуемой зоне наблюдались с помощью изображений Sentinel-2 до и после события с использованием методов нормализованного разностного индекса воды (NDWI) и нормализованного разностного индекса растительности (NDVI) для оценки эффективности автоматического обнаружения районов, подверженных селевым потокам. В ходе исследования были выявлены 49 районов и городов Таджикистана, пострадавших от селей за исследуемый период, ущерб от которых оценивается в 30,2 млн долларов США. Заметные изменения наблюдались в Хуросонском, Тоджикободском и Лахшском районах, где значительные изменения были обнаружены как с помощью NDWI, так и с помощью NDVI. Исследование также показало, что в предгорных зонах в основном наблюдаются селевые потоки, вызванные дождем, в то время как для горных зон характерны дождевые, снежные и ледниковые оползни, вызванные прорывами ледниковых озер. Состав селевых потоков в шести исследованных районах был в основном глинистым, причем некоторые участки были покрыты глинобитом, а в нескольких местах – смесью глины и глинобитного грунта. Интеграция технологий беспилотных летательных аппаратов и дистанционного зондирования позволяет получать важные данные для анализа ущерба, выявления уязвимых зон, информирования об усилиях по реагированию на чрезвычайные ситуации, а также является необходимым условием для управления рисками стихийных бедствий в Таджикистане.

Ключевые слова: *катастрофа, селевые потоки, дистанционное зондирование, беспилотные летательные аппараты, Таджикистан*

Ссылка для цитирования: Сафаров М., Фазылов А., Канг С., Гулаезов М., Наврузжоев Х., Банерджи А., Мамаджонов И. Картографирование территорий горно-предгорной зоны Таджикистана, подверженных опасным природным явлениям. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 445–457.

Introduction

Natural hazards, such as debris flows, earthquakes, and avalanches, collectively pose a significant threat to Tajikistan, leading to devastating consequences for both infrastructure and the regional population [*Scaini et al., 2024*]. The frequency and intensity of these disasters have been steadily increasing in recent years [*Fazylov et al., 2017a*], emphasizing the urgent need for robust monitoring and mitigation strategies [*IPCC, 2014*]. Tajikistan in particular, vulnerable to natural disasters, whereas debris flows accounting for a significant portion of the

risk. Roughly 85% of the country's territory is exposed to debris flow dangers, with 32% falls within high-risk zones [*Fazylov et al., 2017b*].

In response to these challenges, researchers and specialists in Tajikistan have started harnessing cutting-edge technologies to map and assess natural hazards. Unmanned aerial vehicles (UAVs) and satellite imagery from platforms like Sentinel-2 have emerged as invaluable tools for monitoring and analyzing debris flow events, providing critical data for effective disaster management and emergency response. Sentinel-2, part of the European Space Agency's Copernicus program, offers multispectral, high-resolution imagery that enables detailed monitoring and analysis of environmental changes. Moreover, Sentinel-2 allows to obtain the Normalized Difference Water Index (NDWI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) techniques to observe changes through pre- and post-event scenarios. These indices, widely used in remote sensing applications, facilitate the evaluation of water bodies and vegetation cover, respectively, aiding in the automatic detection of debris flow-prone areas. Integrating high-resolution Sentinel-2 imagery with UAV data enhances the understanding of terrain dynamics and vulnerability assessments [*Medeu et al., 2018*] and allow to some extent minimize the damage, help organize the evacuation of the population from vulnerable areas and assess the extent of damage after debris flow events [*Musaeva et al., 2018*].

Understanding the role of climate factors such as increased rainfall and ice melting in high elevations is essential in comprehending the origins of debris flows in Tajikistan. Factors such as heavy rainfall, steep terrain, and loose soil or rock materials contribute to the occurrence of debris flows [*Xu et al., 2014; Bai et al., 2022*]. In mountainous regions like Tajikistan, the combination of high elevations and prevalent glaciers, along with intensified rainfall and accelerated ice melting due to climate change significantly heightens the risk of debris flows [*Mergili et al., 2012; Mustaeva et al., 2015*]. However, due to inaccessible surface topography and inhospitable climate condition, relying on high-resolution remotely sensed applications are the best available option to quantify such alarming environmental issues.

Enhancing management practices for high-risk natural disasters and advancing monitoring and assessment technologies are urgent priorities in the current landscape [*Stupin et al., 2020*]. Remote sensing technologies, including UAVs and platforms like Sentinel-2, play pivotal roles in emergency management, particularly during geological and hydrological disasters [*Tatham, 2009; Shvarev et al., 2020*].

Given the increasing risks posed by natural disasters, particularly debris flows, the primary objective of this research is to analyze natural disasters in Tajikistan from 2020 to 2023. Emphasis was placed on the vital role of modern technologies, such as UAVs and Sentinel-2 imagery, as well as utilizing available reports, conducting own fieldwork, and tapping into other resources. By utilizing high-resolution UAV images and techniques like NDWI and NDVI, the aim is to map and detect changes in debris flow-prone areas. The research seeks to examine the current state of debris flows in Tajikistan, evaluate their impact on the population and economy, and identify vulnerable areas at risk of natural disasters. It underscores the importance of technological innovation in enhancing resilience and response capabilities in Tajikistan.

Materials and methods

Analysis of natural disasters in Tajikistan (2020–2023)

To analyze natural disasters in Tajikistan from 2020 to 2023, primary data from reports of the Committee for Emergency Situations and Civil Defense under the Government of the Republic of Tajikistan (hereafter referred to as Emergency Committee), as well as other resources, were studied. Additionally, several intensive field visits were conducted in areas prone to natural disasters, and an annual analysis of statistical data on the frequency and types of natural disasters such as avalanches, debris flows, earthquakes, strong winds, heavy rains, rockfalls, landslides, increased water levels in reservoirs, thunderstorms were taken into consideration. The research methodology included the collection and analysis of data on the

frequency and impact of natural disasters on various sectors of the economy and the population of Tajikistan, along with estimating financial damages.

UAV technology for disaster mapping and monitoring

Since the beginning of 2017, the Research Center for the Environment of Central Asia (based in Dushanbe), in collaboration with scientific institutions of the National Academy of Sciences of Tajikistan (NAST) and with support from the Emergency Committee, have utilized UAVs for monitoring natural hazards. Specifically, from 2020 to 2023, numerous UAV surveys were deployed to investigate debris flow sites in various regions, including the Khuroson district of the Khatlon region (May 2020), the Tojikobod region (August 2020), the Vakhsh district of the Khatlon region (May 2021), the city of Panjakent in the Sughd region (July 2021), Lakhsh district (August 2022), and Varzob district (August 2023) as illustrated in Fig. 1 and Table 1.

Monitoring activities focused on areas prone to debris flows and were conducted at different altitudes. For instance, the maximum flight altitude during the assessment of debris flow impacts in the Vakhsh district reached 684 meters above sea level, while for the Archakapa section in the Lakhsh district (the basin of the Baralmos glacier, currently called the Said Nafisi; Resolution of the Government of the Republic of Tajikistan, No.269, 2021), it was 6209 meters above from the mean sea level. Aerial photography requirements included transverse and longitudinal image overlap, as well as adjusting flight altitude based on the terrain characteristics of the area.

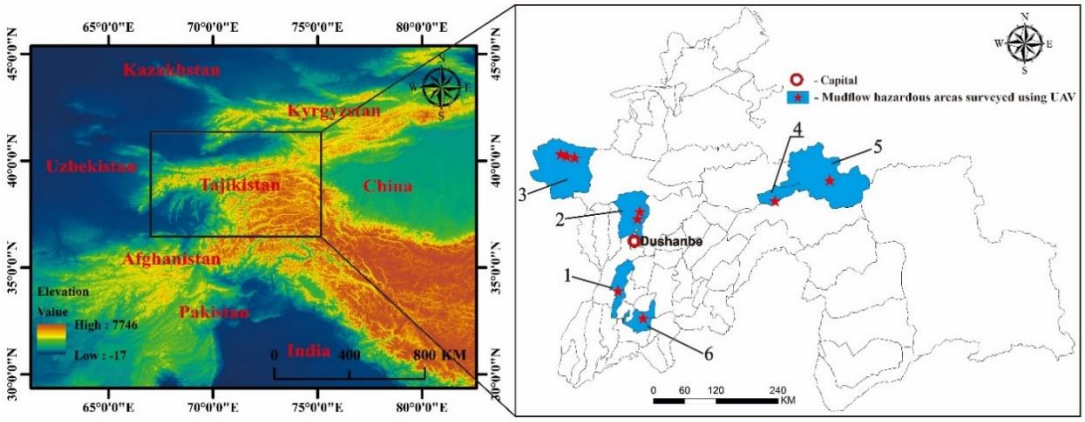


Fig. 1. Monitoring of debris flows in Tajikistan using UAVs in the period 2020–2023. Numbers are highlighting the place names accordingly (1 – Khuroson district, 2 – Varzob district, 3 – Panjakent city, 4 – Tojikobod district, 5 – Lakhsh district and 6 – Vakhsh district)

A DJI Phantom 4 quadcopter and a QC-2 Micro UAV with dimensions of 1.8m width and 1.1m length, equipped with a Sony RX1R camera and a flight time exceeding 1 h, were employed for aerial photography. The UAV field monitoring approach encompassed selecting optimal takeoff and landing sites, inspecting the study area for obstacles, completing pre-flight tasks, conducting aerial photography, monitoring UAV technical parameters, manually landing the UAV, and uploading images and POS data for processing. Flight altitude and image resolution were adjusted based on research objectives and natural conditions, with higher resolutions facilitating detailed investigation of debris flow elements and processes [*Safarov et al., 2021*]. To generate high-resolution orthophotos and digital elevation models, aerial photographs and POS data were processed using MS Excel and Pix4Dmapper [*Karamuz et al., 2020; Safarov et al, 2022*], and subsequently integrated into ArcGIS software for further analysis. Furthermore, combine all UAV images into a single spatial orthomosaics layer in the ArcGIS for analysis post-scenario of debris flow events, whereas high-resolution Google Earth

images and Sentinel-2 datasets were utilized to check the pre-disaster condition [*Dokukin et al., 2021*].

Table 1. Debris flow-hazardous areas were investigated using UAVs in the period 2020–2023 and aerial photography parameters

Site name	District/city	Region/ districts of republican subordination (DRS)	River basin	UAV type	Max. high flight, m a.s.l.	Ortho-mosaic resolution, cm	Year
Ayni	Khuroson	Khatlon	Vakhsh	DJI Phantom, QC-2 Micro	1050	5.62	2020
Margh	Tojikobod	DRS	Vakhsh	QC-2 Micro	3300	9.33	2020
Ittifok	Vakhsh	Khatlon	Vakhsh		684	4.69	2021
Kishtudak	Panjakent	Sughd	Zeravshan		3513	18.6	2021
Vishist	Panjakent т	Sughd	Zeravshan		3308	17	2021
Archakapa	Lakhsh	DRS	Vakhsh	DJI Phantom, QC-2 Micro	6209	43	2022
Gusgarf	Varzob	DRS	Kafirnigan	DJI Phantom	1399	12.2	2023
50 km of the Dushanbe – Khujand highway	Varzob	DRS	Kafirnigan		1922	9.8	2023

Quantifying debris flow-prone areas using satellite image

Satellite datasets are indispensable tools for monitoring natural hazards like debris flows [*Atefi et al., 2022*]. In this study, the Sentinel-2 satellite imagery was utilized to analyze selected sites using the NDWI and NDVI to obtain vegetation health, density, and water body presence, which can influence debris flow risks within the study area. For instance, a decrease in NDVI values may signal vegetation stress or land cover changes, potentially heightening the debris flow risk.

The satellite data underwent preprocessing steps, including geometric corrections, and was further cross-validated with Google Earth images to ensure accurate analysis. For Sentinel-2 NDWI and NDVI values were calculated in ArcGIS using these following formulas:

$$\mathrm{NDWI} = \frac{(\mathrm{Green}-\mathrm{Near\ Infrared})}{(\mathrm{Green}-\mathrm{Near\ Infrared})}, \quad (1)$$

$$\mathrm{NDWI} = \frac{(\mathrm{NIR}-\mathrm{RED})}{(\mathrm{NIR}-\mathrm{RED})}. \quad (2)$$

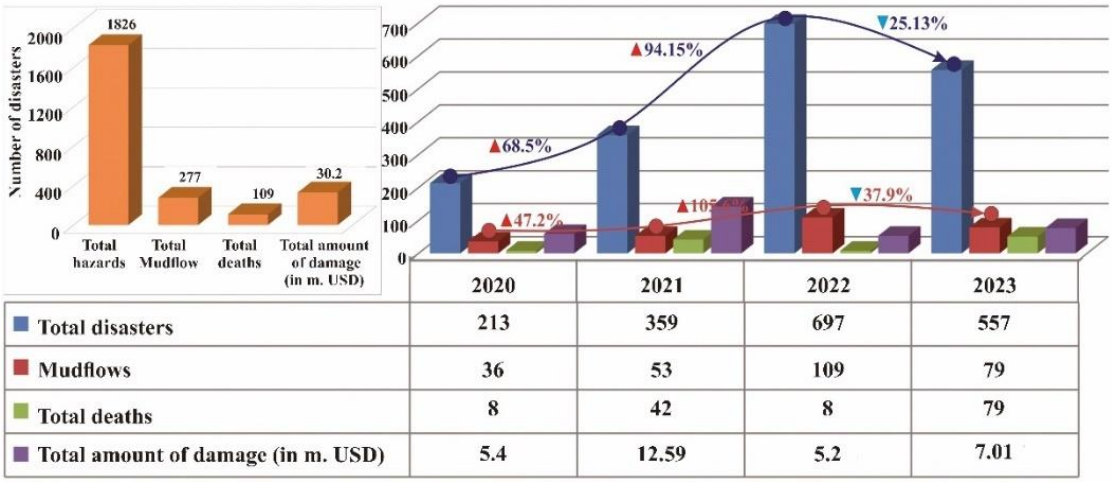
Moreover, the study integrated Advanced Land Observing Satellite (ALOS) Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR) Digital Elevation Model (DEM) data with a resolution of 12.5 meters sourced from the Alaska Satellite Facility (ASF) Distributed Active Archive Center (DAAC) (ASF, 2023). This dataset was used to generate slope, aspect, and contour maps of the debris flow basins across the selected sites. Validation methods were

employed to assess the accuracy of the derived indices and comparison with existing datasets. By incorporating these detailed methodologies, the study ensured a robust and comprehensive analysis of debris flow-prone areas using satellite and UAVs imagery.

Results and discussion

Natural disasters in Tajikistan for 2020–2023 using UAVs

The study reveals that natural disasters occur in Tajikistan almost in every year. Fig. 2 provides information on natural disasters in Tajikistan for the period from 2020 to 2023, observed nearly 1826 disasters were accompanied by casualties resulting in the death of 109 people. The maximum number of disasters in Tajikistan was noted in 2022, where it was gradually declined by 25.1% along with significant reduction of debris flow events up to 37.9% in 2023.



	2020	2021	2022	2023
Total disasters	213	359	697	557
Mudflows	36	53	109	79
Total deaths	8	42	8	79
Total amount of damage (in m. USD)	5.4	12.59	5.2	7.01

Fig. 2. Natural disasters in Tajikistan for the period 2020–2023

In 2020, 213 natural emergencies were registered, including 95 cases of avalanches, 36 cases of debris flows, 30 earthquakes, 21 strong winds, 9 heavy rains, 9 rockfalls, 6 landslides, 4 cases of rising water levels in reservoirs, and 2 cases of thunderstorms. Analysis of emergency situations in 2021 showed that 359 natural disasters were registered in Tajikistan, including 153 avalanches, 53 floods, 42 rockfalls, 40 strong winds, 33 earthquakes, 19 rises in water levels in reservoirs, 8 torrential rains, 7 landslides, 1 soil erosion with collapse, 1 severe cold, and 1 thunderstorm with lightning.

Regarding the situation in 2022, the number of natural disasters amounted to 697, a 94.2% increase from 2021, and the number of debris flows over the same period increased 2.1 times. In 2023, 48 out of 557 recorded natural emergencies in Tajikistan caused damage to the population and economy of the country amounting to around 7 million USD (Fig. 2). In 2020, the damage due to natural disasters and catastrophic events amounted to 5.4 million USD, of which debris flows individually accounted around 1,85 million USD. Over the past four years, the total amount of damage from natural phenomena reached 30.2 million USD.

Intensive and integrated evaluation of debris flow activity from 2020 to 2023 in Tajikistan is illustrated in Fig. 3. Considering the current situation, the implementation of modern monitoring technologies, including UAVs, in areas with risks of natural disasters, as well as methods for processing it, has allowed a comprehensive state-of-art of debris flow-prone areas and assessment of regional damage along with their consequences in various regions of Tajikistan for the period 2020–2023 (Fig. 4).

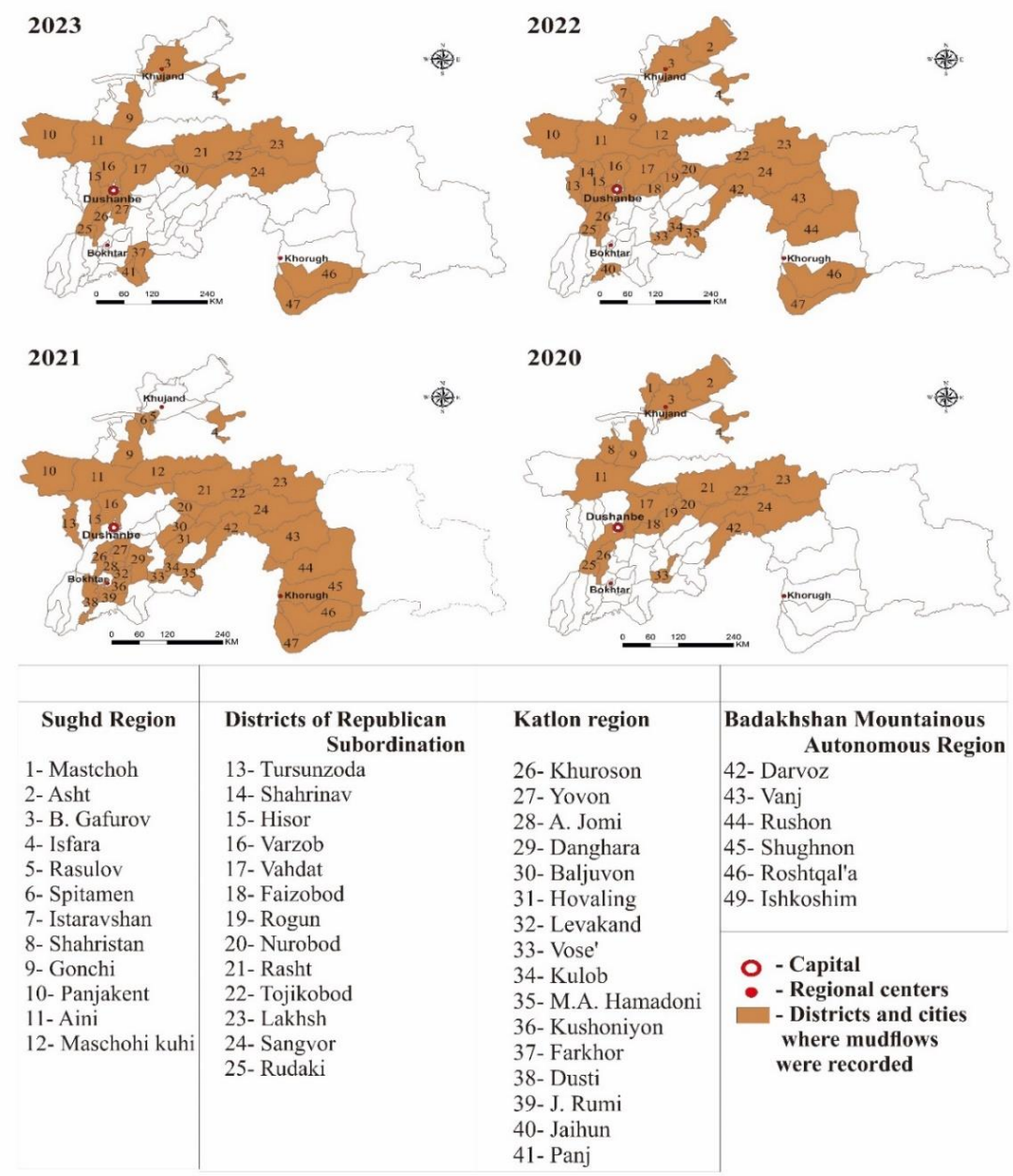


Fig. 3. Distribution of debris flows in Tajikistan for 2020–2023

Fieldwork included aerial photography of the consequences of debris flows in certain areas of the Khuroson district, Khatlon region, revealing flooded residential buildings and personal plots of local residents (Fig. 4*a*). In total, 338 residential buildings were damaged by debris flows and landslides, with 14 houses completely destroyed, a few houses are partially destroyed, and 12 houses dismantled by locals.

In the Shurak River basin in the Tojikobod district (Fig. 4*b*), rainfall and lake outburst-induced debris flows have been observed periodically, causing significant damage to the regional economy and, in some cases, to residential buildings. The debris flow prone area in this region has been gradually expanded, with changing the river course, and agricultural lands.

Investigation of the debris flow situation in the Vakhsh district (Fig. 4*c*) determined that 4 villages were damaged by the disaster. Operational data from the disaster response headquarters as of May 16, 2021, reported that 46 houses were completely destroyed, 43 houses were partially damaged, and 2.5 thousand hectares of land washed away along with the destruction of 5 bridges and roads due to the debris flow.

The research also covered the territory of the debris flow-prone area Veshist in Panjakent city (Fig. 4*d*). Visible changes after the debris flow, such as a destroyed bridge, debris flow deposits on a residential building's land, and the Zarafshan river bank, were observed in the Veshist village area. From 2013 to 2021, the area covered by debris flow deposits has increased, affecting the river's coastline due to the deposition of sediments stretching over 120 meters (Fig. 4*d*).

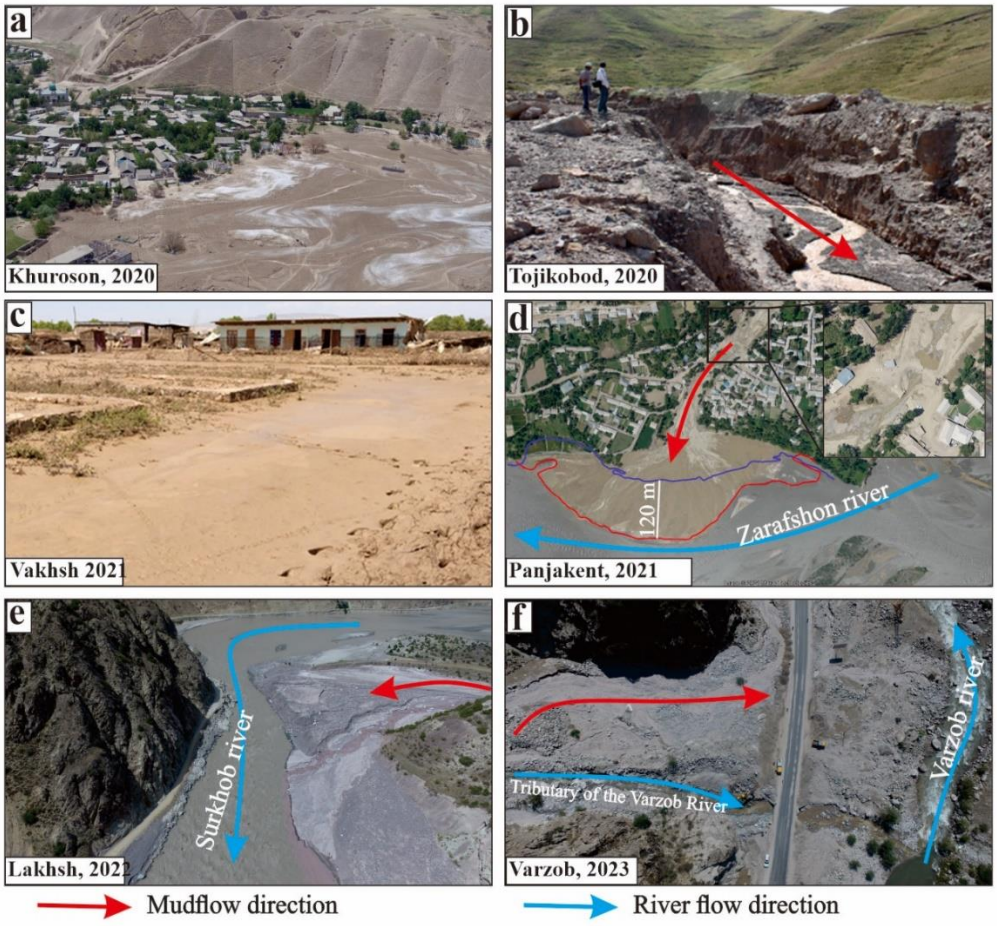


Fig. 4. Consequences of debris flow in various regions of Tajikistan for the period 2020–2023. Photo by M.S. Safarov

In the Lakhsh district (Fig. 4*e*), debris flows of various types and volumes have become more frequent on the slopes of the Peter the Great ridge in recent decades. In the lower reaches of the Baralmos glacier, debris flows form due to glacier melting and glacial lake outburst in the river basin of Archakapa. Such debris flows and outburst floods, spreading several kilometers down the valleys, have led to the destruction of the international highway and blockage of the river bed in the Surkhob (Fig. 4*e*).

Research also covered sections of the Dushanbe-Khujand highway prone to debris flows and avalanches, which mostly depend on the seasons. Aerial photography was conducted in the Gusgarf and 50 km sections in the Varzob district (Fig. 4*f*), revealing damage to houses, asserts or properties, vehicles, and the highway, with 15 cars buried under mud and debris after debris flow in August 2023.

Thus, through aerial photography, archival data study, and orography analysis confirmed that these areas are periodically susceptible to debris flows. Analyzing satellite images from Google Earth before the debris flow and comparing them with aerial photographs taken after the debris flow using UAVs revealed details of the destruction of several houses, the zone of debris flow formation, destroyed roads, and other damaged objects. Fig. 5 shows the results of

mapping the study areas before and after the debris flow in the Khuroson (*a*, *b*, *c*) and Vakhsh (*d*, *e*, *f*) districts of the Khatlon region.

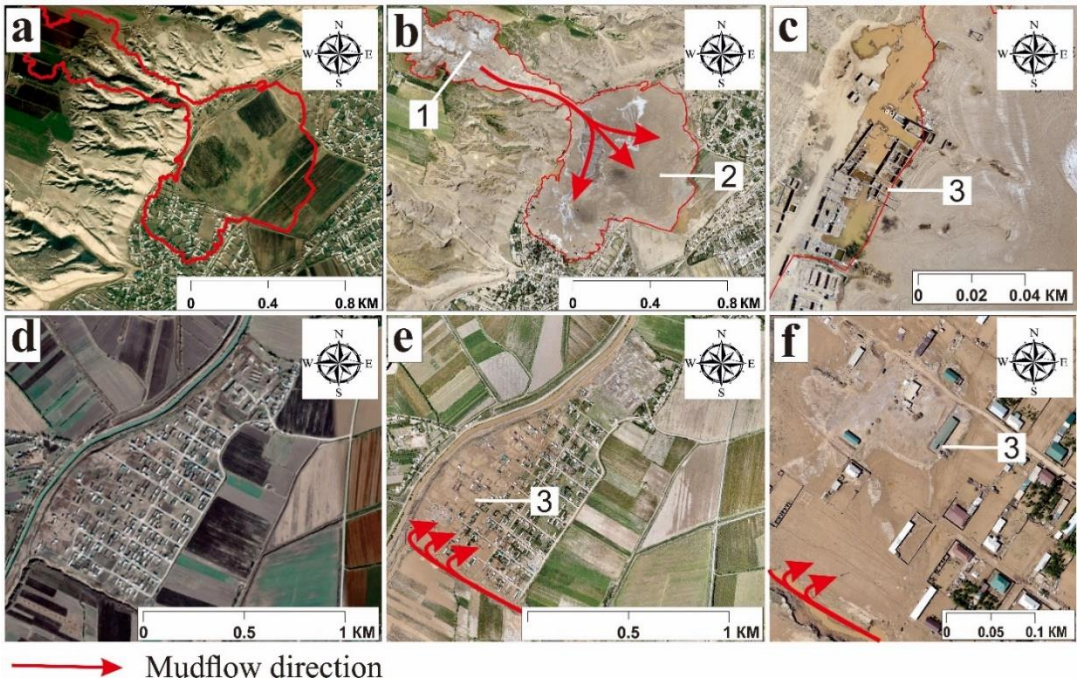


Fig. 5. Mapping of the study areas before and after the debris flow in the Khuroson (a–c) and Vakhsh (d–f) districts of the Khatlon region: a, d – © Google Earth images before the debris flow; b, c, e, f – orthomosaics of areas obtained from the results of aerial photography using a UAV after the debris flow. Designations: 1 – debris flow formation zone, 2 – debris flow deposits, 3 – residential buildings destroyed after the debris flow. Spatial resolution – 5.62 cm/pixel (Khuroson region) and 4.69 cm/pixel (Vakhsh region)

Using Sentinel-2, the most notable change was identified at the Khuroson site, where both NDWI and NDVI displayed a significant alteration following the debris flow event (Fig. 6). Moreover, discernible changes were also observed in the Tojikobod and Lakhsh regions, where large-size debris type debris flows are commonly encountered. Fig. 6 (Id-VId) visually illustrates the presence of the steepest slopes in the Tojikobod and Lakhsh areas, potentially influencing the frequency and severity of debris flows in these locations. It was determined that the Khuroson area primarily experiences rain-induced debris flows, while the Tojikobod area is characterized by rain-snow-induced debris flows. On the other hand, the Lakhsh area is prone to glacial-induced debris flows, with mudslides triggered by outbursts of glacial lakes on the Said Nafisi glacier (Baralmos). The unique nature of these debris flow events underscores the diverse environmental factors at play in each region, shaping the occurrence and impact of such natural phenomena.

Fig. 7 shows the mapping of areas prone to debris flows in various regions of Tajikistan. It has been established that in three studied areas, the debris flows are mostly characterized by clay in composition, whereas some areas were covered by mud-stone, and in few places with mixture of clay and mud-stone. Based on the identified current and previous debris flow deposits, the periodicity of debris flow events in the study areas was confirmed, which corresponds with the conclusions of previous studies [*Atutova et al., 2018; Safarov et al., 2023*], those reported that high-mountain regions are the source of mud-stone flows by long-transported river channels. In the mountainous terrain of Tajikistan, the use of remote sensing monitoring and early warning systems (EWS) could help eradicate such issues, which are currently lacking in the region [*Pecoraro et al., 2019*]. Flexible ring mesh barriers are proposed as an alternative to concrete dams and barrage systems to reduce slope and bottom erosion

caused by debris flows [*Wendeler et al., 2019*]. Nonetheless, continuous monitoring and local-level EWS remain collectively significant in minimizing potential hazards like debris flows.

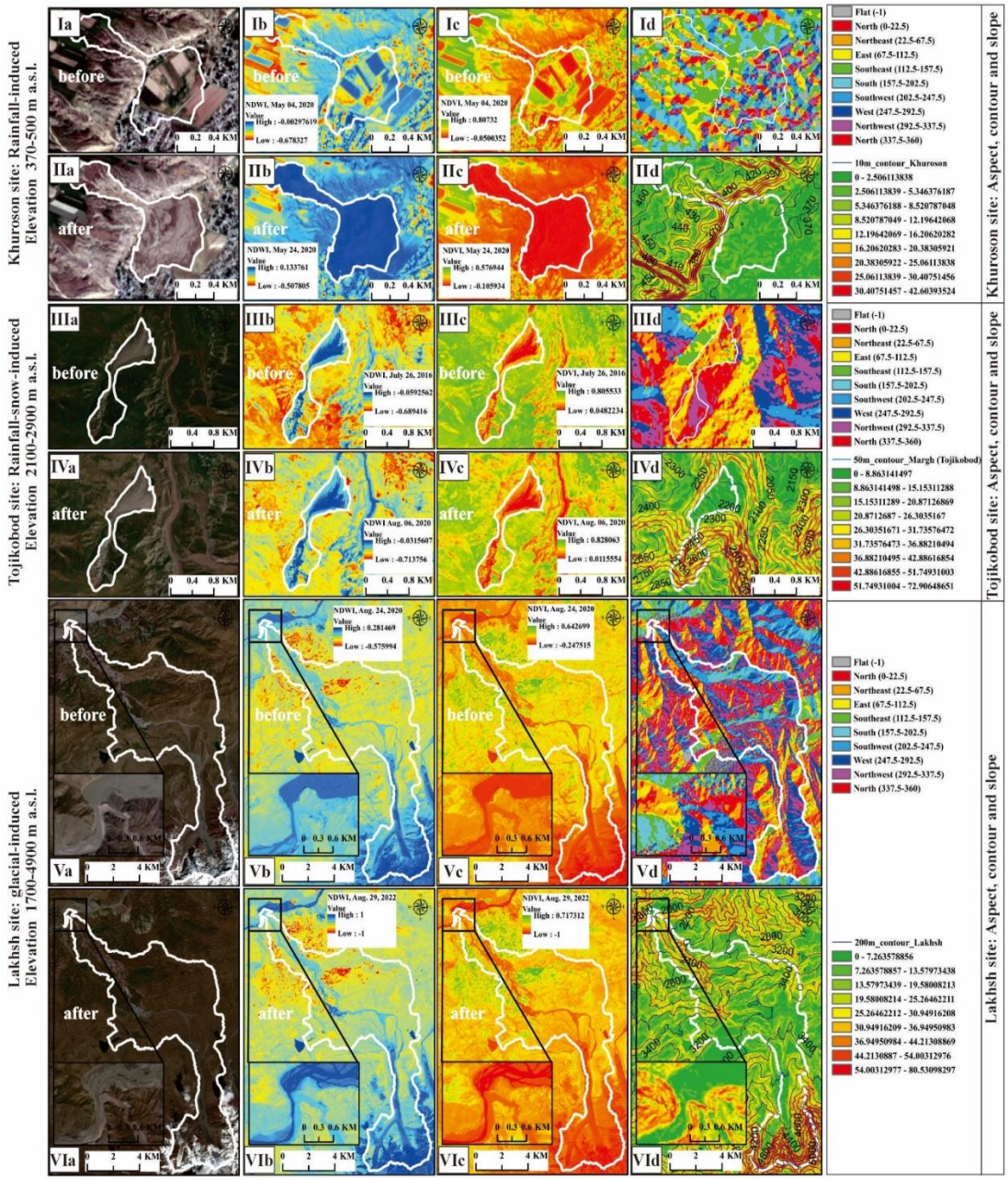


Fig. 6. Observation of changes in the study area by using pre- (Ia-c, IIIa-c, Va-c) and post-event (IIa-c, IVa-c, VIa-c) Sentinel-2 images and Slope, aspect and elevation contours (1d-6d) for selected sites

Conclusions

The research conducted from 2020 to 2023 in Tajikistan has provided valuable insights into the prevalence and impact of hazardous natural phenomena, particularly debris flows. The application of UAVs and satellite data has been instrumental in detecting changes and analyzing patterns in these regions.

Notable changes were observed in Khuroson, Tojikobod, and Lakhsh districts, where significant alterations were detected using both NDWI and NDVI. The composition of debris flows in the six studied areas was predominantly clay, with some regions also covered by mud-stone, and a few areas exhibiting a mixture of clay and mud-stone. These findings underscore

the importance of incorporating remote sensing technologies, particularly UAVs and Sentinel-2, into disaster research and response efforts.

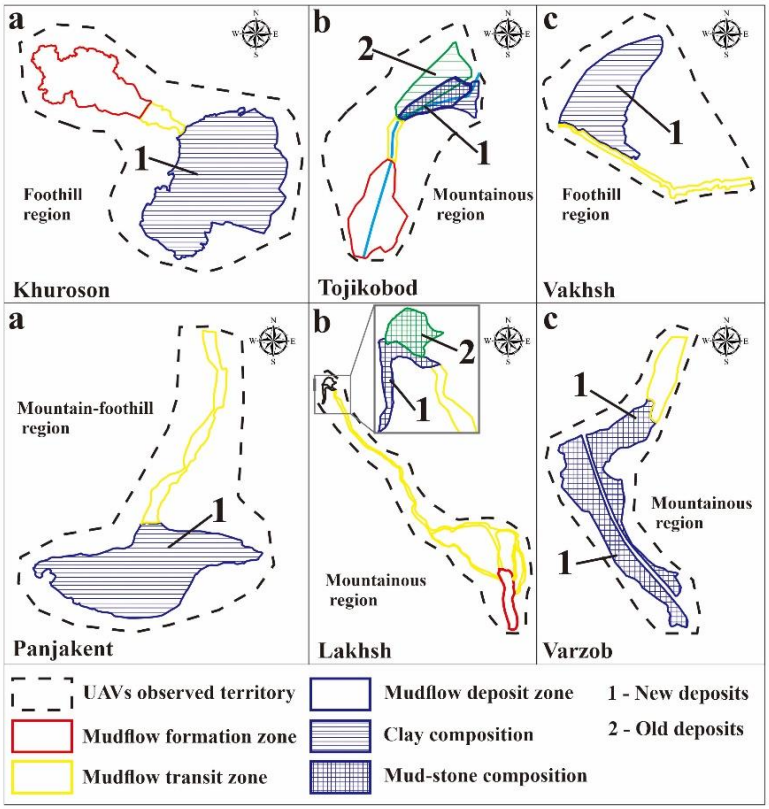


Fig. 7. Mapping of areas prone to debris flows in Tajikistan, using the example of selected areas

The research outcomes have facilitated the identification of high-risk areas prone to natural disasters, evaluating damage, and assessing the extent of debris flow impacts across various regions in Tajikistan. The study identified 49 districts and cities affected by debris flows during the study period, resulting in an estimated 30.2 million US dollars in damages.

Integrating UAV and remotely sensed technologies into monitoring and assessment frameworks is crucial for strengthening preparedness and resilience to natural disasters. By leveraging these technologies, we can minimize infrastructure damage, reduce human casualties, and improve overall disaster response coordination for upcoming events.

Acknowledgements

The research reported in this paper is funded by the Gansu Postdoctoral Science Foundation (Grant number – E339880204) and the research project "The use of unmanned aerial vehicles for monitoring typical mountain hazards in Tajikistan". Overall, we express our sincerest gratitude to everyone who has been involved in this research endeavor.

References

ASF (Alaska Satellite Facility) (2023) ALOS PALSAR DEM. Retrieved from https://search.asf.alaska.edu/

Atefi, M.R.; Miura, H. Detection of Flash Flood Inundated Areas Using Relative Difference in NDVI from Sentinel-2 Images: A Case Study of the August 2020 Event in Charikar, Afghanistan. Remote Sens. 2022, 14, 3647. https://doi.org/10.3390/rs14153647

Atutova Zh.V., Makarov S.A. Experience in the use of unmanned aerial vehicles in the study of landscapes in areas of the spread of dangerous exogenous processes. / Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference Application of unmanned aerial vehicles in geographical research. Irkutsk, May 22–23, 2018 p. 7–10 (in Russian)

Bai, Hl., Feng, Wk., Li, Sq. et al. Flow-slide characteristics and failure mechanism of shallow landslides in granite residual soil under heavy rainfall. J. Mt. Sci. 19, 1541–1557 (2022). https://doi.org/10.1007/s11629-022-7315-8

Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S. Monitoring of landslides, landslides and other destructive processes in the high-mountain zone based on the analysis of multi-temporal satellite images // Study of hazardous natural processes and geotechnical monitoring during engineering surveys: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Moscow, March 18, 2021. – Moscow: Geomarketing, – pp. 59–68. – EDN OPRUCV. 2021. (in Russian)

Fazylov A.R., Fazylov V.A. Hydraulic engineering measures and regulation of mudflows in conditions of climate change // Bulletin of the Don State Agrarian University. – No. 2–1(24). – pp. 105–113. – 2017a. (in Russian)

Fazylov A.R., Lavrov N.P., Niyazov D.B. Mudflow safety in Tajikistan // Sat. scientific tr. FSBEI HPE RSATU "Modern energy- and resource-saving, environmentally sustainable technologies and agricultural production systems"; edited by N.V. Byshova. – Ryazan, – S. 77.80. 2017b. (in Russian)

IPCC 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Author Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (ed.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 163 p.

Karamuz E., Romanowicz R. J., Doroszkiewicz J. The use of unmanned aerial vehicles in flood hazard assessment //Journal of Flood Risk Management. – 2020. – T. 13. – №. 4. – C. e12622.

Medeu A.R., Askarova M.A., Blagoveshchensky V.P. [and etc.]. Concept of monitoring mudflow hazard in Ile Alatau // Mudflows: disasters, risk, forecast, protection: proceedings of the 5th International Conference, Tbilisi, Georgia, October 01–05, 2018 / Mudflow Association; Institute of Water Management named after. Ts. Mirtskhulava Georgian Technical University. – Tbilisi, Georgia: Universal, 2018. – P. 492–498. – EDN VUJUOV. (in Russian)

Mergili, M., Kopf, C., Müllebner, B. and Schneider, J.F., 2012. Changes of the cryosphere and related geohazards in the high-mountain areas of Tajikistan and Austria: a comparison. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 93, 79–96. doi:10.1111/j.1468-0459.2011.00450.x

Musaeva M.Kh., Kalel M.Kh., Ergaliev D.S. Integration of remote sensing and UAV systems for the prevention and monitoring of emergency situations in the Republic of Kazakhstan // Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality". – 2018. – T. 2. – P. 27–29. (in Russian)

Mustaeva N, Wyes H, Mohr B, Kayumov A (2015) Tajikistan: Country situation assessment. PRISE working paper. https://carececo.org/upload/02/eng_CSA_Tajikistan.pdf

Pecoraro G, Calvello M Piciullo L (2019) Monitoring strategies for local landslide early warning systems. Landslides. 16:213–231 https://doi.org/10.1007/s10346-018-1068-z

Safarov M.S., Fazylov A.R. Application of modern remote sensing technologies for monitoring mudflow-prone areas of mountainous territories // GeoRisk. –Volume XIV, -2020. -No. 2. -WITH. 32–41, https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-32-41 (in Russian)

Safarov M.S., Fazylov A.R. Mudflow activity in the Archakapa river basin // News of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Department of physical, mathematical, chemical, geological and technical sciences. – 2022. – No. 2(187). – pp. 125–135. – EDN ZYTWVQ. (in Russian)

Safarov M.S., Fazylov A.R. Remote sensing and monitoring of mudflow-prone areas in the mountainous territories of Tajikistan. – Dushanbe: "Promexpo", 2023. –192 p. (in Russian)

Scaini, C., Tamaro, A., Adilkhan, B., Sarzhanov, S., Ergashev, Z., Umaraliev, R., Safarov, M., Belikov, V., Karayev, J., and Fagà, E.: A regional-scale approach to assessing non-residential building, transportation and cropland exposure in Central Asia, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 24, 355–373, https://doi.org/10.5194/nhess-24-355-2024, 2024.

Shvarev S.V., Kharchenko S.V., Golosov V.N., Uspensky M.I., 2020. Causes and consequences of man-made activation of mudflows in 2006–2019. on the catchment area of the tributary of the stream. Sulimovsky (near the village of Krasnaya Polyana, Western Caucasus). GeoRisk, Vol. XIV, No. 2, p. 66–76, https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-66-76. (in Russian)

Stupin V.P., Plastinin L.A., Olzoev B.N., 2020. The capabilities of remote sensing materials as an information basis for mapping mudflow hazard in the Baikal Mountain region. GeoRisk, Vol. XIV, No. 2, p. 78–87, https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-78-87 (in Russian)

Tatham P. An investigation into the suitability of the use of unmanned aerial vehicle systems (UAVS) to support the initial needs assessment process in rapid onset humanitarian disasters //International journal of risk assessment and management. – 2009. – Т. 13. – №. 1. – С. 60–78.

Wendeler C, Volkwein A, McArdell BW, Bartelt P (2019) Load model for designing flexible steel barriers for debris flow mitigation. Canadian Geotechnical Journal 56(6):893–910. https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0157

Xu, Fg., Yang, Xg. & Zhou, Jw. An empirical approach for evaluation of the potential of debris flow occurrence in mountainous areas. Environ Earth Sci 71, 2979–2988 (2014). https://doi.org/10.1007/s12665-013-2667-6.

Сели в долине реки Ихир (горный массив Шалбуздаг, Дагестан, Россия) и их взаимосвязь с оползнями

Е.А. Савернюк, О.В. Зеркаль, С.С. Черноморец

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, savernyuk@geogr.msu.ru

Аннотация. Анализ разновременных и разномасштабных космических снимков позволил выявить следы недавних крупных оползней на малопосещаемом и труднодоступном для полевого изучения в бассейне р. Ихир (Мазачай, Ахтычай, Самур) юго-западном склоне г. Шалбуздаг (Россия, Республика Дагестан, Ахтынский район). Проанализировано развитие оползневых и селевых процессов за более чем полувековой период, начиная с 1965 г. Приведены схемы развития оползней в бассейне р. Ихир. Сделан вывод о том, что оползневые процессы в привершинной части г. Шалбуздаг будут продолжаться в ближайшие 10 лет. Показано, что селевые потоки в бассейне реки Ихир возникают прежде всего в периоды сильной оползневой активности. Оползни-потоки проходят в долине на значительные расстояния по отложениям предыдущих событий.

Ключевые слова: *селевой поток, оползень, Шалбуздаг, Дагестан*

Ссылка для цитирования: Савернюк Е.А., Зеркаль О.В., Черноморец С.С. Сели в долине реки Ихир (горный массив Шалбуздаг, Дагестан, Россия) и их взаимосвязь с оползнями. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 458–469.

Debris flows in the Ikhir River valley (Mt. Shalbuzdag, Dagestan, Russia) and their relationship with landslides

E.A. Savernyuk, O.V. Zerkal, S.S. Chernomorets

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, savernyuk@geogr.msu.ru

Abstract. Using the interpretation of multi-temporal and multi-scale satellite images, we identified traces of recent large landslides on the southwestern slope of Mount Shalbuzdag (Russia, Republic of Dagestan, Akhtyn region) in the Ikhir River basin (Mazachay, Akhtychay, Samur), which is rarely visited and difficult to access for field study. We analyzed the development of landslide and debris flow processes over a period of more than half a century, starting from 1965. This study presents a detailed analysis of landslide development in the Ikhir River basin. The findings indicate that the landslide processes observed in the upper part of Shalbuzdag will persist over the next 10 years. Moreover, the analysis reveals that debris flows in the Ikhir River basin have occurred particularly during periods of strong landslide activity. Landslide-flows traverse the valley for considerable distances along the sediments of previous events.

Key words: *debris flow, landslide, Shalbuzdag, Dagestan*

Cite this article: Savernyuk E.A., Zerkal O.V., Chernomorets S.S. Debris flows in the Ikhir River valley (Mt. Shalbuzdag, Dagestan, Russia) and their relationship with landslides. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 458–469.

Введение

Горная часть Дагестана располагается в северо-восточной части Кавказской горной системы. Наиболее возвышенная территория горного Дагестана – Главный Кавказский хребет, который находится в его южной части. Годовое количество осадков вследствие высотной поясности, различной экспозиции склонов, а также близости Каспийского моря колеблется в значительных пределах, достигая в высокогорной части Дагестана 1000 мм/год и более. Выпадение интенсивных ливневых осадков нередко сопровождается формированием селей, которые зачастую могут носить катастрофический характер. Помимо селеобразования территория горного Дагестана характеризуется наличием благоприятных условий для интенсивного оползнеобразования, что предопределяется особенностями геоморфологических условий и геологического строения региона, а также его высокой сейсмичностью [*Идрисов, 2013; Разумов, 2019*]. При этом нередко процессы селе- и оползнеобразования находятся в тесной взаимосвязи, обуславливая каскадность в развитии опасных природных процессов.

В 2019 г. в Самурском национальном парке был образован горный кластер «Шалбуздаг» который расположился на северных склонах Главного Кавказского хребта и его отрогах, образующих Базардюзи-Шалбуздагское высокогорье. Южная граница кластера проходит по государственной границе России и Азербайджана. В кластер входят высокие горные массивы Восточного Кавказа – Базардюзи (4466 м), Ярыдаг (4116 м), Шалбуздаг (4142 м), Рагдан (4020 м) и Малкамуд (3880 м).

В связи с растущим потоком туристов встает вопрос об интенсивности проявлений различных процессов на территории кластера и в целом о возможных максимальных масштабах таких процессов как обвалы, оползни и сели. В настоящей работе приведены первые результаты исследования взаимосвязей и взаимовлияния обвальных, оползневых и селевых процессов в малоизученном бассейне р. Ихир на юго-западном склоне г. Шалбуздаг, как примера современной активизации оползневых и селевых явлений в обвальных отложениях.

Ранее проводившиеся исследования показали существенную селевую опасность северной долины р. Гуркам и бассейна р. Мазачай как бассейнов с преимущественно дождевым генезисом селей с расходами 5–50 $м^3/с$ и объемами выносимого твердого материала от первых до 10 тыс. $м^3$ [*Карта…, 2012; Кадастр…, 2015*]. В упомянутых работах бассейн р. Ихир как часть и исток р. Мазачай не выделен как отдельный селевой бассейн. Это объясняется тем, что оползневые процессы и сели в этом бассейне начали только развиваться как раз в период проведения первых работ. Проявление процессов на юго-западном склоне в 1970–1980-е гг. не достигало тех масштабов, которые имеются в долине сейчас. В рамках проведенных исследований для рассматриваемой территории было проанализировано развитие оползневых и селевых процессов за 58-летний период, начиная с 1965 г. по 2023 г.

Природные, геоморфологические и геологические условия района г. Шалбуздаг

Располагающийся в области внутреннего сланцевого Дагестана, в юго-восточной горной части Кавказского региона (рис. 1*а*) массив г. Шалбуздаг является одним из наиболее выразительных природных памятников Дагестана, живописно возвышающимся над окружающим рельефом (рис. 1*б*). Гора Шалбуздаг имеет максимальную отметку 4142 м и расположена в пределах Бокового Кавказского хребта. Со склонов горы берут начало истоки нескольких рек и ручьев, среди которых р. Гуркам, стекающая в северном направлении, р. Мугулахчай, текущая на северо-запад, р. Ихир, стекающая в западном направлении, а также многочисленные ручьи – левые притоки р. Мулларчай и р. Чехычай, протекающих у южного и восточного подножий горы (рис. 2).

Стекающая с юго-западных склонов Шалбуздага река Ихир является правым притоком р. Мазачай, впоследствии впадающей в р. Ахтычай, которая в свою очередь является притоком р. Самур. Высота истока р. Ихир находится около отметки 3800 м.

а б

Рис. 1. Район проведения работ: а – схема расположения объекта; б – вид с севера на горный массив Шалбуздаг (фото Е.А. Савернюк, 2024 г.)

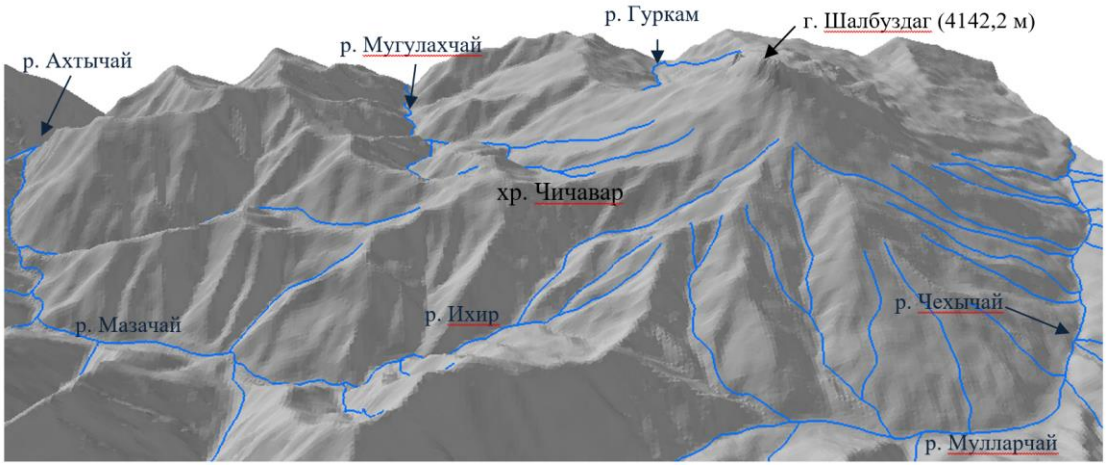


Рис. 2. Орографическая схема района г. Шалбуздаг (вид с юга)

Гора Шалбуздаг представляет собой останец синклинального плато, возвышающийся над окружающими водораздельными поверхностями (хр. Чичавар) на 1000–1100 м и долинами рек (р. Мулларчай, слияние р. Ихир и Мазачай) на 1700–1800 м. Массив Шалбуздаг имеет куэстообразный облик (рис. 1*б*) с достаточно пологим (6–10°) северо-восточным склоном и довольно крутым (50–60°) юго-западным склоном, постепенно выполаживающимся в средней части (до 25–30°). Максимальной крутизной (до 76–80°) характеризуется фрагмент восточного склона (протяженность ~350 м), представляющий собой зону отрыва «старой» крупномасштабной каменной лавины.

В привершинной части г. Шалбуздаг имеются следы оледенения, приуроченные преимущественно к северным ее склонам.

В тектоническом отношении территория располагается в восточной части мегантиклинория Большого Кавказа. Большинство разломов имеют простирание с северо-запада на юго-восток. Сейсмичность территории достигает 8–9 баллов [*Бабаян, 2011*]. В регионе зафиксированы землетрясения, в том числе наиболее крупное на Кавказе Шемахинское землетрясение 1668 (по другим данным, 1667) года [*Бабаян, 2011*].

В геологическом строении рассматриваемой территории, регионально относящейся к области сланцевого Дагестана, принимают участие раннесреднеюрские терригенные толщи, слагаемыми аргиллитами, алевролитами с прослоями песчаников и горизонтами дацитов, риолитов и их туфов с суммарной мощностью более 10 км.

Массив г. Шалбуздаг бронируется сверху верхнеюрскими и нижнемеловыми известняками. Особенностью геологического строения массива является наличие в разрезе высокопрочных гидротермально-измененных красноцветных железисто-карбонатных отложений мощностью до 400 м (рис. 3). В привершинной части горы

Шалбуздаг карбонатные отложения титона (J_3) налегают на размытую поверхность нижнего аалена (J_2). Ниже в основании залегают слоистые песчаники, алевролиты, аргиллиты нескольких свит средней и нижней юры ($J_{1–2}$) – карахской, хивской, хновской, и особенно свиты Ири. Основное место в строении песчано-сланцевой толщи, слагающей среднюю и нижнюю части склонов, имеют флишоидные пачки. В отдельных крупных интервалах разреза ведущая роль в строении толщи принадлежит пачкам оскольчатых сланцеватых аргиллитов, а пачки грубого флиша занимают подчиненное место. Алевролито-слюдисто-сланцевые толщи часто пересечены тонкими кварцевыми жилами и содержат мелкие диабазовые дайки мощностью до нескольких метров [*Халифа-Заде, Магомедов, 1982*].

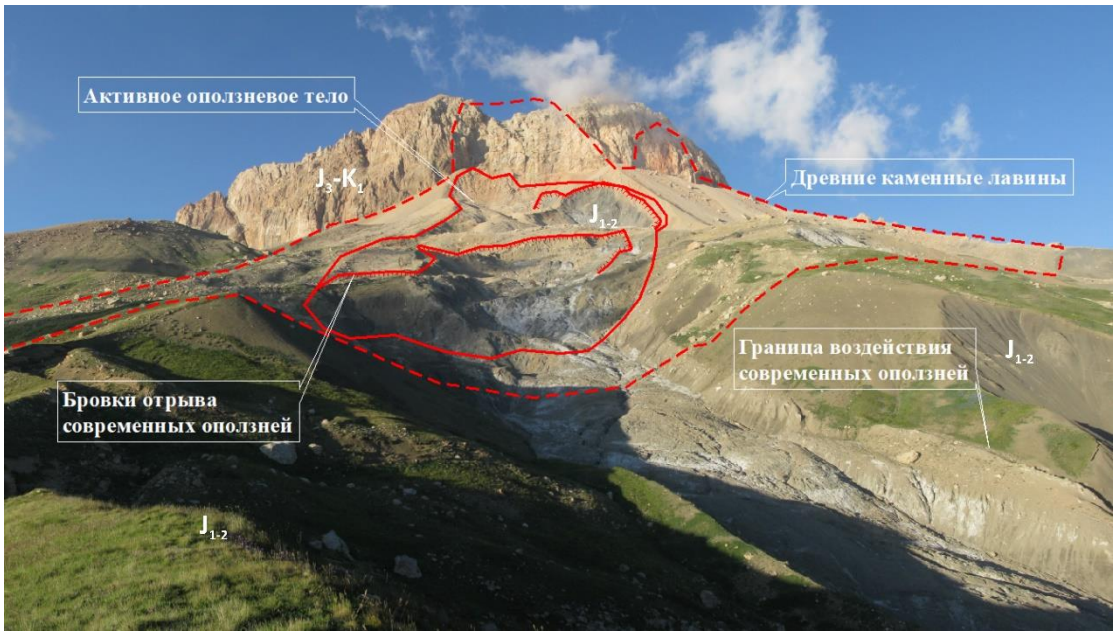


Рис. 3. Общий вид горного массива Шалбуздаг, особенности его геологического строения и развитие оползневых и обвальных процессов на юго-западном склоне в верховьях р. Ихир (фото М.В. Голубева, 17.07.2022 г.)

Верхняя часть геологического разреза рассматриваемой территории, за исключением привершинной части г. Шалбуздаг, слагается легко выветриваемыми юрскими глинистыми сланцами и четвертичными коллювиальными толщами. В этих отложениях на достаточно крутых склонах долин рек образуются разномасштабные оползни, поставляющие в русловую часть долин твердую составляющую селей. Глыбовая составляющая, выносимая селевыми потоками, формирующимися по долине р. Ихир, представлена известняками, источником которых являются отложения каменных лавин, зона отрыва которых расположена в области распространения верхнеюрских и нижнемеловых известняков привершинной части г. Шалбуздаг.

Методы

В ходе исследования, было проведено тематическое дешифрирование космических снимков за различные временные периоды. Начальной точкой изучения оползневых процессов стала ситуация в верховьях долины р. Ихир, зафиксированная на снимке KH-4B Corona от 24.05.1970 (разрешение 1,8 м/пикс.). При привязке разномасштабных данных в качестве базового слоя использован сервис ArcImagery в системе координат WGS84 в проекции UTM в зоне 38N. Для сравнения снимков была использована среда пакета ArcGIS 10.8 и инструмент Swipe (шторка). Снимки были привязаны по опорным точкам к базовому слою ArcImagery методом «резинового листа» из-за сильно расчлененного рельефа и относительно небольшого размера территории. По

снимкам более низкого разрешения устанавливались примерные границы событий, которые корректировались при сравнении со снимками более высокого разрешения с ресурса Google Earth и наземными фотографиями М.В. Голубева. Для сравнения использовались комбинации спектральных каналов в фальшивых и естественных цветах и в панхроматическом режиме.

Данные

В 1970-1980-е гг. в рамках тем по изучению селевых процессов на Северном Кавказе сотрудниками Географического факультета МГУ в результате экспедиций и при дешифрировании аэрофотоснимков были составлены карты селевых бассейнов Республики Дагестан [*Карта Ахтынского…, 1971; Карта оценки …, 1971*]. На этих картах селевые бассейны непосредственно с массива г. Шалбуздаг отмечены только в двух местах – р. Гуркам (№ 168) и 2 притока в верховьях р. Чехычай (№ 170). Эти карты легли в основу обновленной «Карты селевых бассейнов Северного Кавказа» [*Карта, 2012*], составленной под руководством В.Ф. Перова, на которой уже по всему периметру массива г. Шалбуздаг отмечены селевые бассейны разных порядков, как крупные, например р. Мазачай, р. Гуркам, так и более мелкие в ручьях без названий в общем количестве 7 шт. (№ 29-95, 29-98, 29-102, 29-103, 29-105, 29-106, 29-108) и один склоновый бассейн. В Кадастре [*Кадастр…, 2015*] эти бассейны даны под другими номерами (№ 6-118, 6-122, 6-126, 6-127, 6-129, 6-129, 6-130, 6-132 соответственно). Здесь же упомянуто, что процессы активного селепроявления в Дагестане отмечаются в течение года с мая по сентябрь. В 2020 г. сотрудниками Центра географических исследований Кабардино-Балкарского научного центра было проведено полевое обследование бассейна р. Самур с целью инвентаризации опасных природных процессов [*Кюль, Гедуева, 2021; Гедуева, 2022*].

При дешифрировании нами были использованы космические снимки KH-4A Corona J-1 (2,75 м/пикс.) от 10.10.1965, KH-4B Corona-J3 (1,8 м/пикс.) от 24.05.1970, Landsat 4–5-TM за период 1984–2011 гг., Landsat 7 ETM+ за 2012 и 2013 гг., Landsat 8 с 2014 по 2016 гг., SPOT 1 за 1987 и 1997 гг., Spot 2 за 1993 г., Spot 5 с 2002 по 2007 гг., Sentinel-2 с 2016 по 2023 гг., базовый слой ArcImagery, снимки с Google Earth (картографические данные: Google, Maxar Technologies), а также наземные фотографии М.В. Голубева от 17.07.2022.

В качестве исходных метеоданных использованы данные по метеостанции Ахты (ВНИИГМИ МЦД) [*Специализированные…, 2024*]. Данные по землетрясениям получены с ежегодников [*Ежегодник..., 2024*].

Анализ

При дешифрировании на снимке 24.05.1970 г. отмечены многочисленные светлые полосы по водотокам в бассейне р. Гуркам и почти во всех бассейнах со склона г. Шалбуздаг. Этот факт дает основание полагать, что на данной территории возможно был массовый сход селевых потоков в 1963 г., когда по данным метеостанции (м/с) «Ахты» в мае – июне выпало 197,5 мм осадков (рис. 4), либо в 1968 г.

При дешифрировании снимков за 1970–2023 гг. установлены 11 периодов, в которые происходили оползни, прошедшие расстояние более 500 м [*Савернюк и др., 2024*]. Количество периодов оползневой активизации достаточно хорошо коррелирует с количеством пиков с повышенными среднегодовыми суммами осадков, отмеченных в рассматриваемом регионе (по метеостанции Ахты) (рис. 4).

Основные события в этот период происходили в привершинной части оползневого склона в районе отметок 3400–3500 м. В центральной (средней) и нижней части склона видимых и значимых изменений не установлено.

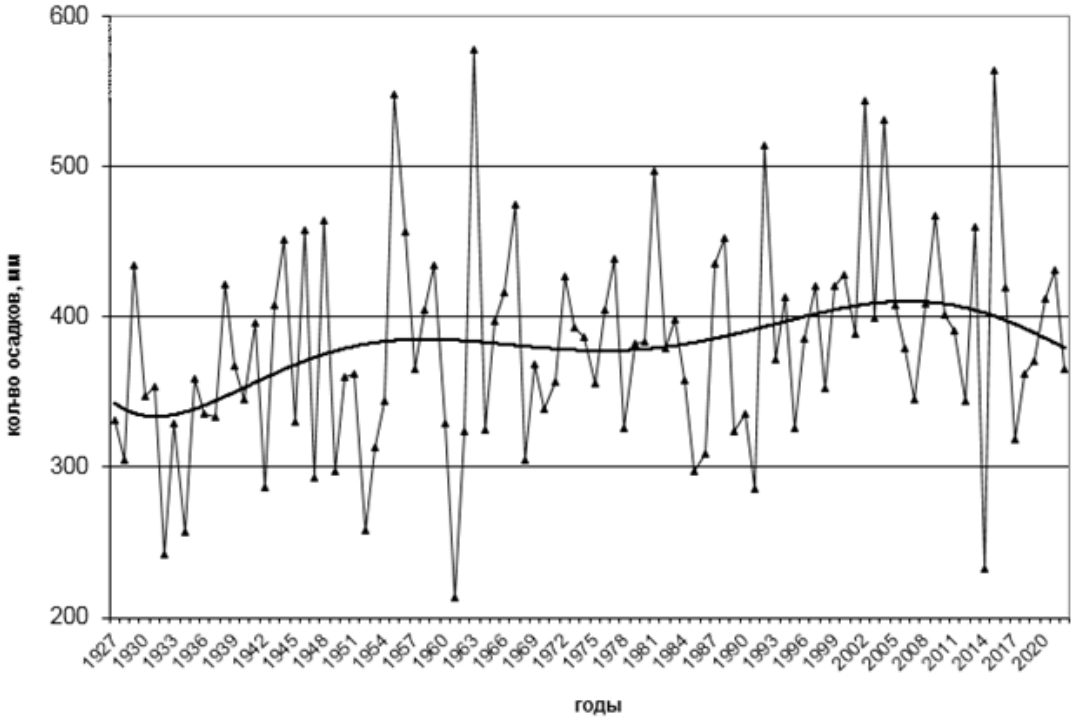


Рис. 4. Изменение среднегодовых сумм осадков (по данным м/с «Ахты»)

На снимке 24.05.1970 было выделено 4 оползневых тела (период № 1 в таблице 1). Образование этих оползней (рис. 5), по-видимому, произошло ранее, в 1969 г., характеризовавшемся высокими значениями среднегодовой суммы осадков. В правой части склона в районе отметок 3150–3350 м ширина оползневых отложений составляла 100–150 м. Ниже отметки 3150 м ширина отложений колеблется от 60 до 40 м, и далее до отметки 2890 м ширина падает до 20 м. Ниже отметки 2660 м на протяжении 1150 м отмечается светлая полоса селевых отложений. В районе отметок 2660–2800 м русло реки отклоняется вправо, огибая небольшую террасу, которая в последующие годы будет отклонять все оползни, направляя на правый борт долины, и в некоторой степени замедлять их движение. После террасы имеется коренной выступ с правого берега, который некоторое время играл роль гасителя оползней на этом участке. Ниже него уклоны резко меняются, что способствует аккумуляции на участке с отметками 2570–2670 м – нижнем поле отложений оползневых масс.

С 1970 г. по 1986 г. по снимкам фиксировались только незначительные изменения в оползневом цирке. В период между 04.05–25.06.1987 сошел первый оползень с горизонтальным проложением 1430 м (№ 2 в таблице 1). Событие установлено по светлой полосе в районе отметок 2850–2960 м. На снимке от 25 июня снежный покров в основном оползневом цирке уже сошел, но пятнами оставался выше отметки 3600 м.

В период с августа 1987 г. по июнь 1990 г. в оползневом цирке отмечены незначительные изменения, а также появление оползневого языка в районе отметок 3070 м.

Следующее крупное событие (№ 4 в таблице 1) произошло в период с 01.06-19.07.1993. Оползневые массы отложились на нижнем поле аккумуляции в районе отметки 2565 м, пройдя 2730 м. Ширина полосы отложений увеличилась с 20 до 50 м. После этого оползня последовал длительный перерыв – с сентября 1993 г. по июнь 2004 г. отмечаются незначительные изменения в районе отметок 3100 м и выше. По поверхности оползневых отложений сформировалось новое русло р. Ихир.

В 2004 г. последовала серия крупных событий с дальностью выброса от 1580 м до 3880 м (№ 5–7 в таблице 1, рис. 6). Контуры самого крупного события № 7 были

проведены в процессе сравнения снимка SPOT 5 от 05.09.2004 и снимка из Google Earth от 18.09.2005 по последнему.

На снимке 2005 г. отложения внешне выглядят выпуклыми, видны примазки на склонах по пути движения, а также следы растекания и заполнения боковых ущелий.

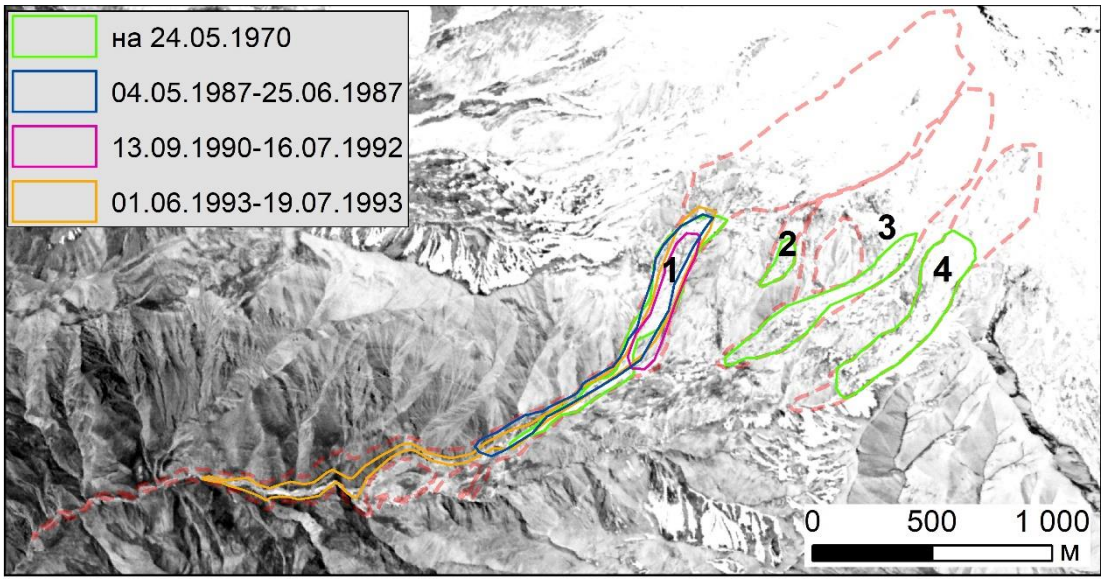


Рис. 5. Схема оползневых событий за период 1970–1993 гг. Красным пунктиром отмечены современные границы оползневого процесса. Подложка – снимок KH-4B Corona-J3 (1,8 м/пикс.) от 24.05.1970

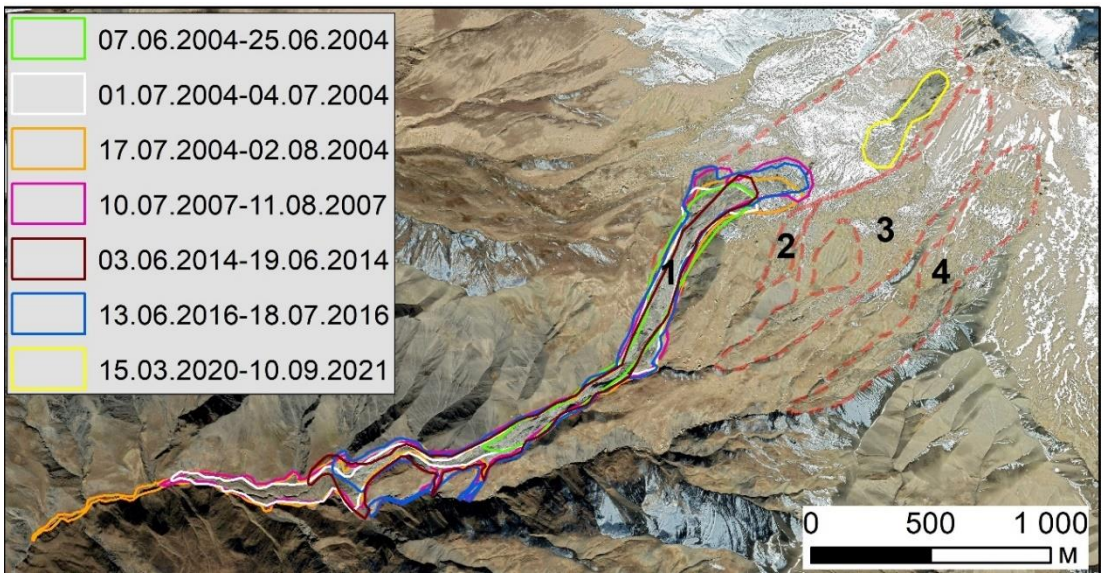


Рис. 6. Схема оползневых событий за период 2004–2021 г. Красным пунктиром отмечены современные границы оползневого процесса. Подложка – космический снимок от 04.10.2016, Google, Maxar Technologies

Отмечен первый случай небольшого перехлеста масс через гребень в районе отметки 2860 м. По сравнению с 1993 г., ширина нижнего поля отложений возросла до 70–100 м, а нижний конец отложений продвинулся вниз по течению на 760 м. По приведенным к высоте 3800 м данным м/с «Ахты» с 1 июня по 2 августа минимальные температуры воздуха редко поднимались выше 0°С, а средняя температура воздуха за этот период составила 1,5 °С. При этом по м/с Ахты выпало 143,2 мм осадков, а в период со 2 августа по 13 сентября 2004 г. – еще 94,5 мм. Вероятно, это способствовало

разработке каналов стока в теле оползневых отложений – на снимке 2005 г. они хорошо читаются.

В следующие три года значительных изменений не наблюдалось. В 2007 г. очередное крупное событие (№ 8 в таблице 1) сформировалось при низких осадках по м/с Ахты (16,2 мм) и средней температуре воздуха 4,3°С, что наводит на размышления о существовании в оползневом цирке рыхлых пород в мерзлом состоянии выше отметки 3400 м. Основная масса отложилась выше коренного выступа и террасы. Из-за повышения поверхности произошел выплеск в районе отметки 2860 м. Позже здесь сформируется новое русло р. Ихир. После события на участке между выступом и террасой в левом кармане образовалось небольшое подпрудное озерцо шириной около 90 м (рис. 7). Вероятно, в этот же период сошел небольшой оползень в крайнем левом цирке оползневого склона.

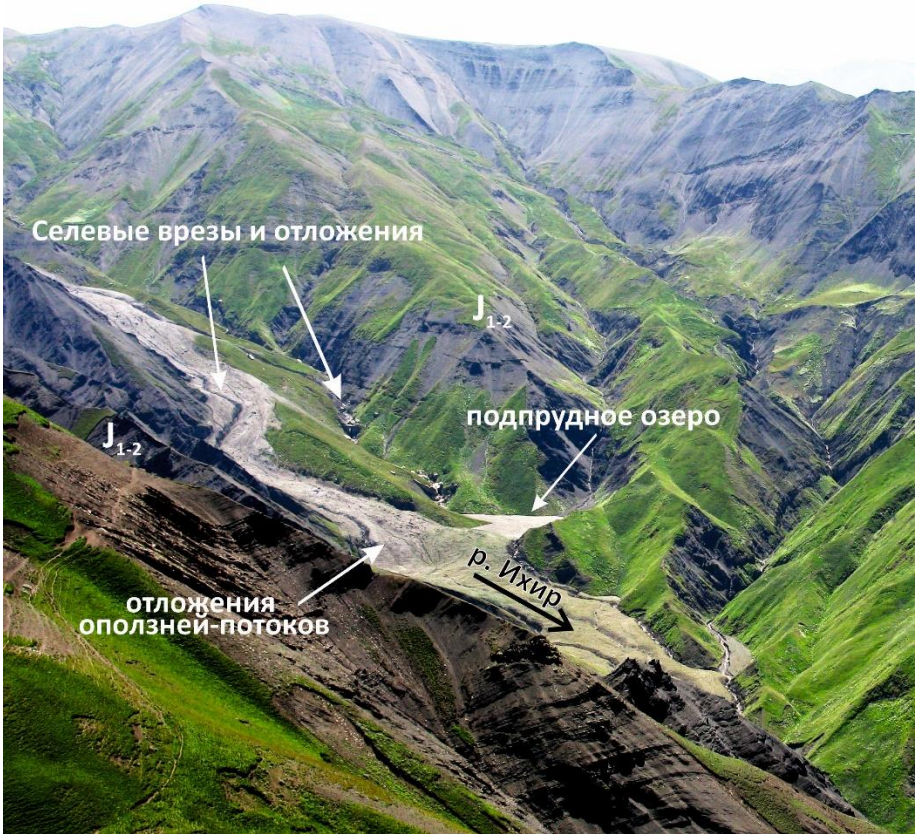


Рис. 7. Нижнее поле отложений оползней-потоков с селевыми врезами, селевыми отложениями и подпрудным озером в долине р. Ихир в районе отметок 2600–2800 м (фото М.В. Голубева, 17.07.2022 г.)

До 2014 г. снова был период затишья. Событие № 9 произошло на фоне небольших осадков и более высоких, чем в предыдущие годы, майских средних температур при сохранении низких минимальных. Для данного случая необходимо уточнение границ по снимкам более высокого разрешения.

В 2016 г. произошло последнее крупное событие (№ 10 в таблице 1), отложения которого зафиксированы на снимке в Google Earth от 04.10.2016.

Событие № 11 произошло в верхней части оползневого цирка под уступом г. Шалбуздаг. Правее этого массива имеется разбитый трещинами массив, который поставляет обломочный материал вниз по склону к основному оползневому цирку – при сравнении снимков высокого разрешения наблюдается продвижение крупных глыб и «лбов» ближе к верхней бровке.

Параметры оползней приведены в таблице 1.

Таблица 1. Оползни в верховьях р. Ихир на юго-западном склоне горы Шалбуздаг [*Савернюк и др., 2024*]

Номер периода	Период/даты снимков	Площадь поражения, тыс. м^2	Точка отрыва, м	Точка остановки, м	Горизонтальное проложение, м	Превышение, м	Угол наклона, градус	Тангенс угла наклона	Наличие следов селевого потока ниже оползневых отложений
1	24.05.1970–02.09.1986	103	3350	2890	1340	460	18,9	0,343	-
		13	3425	3320	240	105	23,6	0,437	-
		82	3500	3200	970	300	17,2	0,309	-
		115	3550	3260	850	290	18,8	0,341	-
2	04.05–25.06.1987	104	3320	2700	1430	620	23,4	0,433	-
3	13.09.1990–16.07.1992	56	3300	3070	630	230	20,0	0,365	-
4	01.06–19.07.1993	143	3330	2565	2730	765	15,6	0,280	-
5	07–25.06.2004	144	3860	3420	1580	440	15,6	0,278	Да
6	01–04.07.2004	230	3410	2550	3000	860	16,0	0,287	Да
7	17.07–02.08.2004	318	3490	2480	3880	1010	14,6	0,260	Да
8	10.07–11.08.2007	328	3520	2540	3320	980	16,4	0,295	-
9	03–19.06.2014	191	3430	2620	2450	810	18,3	0,330	-
10	13.06–18.07.2016	290	3510	2650	2500	860	19,0	0,344	Да
11	15.03.2020–10.09.2021	50	3810	3570	470	240	27,0	0,51	-

При просмотре GIF-анимации, составленной из разновременных снимков на участки оползней, стала понятна граница активных оползневых тел. Например, общая площадь оползневого процесса № 1 (рис. 7) к осени 2023 г. составила 820 тыс. м^2. Площадь оползневого тела, ограниченного отметками 3450–3880 м, составила 420 тыс. м^2, длина этого участка 950 м, ширина – 400 м, угол наклона 24,35°.

Почти одновременно с активизацией оползней в верховьях р. Ихир произошла активизация оползней на правом борту в нижнем течении долины (№ 5 и 6 на рис. 8). На данном этапе при исследовании этого участка по снимкам низкого и среднего разрешения уловить активизацию оползней под влиянием селевых потоков невозможно. Можно ее только предположить. Для более точного ответа необходимы полевые наблюдения и снимки более высокого разрешения с достаточной частотой съемки. При дешифрировании установлено, что после сползания оползневых масс на участке № 6 за телами оползневых запруд началось накопление аллювиального и селевого материала, причем не только по р. Ихир, но и по ее левому притоку с устьем в районе отметки 2320 м. Оползень № 6 в 2024 г. продолжает движение вниз. Правая часть его наиболее активна.

На данном этапе исследования четкой непосредственной связи с землетрясениями, по крайней мере свежими с 2003 г., не прослеживается. Роль Дагестанского (14.05.1970) землетрясения 1970 г. не понятна, так как имеющиеся у авторов материалы не дали качественной информации о развитии процессов в долине р. Ихир до 24.05.1970 г. из-за большого количества теней на космическом снимке 1965 г.

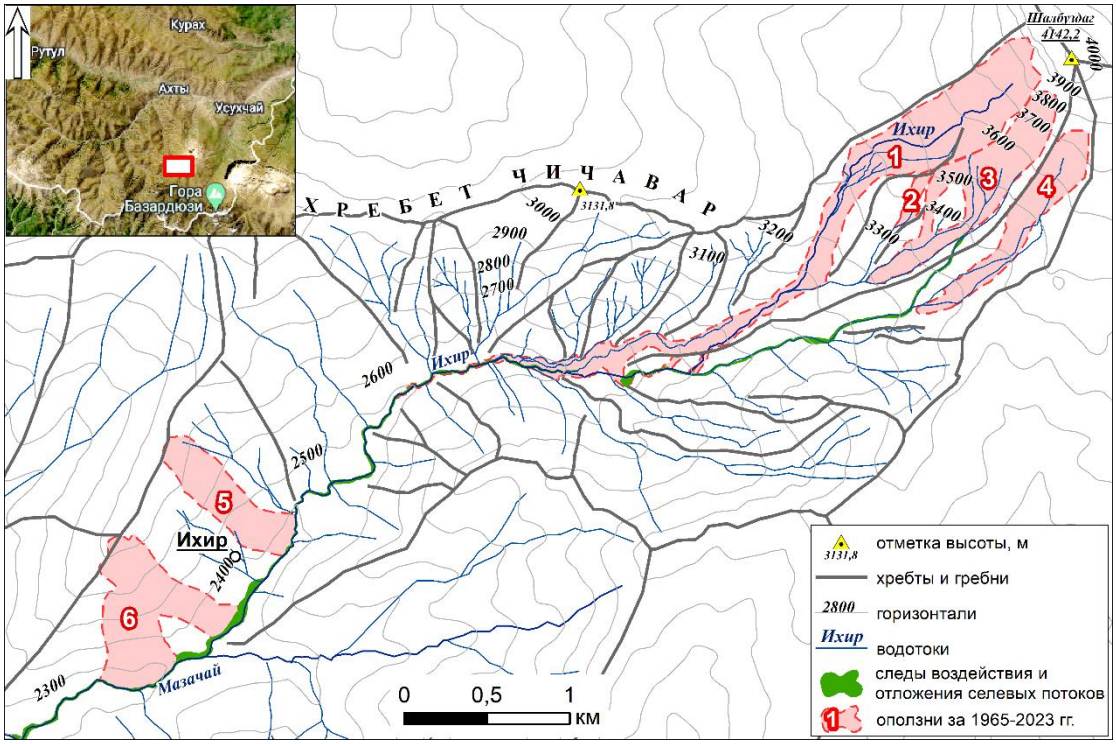


Рис. 8. Схема современных активных оползней на юго-западном склоне г. Шалбуздаг и связанных с ними отложений селевых потоков и оползней в долине р. Ихир (по данным дешифрирования разномасштабных космических снимков за 1965–2023 гг.)

Выводы

По результатам предварительного исследования можно сделать вывод, что юго-западный склон г. Шалбуздаг – «генератор» оползней, тесно связанных с процессами таяния-замерзания и обусловленных метеорологическими и климатическими факторами, такими как отклонение осадков от среднемноголетних значений в сторону увеличения.

Источником твердого материала для оползней служат обвально-осыпные отложения со стены массива г. Шалбуздаг и отложения каменных лавин. Процесс оползания обвальных масс в бассейне р. Ихир при сохраняющемся уровне осадков будет продолжаться не менее 10 лет.

Оползни-потоки проходят в долине р. Ихир на значительные расстояния (1,5–3,8 км) по отложениям предыдущих событий, образуя характерные выпуклые отложения и изменяя направления основных водотоков.

Возникновение селевых потоков в бассейне р. Ихир возможно только при наличии большого количества воды при бурном снеготаянии на фоне дождей и ливней в конце мая – июне либо при продолжительных интенсивных осадках в летне-осеннее время.

В настоящее время в верхней части юго-западного склона г. Шалбуздаг отмечается наличие нескольких заколовшихся оползневых блоков. Если в период интенсивного выпадения осадков либо совместного влияния осадков и резкого изменения температурного режима произойдет очередной крупный обвал, то в зависимости от его объема возможны 2 сценария – вовлечение рыхлых масс в процесс каменной лавины и

ее сход с возможным образованием селевого потока либо подновление и формирование нового массива рыхлообломочного материала и дальнейшее возобновление оползневого процесса. При обоих сценариях обломочный материал с разной скоростью окажется в долине р. Ихир.

В ближайшие год-два можно ожидать перекрытие участка русла р. Мазачай протяженностью в 0,5 км в 150 м ниже устья р. Ихир из-за активности правой части крупного оползня (№ 6 на рис. 8). Это приведет к увеличению селевой активности в бассейне р. Мазачай.

Описанные в статье участки в бассейнах рек Мазачай и Ихир очень динамичные, можно рекомендовать их как учебные объекты для студентов соответствующих специальностей.

Благодарности и ссылки

Авторы благодарны М.В. Голубеву за предоставленные фотографии и возможность их анализа.

Работа выполнена в рамках темы 1.7 121051300175-4 «Опасность и риск природных процессов и явлений» (ГЗ).

Список литературы

Бабаян Т.О. Является ли Шемахинское землетрясение 1668 года сильнейшим на Кавказе? // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2011. – Т. 38. – № 2. – С. 71–80.

Гедуева М.М. Использование геоинформационных технологий в исследовании опасных природных процессов на примере бассейна реки Самур // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 1 (105). С. 114–122. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-114-122.

Ежегодник «Землетрясения России». ФИЦ ЕГС РАН © 2012 – 2024. http://www.gsras.ru/zr/contents.html

Идрисов И.А., Мамаев С.А., Ибаев Ж.Г. Особенности распространения и развития крупных оползней Дагестана // Тр. Ин-та геологии ДНЦ РАН. – 2013. – вып. 62. – С. 96–100.

Кадастр селевой опасности юга Европейской части России. Кондратьева Н.В., Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Гедуева (Гяургиева) М.М., Перов В.Ф., Разумов В.В., Сейнова И.Б., Хучунаева Л.В. – М.: «Феория»; Нальчик: Печатный двор, 2015. – 148 с.

Кюль Е.В., Гедуева М.М., Атаев З. В. Селевая активность в бассейне реки Самур (Восточный Кавказ) по результатам мониторинга 2020 года // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2021. Т. 15. № 1. С. 73–88. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-1-73-88.

Савернюк Е.А., Зеркаль О.В., Черноморец С.С. Оползни юго-западного склона горы Шалбуздаг (Дагестан). // Сергеевские чтения. Региональная инженерная геология и геоэкология. Вып. 25. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (28–29 марта 2024 г.). М.: Геоинфо, 2024. С. 263–266.

Разумов В.В., Богданов М.И., Богданова Н.Д., Разумова Н.В., Гусейнова Н.О. Оценка масштабов распространения и опасности активизации оползневых процессов в Дагестане // Юг России: экология, развитие. – 2019. – т. 14. – № 4. – С. 56–77.

Карта оценки селевой опасности в горном Дагестане. М 1:300000. Парамонов Б.А., Петрасов В.В. / Отчет по теме «Сели и противоселевые мероприятия в ДАССР». – МГУ им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, проблемная лаборатория снежных лавин и селей, эрозионно-селевая экспедиция, 1974.

Карта Ахтынского района Дагестанской ССР. М 1:50000. Парамонов Б.А., Лисовская Е.В., Замкина Г.А. МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Эрозионно-селевая экспедиция, 1971.

Карта селевых бассейнов Северного Кавказа. М 1:200000. Под ред. В.Ф. Перова. Перов В.Ф., Бударина О.И., Сидорова Т.Л., Сейнова И.Б. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, 2012. https://www.debrisflow.ru/wp-content/uploads/2015/09/Perov_et_al_Map_of_Debris_Flow_Catchments_of_North_Caucasus.pdf.

Специализированные массивы для климатических исследований. Copyright © 2000-2011-2018-2022 ВНИИГМИ-МЦД / В.М. Веселов И.Р. Прибыльская О.А. Мирзеабасов. http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml

Халифа-Заде Ч.М., Магомедов А.М. Среднеюрские отложения восточной части Большого Кавказа. – М., Наука, 1982. – 276 с.

Юсупов А.Р., Черкашин В.И., Курбанова Г.М., Гусейнова А.Ш. Природные памятники области внутреннего сланцевого Дагестана//Тр. Ин-та геологии ДНЦ РАН. – 2016. – Вып. 66. – С. 120–124.

Deciphering the interplay of surface velocity and flow height in natural debris flows: Field observations from the Illgraben, Switzerland

T. Schöffl[1,2], B. McArdell[3], R. Kaitna[1], R. Koschuch[2], J. Hübl[1]

[1]BOKU University, Vienna, Austria, tobias.schoeffl@boku.ac.at

[2]IBTP Koschuch, Leutschach an der Weinstraße, Austria

[3]Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Birmensdorf, Switzerland

Abstract. Debris flows are rapid and extremely destructive gravitational mass movements commonly encountered in mountain torrent catchments. Obtaining continuous, highly time-resolved data on the velocities of multiple consecutive debris flow events is challenging but needed for an improved process understanding and constraining simulation models. In this study, we use pulse-Doppler (PD) radar measurements gathered during the 2022 season at Illgraben, Switzerland, to analyze four debris-flow events. The PD radar, operating in a pulsed mode, provides spatially resolved cells known as range gates. Within each range gate, velocities are determined using the Doppler effect, resulting in Doppler spectra with a resolution of approximately 4 Hz per range gate. By plotting time series of these spectra, called Doppler images, we gain detailed insight into the distribution of surface velocities of incoming flows. In addition, we compute median velocity values from the spectra and incorporate independent flow height measurements taken at the same location to explore the relationship between these key debris-flow metrics. Our analysis reveals a moderate to strong positive linear correlation between the median velocities and corresponding flow heights. These findings have significant implications for the debris-flow community, providing valuable insights for refining debris flow models and developing effective mitigation strategies.

Key words: *Pulse-Doppler radar, debris flow monitoring, Illgraben, surface velocity, flow height*

Cite this article: Schöffl T., McArdell B., Kaitna R., Koschuch R., Hübl J. Deciphering the interplay of surface velocity and flow height in natural debris flows: Field observations from the Illgraben, Switzerland. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 470–478.

Установление взаимосвязи между поверхностной скоростью и высотой потока в природных селях: полевые наблюдения в Илльграбене, Швейцария

Т. Шофл[1,2], Б. Макардел[3], Р. Каитна[1], Р. Кошух[2], Й. Хюбль[1]

[1]Университет природных ресурсов и наук о жизни, Вена, Австрия, tobias.schoeffl@boku.ac.at

[2]IBTP Koschuch e.U., Лойчах-ан-дер-Вайнштрасе, Австрия

[3]Швейцарский федеральный институт леса, снега и ландшафтного дизайна, Бирменсдорф, Швейцария

Аннотация. Селевые потоки – это быстрые и чрезвычайно разрушительные гравитационные движения масс, часто встречающиеся в горных водосборных бассейнах. Получение непрерывных данных о скоростях нескольких последовательных селевых потоков с высоким временным разрешением является сложной задачей, но необходимой для лучшего понимания процесса и ограничения

имитационных моделей. В данном исследовании мы используем данные импульсно-доплеровского (PD) радара, полученные в течение сезона 2022 г. в Илльграбене, Швейцария, для анализа четырех событий селевых потоков. Радар PD, работающий в импульсном режиме, обеспечивает пространственно разрешенные ячейки, называемые воротами диапазона. В пределах каждой зоны скорость определяется с помощью эффекта Доплера, в результате чего получаются доплеровские спектры с разрешением около 4 Гц для каждой зоны. Построив временные ряды этих спектров, называемые доплеровскими изображениями, мы получаем подробное представление о распределении поверхностных скоростей входящих потоков. Кроме того, мы вычисляем медианные значения скорости по спектрам и включаем независимые измерения высоты потока, сделанные в том же месте, чтобы изучить взаимосвязь между этими ключевыми показателями селевых потоков. Наш анализ выявил умеренную или сильную положительную линейную корреляцию между медианными скоростями и соответствующими высотами потоков. Эти результаты имеют важное значение для сообщества специалистов по селевым потокам, предоставляя ценные сведения для уточнения моделей селевых потоков и разработки эффективных стратегий смягчения последствий.

Ключевые слова: *импульсно-доплеровский радар, мониторинг селевых потоков, Илльграбен, поверхностная скорость, высота потока*

Ссылка для цитирования: Шофл Т., Макардел Б., Каитна Р., Кошух Р., Хюбль Й. Установление взаимосвязи между поверхностной скоростью и высотой потока в природных селях: полевые наблюдения в Илльграбене, Швейцария. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 470–478.

Introduction

Debris flows are one of the most destructive geophysical mass wasting processes in mountainous areas, often triggered by severe convective thunderstorms [Guzzetti et al., 2008]. Consequently, robust risk assessment is imperative for enhancing societal and infrastructural resilience in vulnerable areas. Fundamental components of contemporary debris-flow risk management include numerical modelling [*Mergili et al., 2017; Meyrat et al., 2021*], vulnerability mapping, streamlined mitigation strategies, and the implementation of reliable automated early warning systems. High-resolution field measurements of flow velocity and height are key to advancing the understanding of debris-flow physics and ultimately improving risk management strategies.

Since the early 2000s, numerous scientific debris flow monitoring sites have been established worldwide. A prevalent method employed at several test sites involves measuring flow height using radar, ultrasonic, or laser sensors positioned above the channel bed [*Arattano and Marchi, 2008; Comiti et al., 2014; Cui et al., 2018; Hürlimann et al., 2014; Kean et al., 2013; McArdell et al., 2007*]. To further assess flow velocity, two or more flow-height sensors, often combined with infrasound- or seismic sensors, are installed at known intervals within a debris flow catchment. The gradient of the resulting time-stamped signals is then correlated to derive a front velocity value using a travel-time-distance method. In addition, for events with multiple significant surges, the entire time series can be cross-correlated to obtain surge-scale velocity estimates [*Coviello et al., 2019; Lapillonne et al., 2023; Marchi et al., 2023; Schimmel et al., 2022; Yan et al., 2023*]. These methods offer widespread applicability and relatively low installation expense but provide only approximate estimates of event velocity. Without continuous velocity information on a temporal microscale, especially for events characterized by multiple successive surges or events that give rise to roll waves [*Arai et al., 2013; Viroulet et al., 2018; Walter et al., 2023*] or erosion-deposition waves [*Edwards and Gray, 2015; Schöffl et al., 2023*], subsequent dynamic analysis remains somehow speculative.

To achieve high-resolution characterization of debris-flow velocities, more sophisticated sensors and techniques such as 3D-LiDAR scanner [*Aaron et al., 2023; Spielmann and Aaron,*

2024] combined with Particle Image velocimetry [*Theule et al., 2018*] or pulse-Doppler radar [*Schöffl et al., 2023*] have been introduced at debris-flow monitoring sites in recent years. These studies have revealed significant velocity fluctuations within natural debris-flow events.

However, to the authors' knowledge, the relation between the key flow metrics of height and velocity has not been investigated from high temporal resolution measurements of natural debris-flow events. In this study, we undertake a thorough examination of these velocity dynamics using pulse-Doppler radar imaging, complemented by flow height observations during the 2022 debris-flow season, which included four notable events at Illgraben, Switzerland.

Methods and test-site

Illgraben test-site & flow height measurements

The Illgraben debris flow monitoring site is located in south-western Switzerland, near Leuk in the canton of Valais. The catchment area covers 8.9 km^2 from the summit of the Illhorn (2716 m a.s.l.) to the confluence of the Illbach with the Rhone (610 m a.s.l.) [*McArdell et al., 2007*]. The close proximity to the major Alpine tectonic faults [*McArdell and Sartori, 2021*] has produced highly erodible and weathered rocks, as well as the steep north-western dolomite cliffs of the catchment area, regularly cause an exceptionally high number of debris flows during the summer months due to heavy convective rainfall [*Badoux et al., 2009; Hirschberg et al., 2021*].

The monitoring site has been in operation since 2000 by the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL [*Hürlimann et al., 2003*], with observations of flow velocity estimated using the travel time of flows between sensors installed along the lower 4 km length of the channel, and flow depth measured at several locations including at check dams 25 (geophone), 27 (geophones and two stage radar sensors) and 29 (geophones, laser, stage radar, and a force plate [*McArdell et al., 2007*]). Bulk density is determined using the vertical force and flow depth information from the force plate, and the discharge and event volume are determined using depth and cross-sectional geometry at the force plate [*McArdell et al., 2023*]. The WSL flow depth measurements are made a few meters upstream of the brink of the check dam because erosion and deposition are generally small due to the presence of the check dam.

Pulse-Doppler (PD) radar

In early 2022, the Institute of Mountain Risk Engineering (IAN) of the BOKU in Vienna, Austria, and the WSL started a cooperation and a joint measurement campaign. As a result, a pulse-Doppler (PD) radar (type SR2000-05-P) manufactured by IBTP Koschuch was set up for the debris-flow seasons of 2022 and 2023.

The PD radar enables non-contact measurement of surface velocity using the Doppler effect. At Illgraben, the PD radar was positioned on the orographic right side of the channel, directed towards check dam 27 (Fig. 1). The radar beam (beamwidth ~ 6°) covered an upstream distance of about 120 m before the signal was obstructed by a bend in the torrent channel. For our measurement campaign at the Illgraben we selected a spatial resolution of so-called range gates (RG) with a length (r_{RG}) of about 20 m, corresponding to a pulse length (τ) of 137 ns as defined by the formula $r_{RG} = (c\tau)/2$ [*Skolnik, 2008*], whereas c is the speed of light. The pulses are transmitted at a pulse repetition frequency (PRF) of 60 kHz. The echo signal is time-sampled and processed by a complex Fast Fourier Transform (FFT), resulting in Doppler spectra with a time step of $\Delta t \sim 0.272$ s for each range gate. A single Doppler spectrum has a resolution of 0.0527 m/s per class, for a total of 1024 classes, with a maximum unambiguously detectable velocity of 27 m/s. Within each class, the amplitude of the echo intensity (power signal) indicates which velocity classes correspond to moving parts on the surface of an incoming flow. To determine median values, we truncate the spectra above a certain multiple of the noise level to obtain a maximum velocity value as described in [*Schöffl et al., 2023;*

Schreiber et al., 2001]. In this study, we focus solely on the data from RG2, as this is where the sensor for the flow height is located.

Fig. 1. PD radar installed at Illgraben. Check dam (CD) 27 can be seen in the background, where the stage sensor and range gate 2 are located

Doppler imaging

The information that Doppler spectra provide about an observed flux becomes visible when the spectra are plotted as a time series, such as Velocity Time Intensity (VTI) or Doppler images, as shown in Fig. 2. The echo intensity, displayed on a color scale, provides an indication of the reflected cross-sectional area and thus the size of a moving object [*Gauer et al., 2007; Schöffl et al., 2023; Schreiber et al., 2001*]. The purple to reddish areas in Fig. 2 indicate a strong backscattered signal, especially when an object with a relatively large cross-section, such as a debris-flow front or a surge, passes through a range gate.

Data & analysis

For the convenience of the reader, we abbreviate the recorded debris flow events in this study as #DF, followed by the year, month, and day on which they occurred. The precise measurement capability is exploited in the use of PD radar as an automated early warning system by the company IBTP Koschuch. Although the radar at Illgraben was installed solely for scientific purposes, it is noteworthy that the system was able to automatically detect and record all debris-flow events during the two measurement seasons. We note that for the first three events, the radar signal amplifier was defective, so the absolute echo intensity values were degraded by a factor of ~10, but still sufficiently sensitive to fully image the events. We fixed the amplifier before the last event (#DF20220908) of 2022.

#DF20220605

The first event we encountered (#DF20220605) was characterized by an initially en-bloc moving, distinct granular debris flow front, resulting in a relatively narrow band of affected Doppler velocity classes and peak flow heights exceeding 2 m. This phenomenon is vividly illustrated in Fig. 2*a*, where a boulder-laden front with plug flow-like behavior as indicated in Iverson, (1997) and measured in the field by Nagl et al. (2020), arrives at ~100 s and moves coherently through the channel. This en-bloc motion initially corresponds to a narrow band of affected Doppler velocities between ~2 and ~5 m s^{-1} with median velocities close to 4 m s^{-1} However, the flux then exhibits a velocity jump at ~190 s, similar to an event observed by Aaron et al. (2023) at Illgraben on September 19, 2021. Thus, the velocity range suddenly increases positively to between ~3.5 m s^{-1} and nearly 8 m s^{-1} with median velocities jumping from ~2.6 m s^{-1} to ~4.6 m s^{-1}. The flow then begins to fluctuate in height and velocity as it breaks up into a series of over 60 roll waves that slowly decay over time until the end of the event.

#DF20220630

The second event (#DF20220630) was preceded by a flood-like surge, visible in the Doppler image from 72 s to 121 s, exhibiting a broad velocity spectrum with median velocities fluctuating around 1.5 m s^{-1} (Fig. 2*b*). The debris flow itself then emerged, consisting of 5 distinct debris flow surges (Fig. 2*b*), 4 of which were recorded by the flow height measurements from 121 s to 1672 s. Interestingly, the first and second surge displayed similar but attenuated oscilliating flow behavior as #DF20220605, with lower overall median velocities ~2 m s^{-1} and flow heights ~1 m, which subsided over time.

#DF20220704

Unlike the other three events, #DF20220704 had a wide range of velocities involved, from 0 to 12 m/s, indicating a more fluidized vortical surface flow with multiple velocities occurring simultaneously (Fig. 2*c*). Although this was a large-scale event featuring peak velocities of ~12 m s^{-1} and flow heights of ~3 m of the season, it is debatable whether it can be classified as a debris flow. As reported in Bolliger et al. (2024) the mean bulk density measured at the lower station at Illgraben amounts to 1189 kg m^{-3}, which would imply a more flash flood-like event in the nature of a debris flood as classified in Church and Jakob (2020) or the possibility of a hyperconcentrated flow as defined by Brenna et al. (2020).

#DF20220908

The last event of the season (#DF20220908) commenced with a flash flood-like surge that was detected by the PD radar at ~1407 s (Fig. 2*d*) with median velocites peaking at ~3.5 m s^{-1}. However, at that time there was no significant corresponding increase in the flow stage. Consequently, the flow height sensor measurement cycle was triggered when a pronounced front arrived at ~1477 s, characterized by median velocities of ~4 m s^{-1} and peak flow heights approaching 2 m. Subsequently, the flow underwent minor oscillations before experiencing a major surge at ~1650 s, with median velocities reaching ~6 m s^{-1} and maximum velocities peaking at ~9 m s^{-1}, accompanied by corresponding peak flow heights exceeding 2 m. This behavior mirrors observations by Aaron et al. (2023) and Hübl and Kaitna (2021) indicating that post-frontal surge or flow velocities can significantly exceed those of the front itself.

Relationship of flow height and suface velocity

We observe statistically significant correlations between flow height and median surface velocity for all four events. Interestingly, the data set of #DF20220605, which is characterized by a complex pulse-like flow pattern with more than 60 consecutive roll waves, shows the

strongest correlation (R^2 = 0.85) over the entire event duration (75 s to 1380 s) (Fig. 3*a*). This is described by the function "Y = 2.28 * X – 0.36", indicating a positive linear relation.

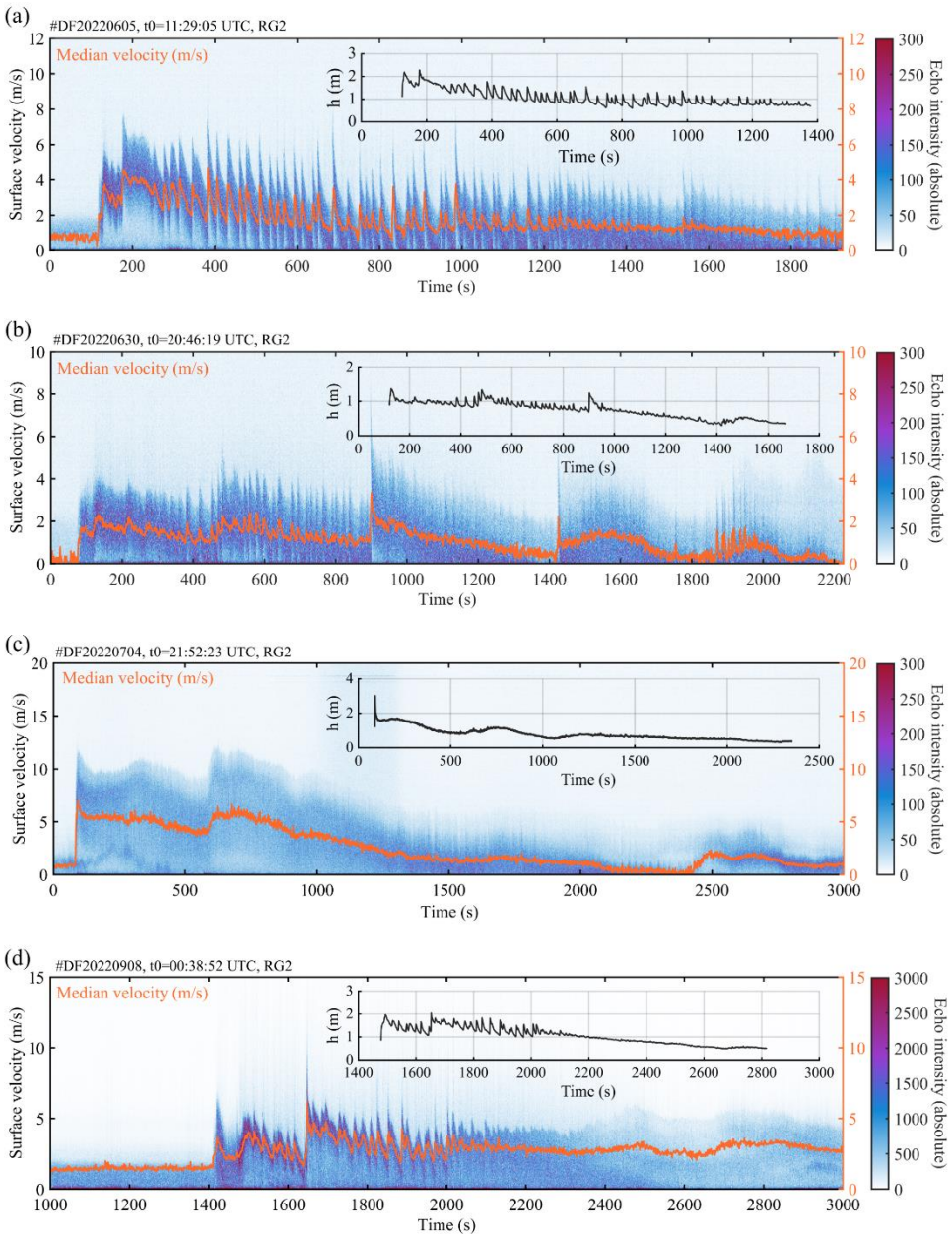


Fig. 11. Event catalogue of the debris flows that occurred in 2022 at Illgraben in chronological order. Doppler images and corresponding median velocities derived from range gate 2 and the respective evolution of flow height measurements

For #DF20200630 (Fig. 3*b*), we observe a moderate correlation (R^2 = 0.59; Y = 1.36 * X + 0.275) for the entire event duration (121 s to 1672 s). However, when analyzed on a surge scale, we find statistically strong relationships: R^2 = 0.73 (Y = 2.70 * X – 1.22), R^2 = 0.74 (Y = 2.36 * X – 0.69), and R^2 = 0.88 (Y = 2.96 * X – 0.73) for surges 1 to 3, respectively (121 s to 466 s; 467 s to 899 s; 900 s to 1416 s). No relation (R^2 = 0.14) is apparent for the last surge (1417 s to 1672 s). We attribute this finding to a transition from a dense, granular debris-flow phase to a more water-saturated flow (watery tail), where flow velocities increase while flow heights seem to stabilize around 0.4–0.5 m before slowly ceasing.

As mentioned above, #DF20220704 stands out in appearance. Although characterized by the highest velocities and flow heights, no oscillations, and thus no significant occurrence

of multiple intra-event surges or waves, can be observed, except for the interval from approximately 600 s to approximately 630 s, where a velocity jump from median velocities of about 4 m s^{-1} rises to over 6 m s^{-1} (Fig. 2*c*). Interestingly, we find that the initial frontal surge (89–105 s) shows no relationship, as peak velocities seem to occur three seconds after peak flow heights. From 1060 s to 1210 s, a negative linear correlation is evident: as flow height increases, velocity decreases (Fig. 3*c*). We hypothesize that this again represents a transition phase where the sediment-water composition is prone to change. However, we find a statistically strong correlation for the entire event duration (89 to 2352 s) with an R^2 value of 0.72 and a corresponding function of Y = 4.46 * X – 0.60.

The radar measurement cycle of #DF20220908 was triggered by small flash floods, which we do not include in this paper. However, the radar time series (t0) is defined by these minor preceeding floods. The debris-flow phase lasted from 1477 s to 2100 s, during which median velocities showed a moderate correlation with flow height, having an R^2 value of 0.57 and the corresponding function: Y = 2.38 * X – 0.20 (Fig. 3*d*). After this period, we did not observe any correlation, possibly due to the changing composition of the flow and the potential measurement of slowly eroding deposits by the flow height sensor.

Considering that the mean bulk densities of #DF20220630, #DF20220630, and #DF20220908 are in the same range, 1690 kg m^{-3}, 1700 kg m^{-3}, and 1592 kg m^{-3}, respectively [*Bolliger et al., 2024*], if we examine the flow quantities of flow height and surface velocity of the three events neglecting the tail sections discussed above, we find a distinct correlation with an R^2 value of 0.84. This holds when excluding #DF20220704, which seems to follow a different flow regime with a mean bulk density of 1189 kg m^{-3}. The corresponding function that correlates the median velocity values with the observed flow heights is given by Y = 2.54 * X – 0.61.

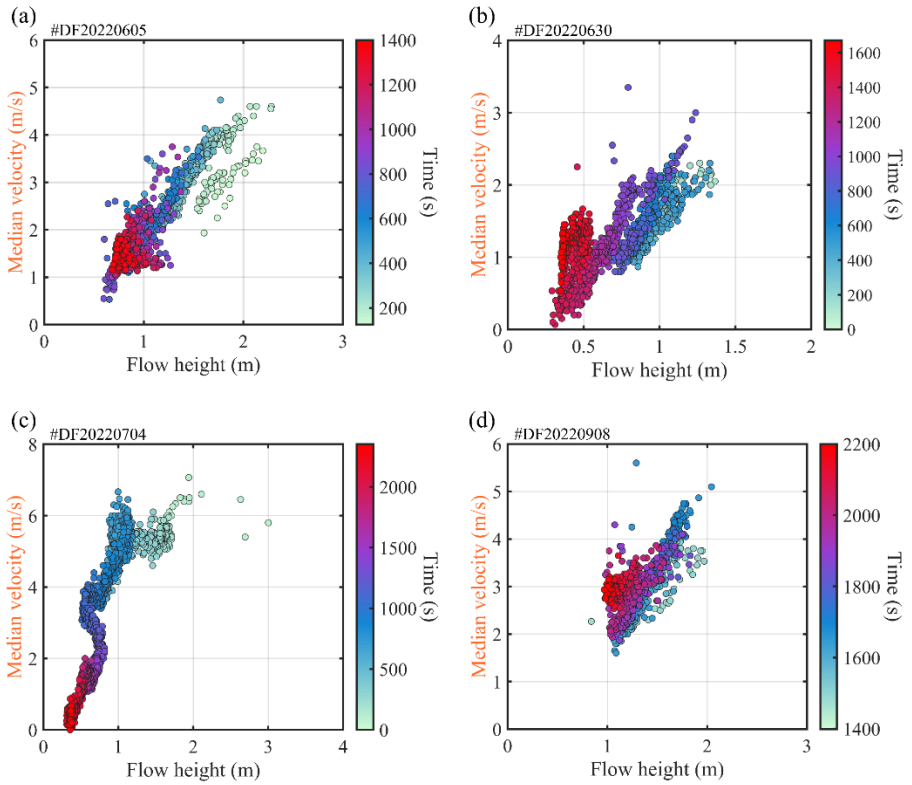


Fig. 12. Scatter plots of flow height and median surface velocities from the observed events. The time scale is highlighted as a color gradient

Conclusions

In this paper, we conducted measurements of four debris-flow events at Illgraben in Switzerland. Our monitoring efforts confirm findings from other research that the velocities of

natural debris flows exhibit significant intra-event variability. However, despite the complex flow behavior, we found a moderate to strong linear relationship between flow height and velocity. It appears that variations in the function of these quantities can be attributed to changes in bulk density and hence to fluctuations in the material composition of the flows.

Acknowledgements

We would like to thank Christoph Graf for his great support in every situation and for making this measurement campaign a success. We also thank Helmut Schreiber for insightful discussions on radar technology and Doppler imaging.

References

Aaron, J., Spielmann, R., McArdell, B.W., Graf, C., 2023. High-Frequency 3D LiDAR Measurements of a Debris Flow: A Novel Method to Investigate the Dynamics of Full-Scale Events in the Field. Geophysical Research Letters 50, e2022GL102373. https://doi.org/10.1029/2022GL102373

Arai, M., Huebl, J., Kaitna, R., 2013. Occurrence conditions of roll waves for three grain–fluid models and comparison with results from experiments and field observation. Geophysical Journal International 195, 1464–1480. https://doi.org/10.1093/gji/ggt352

Arattano, M., Marchi, L., 2008. Systems and Sensors for Debris-flow Monitoring and Warning. Sensors 8, 2436–2452. https://doi.org/10.3390/s8042436

Badoux, A., Graf, C., Rhyner, J., Kuntner, R., McArdell, B.W., 2009. A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance. Natural Hazards 517–539. https://doi.org/10.1007/s11069-008-9303-x

Bolliger, D., Schlunegger, F., McArdell, B.W., 2024. Comparison of debris flow observations, including fine-sediment grain size and composition and runout model results, at Illgraben, Swiss Alps. Natural Hazards and Earth System Sciences 24, 1035–1049. https://doi.org/10.5194/nhess-24-1035-2024

Brenna, A., Surian, N., Ghinassi, M., Marchi, L., 2020. Sediment–water flows in mountain streams: Recognition and classification based on field evidence. Geomorphology 371, 107413. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107413

Church, M., Jakob, M., 2020. What Is a Debris Flood? Water Resources Research 56, e2020WR027144. https://doi.org/10.1029/2020WR027144

Comiti, F., Marchi, L., Macconi, P., Arattano, M., Bertoldi, G., Borga, M., Brardinoni, F., Cavalli, M., D'Agostino, V., Penna, D., Theule, J., 2014. A new monitoring station for debris flows in the European Alps: first observations in the Gadria basin. Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards 73, 1175–1198.

Coviello, V., Arattano, M., Comiti, F., Macconi, P., Marchi, L., 2019. Seismic Characterization of Debris Flows: Insights into Energy Radiation and Implications for Warning. J. Geophys. Res. Earth Surf. 124, 1440–1463. https://doi.org/10.1029/2018JF004683

Cui, P., Guo, X., Yan, Y., Li, Y., Ge, Y., 2018. Real-time observation of an active debris flow watershed in the Wenchuan Earthquake area. Geomorphology 321, 153–166. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.08.024

Edwards, A.N., Gray, J.M.N.T., 2015. Erosion–deposition waves in shallow granular free-surface flows. J. Fluid Mech. 762, 35–67. https://doi.org/10.1017/jfm.2014.643

Gauer, P., Kern, M., Kristensen, K., Lied, K., Rammer, L., Schreiber, H., 2007. On pulsed Doppler radar measurements of avalanches and their implication to avalanche dynamics. Cold Regions Science and Technology 50, 55–71. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.03.009

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P., 2008. The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update. Landslides 5, 3–17. https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1

Hirschberg, J., Badoux, A., McArdell, B.W., Leonarduzzi, E., Molnar, P., 2021. Evaluating methods for debris-flow prediction based on rainfall in an Alpine catchment. Natural Hazards and Earth System Sciences 21, 2773–2789. https://doi.org/10.5194/nhess-21-2773-2021

Hübl, J., Kaitna, R., 2021. Monitoring Debris-Flow Surges and Triggering Rainfall at the Lattenbach Creek, Austria. Environmental and Engineering Geoscience 27, 213–220. https://doi.org/10.2113/EEG-D-20-00010

Hürlimann, M., Abancó, C., Moya, J., Vilajosana, I., 2014. Results and experiences gathered at the Rebaixader debris-flow monitoring site, Central Pyrenees, Spain. Landslides 11, 939–953. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0452-y

Hürlimann, M., Rickenmann, D., Graf, C., 2003. Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. Canadian Geotechnical Journal 161–175. https://doi.org/10.1139/T02-087

Iverson, R.M., 1997. The physics of debris flows. REVIEWS OF GEOPHYSICS Reviews of Geophysics, 35(3), 245– 296., 52. https://doi.org/10.1029/97RG00426

Kean, J.W., McCoy, S.W., Tucker, G.E., Staley, D.M., Coe, J.A., 2013. Runoff-generated debris flows: Observations and modeling of surge initiation, magnitude, and frequency. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 118, 2190–2207. https://doi.org/10.1002/jgrf.20148

Lapillonne, S., Fontaine, F., Liebault, F., Richefeu, V., Piton, G., 2023. Debris-flow surges of a very active alpine torrent: a field database. Natural Hazards and Earth System Sciences 23, 1241–1256. https://doi.org/10.5194/nhess-23-1241-2023

Marchi, L., Coviello, V., Cavalli, M., Comiti, F., Crema, S., Macconi, P., 2023. Monitoring debris flows in the Gadria catchment (eastern Italian Alps): Data and insights acquired from 2018 to 2020. E3S Web of Conf. 415, 03018. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341503018

McArdell, B.W., Bartelt, P., Kowalski, J., 2007. Field observations of basal forces and fluid pore pressure in a debris flow. Geophysical Research Letters 34. https://doi.org/10.1029/2006GL029183

McArdell, B.W., Hirschberg, J., Aaron, J., Badoux, A., 2023. Evaluation of a method to calculate debris-flow volume based on observations of flow depth. E3S Web of Conf. 415, 02012. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341502012

McArdell, B.W., Sartori, M., 2021. The Illgraben torrent system. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43203-4_25

Mergili, M., Fischer, J.-T., Krenn, J., Pudasaini, S.P., 2017. r.avaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows. Geosci. Model Dev. 10, 553–569. https://doi.org/10.5194/gmd-10-553-2017

Meyrat, G., Mcardell, B., Ivanova, K., Müller, C., Bartelt, P., 2021. A Dilatant, Two-layer Debris Flow Model Validated by Flow Density Measurements at the Swiss Illgraben Test Site.

Nagl, G., Hübl, J., Kaitna, R., 2020. Velocity profiles and basal stresses in natural debris flows. Earth Surf. Process. Landforms 45, 1764–1776. https://doi.org/10.1002/esp.4844

Schimmel, A., Coviello, V., Comiti, F., 2022. Debris flow velocity and volume estimations based on seismic data. Natural Hazards and Earth System Sciences 22, 1955–1968. https://doi.org/10.5194/nhess-22-1955-2022

Schöffl, T., Nagl, G., Koschuch, R., Schreiber, H., Hübl, J., Kaitna, R., 2023. A Perspective of Surge Dynamics in Natural Debris Flows Through Pulse-Doppler Radar Observations. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 128, e2023JF007171. https://doi.org/10.1029/2023JF007171

Schreiber, H., Randeu, W.L., Schaffhauser, H., Rammmer, L., 2001. Avalanche dynamics measurement by pulsed Doppler radar. Annals of Glaciology 32, 275–280. https://doi.org/10.3189/172756401781819021

Skolnik, M., 2008. Radar Handbook, Third Edition, 3rd ed. McGraw-Hill Education, New York.

Spielmann, R., Aaron, J., 2024. A new method for detailed discharge and volume measurements of debris flows based on high-frequency 3D LiDAR point clouds; Illgraben, Switzerland. Engineering Geology 329, 107386. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107386

Theule, J.I., Crema, S., Marchi, L., Cavalli, M., Comiti, F., 2018. Exploiting LSPIV to assess debris-flow velocities in the field. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 18, 1–13. https://doi.org/10.5194/nhess-18-1-2018

Viroulet, S., Baker, J.L., Rocha, F.M., Johnson, C.G., Kokelaar, B.P., Gray, J.M.N.T., 2018. The kinematics of bidisperse granular roll waves. Journal of Fluid Mechanics 848, 836–875. https://doi.org/10.1017/jfm.2018.348

Walter, F., Zhang, Z., Aaron, J., McArdell, B., Graf, C., 2023. Seismic Measurements of Roll Waves in Debris Flows. E3S Web of Conf. 415, 03031. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341503031

Yan, Y., Zeng, C., Cui, Y., Hu, S., Wang, X., Tang, H., 2023. Real-time Monitoring and Analysis of Debris Flow Events: Insight from seismic signal features and dynamic flow characteristics (preprint). Physical: Geomorphology (including all aspects of fluvial, coastal, aeolian, hillslope and glacial geomorphology). https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2015

Совершенствование технологий учета и хранения данных о селепроявлениях

А.Х. Шерхов

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, fff.ddd.11@mail.ru

Аннотация. Создание специализированных информационных ресурсов, на современном уровне применения возможностей организации и учета данных – перспективное направление в совершенствовании методов комплексного мониторинга селепроявлений. В данной работе представлена созданная, на базе Microsoft Access, программная оболочка электронного информационного ресурса «База данных селевых явлений» которая охватывает вопросы организации учета данных о селепроявлениях по материалам комплексного и оперативного (космического, наземного маршрутного и др.) мониторинга селевых бассейнов, а также архивных данных по каждому из них. В работе описывается структура вносимой информации; обосновывается выбор параметров, подлежащих учету; представлены способы реализации поисковых запросов; вывода данных; их экспорта со сменой формата. По результатам аналитической проработки представляемых в базе данных сведений, возможно проведение достоверной оценки текущих пространственно-временных изменений объектов мониторинга селевых бассейнов. Подобная информационная основа необходима в решении задач обеспечения безопасности горных населенных пунктов и объектов экономики от негативного воздействия селевых потоков.

Ключевые слова: *база данных, селевой бассейн, мониторинг, информационный ресурс, программная оболочка*

Ссылка для цитирования: Шерхов А.Х. Совершенствование технологий учета и хранения данных о селепроявлениях. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 479–484.

Improvement of technologies for accounting and storing data about debris flow events

A.Kh. Sherkhov

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, fff.ddd.11@mail.ru

Abstract. The creation of specialized information resources, at the modern level of using the capabilities of organizing and recording data, is a promising direction in improving methods for complex monitoring of debris flow occurrences. This work presents the software shell of the electronic information resource “Database of Debris flow Phenomena” created on the basis of Microsoft Access, which covers the issues of organizing the recording of data on debris flow occurrences based on materials from complex and operational (space, ground-based route, etc.) monitoring of debris flow basins, as well as archival data for each of them. The work describes the structure of the information entered; the choice of parameters to be taken into account is justified; methods for implementing search queries are presented; data output; their export with a change of format. Based on the results of the analytical study of the information presented in the database, it is possible to carry out a reliable assessment of the current spatiotemporal changes in the monitoring objects of debris flow basins. Such an information basis is necessary in solving the problems of ensuring the safety of mountain settlements and economic facilities from the negative impact of debris flows.

Key words: *database, debris flow basin, monitoring, information resource, software shell*

Cite this article: Sherkhov A.Kh. Improvement of technologies for accounting and storing data about debris flow events. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 479–484.

Введение

Создание базы данных селевых бассейнов является развитием разработки системного геоинформационного подхода к изучению селевых процессов. Информационное наполнение базы, на основе результатов многолетних наблюдений селевых бассейнов, позволяет систематизировать исследования прошлых лет и всесторонне рассмотреть пространственные и временные закономерности селепроявлений. Формат представления сведений в базе позволяет анализировать процессы с учетом изменений геоморфологических, гидрометеорологических, климатических, почвенно-растительных и антропогенных факторов, определяющих повторяемость, объем, расход, плотность селевой массы, характер отложений и другие параметры селевых потоков и других объектов мониторинга в бассейне.

Краткий обзор проблемы

Проведенный анализ существующих подходов к созданию баз данных селепроявлений показал, что на современном этапе базы данных по данной тематике выполнены, в основном, в виде таблиц, отображающих информацию в структурированном формате, который, в свою очередь, определяется целевым предназначением предоставляемых данных. Помимо табличных данных составляются обзорные карты и карты селевых бассейнов различного масштаба [*Перов, 2012; Шныпарков, 2012*]. Однако такие методы учета данных исключают возможности автоматизированного поиска, сопоставления и статистической обработки информации, т.е. с учетом современного уровня развития технологий, на сегодняшний день, несомненно, являются устаревшими.

Методы

В качестве программной оболочки «Базы данных селевых бассейнов» (БД) использована реляционная система управления базами данных (СУБД) Microsoft Access, входящая в состав пакета программного обеспечения Microsoft Office. Такой выбор обоснован тем, что данное приложение, полностью решая поставленные в работе задачи, является общеупотребительным и не требует от пользователя навыков программирования в работе с ним. Интерфейс информационного ресурса БД разрабатывался в соответствии с соображениями целесообразности и эргономичности и может быть изменен в зависимости от потребностей пользователя.

На данном этапе проводилось настройка взаимодействия составных частей программной оболочки базы данных. С целью тестирования функционала базы в пользовательском режиме были заполнены табличные формы программы на отдельный речной бассейн. Выбор бассейна определялся наличием информационной основы по нему и присутствием в нем всех, или наибольшего количества, разновидностей объектов мониторинга. Количество самих объектов бассейна, параметры которых подлежат учету в базе, не должно быть слишком большим, поскольку громоздкий массив информации затрудняет корректировку табличных форм при тестовой отработке программы. Таким образом, выбор отдельного речного бассейна р. Псыгансу, был обусловлен наибольшим соответствием вышеперечисленным условиям.

Данные

В основу информационного наполнения форм программы, на начальном этапе, положены данные «Кадастра селевой опасности Юга европейской части России» [*Кондратьева, 2015*] (Кадастр). В целях реализации рассмотрения системной иерархии типов объектов селевых бассейнов основных рек, сведения Кадастра дополняются детальной информацией по селевым бассейнам каждого порядка. Таким образом учитываются параметры селевых русел, очагов селеобразования, прошедших селевых потоков. Оцениваются вероятности возникновения новых селевых очагов, возможности единовременного запуска селевых процессов сопряженных бассейнов разных порядков. Определяется наличие объектов, представляющих потенциальную угрозу возникновения опасных склоновых и русловых процессов. Учитываются ущерб, риски и угрозы, а также степень селеопасности для селитебных территорий.

Анализ

Структура базы программы разработана под информацию, позволяющую оценить условия возникновения селевых процессов в регионе, их тип, генезис, объем твердой составляющей селя, периодичность, интенсивность, основные морфометрические показатели селевых бассейнов и т.п. Помимо кадастровых значений параметров селевого бассейна вносились данные результатов космического мониторинга, наземных обследований и архивные материалы.

Информационное наполнение БД выполняется в первом блоке по 10 пунктам, включающим различные критерии селепроявлений. 11-й пункт содержит сводную информацию по селевому бассейну, а 12-й определяет формат предоставляемых сведений.

1. Параметры основной реки. Первичное районирование объектов «Базы данных селевых бассейнов» реализуется на гидрологической основе и предполагает представление сведений о бассейне основной реки. Данные хранятся в файловой системе в разрезе «Параметры основной реки»

2. Селевые притоки 1-го и 2-го порядков. При заполнении табличных форм по отдельному речному бассейну р. Псыгансу описывается, в частности, селевой приток 1-го порядка – б/н, 5–15 [*Кондратьева, 2015*] урочища Худзур и расположенные в его бассейне селевые притоки 2-го порядка. В этом блоке помимо кадастрового номера и названия водотока приводятся адрес селевого бассейна и его площадь.

В данном селевом бассейне имеется не один, а несколько селевых очагов, селепроявления в которых могут, как совпадать, так и не совпадать по времени. Т.е. русло селевого водотока 5–15 может пропускать потоки из разных селевых очагов. К тому же при трансформации русла и прилегающих склонов существуют условия для формирования новых очагов или активизации существующих. В этом случае целесообразно говорить о системе селевых очагов бассейна [*Черноморец, 2005; Докукин, 2012; Запорожченко, 2009*], наличие которой при заполнении формы, также указывается.

Информация по водотоку дополнена графическими файлами картосхемы бассейнов селевых притоков 1-го порядка р. Псыгансу, с указанием на ней описываемого русла и космическим снимком с обозначением водосборной площади бассейна селевого притока с показанными на нем селевыми притоками 2-го порядка.

3. Параметры селевых русел. В дополнение к основным параметрам селевых водотоков, в следующем окне заносятся сведения о наличии в бассейне системы очагов селеобразования, в том числе потенциальных, таких как: оползневые массивы, озера или скопления материала в приледниковой зоне

4. Параметры селевых очагов. В настоящей базе, селевые очаги рассматриваются в качестве отдельного объекта селевого бассейна и заносятся в едином формате представления данных для всех бассейнов. В качестве основных параметров вносятся: информация о местоположении очага (координаты); абсолютная высота над у. м.; тип

очага, определяемый по характеру процессов; динамический показатель, классифицирующий состояние селевого очага на данный момент: потенциальный, развивающийся, стабильный, затухающий

Классификация селевых очагов по типу производится согласно числовым значениям параметров скальных селевых очагов и селевых врезов и рытвин, указанных в «Методических указаниях по изучению селевых потоков» [*Методические указания, 1972*].

5. Параметры селевых потоков. При заполнении данного блока дублируются сведения о параметрах селевых потоков, указанных в «Кадастре» [*Кондратьева, 2015*]. В дополнение к ним вводятся: данные о возможности выхода селевых выносов в русло основной реки в графе «Дополнительные сведения»; информация о площади конуса выноса, в том числе вероятной; возможности перекрытия русла основной реки; протяженности транзита селевых масс в русле основной реки

6. Ущерб народно-хозяйственным объектам. В этот блок внесена информация о возможном и фактическом ущербе народно-хозяйственным объектам, а также о местоположении негативного воздействия. Графа «Дополнительные сведения» содержит детальную информацию с классификацией объектов жизнедеятельности, подверженных негативному воздействию (в том числе возможному) склоновых и русловых процессов

7. Угрозы и риски. Угрозы и риски так же вносятся в едином формате показателя опасности текущих или возможных природных процессов. В данном окне приводится информация об объектах, подверженных возможному негативному воздействию. В графе «Угрозы» учитываются возможные опасности для объектов жизнедеятельности на селитебных территориях, подверженных воздействию селевых потоков и, в графе «Риски», оценивается вероятность развития событий по негативному сценарию.

8. Степень селеопасности. Значение этого показателя во многом зависит от факторов, способствующих селеформированию в селевом бассейне, и их активности. Поскольку в настоящее время общепринятой методики определения степени селеопасности (селевой интенсивности, селевой пораженности) не существует, разными исследователями используются различные принципы и подходы [*Мезенина, 1995; Стрешнева, 1996*].

В форму «Степень селеопасности» внесены следующие параметры селевого бассейна: интенсивность селепроявлений в селевом бассейне; уровень пораженности селевыми процессами территории бассейна основной реки; степень присутствия народнохозяйственных объектов и их инфраструктуры в зоне воздействия селевых потоков. Данные показатели, будучи не связанными напрямую между собой, отражают масштаб селеопасности в зависимости от целевого назначения запроса.

9. Сооружения и мероприятия. В основе информационного заполнения данного блока представлены материалы, изложенные в каталоге к карте «Народнохозяйственные объекты на территории КБР, подверженные воздействию лавин и селей» Кадастра лавинно-селевой опасности КБР 2001 г., дополненные актуальными, в настоящее время, сведениями. В графе «Примечания» описывается современное состояние объекта.

10. Рекомендации. В этом блоке представлена информация о рекомендуемых селезащитных сооружениях и мероприятиях в контексте современной обстановки в селевом бассейне 1–15, урочища Худзур, с учетом предполагаемого развития ситуации в ближайшем будущем. Базовыми данными в наполнении этого блока также служат материалы каталога к карте «Народнохозяйственные объекты на территории КБР, подверженные воздействию лавин и селей» Кадастра лавинно-селевой опасности КБР и результаты наземных обследований, проводившихся в бассейне реки Псыгансу по следам мощного селевого потока, сошедшего 24.06.2016 г. в описываемом селевом притоке с выходом в русло основной реки. В графе «Примечания» указывается необходимость проведения дополнительных исследований, так как информации о селепроявлениях в данном водотоке недостаточно.

11. Все данные. В этом разделе выведена сводная табличная форма полного набора информации, введенной в базу данных по селевому бассейну б/н, 1–15, урочища Худзур.

Такой формат удобен для составления пользователем обоснованного представления о текущей ситуации в каждом селевом бассейне.

В разделе *«Поиск и отбор данных»*, были отработаны варианты реализации поисковых запросов, сортировки и первичной аналитической обработки внесенных данных. В данном разделе содержатся формы поисковых запросов по типу селя, его генезису, объему выбросов, площади селевого бассейна и типу селевого очага. Инструментальное обеспечение программы позволяет осуществлять вывод полного набора заполненных данных по каждому селевому бассейну в разделе *«Печать отчета»* на бумажном носителе.

Так же отработана технология вывода результатов поисковых запросов с преобразованием формата в разделе *«Экспорт данных».* Это необходимо в случае использования информации в другой программной среде, резервного копирования или архивирования данных.

Подраздел *«Экспорт статистических данных»* реализует возможность вывода, данных с преобразованием формата, информационных запросов по типу селевого очага, а также по типу селевого потока и его генезису. В настоящий момент эти формы программы носят обзорный характер, поскольку для статистической обработки необходим значительный объем сведений по всем селевым бассейнам.

Сведения о типах информации и обозначениях, применяемых в данной программе, содержатся в разделе *«Справочная информация»*, определяющем формат предоставляемых данных.

Выводы

Проведено заполнение табличных форм программы «База данных селевых бассейнов» на отдельный речной бассейн. Для тестирования функциональной составляющей базы данных в пользовательском режиме по селевым бассейнам р. Псыгансу была внесена информация, позволяющая оценить условия возникновения селевых процессов в районе, их тип, генезис, объем твердой составляющей селя, периодичность, интенсивность, основные морфометрические показатели селевых бассейнов и т.п. В целях реализации рассмотрения системной иерархии типов объектов мониторинга селевых бассейнов, в дополнение к имеющимся сведениям, вносилась также детальная информация по селевым бассейнам каждого порядка, ранее не подлежавшая отдельному рассмотрению и/или систематизированному учету.

По заполненным блокам проведена отладка взаимодействия составных частей программной оболочки базы данных. Путем корректировки табличных форм базы, получилось добиться надлежащей работы всех функций, составляющих целевой инструментарий программы.

Налажено корректное выполнение:

- ввода информации;
- автоматизированного поиска по определенным заданным параметрам объектов учета или характеристикам селевых бассейнов;
- вывода информации со сменой формата с целью использования данных в другой программной среде, резервного копирования или архивирования данных;
- вывода печатной версии полного набора заполненных данных по каждому селевому бассейну на бумажном носителе.

По мере заполнения программной оболочки сведениями о селепроявлениях в речных бассейнах, т. е. накопления значительного объема данных, реализуется возможность статистической обработки информации, что обеспечит полноценное функционирование информационного ресурса.

Программная оболочка «Базы данных селевых бассейнов» решает задачу организации и учета данных о селепроявлениях по материалам комплексного и оперативного (космического, наземного маршрутного и др.) мониторинга селевых бассейнов, а также архивных данных по каждому из них. По результатам аналитической

проработки пополняемых данных возможно получение актуальной информационной основы для оценки текущих пространственно-временных изменений объектов мониторинга селевых бассейнов.

Список литературы

Докукин М.Д. и др. О селях 2011 года на Северном склоне Центрального Кавказа // ГеоРиск. 2012. № 7. С. 30–40.

Запорожченко Э. В. и др. Селевые процессы на современном этапе деградации горного оледенения // Вестник ВНЦ. 2009. Том 9. № 1. С. 44–49.

Кадастр селевой опасности Юга Европейской части России // Ответственный редактор Н.В. Кондратьева, А.Х. Аджиев, М.Ю. Беккиев, М.М. Гедуева (Гяургиева), В.Ф. Перов, В.В. Разумов, И.Б. Сейнова, Л.В. Хучунаева. Москва. ООО «Феория», Нальчик. Печатный двор. 2015. С. 90, 91, 94.

Методические указания по изучению селевых потоков, проект. КНИГМИ, Алма-Ата, 1972. С. 75.

Мезенина Т. Н., Чулков К. И., Сейнова И. Б. Пояснительная записка к комплекту карт распространения экзогенных геологических процессов на территории КБР масштаба 1:200000. – Нальчик. Фонды МЧС КБР. 1995.

Перов В.Ф. Селеведение. Учебное пособие. Географический факультет МГУ. Москва, 2012. 272 с.

Стрешнева Н. П., Строганова О. И. и др. Отчет по инженерно-геологическому обследованию территории КБАССР, СОАССР, ЧИАССР и КЧАО за 1972–1975 гг. Нальчик. Фонды КБГРЭ. 1996

Черноморец С. С. Селевые очаги до и после катастроф. Москва. 2005. С. 15–23.

Шныпарков А.Л., Колтерманн П.К., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Перов В.Ф. Селевой риск на Черноморском побережье Кавказа. М.: Изд-во Геориск. 2012. С. 20–25.

Сверхкраткосрочный прогноз селей дождевого генезиса

Б.С. Степанов, Р.К. Яфязова

Национальная гидрометеорологическая служба Казахстана, Алматы, Казахстан, yafyazova@gmail.com

Аннотация. Необходимость разработки метода сверхкраткосрочного прогноза селей дождевого генезиса связана с большим моральным и материальным ущербом, обусловленным неоправдавшимися краткосрочными прогнозами селей. Низкая оправдываемость краткосрочных прогнозов селей дождевого генезиса объясняется главным образом нерешенностью проблемы прогноза осадков для горной территории. Наличие и доступность современных средств получения, передачи и обработки данных, необходимых для прогноза селей, а также доведения информации о грозящей опасности до различных категорий потребителей, позволили Национальной гидрометеорологической службе Казахстана разработать метод сверхкраткосрочного прогноза селей дождевого генезиса. Достоинствами этого метода являются достаточная приближенность к ожидаемому явлению, а также высокая оправдываемость прогноза селей, поскольку используется, в совокупности с прогнозом погоды для горной территории, текущая метеорологическая ситуация. Оправдываемость сверхкраткосрочного прогноза селей значительно превышает оправдываемость краткосрочного прогноза селей. При этом заблаговременность предупреждения о селевой опасности превышает заблаговременность, автоматизированной системы мониторинга селевой опасности, созданной для защиты г. Алматы. Заблаговременность сверхкраткосрочного прогноза селей дождевого генезиса достаточна для принятия мер по уменьшению возможного ущерба.

Ключевые слова: *сель, дождь, осадки, температура воздуха, краткосрочный прогноз, сверхкраткосрочный прогноз, метод*

Ссылка для цитирования: Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Сверхкраткосрочный прогноз селей дождевого генезиса. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 485–486.

Ultra-short-term forecast for debris flows induced by rainfall

B.S. Stepanov, R.K. Yafyazova

National Hydrometeorological Service of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, yafyazova@gmail.com

Abstract. The necessity to develop a method for ultra-short-term forecast of debris flows induce by rainfall is associated with great moral and material damage caused by unfulfilled short-term forecasts of debris flows. The low validity of short-term forecasts of debris flows induce by rainfall is mainly explained by the unsolved problem of forecast of precipitation for mountainous areas. The availability and accessibility of modern means for receiving, transmitting and processing data necessary for forecast of debris flows, as well as communicating information on the impending danger to various categories of consumers, allowed the National Hydrometeorological Service of Kazakhstan to develop a method for ultra-short-term forecast of debris flows induce by rainfall. Sufficient proximity to the expected phenomenon, as well as high justifiability of debris flow forecast, since the current meteorological situation is used in conjunction with the weather forecast for the mountainous area, are advantages of this method. The justifiability of the ultra-short-term forecast of debris flows significantly exceeds the justifiability of the short-term forecasts of debris flows. At the same time, the timeliness of warning about debris-

flow hazard exceeds the timeliness of the automated debris-flow hazard monitoring system created to protect Almaty city. The timeliness earliness of the ultra-short-term forecast of debris flows induce by rainfall is sufficient to take measures to reduce possible damage.

Key words: *debris flow, rainfall, precipitation, air temperature, short-term forecast, ultra-short-term forecast, method*

Cite this article: Stepanov B.S., Yafyazova R.K. Ultra-short-term forecast for debris flows induced by rainfall. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 485–486.

Полный текст статьи будет опубликован в журнале «ГеоРиск».

Thick alluvial fans – indicator of the past rivers' damming

A.L. Strom

Research Institute of Energy Structures – branch of JSC "Hydroproject Institute", Moscow, Russia, strom.alexandr@yandex.ru

Abstract. Debris flows are known as one of the natural phenomena in mountainous regions producing maximal erosion. Most powerful of them can incise for several tens of meters in the valley bottom composed of loose material. At the same time, quite often one can observe alluvial fans up to 50–70 m thick, outcropping at the river's banks and composed of debris flow sediments accumulated successively without evidence of bottom erosion. Most of such outcrops are characterized by the relatively homogenous grain size composition without large boulders. It is hypothesized that such sedimentation takes place when debris flows fall into the water body with standing water. Such hydrological environment is typical, in particular, for landslide-dammed lakes. As soon as debris flow enters water, its' transporting and erosive capacity drops drastically and material starts accumulating not eroding the underlying sediments. Such debris flow – lacustrine sediments become finer being deposited more distant from the lake banks and larger dammed lakes are filled by well-laminated silt. When the dam is breached and lake disappears, the subsequent debris flows from the same sources cut through these accumulations tending to reach the trunk stream level. Such outcrops provide valuable information about the level of past landslide-dammed lakes and opens new perspectives for determining their ages and of the river damming longevity. Examples of thick alluvial fans located upstream from the past breached rockslide dams in the Central Asia region and the Greater Caucasus are presented.

Key words: *debris flow, landslide-dammed lake, erosion, siltation, alluvial fan*

Cite this article: Strom A.L. Thick alluvial fans – indicator of the past rivers' damming**.** In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 487–488.

Мощные аллювиальные конусы – индикатор запруживания древних рек

А.Л. Стром

НИИЭС – филиал АО «Институт Гидропроект», Москва, Россия, strom.alexandr@yandex.ru

Аннотация. Селевые потоки известны как одно из природных явлений в горных регионах, вызывающее максимальную эрозию. Наиболее мощные из них способны врезаться на несколько десятков метров в дно долины, сложенное рыхлым материалом. В то же время нередко можно наблюдать конусы выноса мощностью до 50–70 м, обнажающиеся по берегам рек и сложенные последовательно накапливавшимися селевыми отложениями без признаков донной эрозии. Большинство таких обнажений характеризуются относительно однородным гранулометрическим составом без крупных валунов. Предполагается, что такое осадконакопление происходит при входе селей в водоем со стоячей водой. Такая гидрологическая обстановка характерна, в частности, для завальных озер. Как только селевой поток попадает в воду, его транспортирующая и эрозионная способности резко падают, и материал начинает накапливаться, не размывая подстилающие осадки. Гранулометрический состав таких отложений селевого и, одновременно, озерного генезиса становится более тонким по мере удаления от берегов озера, и более крупные озера заполняются илистыми осадками с хорошо выраженной слоистостью. При прорыве плотины и исчезновении озера

последующие селевые потоки из тех же источников прорезают эти отложения, стремясь достичь уровня магистральной реки. Такие обнажения дают ценную информацию об уровне прошлых подпрудных озер, и открывают новые перспективы для определения их возраста и длительности сушествования. Приведены примеры мощных конусов выноса, расположенных выше по течению от древних завальных плотин, образованных скальными оползнями в Центральноазиатском регионе и на Большом Кавказе.

Ключевые слова: *селевые потоки, завальное озеро, эрозия, заиление, конус выноса*

Ссылка для цитирования: Стром А.Л. Мощные аллювиальные конусы – индикатор запруживания древних рек. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 487–488.

The full text of the article will be published in the Journal of Mountain Science.

Оценка оползневой восприимчивости селеопасного Шамахинского административного района Азербайджана (на основе ArcGIS)

С.А. Тарихазер

Институт географии имени академика Г.А. Алиева Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджан, kerimov17@gmail.com

Аннотация. Наиболее угрожающим природным бедствием, ведущим к экономическому ущербу и человеческим жертвам, являются оползни. К сожалению, исследованию и изучению их влияния на селевые процессы серьезного внимания не уделялось.

Для снижения ущерба от оползней на примере селеопасного Шамахинского административного района Азербайджана осуществлено подробное исследование факторов (гипсометрия, крутизна склонов, горизонтальное и вертикальное расчленения, литологический состав грунтов, расстояние от разломов, количество атмосферных осадков, высотные ландшафтные комплексы), обусловливающих формирование оползней, принимая во внимание также механизм их образования. Затем был осуществлен анализ выявленных значений оползневой восприимчивости и возможного проявления оползней, являющихся основным источником селевого материала. В программной среде ArcGIS территория исследуемого района была подразделена на три зоны по восприимчивости к формированию оползней: низкая, умеренная и высокая.

Ключевые слова: *оползень, оползневая восприимчивость, вес фактора, природопользование, антропогенный фактор, картографирование, оценка оползневой опасности, селевой материал*

Ссылка для цитирования: Тарихазер С.А. Оценка оползневой восприимчивости селеопасного Шамахинского административного района Азербайджана (на основе ArcGIS). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 489–499.

Assessment of landslide susceptibility of debris flow hazardous of Shamakhi administrative district of Azerbaijan (based on ArcGIS)

S.A. Tarikhazer

Institute of Geography named after academician H.A. Aliyev, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan, kerimov17@gmail.com

Abstract. The most threatening natural disaster leading to economic damage and human casualties are landslides, which, to our great regret, have not received serious attention to research and study of their impact on debris flow processes.

To reduce damage from landslides, using the example of the debris flow-prone Shamakhi administrative region of Azerbaijan, a detailed study of factors (hypsometry, slope steepness, horizontal and vertical dissection, lithological composition of soils, distance from faults, amount of precipitation, high-altitude landscape complexes) causing the formation of landslides was carried out, taking into account attention also to the mechanism of their formation. Then, an analysis was carried out of the identified landslide susceptibility values and their possible manifestations, which are the main source of debris flow material. In the ArcGIS software environment, the territory of the study area was divided into 3 zones according to the susceptibility of landslide formation: low, moderate and high.

Key words: *landslide, landslide susceptibility, factor weight, environmental management, anthropogenic factor, mapping, landslide hazard assessment, debris flow material*

Cite this article: Tarikhazer S.A. Assessment of landslide susceptibility of debris flow hazardous of Shamakhi administrative district of Azerbaijan (based on ArcGIS). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 489–499.

Введение

В последние десятилетия в Азербайджане огромное значение придают развитию рекреационной отрасли. Однако, настоящая ситуация в сфере рекреации в Азербайджане весьма неоднозначна. Законодательные акты (Закон «О туризме» от 4 июня 1999 г.), а также Государственные программы развития рекреации в 2010–2014 гг. в Азербайджане явились стимулом к формированию региональных программ становления туризма. А это возможно добиться посредством осуществления исключительного туристско-рекреационного плана, во главу которого окажутся уникальные туристские ресурсы горных регионов Азербайджана. Неуклонность экономического роста, а это возведение туристических объектов, прокладка дорог и пр., может привести к риску развития опасных морфогенетических процессов, которые могут оказывать прямое или косвенное влияние на горные геосистемы. Стало быть, увеличивается объем и многообразие экогеоморфологических рисков природопользования [*Tarikhazer, 2020*].

Наибольшую угрозу на территории Шамахинского административного района представляют оползни. Площадь Шамахинского района составляет 1611 км^2. Если до 2000 г. оползневые процессы проявлялись в нескольких селах района – Муганлы, Мейсяри и Мадраса и др., где 180 домов были подвержены оползневым процессам, то после 2000 г. – более 400 домов только в 7 селах района – Чабаны, Мадраса, Мейсяри, I-Чайлы, Муганлы, Аджыдере и Галейбугурд подвержены оползневым процессам. Большинство семей были эвакуированы.

С сожалением отмечаем, что исследованию и изучению воздействия оползней на селевые процессы в Азербайджане не проявляли серьезного внимания. Значит, специфические и нестойкие формы рельефа могут стать существенной угрозой при туристско-рекреационном освоении [*Tarikhazer, 2022*].

Территория Шамахинского административного района, как компонент активной эпигеосинклинальной орогенической зоны, обладает весьма непростым геолого-геоморфологическим строением. Исследуемый регион находится в юго-восточном погружении Большого Кавказа и является частью аналогичной геосинклинальной складчатой области. Вследствие существенному многообразию расположенных здесь геологических структур, тектонического строения и дифференцированному характеру значительных неотектонических подвижек, рельеф территории отличается распространением опасных морфогенетических процессов (землетрясения (9 баллов), извержения грязевых вулканов, обвалы, оползни, сели и др.). Из этого следует, что в ходе освоения территории Шамахинского административного района в целях развития рекреации существенную ценность имеет вопрос исследования, оценки и прогнозирования развития современных опасных природно-разрушительных процессов. Геодинамически активное, дифференцированное формирование комплекса эндогенно и экзогенно обусловленных процессов рельефообразования несменяемо преобразовывает морфологический (морфометрический) облик рельефа, что крайне необходимо принимать к сведению при освоении чрезвычайно неустойчивых горных геосистем в целях туризма [*Мамедов и др., 2023*].

Цель и методы исследований

Целью данного исследования является выявление главных причин формирования и распространения оползневых процессов на территории Шамахинского административного района, дать оценку условий их образования, т.е. риск восприимчивости территории от оползней, являющих главным источником селевого материала. В основу исследования вошли собственные полевые геолого-геоморфологические работы, анализ полученных результатов, их сочетание с данными по гидрогеологическому строению территории района и гидроклиматическими факторами формирования оползневых процессов.

На сегодняшний день опубликовано множество работ по теме исследования оползней [*Guzetti et al., 2005; Lee, Pradhan, 2007; Oh, Lee, 2011; Пендин и др. 2015; Arabameri et al., 2019; Cantarino et al, 2019; Mandal et al., 2019; Nahayo, 2019; Shano et al., 2020; Харченко и др., 2020; Rocatti et al., 2021 и др.*].

Для оценки оползневой восприимчивости и составления карт вероятного формирования оползней в исследуемом районе использован интегрированный показатель (по способу взвешенных сумм) восприимчивости территории к оползневому процессу. Для прогноза оползневых процессов следует отметить, что их формирование идентифицируется основными факторами, ну и последующие оползни имеют возможность сформироваться при тех же обстоятельствах, что и прежние.

Итогом проведенного анализа значится разделение изучаемой территории на 3 зон вероятного формирования оползневого процесса – низкая, умеренная и высокая. В ходе исследования на базе отношения правдоподобия (ОП) проведена оценка надежности полученных результатов, что позволит оценить незнакомые величины, построенные на ведомых показателях. Проведена оценка интегрированного параметра (по способу взвешенных сумм) восприимчивости территории к оползневому процессу.

Краткая характеристика геолого-геоморфологического строения исследуемой территории

Шамахинский административный район в геолого-геоморфологическом отношении является частью единой Шамахино-Гобустанской зоны. В северной части района развиты отложения мела, представленные глинами, известняками и известняковыми песчаниками. На остальной территории развиты палеогеновые и неогеновые отложения. В центральной и южной частях района преобладают плиоценовые отложения – глины, песчаники, пески и пр. Район охватывает высоты от 200–300 до 2200–3500 м. Главнокавказский хребет вблизи г. Бабадаг имеет острые, зубчатые вершины со следами древнего оледенения (кары). Восточнее г. Гюлюмдосту геолого-геоморфологическое строение водораздела хребта резко изменяется. Южнее Главнокавказского хребта с запада на восток протягивается интенсивно расчлененной среднегорье, с широко развитыми оползнями. Центральная часть района выровненная, однако склоны долин междуречья Гирдыманчай-Пирсаатчая интенсивно расчленены оползнями и овражно-балочной сетью, местами и бедлендом.

На территории Шамахинского административного района простирается Чухурюрдское, Гирджакинское, Маразинское и Сюндинское плато. Прослеживается Тфанская, Говдагская и Гобустанская тектонические продольные ступени, хорошо выраженные в рельефе. На юго-западе района простирается Лянгябизский хребет, северные склоны которого осложнены оползнями. На севере района простирается Дюбрарский горст-синклинорный хребет, южнее которого протягиваются средние эрозионно-денудационные горы. К юго-востоку от них расположен Алтыагадж-Куркачидагский антиклинорный хребет, с крутым и интенсивно расчлененным южным склоном.

Чухурюрдское, Сюндинское и Маразинское синклинальное плато бронированы известняками и с юга ограничены тектоническими нарушениями. Лянгябизский антиклинальный хребет имеет асимметричное строение – южный склон крутой на западе, северный – пологий.

В исследуемом районе горообразовательные процессы, в том числе и разрывные блоковые движения, активно проявляются и в современную эпоху, о чем свидетельствуют частые высокобалльные (9 баллов и более) землетрясения, и развитие сейсмотектонических явлений.

Современные рельефообразующие процессы имеют сложные закономерности территориального распространения. На севере, северо-западе и в центральной части господствуют гравитационные, эрозионно-денудационные, а в юго-западной и юго-восточной частях, наряду с эрозионными, отчасти и гравитационно-денудационными процессами, преобладает и аридная денудация. Долины рек имеют широкое дно, относительно крутые склоны, осложненные оползнями и овражно-балочной сетью. Оползни наиболее активны на севере и западе, действующие периодически, особенно в период увеличения атмосферных осадков в 1,5–2 раза выше среднегодовой нормы. На развитие оползней существенное влияние оказывает активная сейсмичность района. Грязевулканические процессы интенсивно проявляются и усиливаются в юго-восточном направлении. Здесь находится ряд грязевых вулканов, представленные небольшими куполами, грифонами и сальзами – грязевые вулканы Дамирчи, Астрахановка и др.

Результаты исследования

Основой для оценки оползневой угрозы Шамахинского административного района явилась карта инвентаризации оползней (КИП), на которой отражены 76 мест их активизации (рис. 1). КИП – это важный элемент в оценке оползневого риска. Помимо изображения пространственного размещения оползней КИП содержит в себе морфометрические показатели оползня – размеры, площадь, глубина захвата склонового массива оползневой деформацией [*Tarikhazer et al., 2023*].

Карты гипсометрии, крутизны склонов получены с помощью цифровой модели рельефа (ЦМР) благодаря инструментов пространственного анализа и перегруппированы на 3 группы на основании алгоритма естественных границ. Показатели «Расстояние от активных разломов» подразделены на 3 группы благодаря инструмента «Евклидово расстояние» ArcGIS: зона разлома, менее 3 км м и более 3 км. Карта количества атмосферных осадков получена посредством интерполяции данных о количестве осадков в населенных пунктах, расположенных по соседству. Карта высотных ландшафтных комплексов составлена в программной среде ArcGIS. Сведения о литологическом состоянии грунтов и глубинные разломы оцифрованы с геологической карты Шамахинского района масштаба 1:200 000. Затем для анализа данные карты преобразованы в растровый формат в целях расчета весов классов и факторов, а в итоге получения карты оползневой восприимчивости.

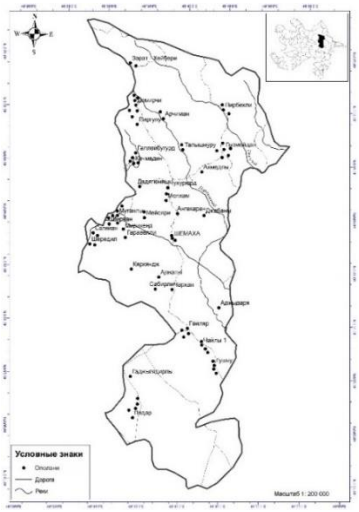


Рис. 1. Карта инвентаризации оползней Шамахинского административного района

Перед нами стояла задача – выявить условия формирования оползневых процессов, т.е. совокупность природных и антропогенных факторов, провоцирующих данные процессы. С учетом собственных данных, а также особенностей оползней и факторов, провоцирующих их развитие, являющихся селевыми очагами, а также в будущем генераторами возникновения селевых процессов, для создании карт оползневой восприимчивости и потенциального их формирования, в нашем исследовании взяты 8 факторов – крутизна склонов, горизонтальное и вертикальное расчленения рельефа, литологический состав грунтов (геологическое строение), расстояние от разломов, гидрологические условия, количество атмосферных осадков, высотные ландшафтные комплексы (рис. 2–10).

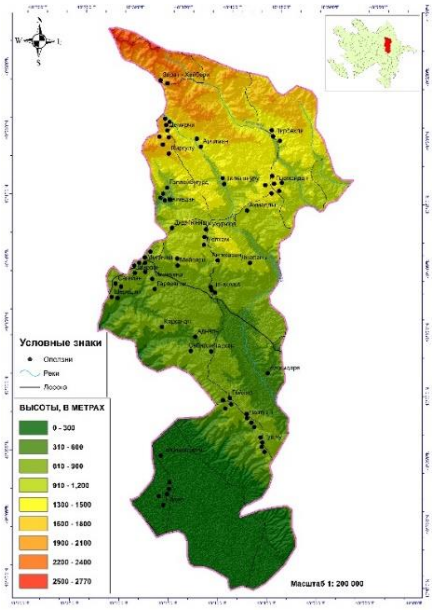


Рис. 2. Гипсометрическая карта Шамахинского административного района

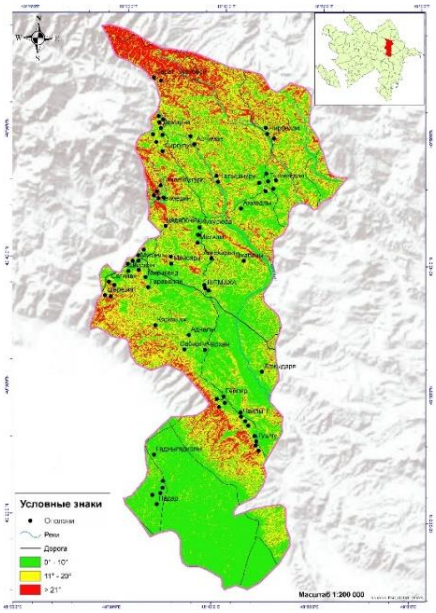


Рис. 3. Карта крутизны склонов

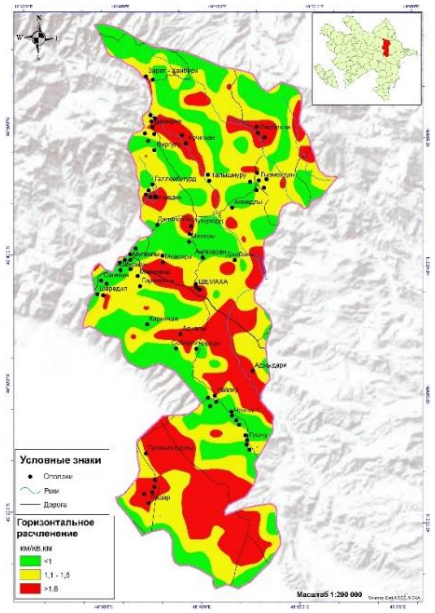


Рис. 4. Карта горизонтального расчленения рельефа

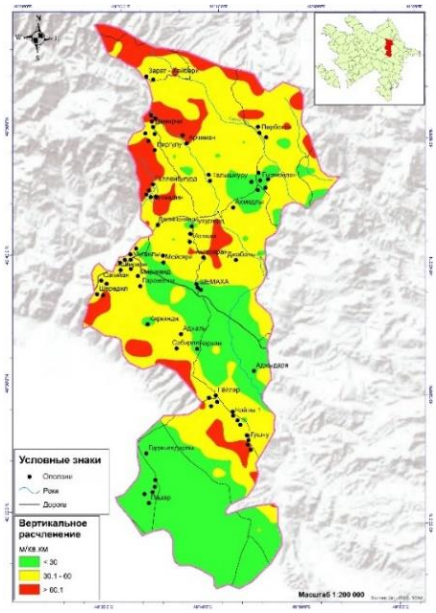


Рис. 5. Карта вертикального расчленения рельефа

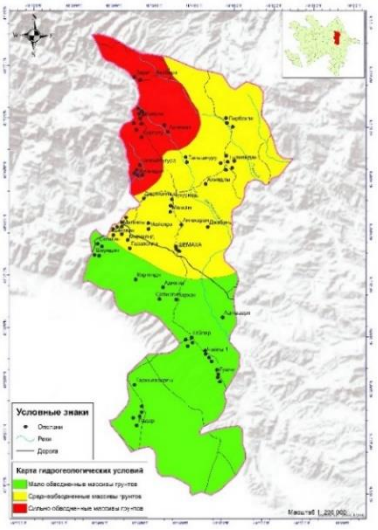


Рис. 6. Карта гидрогеологических условий

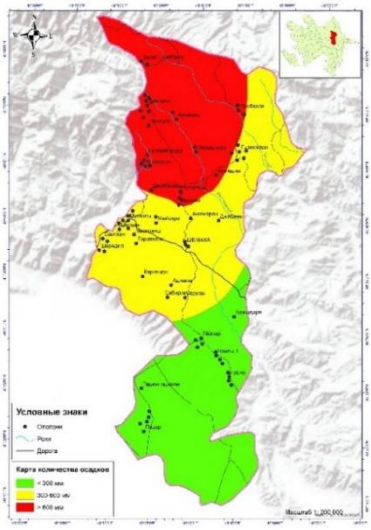


Рис. 7. Карта количества атмосферных осадков

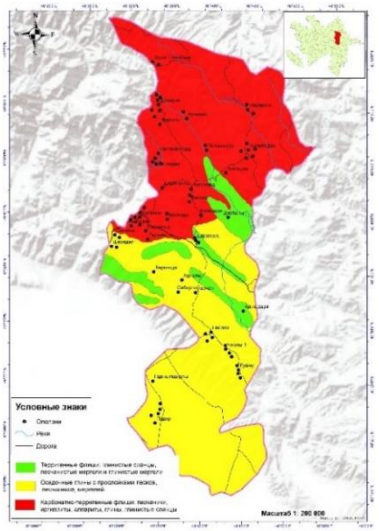


Рис. 8. Карта литологического состава грунтов

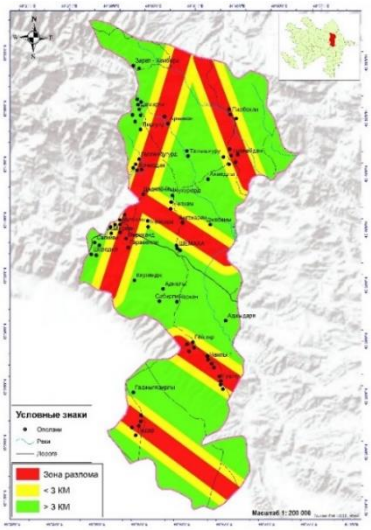


Рис. 9. Карта расстояния от активных разломов

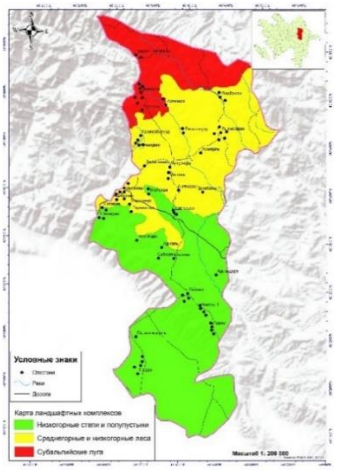


Рис. 10. Карта высотных ландшафтных комплексов

В ходе исследования рассчитана связь между факторами, провоцирующими оползни, и практическим формированием оползней на территории осуществляемых изысканий. Каждый фактор представлен тремя информационными классами (таблица 1). Вес *xij* информационных классов нормируются относительно количества выявленных оползней так, чтобы их сумма для каждого фактора составляла 1:

$$xiy = \frac{\text{количество оползней в данном информационном классе}}{\text{количество оползней на исследуемой территории}}. \quad (1)$$

Таблица 1. Разделение основных факторов, обуславливающих активизацию оползневых процессов в Шамахинском административном районе, на информационные классы и вес этих классов

Фактор *Wj*	Классы	Количество оползней	Вес *xij*
Крутизна склонов (°)	< 10°	5	0,066
	11–20°	53	0,697
	> 21°	18	0,236
	Сумма		1
Горизонтальное расчленение рельефа (км/км^2)	< 1	19	0,25
	1,1–1,5	35	0,460
	> 1,5	22	0,289
	Сумма		1
Вертикальное расчленение рельефа (км/км^2)	< 30	18	0,237
	30,1–60	46	0,605
	> 60,1	12	0,157
	Сумма		1
Литологический состав грунтов	Осадочные глины с прослойками песков, песчаников, мергелей	26	0,342
	Терригенные флиши: глинистые сланцы, песчанистые мергели и глинистые мергели	5	0,065
	Карбонатно-терригенные флиши: песчаники, аргиллиты, алевриты, глины, глинистые сланцы	45	0,592
	Сумма		1
Расстояние от активных разломов (км)	< 3	20	0,263
	> 3	24	0,315
	Зона разлома	32	0,421
	Сумма		1
Гидрогеологические условия	Мало обводненные грунты	27	0,355
	Среднеобводненные грунты	32	0,421
	Сильно обводненные грунты	17	0,223
	Сумма		1
Количество атмосферных осадков (мм/год)	< 300	19	0,25
	300–600	27	0,355
	> 600	30	0,394
	Сумма		1
Высотные ландшафтные комплексы	Субальпийские луга	10	0,131
	Низкогорные степи и полупустыни	27	0,355
	Среднегорные и низкогорные леса	39	0,513
	Сумма		1

Далее был рассчитан вес фактора *Wj* (*j* = 1, 2, 3, …, 8) (таблица 2). Вес фактора вычисляется по формуле:

$$W_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}, \quad (2)$$

где *Wi* – вес фактора *Ai*; *mi* – среднее геометрическое значение *i* строки.

Таблица 2. Вес фактора оползнеобразования W_i

Фактор	Уровень значимости *I*	Вес W_i
Литологический состав грунтов	9	0.225
Гидрогеологические условия	7	0.175
Крутизна склонов	7	0.175
Количество атмосферных осадков	6	0.150
Расстояние от активных разломов	5	0.125
Высотные ландшафтные комплексы	3	0.075
Вертикальное расчленение рельефа	2	0.050
Горизонтальное расчленение рельефа	1	0.025

Интегрированный показатель восприимчивости территории к оползневому процессу (по способу взвешенных сумм) вычисляется по формуле:

$$S = \frac{I_1}{(I_1+I_2+I_3+\cdots+I_n)} + \frac{I_2}{(I_1+I_2+I_3+\cdots+I_n)} + \cdots + \frac{I_n}{(I_1+I_2+I_3+\cdots+I_n)}. \quad (3)$$

На основе данных формул строится карта районирования территории по восприимчивости к оползневой опасности. Выделены три зоны: 1. Зона с низкой оползневой восприимчивостью; 2. Зона с умеренной оползневой восприимчивостью; 3. Зона с высокой оползневой восприимчивостью (рис. 11).

Анализ составленной карты районирования показал, что большая часть Шамахинского административного района характеризуется высокой оползневой опасностью. В геологическом отношении к зоне с высокой оползневой опасностью относятся территории, где массивы грунтов сложены карбонатно-терригенными флишами: песчаники, аргиллиты, алевриты, глины, глинистые сланцы, которые располагаются в зоне воздействия активных тектонических разломов. Причиной активизации оползневых процессов в данной зоне являются высокая энергия рельефа, а также слабая прочность массивов грунтов и их нарушенность тектоническими разломами. К зоне с низкой оползневой опасностью относятся зоны, массивы грунтов сложены осадочными глинами с прослойками песков, песчаников, мергелей.

Было выявлено, что периоды образования новых оползней и различных подвижек совпадают с периодами дождей. Это связано с изменением свойств и состояния слагающих склоны грунтов из-за их избыточного увлажнения. Кроме того, происходит подъем уровня грунтовых вод и, как следствие, с возрастанием в грунтах порового давления. Количество выпавших атмосферных осадков оказывает влияние и на гидрологический режим рек, который определяет интенсивность эрозионных процессов и активизацию оползней на береговых участках. Особенность рельефа территории является одним из основных условий, способствующим образованию оползней. Именно рельеф определяет запасы потенциальной энергии, способствующей развитию оползней.

Воспользовавшись формулой L. Saro [*2004*], мы также провели оценку показателя восприимчивости выделенных зон территории Шамахинского административного района при районировании оползневой опасности:

$$\text{ОП} = \frac{\%\ \text{оползней}}{\%\ \text{площади}}. \quad (4)$$

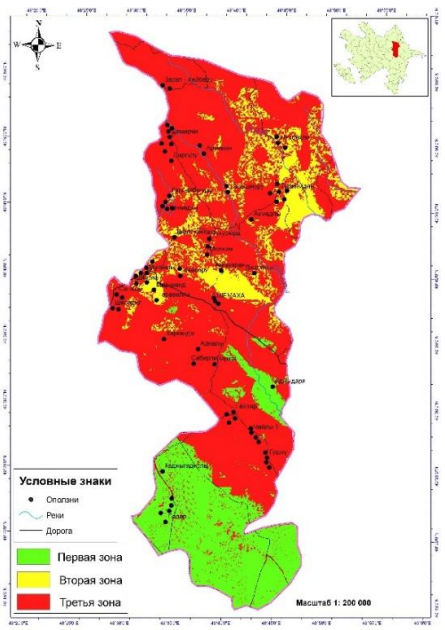


Рис. 11. Карта районирования по восприимчивости к оползневой опасности территории Шамахинского административного района

По мнению L. Saro [*2004*], для оценки S отношение правдоподобия (ОП) является отражением условной вероятности. Т.е., если ОП > 1, то на изучаемой территории высокая вероятность проявления оползневого процесса. Если же ОП < 1, следовательно, вероятность проявления оползневого процесса низкая. Результаты оценки ОП способом взвешенных сумм отражены в таблице 3 и на рис. 12.

Из карты следует, что большая часть территории Шамахинского административного района (73,68%) характеризуется высокой восприимчивостью к оползневой опасности. Зона с умеренной восприимчивостью к оползневой опасности составляет 11,78% территории, а зона с низкой восприимчивостью к оползневой опасности – 14,54% территории.

Таблица 3. Оценка ОП по способу взвешенных сумм

Зона оползневой опасности	Площадь зоны	Количество оползней	% оползней	% площади	ОП
Зона с низкой оползневой опасностью	218 км^2	4	5,26	13,53	0,38
Зона с умеренной оползневой опасностью	206 км^2	9	11,84	12,78	0,92
Зона с высокой оползневой опасностью	1187 км^2	63	82,89	73,.68	1,12

Рис. 12. ОП для выделенных зон оползневой опасности

Заключение

В Азербайджане в целях снижения или предотвращения природных рисков оценка оползневой опасности служит ценным компонентом национальной стратегии. По этой причине на основе ArcGIS проведено районирование по восприимчивости к оползневой опасности территории Шамахинского административного района, являющегося одним из селеопасных районов Большого Кавказа в пределах Азербайджана. Исследуемая территория была подразделена на 3 зоны по степени восприимчивости к оползневой опасности: низкая, умеренная и высокая. Для оценки оползневой восприимчивости вероятного формирования оползней в исследуемом районе использован интегрированный показатель (по способу взвешенных сумм) восприимчивости территории к оползневому процессу. Была рассчитана связь между факторами, провоцирующими оползни, и практическим формированием оползней на территории осуществляемых изысканий. Неопровержимость выявленных моделей оценена формулой Saro L., указавшая на высокую результативность применяемого метода. Итог выполненных работ крайне необходим в целях оценки оползневой опасности и рисков, планирования устойчивого землепользования и сокращения урона от оползней, являющихся основным источником селевого материала на изучаемой территории. За счет максимальной точности данный метод следует использовать для оценки оползневой восприимчивости различных регионов Альпийско-Гималайского пояса.

Список литературы

Мамедов С.Г., Тарихазер С.А. Применение количественных методов для оценки оползневой восприимчивости бассейна реки Гирдыманчай // Известия Тульского ГУ. Вып. 1. 2023. С. 38–66.

Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: ЛЕНАНД, 2015. 320 с.

Харченко С.В., Шварев С.В. Прогнозирование оползневой опасности в окрестностях Красной Поляны на основе линейного дискриминантного анализа // Вестник Московского Государственного Университета. Серия 5. География. 2020. № 3. С. 22–33.

Arabameri A., Pradhan B., Rezaei K., Lee C.-W. Assessment of landslide susceptibility using statistical- and artificial intelligence-based FR–RF integrated model and multiresolution DEMs // Remote Sensing. 2019. V. 11. Iss. 9. URL: https://doi.org/10.3390/rs11090999.

Cantarino I., Carrion M.A., Goerlich F., Martinez Ibañez V. A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps // Landslides. 2019. V. 16. I. 2. P. 265–282. URL: https://doi.org/10.1007/s10346-018-1063-4

Guzzetti F., Reichenbach P., Cardinali M., Galli M., Ardizzone F. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale // Geomorphology. 2005. V. 72. Iss. 1. P. 272–299. URL: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002

Lee S., Pradhan B. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models // Landslides. 2007. V. 4. P. 33–41.

Mandal S., Mondal S. Statistical approaches for landslide susceptibility assessment and prediction. Switzerland: Springer International Publishing, 2019. 200 p.

Nahayo L., Mupenzi C., Habiyaremye G., Kalisa E., Udahogora M., Nzabarinda V., Li L. Landslides hazard mapping in Rwanda using bivariate statistical index method // Environmental Engineering Science. 2019. V. 36. Iss. 8. P. 892–902. URL: https://doi.org/10.1089/ees.2018.0493.

Oh H.-J., Lee S. Cross-application used to validate landslide susceptibility maps using a probabilistic model from Korea // Environmental Earth Science. – 2011. V. 64. P. 395–409.

Roccati A., Paliaga G., Luino F., Faccini F., Turconi L. GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment // Land. 2021. V. 10. Iss. 2. URL: https://doi.org/10.3390/land10020162.

Saro, L. Application of Likelihood Ratio and Logistic Regression Models to Landslide Susceptibility Mapping Using GIS // Environmental Management, – 2004. Vol. 34. № 2, – p. 223–232.

Tarikhazer S.A. The geographical prerequisites for the identification and prevention of dangerous geomorphological processes in the mountain geosystems of the Alpine-Himalayan belt (on the

example of the Major Caucasus of Azerbaijan) // Bulletin of Dnipropetrovsk University. Geology, Geography and Geoecology. 2020. № 1. P. 176–187. DOI https://doi.org/10.15421/112016

Tarikhazer S.A. Assessment of ecological strength and risk of geosystems of the north-eastern slope of the Great Caucasus (within Azerbaijan) // Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series Geology. Geography. Ecology. 2022. V. 56. P. 264–276. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-20

Tarikhazer S.A., Mammadov S.G., Hamidova Z.A. Application of quantitative methods for the assessment of landslide susceptibility of the Aghsuchay river basin // Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University, series" Geology. Geography. 2023. № 58. P. 257–273. https://doi.org/10.26565,2410-7360-2023-58-20

Shano L., Raghuvanshi T.K., Meten M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques–a review // Geoenvironmental Disasters. 2020. V. 7. Iss. 1. URL: https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0.

Радиоактивные сели в долине реки Майлуу-Суу (Кыргызстан)

И.А. Торгоев, Ю.Г. Алешин

Научно-инженерный центр «Геоприбор» Национальной Академии наук, Бишкек, Кыргызстан, isakbektor@mail.ru

Аннотация. наибольшую угрозу для жизнедеятельности населения, функционирования объектов экономики и инфраструктуры в Кыргызстане представляют оползни, перекрывающие долины и ущелья горных рек. При разрушении оползневых перекрытий (плотин) часто возникает волна прорыва, устремляющаяся вниз в виде селевого потока. Подобные каскадные сценарии, связанные с оползнями и селями, особенно опасны тогда, когда в зону воздействия оползней и селей попадают радиоактивные хвостохранилища, как это неоднократно имело место в долинах рек Майлуу-Суу, Кичи-Кемин в Кыргызстане. Опасность разрушения таких хранилищ, размещенных в руслах и поймах рек, связана с тем, что волна прорыва оползневой запруды может трансформироваться в радиоактивный и/или токсичный селевой поток с загрязнением прилегающих территорий. В настоящее время нарастет риск разрушения урановых хвостохранилищ в среднем течении р. Майлуу-Суу, расположенных на противоположном берегу от оползня «Кой-Таш». Неизбежная разгрузка этого оползня объемом около 4 млн $м^3$ в русло р. Майлуу-Суу может вызвать формирование оползневой запруды высотой до 20 м с подъемом уровня воды на 12 м выше основания дамб хвостохранилищ, расположенных на противоположном берегу. В статье дается оценка последствий размыва такой оползневой дамбы с возникновением волны прорыва, которая может трансформироваться в разрушительный селевой поток, чреватый трансграничным радиоактивным загрязнением долины в полосе до 15 м по обоим берегам и конуса выноса реки на территории соседнего Узбекистана. Для предотвращения риска разрушения хвостохранилищ при возможном каскадном сценарии, развития событий, вызванных обрушением оползня, разработан проект переноса наиболее уязвимых объектов на безопасный участок, в стороне от долины реки.

Ключевые слова: *оползни, оползневые дамбы, хвостохранилища, селевые потоки, радиоактивное загрязнение*

Ссылка для цитирования: Торгоев И.А., Алешин Ю.Г. Радиоактивные сели в долине реки Майлуу-Суу (Кыргызстан). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 500–510.

Radioactive debris flows in the valley of the Mailuu-Suu River (Kyrgyzstan)

I.A. Torgoev, Yu.G. Aleshin

Scientific and Engineering Center "Geopribor" of the National Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyzstan, isakbektor@mail.ru

Abstract. The greatest threat to the livelihoods of the population, the functioning of economic facilities and infrastructure in Kyrgyzstan are landslides that block the valleys and gorges of mountain rivers. When landslide ceilings (dams) are destroyed, a breakthrough wave often occurs, rushing down in the form of a debris flow. Such cascade scenarios associated with landslides and debris flows are especially dangerous when radioactive tailings fall into the zone affected by landslides and debris flows, as has repeatedly happened in the valleys of the Maily-Suu and Kichi-Kemin rivers in

Kyrgyzstan. The danger of destruction of such storage facilities located in river beds and floodplains is due to the fact that the wave of a breakthrough of a landslide dam can transform into a radioactive and/or toxic debris flow with contamination of adjacent territories. Currently, the risk of destruction of uranium tailings in the middle reaches of the river is increasing. Mailu-Suu, located on the opposite bank from the Koi-Tash landslide. The inevitable discharge of this landslide with a volume of about 4 million m^3 into the river bed. Mailuu-Suu can cause the formation of a landslide dam up to 20 m high with a rise in water level by 12 m above the base of the tailing's dams located on the opposite bank. The article assesses the consequences of the erosion of such a landslide dam with the occurrence of a breakthrough wave, which can transform into a destructive debris flow, fraught with transboundary radioactive contamination of the valley in a strip of up to 15 m on both banks and the river fan in the territory of neighboring Uzbekistan. To prevent the risk of destruction of tailings dumps in a possible cascade scenario, the development of events caused by the collapse of a landslide, a project has been developed to transfer the most vulnerable objects to a safe area, away from the river valley.

Key words: *landslides, landslide dams, tailings ponds, debris flows, radioactive contamination*

Cite this article: Torgoev I.A., Aleshin Yu.G. Radioactive debris flows in the valley of the Mailuu-Suu River (Kyrgyzstan). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 500–510.

Введение

Горнопромышленный район Майлуу-Суу является особым районом Кыргызстана с точки зрения масштабов и интенсивности развития оползневых процессов. Здесь, на небольшой территории площадью около 100 км^2 насчитывается свыше 200 оползней различных типов, размеров, генезиса и возраста [*Havenith H.-B. et al., 2006*]. Крупномасштабные техногенные воздействия на слабоустойчивые горные склоны рассматриваемого района: подработка массива горных пород при подземной добыче урановой руды и угля; многолетняя эксплуатация нефтяных залежей; отбор подземных вод; подрезка склонов при сооружении транспортных коммуникаций и магистральных трубопроводов; пригрузка горных склонов горными отвалами, хвостохранилищами и инженерными сооружениями – все это вызвало необратимые изменения в геологической среде рассматриваемого района и стимулировало массовое развитие оползней [*Торгоев, 2023*], часть из которых показана на рис. 1*б*.

Наибольшую угрозу для жизнедеятельности в трансграничном водосборном бассейне р. Майлуу-Суу представляют оползни развивающиеся (возникающие) на склонах, приуроченных к бортам долины этой реки и ее притоков (рис. 1*б*), т.к. они могут порождать многоступенчатые катастрофы, формирующиеся по следующей схеме: оползень (обвал) => перекрытие русла или => долины реки => образование подпруженного водоема (завального озера) => затопление долины => прорыв оползневой плотины => паводок или прорывной поток, часто трансформирующийся в селевой поток [*Торгоев, 2023*].

В большинстве случаев оползни и сели проявляются независимо друг от друга. Однако иногда, как например, в бассейне р. Майлуу-Суу между ними возникает парагенетическая связь, предопределяющая дальнейший ход процессов. В этом случае нередко источником возникновения селей являются оползневые отложения, которые служат источником их питания (твердой составляющей). Подобное возможно при продолжительных ливнях, которые доводят до насыщения рыхлые оползневые отложения на склонах, затем разжижают их и создают условия для текучести селевой массы.

Селевые паводки в районе г. Майлуу-Суу образуются чаще всего за счет ливневых дождей, отмеченных как в самой долине, так и в среднегорной зоне бассейна, в основном при суточной сумме атмосферных осадков не менее 30 мм в районах образования селевых паводков. В редких случаях они могут формироваться при небольших осадках в сочетании резким повышением температуры воздуха, приводящей к интенсивному таянию снега в высокогорной части бассейна.

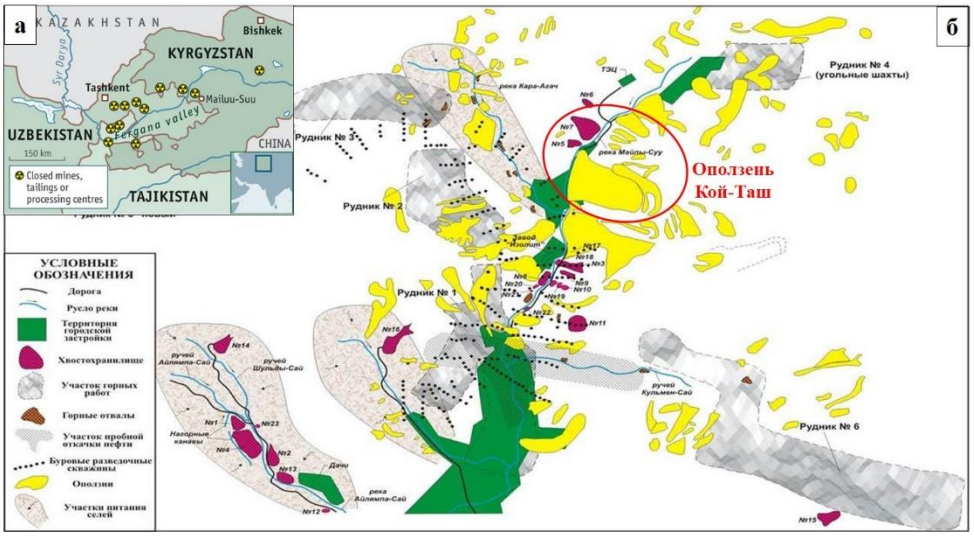


Рис. 1. Горнопромышленный район Майлуу-Суу в Кыргызстане: а – карта расположения объектов уранового наследия в бассейне реки Сырдарья с указанием г. Майлуу-Суу (Mailuu-Suu); б – карта хвостохранилищ и отвалов в среднем течении р. Майлуу-Суу, оказавшихся в оползне- и селеопасной зонах

Повторяемость паводков и селей по наблюдениям с 1917 г. в бассейне р. Майлуу-Суу составляет в среднем 1 раз в 1.5 года. Распределение селей во времени – крайне неравномерное: в отдельные годы отмечается прохождение до четырех-пяти паводков и грязевых потоков (например, в 1928 г. – три, в 1929 г. – пять, в 1930 г. –два, в 1958 г. – пять, в 2012 г. – семь), в то время как продолжительность периода без селей может составлять 5–7 лет, в течение которого происходит накопление твердого материала в бассейнах селевых логов. В результате работ по инженерно-геологическому районированию территории бассейна р. Майлуу-Суу, наиболее детально проведенных в среднем и нижнем течении реки, было установлено, что водо-селесборные бассейны основных притоков реки: Айлампасай, Сары-Бээ, Кугай, Келме-Сай, Ашваз, Карагач являются активными в селевом отношении за счет широкого распространения здесь оползней, оплывин и осовов [*Торгоев, 2023*].

Краткий обзор проблемы

Очень часто спровоцированные оползнями селевые потоки превосходят по своей разрушительной силе и ущербу инициирующее явление – оползень и/или землетрясение. В июле 1949 г. на территории Тянь-Шаня в Таджикистане, в окрестностях села Хаит произошло сильное землетрясение магнитудой M = 7.4, очаг которого располагался на глубине 20 км. Это землетрясение спровоцировало в эпицентральной зоне каменную лавину объемом около 80 млн м^3, которая, обрушившись с высоты 2950 м, прошла расстояние более 6 км (рис. 2), похоронив под собой села Хаит и Кусурак с тысячами жителей [*Havenith et al.,2013.*]. Кроме этого, значительную часть оползней, возникших при этом землетрясении и его фор- и афтершоках, составили лессовые оползни в долине реки Ясман (рис. 2), которые трансформировались в массовый грунтовый поток, разрушивший 22 населенных пункта, в которых погибли 4000 жителей. Такой

разрушительный массивный поток возник в несколько этапов (рис. 2): во-первых, ко-сейсмическое разрушение неглубокого лессового покрова на крутых склонах (маленькие оранжевые стрелки) вызвало возникновение множества оползней; во-вторых, произошло слияние лессового материала в небольшие ориентированные с севера на юг долины оползни-потоки (большие оранжевые стрелки) с образованием плотин (оранжевые эллипсы) и небольших водоемов (маленькие голубые эллипсы) в основной долине, ориентированной на юго-запад; в-третьих, размыв нескольких оползневых плотин из лесса (эффект домино) способствовал формированию разрушительного селевого потока (длинные оранжевые и голубые линии и стрелки). Подобные факты свидетельствуют о том, что отличительной особенностью синергетических (многоступенчатых) процессов в горных ущельях является взаимоусиление негативных эффектов.

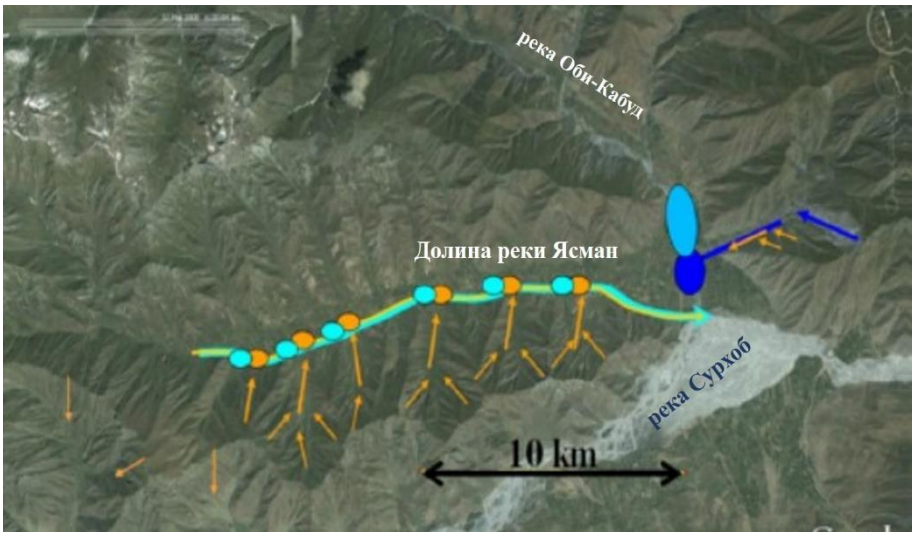


Рис. 2. Часть эпицентральной зоны Хаитского землетрясения 1949 г. (M = 7,4) с местонахождением каменной лавины Хаит (справа -движения отмечены темно-синими линиями) и Ясманский грунтовый поток (левая и центральная часть – движение лесса показано оранжевым цветом, грунтовый поток – голубой цвет). Предполагаемые временные водоемы, образовавшиеся после землетрясения, обозначены светло-голубыми эллипсами

Особая опасность развития подобных многоступенчатых сценариев, неоднократно имевших место в районе Майлуу-Суу, связана с тем, что в зоне затопления и/или в зоне распространения прорывных потоков и селей могут оказаться не только жилые застройки и объекты инфраструктуры, но и многочисленные урановые хвостохранилища [*Aleshin et al., 2002*] , размещенные вдоль русла трансграничной р. Майлуу-Суу и ее притоков (рис. 1*б*). В апреле 1958 г. имела место катастрофическая авария на хвостохранилище № 7 в г. Майлуу-Суу, когда в результате неблагоприятного сочетания экстремальных атмосферных осадков и повышенной сейсмической активности весны 1958 г, была прорвана намывная дамба этого хранилища, высота которой составляла несколько десятков метров. В результате аварии в р. Майлуу-Суу 16 апреля 1958 г. было выброшено по разным оценкам от 200 до 600 тыс. м^3 «хвостов» – мелкодисперсных отходов переработки урановых руд [*Алешин*, 2000]. Образовавшийся радиоактивный селевой поток с расходом 108 м^3/с, прошедший по руслу реки, произвел большие разрушения в городе, в пределах первых надпойменных террас, вызвал десятки человеческих жертв. При массовом выбросе хвостов в реку поступило около 8 тонн урана и десятки граммов радия, которые содержались как в жидкой, так и в твердой фазах хвостов. Из-за этой аварии радиоактивные материалы, хранившиеся в хвостохранилище на площади 60 тыс. м^2, вызвали загрязнение долины реки в Кыргызстане и ее конуса выноса на территории Узбекистана общей площадью свыше 10 млн м^2, т.е. коэффициент синергического усиления составил почти 170. Последствия

этой и других аварий, связанных с оползневым разрушением хвостохранилищ, устранялись много лет, однако пятна загрязнения со следами урана, молибдена, кобальта, селена, свинца и мышьяка остались на конусе выноса реки до настоящего времени [*Li et al., 2021*].

Данные об оползневых плотинах в бассейне р. Майлуу-Суу

В долине р. Майлуу-Суу, на бортах которой развиты древние и современные оползни, перекрытия реки возникали на многих участках его русла, начиная с ее истоков (запрудное озеро Кутман-Куль), вплоть до среднего течения [*Torgoev et al., 2004*]. В среднем течении р. Майлуу-Суу большие оползневые дамбы наиболее часто формировались на участках левобережных оползней «Тектоник», «Кой-Таш» (рис. 1*а*).

Наиболее катастрофические последствия спровоцировал завал реки на участке оползня «Тектоник», произошедший 4 июля 1992 г. Обрушение склона на северном фланге оползня объемом $1{,}5\times10^6$ м^3 продолжалось в течении 15 мин с начальной скоростью около 5 м/с, после чего смещение всей массы продолжалось еще 30 мин. Долина реки на блокированном участке имеет трапециевидный профиль с достаточно широким дном (90 м), поэтому максимальная высота оползневой плотины не превышала 12 м, причем река начала переливаться через оползневую плотину на правом борту долины через несколько часов после перекрытия русла, постепенно размывая плотину [*Торгоев, 2023*]. Однако, несмотря на это и относительно небольшой расход воды в реке $Q \cong 20–25$ м^3/с, глубина водоема превысила 6 м, а площадь затопления затронула двухэтажные жилые дома, промышленные здания и сооружения, транспорт и инженерные коммуникации в пойме реки в районе завода «Кыргызэлектроизолит» (бывший гидрометаллургический завод № 3 по извлечению урана). Общий ущерб от оползня и наводнения составил почти 40 млн долл. США. В мае 1994 г. в результате неоднократных подвижек южного языка оползня «Тектоник» возникла запруда в русле реки рядом с заводом, при размыве которой в движение волны прорыва были вовлечены мелкодисперсные радиоактивные материалы небольшого хвостохранилища № 17, размещенного непосредственно на левом берегу р. Майлуу-Суу.

В апреле 2017 г. произошла частичная разгрузка оползня «Кой-Таш» объемом свыше 2 млн м^3 вниз по склону, в русло р. Майлуу-Суу, которая вызвала блокирование русла реки оползневой дамбой высотой до 10 м и протяженностью свыше 500 м (рис. 3*б*). Основной причиной смещения оползневых масс на участке «Кой-Таш» стало сильное увлажнение склона за счет аномально большого количества осадков, выпавших зимой и весной 2017 г. По данным наблюдений на гидрометеорологической станции «Ак-Терек», расположенной в 25 км восточнее Майлуу-Суу, в апреле 2017 г. в рассматриваемом районе выпало 310 мм осадков, что более, чем в 2 раза превышает среднемесячное количество осадков в апреле, составлявшее в 2008–2016 гг. 142 мм/месяц. Примечательно, что только за 21–22 апреля 2017 г., то есть непосредственно перед сходом оползня выпало 64 мм осадков, что более, чем в 10 раз превышает средний уровень суточного осадконакопления апреля месяца. Рекордное количество атмосферных осадков в апреле 2017 г. сопровождалось повышенным уровнем и расходом воды в р. Майлуу-Суу, что в свою очередь обусловило сильный подмыв основания склона Кой-Таш [*Торгоев, 2023*].

В результате блокирования русла реки в верхнем бьефе оползневой дамбы образовалось подпрудное озеро (рис. 3*а, б*), объем которого до прорыва дамбы составил по приблизительным оценкам около 800 тыс. м^3 при паводковом расходе воды в р. Майлуу-Суу, равном 30 м^3/с. Накопление воды в подпруженном водоеме вызвало затопление основания удерживающих дамб урановых хвостохранилищ № 5, 7 (рис. 3*б*). После переполнения подпрудного озера, примерно через 20 ч после блокирования реки начался поверхностный размыв оползневой дамбы за счет перелива воды по ее правому берегу, где высота оползневой дамбы была ниже. В результате размыва дамбы по правому борту долины произошло смещение русла реки в сторону поселка Южный Карагач и затопление близкорасположенных к реке жилых строений и хозяйственных

построек (рис. 3*в*), разрушение новой правобережной автодороги Майлуу-Суу – Сары-Бээ (рис. 3*б*).

Таким образом, многократное повторение процессов перекрытия русла р. Майлуу-Суу на участке оползней Тектоник, Кой-Таш, в долинах р. Ашваз, Бедре-Сай сопровождалось возникновением временных подпрудных озер (водоемов). При переполнении этих водоемов происходил размыв оползневых запруд, сложенных рыхлыми отложениями оползней, с трансформацией волны прорыва в наносоводные и грязевые селевые потоки.

Рис. 3. Последствия оползневого блокирования р. Майлуу-Суу при обрушении оползня Кой-Таш 22 апреля 2017 г.: а – общий вид склона, оползневой дамбы и подпрудного озера; б – затопление основания удерживающей дамбы хвостохранилища № 5 и разрушенная новая автодорога; в – проран по правому борту долины р. Майлуу-Суу

Моделирование зоны затопления и селевого потока при разгрузке оползня «Кой-Таш»

Геофизические исследования оползня Кой-Таш, выполненные нами в 2022 г., позволили установить, что в настоящее время объем неустойчивой части склона составляет около 4 млн м^3 (рис. 4). Нарастание объема неустойчивых грунтов, а также пониженное значение запаса устойчивости склона по сравнению с 2017 г. можно объяснить следующими причинами:

- из-за наличия серии глубоких трещин в верхней части потенциально неустойчивого участка склона состояние и структура массива грунтов и пород хуже, чем до обрушения склона в 2017 г. К тому же вероятность повторного смещения неустойчивых масс усугубляет отсутствие механического упора в средней части склона (рис. 4);
- физико-механические характеристики пород и грунтов сместившейся массы оползня намного ниже по сравнению с прочностными характеристиками до разгрузки (схода) оползня в апреле 2017 г., что обуславливает снижение запаса устойчивости.

В случае повторной разгрузки оползня «Кой-Таш» с прогнозируемым объемом 3–4 млн м^3 неизбежно оползневое блокирование русла р. Майлуу-Суу высотой до 20 м протяженностью по руслу до 400 м с формированием подпруженного водоема, в зоне затопления которого могут оказаться хвостохранилища № 5, 7, расположенные на правом берегу. Моделирование различных сценариев затопления в верхнем бьефе

оползневой плотины и при прорыве дамбы осуществлялось на основе высокоточной цифровой модели рельефа (ЦМР), созданной с использованием стереопар аэрофотоснимков масштаба 1:33 000, сделанных в 2019 г. [*Torgoev, 2010*]. Автоматическое построение ЦМР осуществлялось с помощью программной платформы ERDAS Imagine v. 8.6, дальнейшая постобработка и уточнение выполнялись с использованием PCI Geomatica 8.0 Orthoengine. Финальная версия ЦМР имела размер пикселя 5 × 5 м. Зоны затопления в верхнем бьефе были построены с помощью расширения ArcGIS 9.2 Spatial Analyst. Основные результаты моделирования зоны затопления в случае разгрузки оползня Кой-Таш представлены в таблице 1, а на рис. 5 показаны контуры наиболее вероятной зоны затопления в верхнем бьефе оползневой дамбы, в которой могут оказаться урановые хвостохранилища № 5, 7.

Рис. 4. Результаты моделирования оползневой дамбы в случае разгрузки оползня Кой-Таш: высота оползневой дамбы в русле р. Майлуу-Суу в апреле 2017 г. не превышала 10 м; при повторной разгрузке оползня объемом около 4 млн м^3 высота возможной дамбы может достигнуть 20 м

Таблица 1. Параметры зоны затопления при различных сценариях блокирования русла р. Майлуу-Суу оползневой дамбой на участке Кой-Таш

Высота оползневой дамбы, м	Объем воды в водоеме, м^3	Время наполнения водоема до перелива		
		Минимальное (расход реки – 19 м^3/с)	Среднее (расход реки – 9,01 м^3/с)	Максимальное (расход реки – 4,53 м^3/с)
10	170373	2,5 ч	5,3 ч	10,4 ч
20	1147747	156,8 ч	1,5 сут	2,9 сут
30	3573860	2,2 сут	4,2 сут	9,1 сут

Таким образом, по нашим оценкам, весьма вероятно, повторное обрушение склона объемом около 4 млн м^3, в результате которого долина р. Майлуу-Суу будет заблокирована оползневой дамбой протяженностью по руслу около 400 м и высотой до 20 м. Это может вызвать формирование в верхнем бьефе оползневой дамбы подпруженного водоема объемом около 1,15 млн м^3 с подъемом уровня воды на 12 м выше основания дамбы хвостохранилища № 5 и на 8 м выше основания дамбы хвостохранилища № 7 (рис. 5).

Неизбежное обводнение намывных секций дамбы хвостохранилищ № 5,7 при их затоплении может, во-первых, обусловить их обильное водонасыщение, которое, в свою очередь, может привести к снижению и потере их устойчивости и разжижению «хвостов», особенно при землетрясении, которое может послужить триггерным механизмом обрушения дамбы, как это имело место при аварии в апреле 1958 г.

При прорыве оползневой дамбы, который скорее всего произойдет по сценарию перелива воды и постепенного размыва ее тела, высока вероятность вовлечения в волну

прорыва мелкодисперсных хвостов с ее трансформацией в радиоактивный селевой поток, который распространится вниз по течению реки.

При гидродинамическом моделировании прорыва был выбран наиболее вероятный сценарий разрушения оползневой дамбы за счет перелива с образованием прорана на участке с минимальной высотой плотины, наиболее часто наблюдавшийся в долине р. Майлуу-Суу (рис. 3*в*). Для выполнения гидравлических расчетов использовалась программа HEC-RAS с пакетом HEC-GeoRAS, которые позволили выполнить одномерные расчеты установившегося и нестационарного потока. При гидравлических расчетах использовался максимально вероятный расход р. Майлуу-Суу, соответствующий событиям с периодом повторяемости 100 лет (вероятность 1%), который составил 169 м^3/с. Максимальный зарегистрированный расход, обусловленный прорывом дамбы хвостохранилища № 7, был зафиксирован в апреле 1958 г. значением Q = 108 м^3/с. Результаты моделирования, представленные в графическом виде на рис. 6, показали, что прорывной поток распространится вниз по течению реки в полосе до 15 м по обоим берегам.

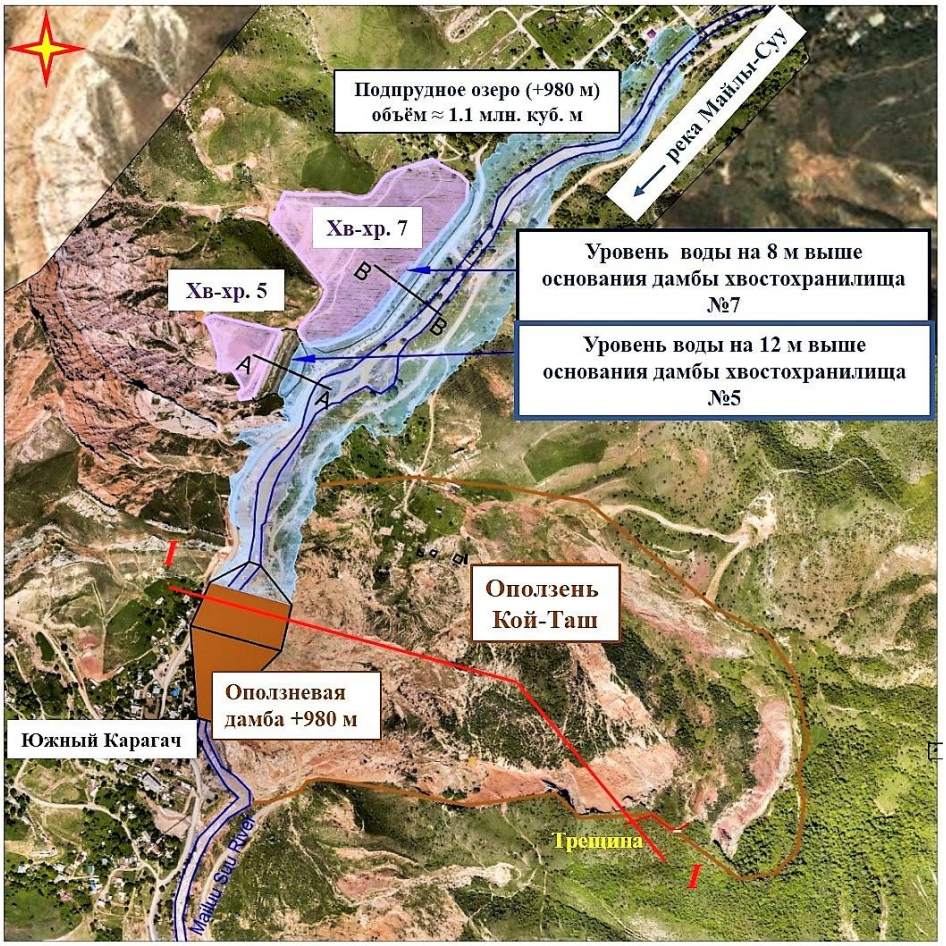


Рис. 5. Результаты моделирования зоны затопления (голубая заливка) на участке оползня Кой-Таш (коричневый контур) в случае формирования оползневой дамбы высотой 20 м; красная линия I-I – генеральный профиль склона для расчетов устойчивости (см. рис. 4)

При распространении прорывного потока по руслу р. Майлуу-Суу могут быть размыты хвостохранилища № 8, 18, расположенные непосредственно в пойме реки (рис. 6*б*), на расстоянии 2 км ниже хвостохранилища № 7. При таком сценарии в движение селевого потока, вызванного размывом оползневой дамбы, дополнительно будут вовлечены материалы этих хвостохранилищ объемом еще около 100 тыс. м^3. Следовательно, общий объем сильно увлажненных мелкодисперсных радиоактивных

материалов, вовлеченных в разрушительное движение радиоактивного селя может достигнуть 1 млн м^3 [*Торгоев, 2023*].

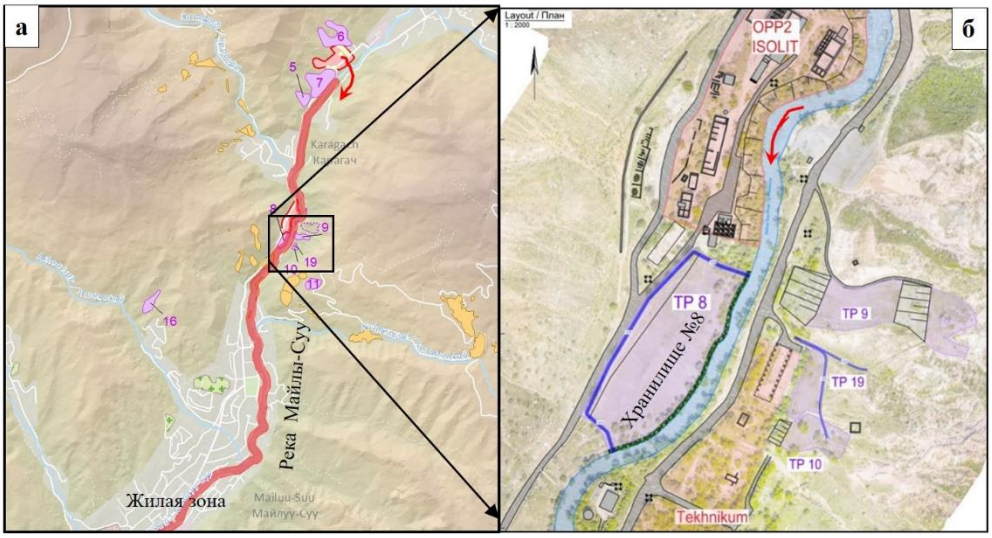


Рис. 6. Распространение радиоактивного селевого потока при размыве оползневой дамбы и обрушении хвостохранилищ № 5, 7, 8: а – зона распространения радиоактивного селя (красная линия) по долине р. Майлуу-Суу; б – воздействие селевого потока на вдольрусловое хвостохранилище № 8. Цифрами и индексами ТР показаны урановые хвостохранилища, размещенные в долине реки

Выводы и рекомендации

Результаты моделирования и оценки рисков, связанных с возможной разгрузкой оползня «Кой-Таш» в русло и пойму р. Майлуу-Суу, показывают, что описываемый селевой поток, обогащенный мелкодисперсными материалами урановых хвостохранилищ объемом до 1 млн м^3, может вызвать радиоактивное загрязнение донных отложений и поймы реки Майлуу-Суу в полосе до 15 м по обоим берегам. В конечном итоге высокий риск гидродинамической волны прорыва оползневой дамбы на рассматриваемом участке оползня Кой-Таш и разрушение хвостохранилищ № 5, 7, 8, 18 может трансформироваться в радиоактивное трансграничное загрязнение долины р. Майлуу-Суу на территории Кыргызстана и конуса выноса р. Майлуу-Суу на территории соседнего Узбекистана. По оценкам специалистов компании WISUTEC (Германия), долгосрочные дозы для населения из-за распространения радиоактивных хвостов из хранилищ № 5, 7, 8, 18 могут составить до 20 мЗв/год.

В этой связи для предотвращения риска обрушения этих хвостохранилищ при описанных выше оползневых и селевых сценариях развития событий и их вторичных проявлениях (блокирование русла реки, затопление хвостохранилищ, прорыв оползневого перекрытия, гидродинамическая волна прорыва и т.д.) нами было рекомендовано удалить указанные хвостохранилища из поймы р. Майлуу-Суу с переносом хвостовых материалов, содержащихся в этих хранилищах, на безопасный участок.

Ликвидация хвостохранилищ из поймы р. Майлуу-Суу необходима еще по следующим соображениям. Как отмечалось выше, в истоках этой реки имеется завальное озеро Кутман-Куль, которое образовалось в результате перекрытия долины р. Чон-Керей, древней каменной лавиной объемом около 75–77 млн м^3, возможно спровоцированной сильным землетрясением, произошедшим несколько тысяч лет назад. Озеро имеет продолговатую форму (рис. 7), оно вытянуто с юго-запада на север-восток, длина озера составляет 1500 м, максимальная ширина – 425 м, площадь акватории 0,496 км^2, площадь водосборного бассейна – 36,5 км^2, максимальная глубина 20,4 м, средняя глубина 9,8 м, объем воды 4,8 млн м^3.

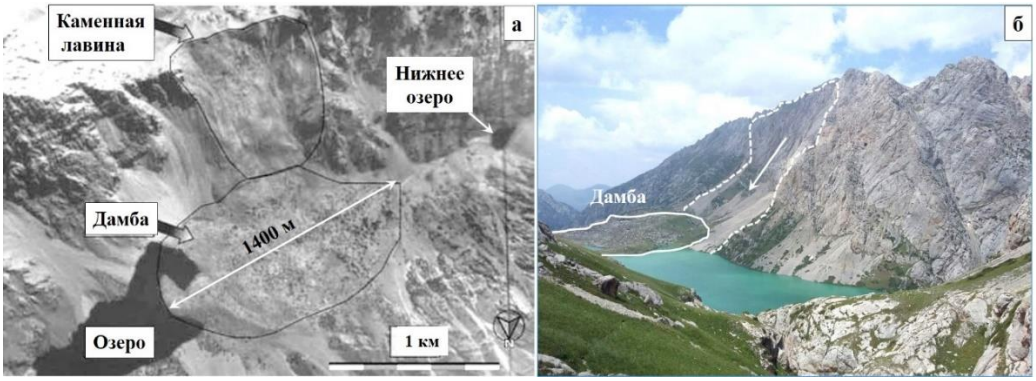


Рис. 7. Завальное озеро Кутман-Куль в истоках р. Майлуу-Суу: а – аэрофотоснимок обрушенной части склона – источника каменной лавины, оползневой плотины и самого озера по состоянию в 1998 г.; б – вид на склон и обвально-оползневую плотину озера со стороны притока Чон-Керей

В 2010 г. было выполнено рекогносцировочное обследование оползневой плотины озера Кутман-Куль и оценка ее устойчивости [*Ruse et al., 2020*]. Главной целью этих работ являлась оценка потенциальной опасности для урановых хвостохранилищ, расположенных в окрестностях г. Майлуу-Суу, при возможном прорыве или обрушении оползневой плотины оз. Кутман-Куль. По результатам этих работ было сделано предположение о том, что возможен сценарий переполнения оз. Кутман-Куль за счет процессов, вызванных изменением климата (деградация оледенения, экстремальные осадки и т.п.). Потенциальное переполнение ванны озера может возникнуть из-за избытка поступающей в озеро воды и ограничения оттока путем блокирования подземных водоводов. Наряду с этим переполнение озера с возникновением волны перелива может произойти при обрушении в чашу озера обвалов или оползней с прилегающих склонов. Не исключено, что при указанных сценариях и/или их сочетании может сформироваться селевой поток, способный разрушить урановые хвостохранилища, размещенные в среднем течении р. Майлуу-Суу с катастрофическими экологическими последствиями, описанными выше.

В общем вероятность разрушения того или иного хвостохранилища в тот или иной момент времени зависит от влияния неконтролируемой эрозии, воздействий затопления, оползней, селей, землетрясений и нарушения структурной устойчивости в течение срока службы объекта. Согласно международным рекомендациям МАГАТЭ, срок безопасной службы хранилищ радиоактивных отходов, размещенных на поверхности земли, должен составлять от 200 до 1000 лет после их рекультивации с учетом конкретных требований к объекту.

Таким образом, необходимость реализации неотложных мер по исправлению ситуации в первую очередь относится к большим хвостохранилищам № 5, 7, 8 расположенным в непосредственной близости от реки. По указанным соображениям принято решение и разрабатывается проект по переносу этих хвостохранилищ на безопасный по нормам МАГАТЭ участок хвостохранилища № 15, которое расположено на удалении 10 км от долины реки и города Майлуу-Суу.

Список литературы

Алешин Ю.Г., Торгоев И.А., Лосев В.А. Радиационная экология Майлуу-Суу. Бишкек: ИЛИМ, 2000. – с. 83–88

Торгоев И.А. Оползневые процессы и риски на территории Кыргызстана. Бишкек: ОсОО OretaGroup, 2023. – 548 стр.

Торгоев И.А., Алешин Ю.Г., Червонцев П.Г. Урановые хвостохранилища Майлуу-Суу: решение геоэкологических проблем. // Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы утилизации и захоронения отходов. Выпуск 7 / Материалы

годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии, и гидрогеологии (23 марта 2005г.). Москва: ГЕОС, 2005. – с. 67–72

Aleshin U.G., Torgoev I.A. Shmidt G. Environmental Risk Management at Uranium Tailing Ponds in Mailuu-Suu, Kyrgyzstan // Uranium in the aquatic environment, Freiberg, Germany, Merkel, Planer, Friedrich and Wolkersdorfer (eds), Springer. 2002, pp. 881–888.

Havenith H.-B., Abdrakhmatov K., Torgoev I. et al. Earthquakes, landslides, dams and reservoirs in the Tien Shan, Central Asia // In Margottini C., Canuti P. and K. Sassa (Eds.), Landslide science and Practice, vol. 6. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013 – pp 27–31.

Havenith H.B., Torgoev I., Meleshko A. et al. Landslides in the Mailuu-Suu valley, Kyrgyzstan – hazards and impacts // Journal Landslides. Vol 3 No.2. 2006 – pp 137–1477.

Li, F.; Torgoev, I.; Zaredinov, D.; Li, M.; Talipov, B.; Belousova, A.; Kunze, C.; Schneider, P. Landslide-Induced Mass Transport of Radionuclides along Transboundary Mailuu-Suu River Networks in Central Asia. Remote Sensing. 2021, Vol. 13, Issue 4. 698. https:// doi.org/10.3390/rs13040698.

Ruse M.E., Hearn G.J., Erokhin S.A., Sibagatulin V.R. Assessment of the Kutman Kul landslide dam, Kyrgyz Republic // Geologically Active, Proceedings of the 11th IAEG Congress. Auckland, New Zealand, 2010. – pp 1391–1398

Torgoev A.D., Havenith H.-B. GIS-Based modeling of upstream flooding areas for the case of landslide damming of river // Proceedings of the Fourth Central Asia GIS Conference – GISCA'10 "Water: Life, Risk, Energy and Landuse", Bishkek, 27–28 May, 2010 – pp 60–64

Torgoev I.A., Aleshin Yu.G. Ecological Risk in Territory Uranium Tailing of Kyrgyzstan // Environmental Protection against Radioactive Pollution: N. Brisen and K.K. Kadyrzanov (eds), Kluwer Academic Publ. 2003. – pp. 57–44.

Torgoev I.A., Aleshin Y.G., Meleshko A.V., Havenith Y.-B. Hazard mitigation for landslide dams in Mailuu-Suu // Italian Journal of Engineering Geology an Environment (Special Issue on Security of Natural and Artifical Rockslide Dams NATO ARW, Bishkek (Kyrgyzstan), 2004. – pp 99–102.

Evaluation of decadal rainfall variability's effect on debris flow intensity and frequency in the Brep Area of Chitral, Pakistan

N. Uddin, L. Ali, Z. Uddin

Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in Pakistan, Islamabad, Pakistan,
nasiruddin.shah@akdn.org

Abstract. Debris flows are a significant natural hazard, causing severe casualties and property damage. This study explores the relationship between rainfall conditions and debris flows in the Chitral District of northern Pakistan, focusing on the Brep region. Utilizing rainfall and temperature data from the weather monitoring post (WMP) installed by the Aga Khan Agency for Habitat, historical debris flow records, and GIS mapping, the study examines the impact of climatic variations on debris flow frequency and intensity.
The study aims to identify changing climatic conditions that lead to changes in precipitation patterns by analyzing temperature and rainfall data collected over ten years. Findings indicate a significant rise in temperatures from 2007 to 2023 and fluctuating rainfall intensities. Historical data reveals an increasing trend in debris flow damage, with affected areas expanding markedly over time. The results underscore the dynamic nature of climatic patterns and their influence on debris flows. By understanding the link between rainfall patterns and debris flow intensification, the research contributes to developing effective disaster prediction and early warning systems.

***Key words**: debris flow, intensity, rainfall, hazard, impact*

Cite this article: Uddin N., Ali L., Uddin Z. Evaluation of decadal rainfall variability's effect on debris flow intensity and frequency in the Brep Area of Chitral, Pakistan. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 511–516.

Влияние десятилетней изменчивости осадков на интенсивность и частоту селевых потоков в районе Бреп (округ Читрал, Пакистан)

Н. Уддин, Л. Али, З. Уддин

Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Пакистане, Исламабад, Пакистан,
nasiruddin.shah@akdn.org

Аннотация. Селевые потоки представляют собой значительную природную опасность, приводящую к серьезным жертвам и материальному ущербу. В данном исследовании изучается связь между количеством осадков и селевыми потоками в районе Читрал на севере Пакистана, в основном в районе Бреп. Используя данные о количестве осадков и температуре с поста метеорологического мониторинга (ПММ), установленного Агентством Ага Хана по вопросам среды обитания, исторические данные о селевых потоках и картографию ГИС, в исследовании рассматривается влияние климатических колебаний на частоту и интенсивность селевых потоков.
Исследование направлено на выявление меняющихся климатических условий, которые приводят к изменению характера осадков, путем анализа данных о температуре и количестве осадков, собранных за десять лет. Полученные данные свидетельствуют о значительном повышении температуры с 2007 по 2023 г. и колебаниях интенсивности осадков. Исторические данные свидетельствуют о тенденции к увеличению ущерба от селевых потоков, причем пострадавшие районы заметно расширяются с течением времени. Полученные результаты подчеркивают динамичность климатических моделей и их влияние на селевые потоки. Понимание связи между характером осадков и интенсивностью селевых потоков способствует

разработке эффективных систем прогнозирования и раннего оповещения о стихийных бедствиях.

Ключевые слова: *селевые потоки, интенсивность, осадки, опасность, воздействие*

Ссылка для цитирования: Уддин Н., Али Л., Уддин З. Влияние десятилетней изменчивости осадков на интенсивность и частоту селевых потоков в районе Бреп (округ Читрал, Пакистан). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 511–516.

Introduction

Debris flows are major components of many natural disasters, causing severe casualties and significant damage to public and private properties. Rainfall is widely recognized as a critical factor in triggering debris flows [*Prenner et al., 2018*]. Regional rainfall destabilizes hillsides, increasing erosion and triggering debris flows as rainfall intensity rises [*Thouret et al., 2020*]. Understanding the relationship between rainfall and debris flows is crucial for comprehending their mechanisms, predicting disasters, and developing early warning systems.

Determining rainfall thresholds is a common method for analyzing how debris flows respond to rainfall [*Banihabib and Tanhapour, 2020*]. These thresholds are defined using various parameters [*Segoni et al., 2018*], including rainfall intensity [*Marin et al., 2020*], rainfall duration [*Peres and Cancelliere, 2014*], cumulative rainfall over a specific period [*Kean et al., 2011*], daily rainfall, and antecedent rainfall index [*Monsieurs et al., 2019*]. Rainfall thresholds for debris flows are typically derived from rainfall gauge observations.

In the Chitral region, rainfall-induced debris flows are a persistent hazard due to a combination of diverse conditioning factors, such as varying climates, complex terrains, and active geological movements [*Haq, 2007*]. In this area, rainfall data from gauge stations serve as the primary source for determining debris flow rainfall thresholds. Data on daily rainfall from 33 weather monitoring stations, covering the period from 2014 to the present, are accessed through the Aga Khan Agency for Habitat Regional office.

Study Area

Surrounded by some of the tallest and highly glaciated mountains, the Chitral District of northern Pakistan lies in the eastern Hindu Kush Range. Geographically, it extends from 71°2’ – 73°8’ E longitude to 35°3’ – 36°9’ N latitude (Fig. 1). The district has an area of 15,000 km^2 and spans within an elevation range from 1000 m to 7700 m above sea level. A common geomorphic feature of the Chitral region is valley facing slopes associated with high relief Mountains, which merge into broad, relatively flat floodplains. At least a dozen human casualties are associated with snow avalanches, floods and debris flows in the eastern Hindu Kush every year [*Khan et al., 2012*].

The Yarkhoon Valley is possessed by three of most noteworthy mountain networks of the earth. The Hindu Kush extend in the west, Hindu Raj go in the east and in the middle of is the Shandhur Karakorum run. Brep is situated in the lower yarkhoon northern part of Chitral District. The climate there is temperate. type with warm summer and very cold winter. Mean summer temperature ranges from 22°C to 24 °C while winter temperature ranges from -4°C to -6°C. Debris flow is the major and dominant hazard in the study area and the events in 2005, 2015 and 2022 damaged more than 100 households and washout major portion of the village.

Brief review of the problem

The problem under consideration revolves around the observed changes in rainfall patterns over the last decades, coupled with an increase in the frequency and intensity of debris

flow events. Despite these significant shifts, there has been a notable absence of research exploring the potential correlation between changing rainfall patterns and the intensification of debris flow events. This research gap is concerning as it restricts our ability to understand and mitigate the risks associated with these natural hazards effectively. Addressing this gap is crucial for developing proactive measures to safeguard vulnerable communities and ecosystems against the growing threats posed by changing environmental conditions.

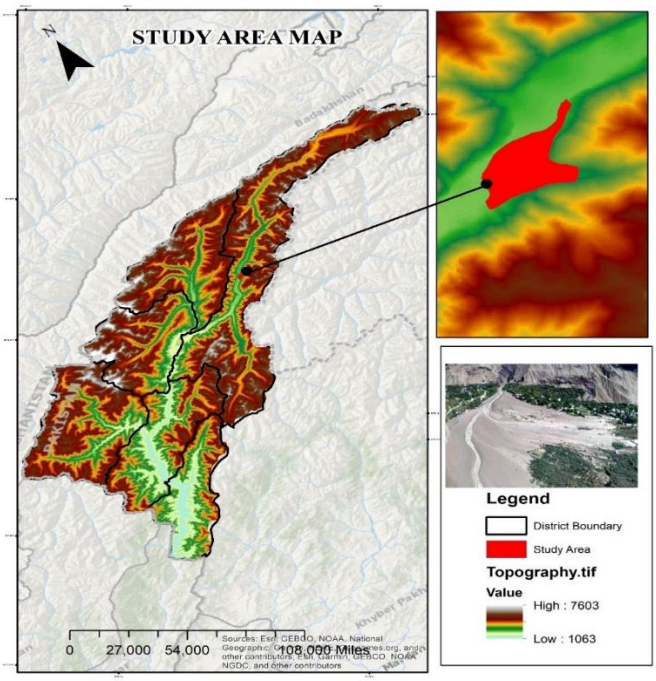


Fig. 13. The study area location map

Methods

The article employed several methodologies. Initially, rainfall and temperature data were gathered from weather monitoring posts set up by the Aga Khan Agency for Habitat. This data was then analyzed through the creation of various bar charts to observe changes in rainfall intensity and temperature variation. Subsequently, a field visit was conducted in the study area to develop risk reduction maps and verify changes in impact areas during the last three debris flow events. GIS footprints were utilized to produce maps illustrating variations in debris flow impact across the same three events.

Data

The data utilized in this study comprised three main sources:

1. Rainfall and temperature data: Data on rainfall intensity and temperature variations were collected from weather monitoring posts (WMPs) deployed by the Aga Khan Agency for Habitat within the study area. These records provided crucial information for analyzing climatic patterns and their potential influence on debris flow occurrences.
2. Historical data of debris flow: Historical records detailing previous debris flow events in the study area were compiled. Additionally, hazard and risk mapping data were generated through field visits, enabling the identification and assessment of vulnerable areas prone to debris flow hazards.
3. GIS footprints: Geographic Information System (GIS) footprints were utilized to analyze and visualize the impact areas of debris flow during the three most recent events.

This spatial data facilitated the creation of hazard and risk maps, offering insights into the extent and severity of debris flow occurrences over time.

Analysis

The analysis conducted in this study sheds light on the relationship between decadal rainfall variability and the intensity and frequency of debris flows in the Brep area of Chitral, Pakistan. Three key findings emerged from the examination of temperature and rainfall data, historical records, and impact area mapping:

- temperature Variation: The bar graphs constructed to analyze temperature variation over the years reveal a notable increase in temperatures from 2007 to 2023. In 2007, the temperature was recorded at less than 30 degrees Celsius, which rose to 32 degrees Celsius in 2014 and further increased to 35 degrees Celsius in 2023. This upward trend in temperatures suggests a potential warming effect over the past decade;
- rainfall Intensity Fluctuation: The analysis of rainfall data for the months of July and August illustrates variability in precipitation levels over the years. In 2004, rainfall measured 20 mm, which increased to 34 mm in 2007 and further rose to 38 mm in 2023. This fluctuation in rainfall intensity underscores the dynamic nature of climatic patterns in the region;
- historical Damage Assessment: Historical data collected during field visits indicates a concerning trend of increasing damages caused by debris flow events over time. The damages recorded in 2007 were relatively minimal compared to those in 2014 and 2023, suggesting a progressive escalation in the severity of debris flow impacts;
- impact Area Mapping: The mapping of impact areas for the three events further reinforces the escalating trend observed in historical data. In 2007, approximately 2000 square meters were affected, whereas in 2014, the impacted area expanded to 5000 square meters. By 2023, the impact area had significantly increased to 8000 square meters, highlighting the growing magnitude of debris flow occurrences.

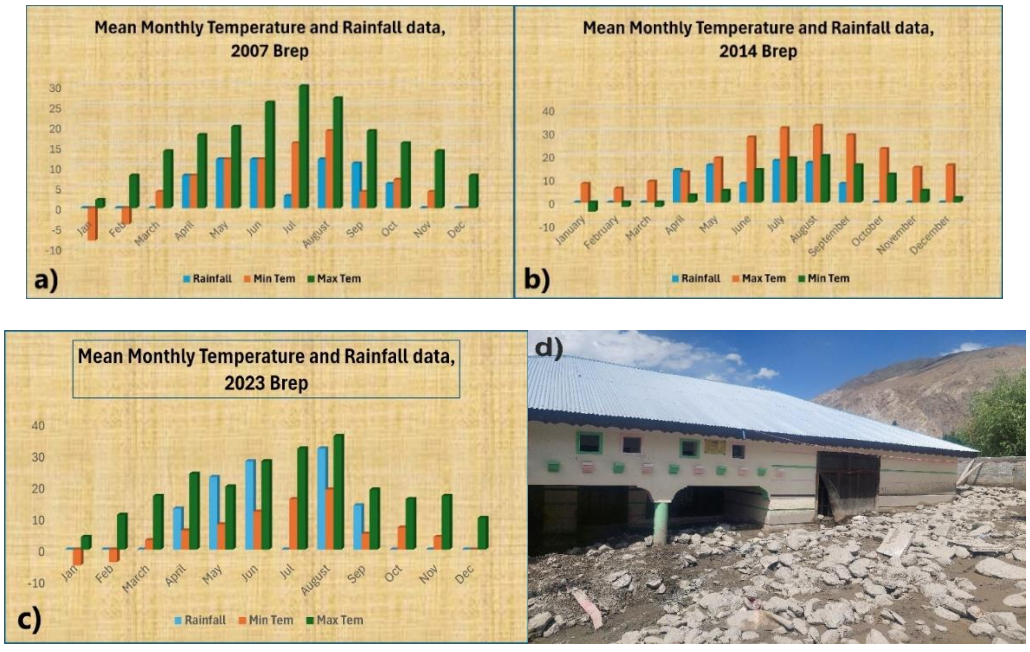


Fig. 14. Temperature and rainfall data: a – 2007 mean temperature and rain fall data variation; b – 2014 mean temperature and rain fall data variation c) 2022 mean temperature and rain fall data variation d) field photograph of 2022 debris flow incident

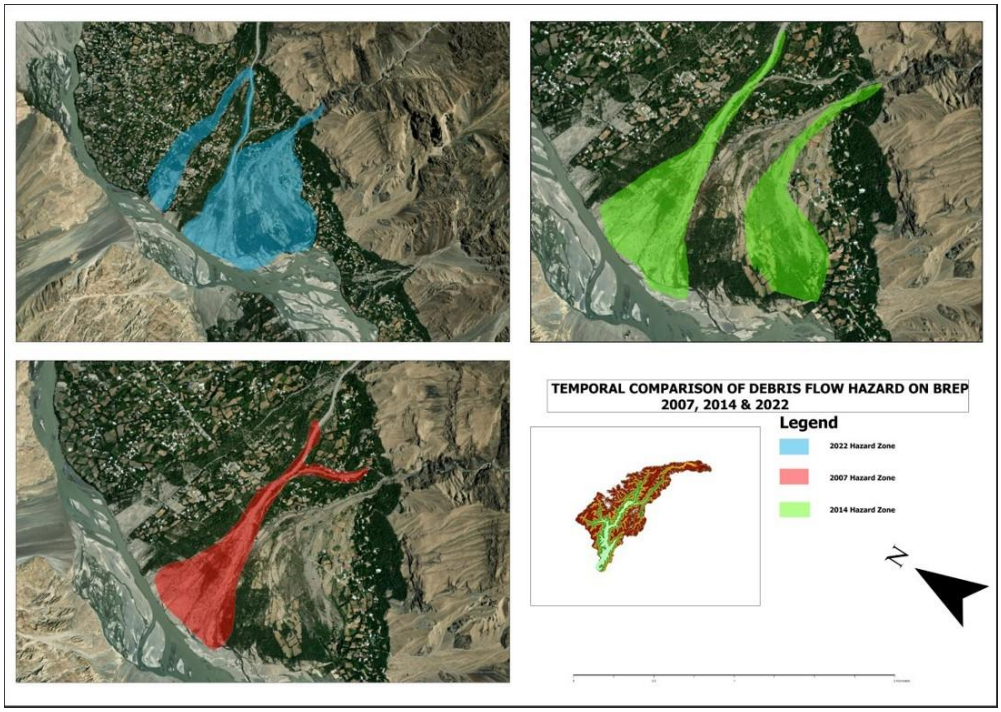


Fig. 15. Comparison of debris flow intensity in last one decade

Conclusions

The study presents compelling evidence linking decadal rainfall variability to the intensity and frequency of debris flows in the Brep area of Chitral, Pakistan. Through meticulous analysis of temperature and rainfall data, historical records, and impact area mapping, significant trends have emerged.

The observed rise in temperatures over the past decade, coupled with fluctuating rainfall intensities, underscores the dynamic nature of climatic patterns in the region. Moreover, the progressive escalation in damages caused by debris flow events, as evidenced by historical data and impact area mapping, highlights the growing vulnerability of communities to these hazards.

These findings emphasize the urgent need for robust risk management strategies to address the increasing risks posed by debris flows. By incorporating climate resilience measures, enhancing early warning systems, and implementing sustainable land-use practices, communities can better prepare for and mitigate the impacts of future debris flow events.

Ultimately, this study contributes valuable insights to the field of natural hazard management, advocating for proactive measures to build resilience and safeguard lives and livelihoods in hazard-prone regions like Brep, Chitral.

Acknowledgements

We would like to thank for all kind of support including technical assistance and field support provided by Aga Khan Agency for Habitat Pakistan to compile and write this article at every step throughout the completion of this article.

We also acknowledge the contributions of Ms. Asma Sherbaz, Weather Monitoring Post (WMP) In charge for providing accurate data of rainfall and temperature of the study area.

References

Banihabib, M. E., & Tanhapour, M. (2020). An empirical equation to determine the threshold for rainfall-induced landslides developing to debris flows. Landslides, 17(9), 2055–2065.

Haq, I. (2007). Community response to climatic hazards in northern Pakistan. Mountain Research and Development, 27(4). http://dx.doi.org/10.1659/mrd.0947

Kean, J. W., Staley, D. M., & Cannon, S. H. (2011). In situ measurements of post-fire debris flows in southern California: Comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 116, F04019.

Khan, M. A., Haneef, M., Khan, A. S., & Tahirkheli, T. (2012). Debris-flow hazards on tributary-junction fans, Chitral, Hindu Kush Ranges, northern Pakistan. Journal of Asian Earth Sciences, 62, 720–733.

Marin, R. J., Garcia, E. F., & Aristizabal, E. (2020). Effect of basin morphometric parameters on physically based rainfall thresholds for shallow landslides. Engineering Geology, 278, 105855.

Monsieurs, E., Dewitte, O., Depicker, A., & Demoulin, A. (2019). Towards a transferable antecedent rainfall-susceptibility threshold approach for landsliding. Water, 11(10), 2202.

Peres, D. J., & Cancelliere, A. (2014). Derivation and evaluation of landslide-triggering thresholds by a Monte Carlo approach. Hydrology and Earth System Sciences, 18(12), 4913–4931.

Prenner, D., Kaitna, R., Mostbauer, K., & Hrachowitz, M. (2018). The value of using multiple hydrometeorological variables to predict temporal debris flow susceptibility in an alpine environment. Water Resources Research, 54(9), 6822–6843.

Segoni, S., Piciullo, L., & Gariano, S. L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. Landslides, 15(8), 1483–1501.

Thouret, J. C., Antoine, S., Magill, C., & Ollier, C. (2020). Lahars and debris flows: Characteristics and impacts. Earth-Science Reviews, 201, 103003.

Прорывы ледниковых озер на примере озера Спартаковское. Методы изучения и особенности прогнозирования

Л.Н. Улаева

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, Ulaeva.Liliia@yandex.ru

Аннотация. В эпоху двадцать первого столетия происходят значительные научные открытия, но при этом неизбежно возникают и новые вызовы, например изменение климата. Таяние ледников вследствие потепления климата одна из основных причин увеличения прорывов ледниковых озер. Подобные ледовые катастрофы являются крайне опасными гидрологическими явлениями, учитывая их нестабильность и сложность прогнозирования, тогда как сам механизм прорыва и его взаимосвязь с изменением внешних климатических условий на сегодняшний день изучены недостаточно. Уникальную возможность для изучения особенностей этих процессов предоставляет озеро Спартаковское на архипелаге Северная Земля. Применение полученных полевых данных в математическом моделировании может открыть возможности для более точного прогнозирования прорывов озер, как и для лучшего понимания процессов, происходящих под ледниками.

Ключевые слова: *изменение климата, прорыв озера, ледниковое озеро, Jökulhlaup, математическое моделирование, озеро Спартаковское*

Ссылка для цитирования: Улаева Л.Н. Прорывы ледниковых озер на примере озера Спартаковское. Методы изучения и особенности прогнозирования. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 517–525.

Glacial lake outbursts: A case of the Spartakovskoe Lake. Study methods and forecasting features

L.N. Ulaeva

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, Ulaeva.Liliia@yandex.ru

Abstract. Significant scientific discoveries are taking place in the era of the twenty-first century, but new challenges, such as climate change, inevitably arise. The melting of glaciers due to climate warming is one of the main reasons for increasing glacial lake outbursts. Such ice catastrophes are extremely dangerous hydrological phenomena, given their instability and complexity of forecasting, whereas the mechanism of glacial lake outburst and its relationship with changes in external climatic conditions have not been sufficiently studied to date. A unique opportunity to study the features of these processes is provided by Spartakovskoe Lake in the Severnaya Zemlya Archipelago. Using of the obtained field data in mathematical modeling may allow opportunities for more accurate prediction of lake outbursts, as well as for a better understanding of the processes occurring under glaciers.

Key words: *climate change, lake outburst, glacial lake, Jökulhlaup, mathematical modeling, Spartakovskoe Lake*

Cite this article: Ulaeva L.N. Glacial lake outbursts: A case of the Spartakovskoe Lake. Study methods and forecasting features. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 517–525.

Введение

Как отмечал Ю.Б. Виноградов в «Этюдах о селевых потоках», «одной из самых крупных ледниково-селевых катастроф является прорыв временно подпруженных ледниками озер. Завальные озера, возникшие в результате обвалов и оползней горной породы, могут существовать десятки, сотни и тысячи лет, хотя и они могут прорваться. Ледяные же плотины, сколь бы мощными они не были, недолговечны. Лед тает, трескается, отдельные его блоки всплывают, и разрушение такой плотины — вопрос времени».

За последние 100 лет глобальное потепление уже привело к повышению средней температуры на нашей планете на 1,4°C, а с 1970 г. ее рост наблюдается гораздо быстрее, чем в любой другой 50-летний период за всю историю наблюдений [*IPCC, 2023*]. Доклад Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 г. отражает не менее настораживающую картину изменения климата. В нем отмечается практически повсеместное повышение температуры окружающего воздуха относительно климатической нормы, как и рост атмосферных осадков в каждом из сезонов года. Продолжительность залегания снежного покрова в среднем по России зимой 2021/2022 г. также отличается от климатической нормы в меньшую сторону [*Росгидромет, 2023*].

Антарктика и Арктика наиболее чувствительно реагируют на скорости климатических изменений. Максимальная площадь морского льда в Антарктике в 2023 г. достигла абсолютного рекордно низкого уровня за период наблюдений с 1979 года [*WMO, 2023*] а состояние арктических льдов можно визуально оценить с помощью изменения баланса массы материкового льда (рис. 1).

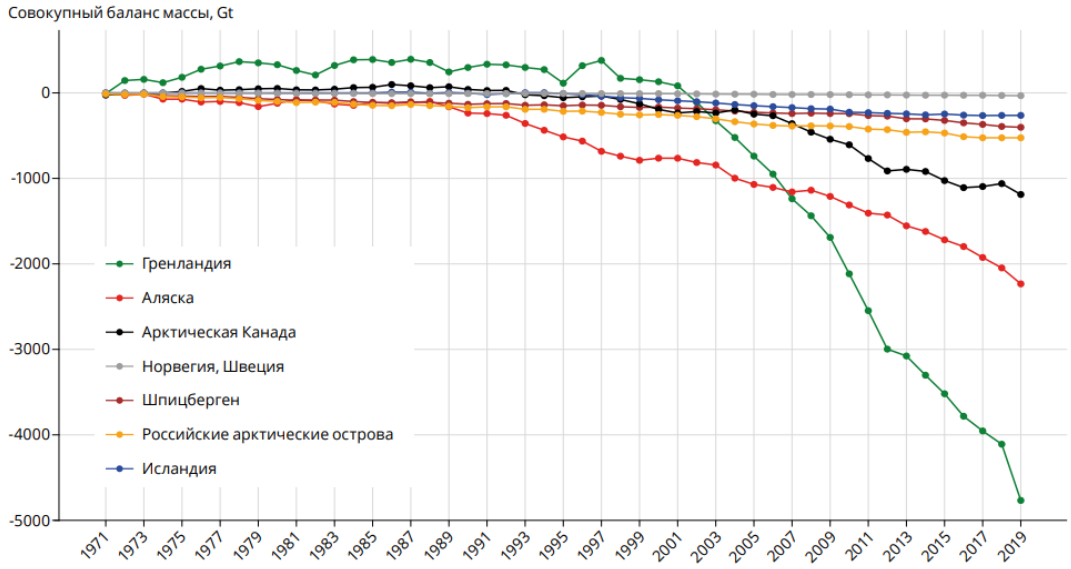


Рис. 1. Изменения баланса массы материкового льда в Арктике [*AMAP, 2022*]

Аналогичная ситуация наблюдается и на континентах. Ледники, как крайне чувствительные к любым климатическим изменениям системы, отступают в результате придонного и приповерхностного таяния и одно из главных последствий этого процесса – образование озерно-ледниковых комплексов, как новых, так и увеличение площади и объемов уже существующих озер [*Кренке, 1987; Черноморец и др., 2003*]. Площадь ледников сокращается, активизируются обвальные процессы в ледниковой зоне, ускоряется деградация массивов горной мерзлоты. Все это влияет на динамику ледников и увеличивает количество опасных природных явлений: происходят прорывы ледниковых озер и формирование катастрофических прорывных паводков; сходят

крупные сели на участках, где они ранее в таких объемах не были зафиксированы [*Росгидромет, 2023*], а также появляются провалы и депрессии в ледниках [*Boronina et al., 2021*]. Все это несет угрозу для безопасности человеческой деятельности и жизни, а нестабильность и сложность прогнозирования этих событий делает их крайне опасными природными явлениями [*Richardson et al., 2000*; *Попов и др., 2018*].

Прорывы ледниковых озер являются одним из главных источников селевой опасности в высокогорных районах. Учитывая скорость таяния ледников и возрастающую интенсивность опасных природных явлений, эти процессы активно изучаются. Помимо решения прикладных задач, изучение процессов, связанных с прорывом ледниковых озер, также крайне важны для фундаментальных научных исследований, поскольку это поможет понять процессы, происходящие под ледниками, эволюцию подледного ландшафта, а также состояние подледниковой среды. Новые знания способны открыть возможности для более точного прогнозирования данных опасных гидрологических явлений.

Однако подобные явления характерны также и для подледниковых озер Антарктиды и ледниково-подпрудных озер Арктики, где, несмотря на малонаселенность этих регионов, могут привести к экономическому ущербу и угрозе человеческим жизням. Например, образовавшийся в 2017 г. внушительный провал в краевой части ледника Долк (Dålk Glacier) в Восточной Антарктиде, который разрушил участок дороги между российской станцией Прогресс и китайской станцией Зонгшан. Учитывая, что это интенсивно используемый участок, данное событие могло привести к человеческим жертвам. Причиной его возникновения был катастрофический прорыв внутриледникового водоема [*Sukhanova et al., 2023; Пряхина и др., 2022*]. В Исландии прорывные ледниковые паводки, иногда достигающие грандиозных размеров, настолько часты, что являются одним из главных природных явлений, специфических для этого острова [*Nye, 1976; Björnsson, 2010*]. Последствия прорывов озер, помимо опасности для человеческой жизни и экономического ущерба, отражаются и на окружающей среде. В частности, прорыв озера Спартаковское на острове Большевик архипелага Северная Земля. Его заполнение до максимального предела привело к всплыванию ледниковой плотины, образованной выводным ледником купола Семенова-Тян-Шанского. Это привело к формированию паводка, который по мере своего развития, разрушил плотину [*Чернов и др., 2020; Муравьев и др., 2023*]. Ввиду того, что прорывы ледникового озера Спартаковское достаточно регулярны, его можно рассматривать в качестве полигона для изучения такого рода процессов.

Прорывы ледниковых озер. Озеро Спартаковское

Прорывы ледниковых озер

Прорыв ледникового озера представляет собой внезапный и мощный сброс большого объема воды из озерной котловины в долину. Факторы, обусловливающие такого рода события, можно подразделить на две основные категории. Первая из них связана с изменениями климата, которые приводят к резкому увеличению притока воды в озеро из-за различных климатических аномалий, таких как повышенная температура или экстремальные осадки. Вторая категория включает в себя геологические и геоморфологические изменения, приводящие к нарушению устойчивости барьера, включая разрушение ледника или подпруживающей плотины, изменение свойств грунтов, а также присутствие вулканических процессов или повышенной сейсмической активности. Особенности рельефа, такие как неустойчивость склонов, особенно при больших уклонах и крутых перепадах высот, также могут быть отнесены к этой группе факторов [*Глазовский и др., 2014*]. Рассмотрим более подробно механизм прорыва озера через ледовую перемычку вследствие влияния внешних климатических факторов.

В ранних исследованиях отмечалось, что климатические изменения являются одной из основных причин изменения толщины ледника и положения его краевой части.

В свою очередь деградация ледника сказывается на стабильности, уровне и объеме примыкающих к нему ледниковых озер [*Evans et al., 1994; Thorarinsson et al., 1939*].

С изучением деградации и отступания ледников связано понятие «цикл *jökulhlaup*». *Jökulhlaup* в буквальном переводе с исландского языка означает «*Бегущий ледник*» – красивое название, однако несущее в себе определение опасного стихийного бедствия. Первоначально это понятие было введено в Исландии для характеристики явлений, связанных с извержениями подледных вулканов на крупнейшем леднике Исландии *Vatnajökull* [*Thorarinsson, 1939; Björnsson, 2010*]. Территория Исландии является уникальной, сочетая в себе и вулканическую активность, и ледниковый покров над действующими вулканами. При извержении сильное придонное таяние провоцирует резкое увеличение объема воды в ледниковом озере, приводя к катастрофическим прорывам. Эти события и породили новый термин в гляциологии, который далее был принят во многих языках и применяется для описания любого крупного и резкого выброса воды из подледникового озера.

Цикл jökulhlaup предполагает, что опустошение озера происходит в виде цикла повторяющихся прорывов, когда вследствие увеличения объема воды в озере давление, оказываемое на ледниковый барьер, превышает то критическое значение, при котором он оставался относительно стабильным и мог сдерживать оказываемый напор.

Существуют различные способы сброса воды из ледникового озера: перелив через ледовую плотину, разрушение ледовой перемычки из-за избыточного давления, просачивание в снежно-фирновой зоне или по подледниковым полостям и каналам, которые формируются мощным водным потоком при поиске выхода из-под ледниковой массы или флотация льда. Внутренний диссипативный разогрев льда и трение на ложе выступают в качестве дополнительного источника воды в ледниках. Канал выхода расширяется за счет термической и механической эрозии [*Björnsson, 2010*; *Виноградов, 1976*], что приводит к развитию внутриледниковой и подледниковой дренажной сети. Если вести речь о всплывании ледовой плотины, как способе прорыва озера, то, согласно работам [*Nye, 1976; Thorarinsson, 1939*], уровень воды должен подняться до 9/10 ее высоты (это следует из соотношения плотностей льда и воды), что и обеспечивает всплывание ледяной плотины и запускает процесс прорыва.

При прорыве озер через ледовую перемычку, энергия движущейся воды приводит к таянию стенок канала. При этом вследствие деформации льда и разницы между давлением на канал со стороны ледника и водного потока, канал может закрываться, что приводит к прекращению сброса и повторному накоплению объема воды в озерной котловине. В своей работе *Дж. Най* также подчеркивает, что сброс воды осуществляется преимущественно в одном русле, так как движущая сила воды в прожилках между зернами направлена к озеру, а не от него [*Nye, 1976*].

Согласно теории *Ю.Б. Виноградова*, одним из ключевых факторов в процессе прорыва является достаточное количество тепла, выделяемое за счет превышения температуры воды над температурой тающего льда и диссипации энергии водного потока, который движется через незначительный внутриледниковый или подледниковый канал. Это позволяет за относительно короткий промежуток времени выработать туннель, способный обеспечить катастрофический сброс воды из озера [*Виноградов, 1976*] на него водной массы, что прослеживается во многих указанных гипотезах прорыва.

На первый взгляд вывод о первоочередной значимости изменения внешних климатических факторов, например, температуры окружающего воздуха, на процесс накопления воды в озере достаточно очевиден. Однако следует отметить важность влияния на процесс формирования и прорывов ледниковых озер таких не менее значимых факторов, как толщина ледника и геотермический поток [*Pattyn, 2010; Боронина, 2023*].

Озеро Спартаковское

К одним из крупнейших ледниково-подпрудных озер Северной полярной области относится уникальное и единственное в своем роде озеро Спартаковское, расположенное на архипелаге Северная Земля и подпруженное ледником Семенова-Тян-Шанского (рис. 2). Длина озера около 5 км, ширина достигает 900 м, глубина у плотины перегораживающего ледника составляет 100 м при отметке уровня воды в озере около 90 м над уровнем моря. Его прорывы характеризуются объемами сброса, превышающие объемы при прорывах в горных регионах в десятки раз, что делает их воздействие на окружающую среду значительным [*Чернов, 2020*].

Рис. 2. Озеро Спартаковское. Фото: А.С. Парамзин, Д.Ю. Большиянов, ААНИИ

Активным изучением этих процессов занимаются сотрудники ААНИИ и ИГ РАН. Первый частичный спуск воды из озера наблюдался в период с 25 по 27 августа 2016 г., далее летом 2017 г. было зафиксировано резкое изменение уровня воды, и последний спуск воды из озера был зафиксирован 22–27 августа 2021 г., когда впервые за время наблюдений произошел полный спуск за 117 часов при приблизительном расходе воды до 2000 м³/с, что сопоставимо со стоком реки Невы [*Чернов,2020*]. Ученые установили, что прорыв озера происходит посредством флотации ледяной плотины под действием гидростатических сил, соответственно, основной фактор, запускающий этот процесс – высокий уровень воды в озере. Около 40% площади водосборного бассейна озера Спартаковское занимают ледники и многолетние снежники. Накопление воды в озере происходит в результате таяния ледников Семенова-Тян-Шанского и Войцеховского, поэтому колебание климатических факторов, особенно теплые летние сезоны, имеют первоочередное значение [*Чернов, 2020; Муравьев, 2023*].

Регулярные сбросы воды в приледниковом озере Спартаковское открывают возможности детального изучения взаимосвязей многочисленных факторов климатических изменений, влияющих на этот процесс, как и последствий таких событий для окружающей среды, включая ответную реакцию на прорыв озера выводного ледника.

Методы изучения и особенности прогнозирования

Методы изучения

Методы изучения ледниковых озер и их прорывов можно разделить на 4 основные блока [*Попов и др.,2022; Глазовский, 2014*] исследований:

1. Натурные инструментальные исследования, включая дистанционные методы исследований и применение геоинформационных систем и баз данных.
2. Статистические методы анализа.

3. Создание физических моделей прорыва озер.
4. Математическое моделирование.

Сотрудники ААНИИ и ИГ РАН, детально изучая процессы прорыва озера Спартаковское, применяют новейшие методы: анализ спутниковых снимков, лазерную альтиметрию, полевые наблюдения на научно-исследовательском стационаре ААНИИ «Ледовая база «Мыс Баранова», включая метеорологические, аэрологические и геофизические исследования, а также гляциологические работы. Это позволило прийти к важным выводам относительно происходящих процессов, включая характеристики самих прорывов озера.

Дешифрирование спутниковых снимков и обработка ЦМР позволили получить следующие данные о прорыве озера в 2016 г.: максимальный уровень озера, равный (122,9 ± 1,0) м; площадь озера при максимальном уровне, равная (6,63 ± 0,42) км²; объем озера, составляющий (404,3 ± 21,9) млн м³. Минимальная высота ледораздела плотины до спуска озера была около 137 м, ширина около 3 км, что обеспечило ее всплытие при средней плотности льда 0,875 г/см. Расчетная величина стока в водосборном бассейне Спартаковское в зависимости осадков и средней летней температуры варьируется от 37, до 48,0 млн м³. Также в результате расшифровки космических снимков удалось зафиксировать перетекание воды из озера Спартаковское в долину реки Базовой. Однако полевые работы в 2021 г. показали, что сток в долину реки Базовая происходить больше не может, так как уровень воды уже не поднимается до водораздела с бассейном реки Базовая. Неожиданно произошедший в 2021 г. масштабный прорыв озера Спартаковское показал, что изменяющиеся климатические факторы внесли корректировки в прогноз следующего после 2016 г. прорыва озера – в 2024–2025 гг. и он произошел существенно раньше предполагаемого срока. За счет усиления поверхностной абляции на ледниках водосборного бассейна при аномально теплых летних сезонах в 2018–2021 гг., озерная котловина наполнилась водой существенно быстрее, чем в период с 2006 по 2016 гг. [*Чернов, 2020*]. Согласно выполненным расчетам, сток в озеро за 2020 г. превысил 101 млн м³, что более чем вдвое превышает расчетную величину стока в озеро в период с 2006 по 2016 г. Немало важный фактор, выявленный в ходе исследований и влияющий на прорыв озера – уменьшение размера удерживающей плотины. С 01.08.2016 по 06.08.2021 граница подпруживающей озеро ледяной плотины в центральной части отступила на 350–380 м, что свидетельствует о постепенном ее разрушении [*Муравьев, 2023*]. Полученные выводы можно объединить предположением, что количество прорывов озера в ближайшем будущем будет увеличиваться.

Безусловно, натурные исследования и дистанционное зондирование имеют немаловажное значение с точки зрения сбора, обработки и мониторинга данных. Однако в значительной степени полученная информация касается уже произошедшего прорыва. Более того, ледниковые озера отличаются своей труднодоступностью для исследований. Поэтому изучение субгляциальных и гляциальных гидрологических процессов невозможно осуществить только прямыми методами. Им на помощь приходит математическое моделирование в сочетании с полученными данными натурных измерений.

В 1970-х гг. были заложены основы для современных моделей катастрофического сброса. В 1972 г. была опубликована работа Ретлисбергера [*Röthlisberger, 1972*], где подробно описана гидравлическая модель стационарного течения воды в канале. Он предположил, что текущая вода в канале, чтобы оставаться при температуре таяния и соответствующем давлении, должна получать или терять энергию. Модель, представленная в его работе, учитывает помимо особенностей самого канала (длина, радиус, глубина, шероховатость), взаимодействие и взаимное влияние друг на друга давления воды и ее расхода, давления льда на стенки канала, а также зависимость таяния от давления. Однако использование модели Ретлисбергера для каналов в области абляции может привести к значительным ошибкам, так как продолжительность заполнения каналов водой изменчива, как и расход в этой области [*Глазовский, 2014*].

Однако эта теория послужила отправной точкой для следующей фундаментальной работы в этой области, подробно изложенной в публикации 1976 г. Модель

Ретлисбергера соотносилась к установившемуся течению воды, в то время как Дж. Най предложил модель для описания неустановившегося течения воды в ледниковом наклонном канале, заполненном водой. При этом также учтено плавление стенок канала в связи с трением воды о них, а также описан процесс закрытия каналов за счет деформации пластичного льда. То есть особенность его модели в том, что катастрофичность прорыва может быть объяснена стремительным расширением изначально небольшого канала выхода водного потока за счет плавления стенок, в то время как сокращение объема воды в озере приводит к снижению давления и закрытию канала, останавливая тем самым процесс прорыва [*Nye, 1976*]. Несмотря на логичность модели, следует отметить, что она все же не учитывает некоторые особенности, которые выявляются в процессе исследований и наблюдений. Например, данная модель не учитывает процессы водной эрозии при формировании паводка и, как следствие, проседание поверхности ложа ледника, а также не способна описать процесс подпитки зарождающихся систем каналов, когда распределение водных потоков первоначально идет в турбулентном подледниковом слое [*Flowers et al., 2004; Boronina et al., 2021*].

Среди отечественных следует выделить модель Ю.Б. Виноградова, по которой при процессе прорыва за относительно короткий промежуток времени за счет превышения температуры воды над температурой льда и диссипации энергии водного потока в канале, формируется туннель, способный обеспечить катастрофический сброс воды из озера, то есть преобразуются уже существующие каналы стока. В ней отражены два основных явления: увеличение площади поперечного сечения туннеля и падение давления по мере выхода объема воды из озера. Входными данными являются объем озера перед прорывом, начальная температура воды в озере, длина канала, морфометрические данные, а также разница высот между точкой входа и точкой выхода туннеля. Однако расход воды через туннель определяется с помощью эмпирического коэффициента, который несет в себе большое количество неопределенностей и должен оцениваться исходя из наилучшего соответствия модели и действительности [*Виноградов, 1976; Боронина и др., 2018*]. Помимо этого, в этой модели не учтено наличие ледникового покрова над водной поверхностью. Эта модель получила развитие, и в работе [*Evatt et al., 2007*] приводится ее описание.

Каждая из исследуемых моделей внесла свой вклад в развитие математического моделирования. Однако для приближения к максимальной точности автору видится применение этих моделей с доработкой под конкретные цели и задачи, стремясь максимально заменить в модели эмпирические вычисления на полевые исследования, что может способствовать уменьшению неопределенности полученных результатов.

Модель Дж. Ная по мнению автора наиболее подходит в качестве основы моделирования процесса прорыва озера Спартаковское, где ключевым моментом является всплытие ледниковой плотины и сброс воды под ледником во фьорд. Высокие уровни озера, зафиксированные при обоих прорывах, способствуют значительному давлению воды, быстрому развитию подледного канала и флотации ледникового барьера, при этом сток происходит даже при падении уровня воды в озере. Модель Ная и объясняет катастрофичность прорыва стремительным расширением изначально небольшого канала выхода водного потока за счет плавления его стенок и баланса давлений со стороны ледника и водного потока. При этом исследования, проведенные сотрудниками ААНИИ и ИГ РАН, показали, что постоянных внутриледниковых или подледниковых каналов стока в ледяной плотине, образованные выводным ледником купола Семенова-Тян-Шанского, нет. Если бы подобные каналы существовали, прорывов озера, возможно, могло бы и не быть, так как озеро не наполнялось бы выше определенного уровня [*Муравьев, 2023*]. Модель Дж. Ная описывает процесс так называемого «закрытия каналов» за счет деформации пластичного льда [*Nye, 1976*], что позволяет накопить значительные объемы воды в озерной котловине.

Такой подход поможет описать развитие процесса прорыва, однако не может описать его начало: процесс формирования самого канала. Как происходит развитие этого канала, особенно в условиях контакта воды со льдом и при значительных расходах воды, какие размеры имеет подледниковый канал на этапе появления – эти вопросы еще

предстоит выяснить в будущих исследованиях. Решение задачи Стефана о таянии на контакте скальных пород и льда за счет процессов тепломассопереноса может восполнить этот недостаток. Подобный опыт моделирования уникален и тем, что позволит получить распределение температуры в толще ледника и воды.

Особенности прогнозирования

Прорыв ледникового озера – сложный природный процесс, зависящий от множества факторов и влияющих на них неопределенностей, поэтому предсказать, когда именно будет прорыв, крайне затруднительно. Интегрированный подход, при котором изучается динамика ледников, гидрогеологические особенности озера, включая постоянный мониторинг уровня воды, а также отслеживается изменение климатических условий, позволяет более точно оценить вероятность прорывов. Математическое моделирование – провести анализ сложных взаимосвязей между различными факторами и более комплексное понимание процессов, особенно если озеро располагается в труднодоступном для регулярного наблюдения месте.

Заключение

Особенности перемещение значительных водных масс с выделением большого количества энергии при прорывах ледниковых озер все еще остаются мало изучены, как и механизмы воздействия климата на районы озерных систем в Антарктиде. Объемы ледниковых озер могут вмещать до сотен миллионов кубометров воды, а внезапность прорыва озера и сложность в прогнозировании делает это явление чрезвычайно опасным. Согласно исследованию, проведенному в 2023 г., около 90 млн человек живет в бассейнах, содержащих ледниковые прорывные озера. Из них более половины приходится на страны с высокой плотностью населения: Индию, Пакистан, Китай, Перу и Бутан [*Taylor, 2022*]. Увеличение человеческой активности в районах, где существует потенциальная угроза от прорывов ледниковых озер, учитывая значимый ущерб в качестве последствий, делает изучение этой проблемы крайне актуальной в настоящее время. Помимо решения прикладных задач, создание новых более точных моделей важно для изучения субгляциальных процессов в целом.

Благодарности

Автор выражает благодарность доктору геолого-минералогических наук С.В. Попову за помощь в подготовке настоящей статьи.

Список литературы

Боронина А.С. Оценка факторов, влияющих на процессы формирования и развития подледниковых озер Антарктиды. Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородных ресурсов: Тезисы докладов / II Международная научно-практическая конференция, 2023. С. 86.

Боронина А.С., Попов С.В., Пряхина Г.В. Моделирование подледниковых паводков на примере катастрофического прорыва водоема в леднике Долк (полуостров Брокнес, Восточная Антарктида) // Сборник докладов международной научной конференции «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии», г. СПб., 2018. С. 854–859.

Виноградов Ю.Б. Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера // Селевые потоки, сб. 1, 1976. С. 138–153.

Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М. 2014. ГЕОС. 528 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: РОСГИДРОМЕТ, 2023. 104 с.

Кренке А.Н. Современные ледники и климат // Взаимодействие оледенения с атмосферой и океаном / Под ред. Котляков М.Г., Гросвальд М.Г. 1987. С. 7–33.

Муравьев А.Я., Чернов Р.А. Прорыв ледниково-подпрудного озера Спартаковское и изменение выводного ледника купола Семенова-Тян-Шанского в 2021 году (Северная Земля) // Лед и снег, 2023, том 63, № 1, с. 17–32. https://doi: 10.31857/S2076673423010118.

Попов С.В., Боронина А.С., Пряхина Г.В., Григорьева С.Д., Суханова А.А., Тюрин С.В. Прорывы ледниковых и подледниковых озер в районе антарктической станции Прогресс, Восточная Антарктида, в 2017 – 2018 гг. // Труды 5-й международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита», Тбилиси, Грузия, 2018 г., С. 512–520.

Попов С.В., Пряхина Г.В., Боронина А.С., Кашкевич М.П. Математическое моделирование, как основной метод изучения процессов, протекающих в ледниках и подледниковых водоемах Антарктиды // Сб. материалов IV Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Государственного учреждения Республиканский центр полярных исследований. 2022. С. 192–195.

Черноморец С.С., Тутубалина О.В., Алейников А.А. Новые селеопасные озера у края ледника Башкара на Центральном Кавказе // Материалы гляциологических исследований. – 2003. – № 95. – С. 153–160.

Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Природная катастрофа ледниково-подпрудного озера Спартаковское на острове Большевик (Северная Земля) // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 4, с. 58–68; https://doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-4 (58–68).

AMAP Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts. 2022. – 160 p.

Boronina A., Popov S., Pryakhina G., Chetverova A., Ryzhova E., Grigoreva S. Formation of a large ice depression on Dålk Glacier (Larsemann Hills, East Antarctica) caused by the rapid drainage of an englacial cavity // J. Glaciol., 2021, Vol. 67, No 266, P. 1121–1136. https://doi: 10.1017/jog.2021.58.

Björnsson, H. Jökulhlaups in Iceland: sources, release and drainage // Megaflooding on Earth and Mars. 2010. P. 95–106. https://doi: 10.1017/CBO9780511635632.004.

Evans S.G., Clague J.J. Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments // Geomorphology, 1994. Vol. 10. P. 107–128.

Evatt G.W., Fowler A.C. Cauldron subsidence and subglacial floods // Ann. Glaciol., 2007. Vol. 45. P. 163–168.

Caroline Taylor, Tom R. Robinson, Stuart Dunning, J. Rachel Carr &Matthew Westoby Glacial Lake outburst floods threaten millions globally, 2022, https://doi.org/10.1038/s41467-023-36033-x.

Nye J.F. Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels, and veins // J. Glaciol., 1976. Vol. 17. No 76. P. 181–207.

Pattyn F. Antarctic subglacial conditions inferred from a hybrid ice sheet/ice stream model // Earth and Planetary Science Letters, 2010. vol. 295. P. 451–461.

Richardson S.D, Reynolds J.M. An overview of glacial hazards in the Himalayas // Quatern. Intern. 2000. Vol. 65/66/ P. 31–47.

Röthlisberger H. Water pressure in intra- and subglacial channels // J. Glaciol., 1972. Vol. 11. No 62. P. 177–203.

Sukhanova A.A., Bantsev D.V., Popov S.V., Boronina A.S., Shimanchuk E.V., Polyakov S.P. The current state of Lake Dålk (Larsemann Hills, East Antarctica) // Polar Sci., 2023, V. 38. P. 101006, https://doi: 10.1016/j.polar.2023.101006.e

Thorarinsson S. Chapter IX. The ice dammed lakes of Iceland with particular reference to their values as indicators of glacier oscillations // Geografiska Annaler, 1939. Vol. 21. No. 3–4. P. 216–242.

Flowers G.E., Björnsson H., Pálsson F., Clarke G.K. A coupled sheet-conduit mechanism for jökulhlaup propagation // Geophysical research letters, 2004. Vol. 31. No 5. P. L05401. https://doi:10.1029/2003GL019088.

WMO, 2023: Provisional State of the Global Climate 2023, pp. 13–14.

Каскадность оползневых и селевых процессов в Долине гейзеров (Камчатка, Россия)

О.В. Зеркаль, О.С. Барыкина, Ю.В. Фролова, И.Е. Большаков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, igzov@mail.ru

Аннотация. Селевые и оползневые процессы могут формировать каскадные парагенетические ряды, когда проявление одного процесса выступает триггером развития другого. Каскадность селевых и оползневых процессов, при котором сель является «первичным» процессом, заключается в реализации цикла, включающего три фазы – эрозионный размыв подножья склона селем, смещение оползня с перекрытием селевого русла, прорыв оползневой дамбы с образованием нового селевого вала, размывающего склон. Также возможно образование каскада селевых и оползневых процессов, когда первичной причиной являются оползневые смещения, провоцирующие формирование селя. Каскадность оползневых и селевых процессов рассмотрена на примере развития опасных природных процессов в Долине гейзеров (долина р. Гейзерной, Камчатка, Россия), располагающейся на территории Кроноцкого государственного заповедника, являющегося одним из уникальных объектов природы России. Показано, что в рассмотренном случае формирование селя, прошедшего 04.01.2014 г., явилось следствием смещения каменной лавины, выступившей первичным процессом при образовании каскадопроявлений опасных геологических процессов.

Ключевые слова: *каскадность, сели, оползни, Долина гейзеров, Камчатка*

Ссылка для цитирования: Зеркаль О.В., Барыкина О.С., Фролова Ю.В., Большаков И.Е. Каскадность оползневых и селевых процессов в Долине гейзеров (Камчатка, Россия). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 526–534.

Cascading mode of landslide and debris flow processes in the Valley of Geysers (Kamchatka, Russia)

O.V. Zerkal, O.S. Barykina, J.V. Frolova, I.E. Bolshakov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, igzov@mail.ru

Abstract. Debris flows and landslides can form cascading paragenetic series, when one geological process acts as a trigger for another. The cascade of debris flows and landslides, in which debris flows are the "primary" process, represents a cycle, that includes three phases such as erosion of the foot of the slope by the debris flow, displacement of the landslide in flow channel with the overlap its, and the breakthrough of the landslide dam with formation of a new debris flow, eroding the slope. The cascade of debris flows and landslides is also possible when landslide displacements occur first and then it contributes to the formation of a debris flow. The cascade of landslides and debris flows is considered on the example of the activity of hazardous geological processes in the Geyser valley Kamchatka Peninsula, Russia), located on the territory of the Kronotsky State Reserve, which is one of the most unique objects of nature in Russia. It is shown, that the debris flow that occurred on January 4, 2014 was a consequence of the displacement of a rock avalanche, which was the primary process in the cascade of hazardous geological processes.

Key words: *cascading mode, debris flows, landslides, Geyser Valley, Kamchatka*

Cite this article: Zerkal O.V., Barykina O.S., Frolova J.V., Bolshakov I.E. Cascading mode of landslide and debris flow processes in the Valley of Geysers (Kamchatka, Russia). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 526–534.

Введение

Современные геологические процессы отличаются многообразием и находятся в сложной взаимосвязи и взаимозависимости. Селевые и оползневые процессы относятся к наиболее опасным геологическим процессам, нередко приводя к существенным жертвам и экономическим потерям. Изучение этих опасных процессов проводится в рамках самостоятельных научных направлений – селеведения и оползневедения, соответственно. Вместе с тем, в природных условиях, в особенности в тектонически активных горных регионах, нередко наблюдается сложное сочетание проявления селевых и оползневых процессов. В то же время, при изучении селей и оползней нередко отмечается определенная последовательность развития этих опасных процессов, когда либо селевые процессы являются триггерным фактором для оползнеобразования, либо оползневые процессы выступают причиной селей. Такого рода взаимообусловленная последовательность в развитии опасных природных процессов рассматривается как каскадность в их образовании [*Зеркаль, 2022*]. Учет каскадности в развитии селевых и оползневых процессов позволяется более полно и всесторонне проводить оценку геологической опасности, дает возможность полнее характеризовать геологические риски.

В настоящей работе проведен анализ каскадности развития оползневых и селевых процессов в Долине гейзеров (Камчатка, Россия) (рис. 1). Уникальный район распространения гейзеров на Камчатке – Долина гейзеров (рис. 2), был открыт Т.И. Устиновой в апреле 1941 г. на территории Кроноцкого государственного заповедника, история создания которого начинается с 1882 г. [*Устинова, 1955, Сугробов, 2009*]. В настоящее время Кроноцкий заповедник является одним из крупнейших природных резерватов в мире и внесен в Список объектов Всемирного природного наследия ЮНЕСКО. Сохранение уникальной природы этого региона является одной из важнейших задач.

Рис. 1. Район проведения работ

Рис. 2. Долина гейзеров (Камчатка, Россия). Фото О.В. Зеркаля

Представление о каскадности геологических процессов

Современные опасные геологические процессы могут образовывать каскадные парагенетические ряды (т.е. группы генетически связанных процессов), представляющие собой серию последовательно формирующихся геологических событий (одного или близкого масштабного уровня), зачастую перетекающих (дискретно во времени) один в другой, в наследуемых природных условиях, нередко представляя собой самонарастающий процесс. В этом случае проявление одного процесса либо выступает непосредственной причиной (триггерным фактором) развития другого процесса (перетекание), либо создает условия для его последующего возникновения (наследуемость).

Среди процессов, развивающихся в горно-складчатых областях, особое место занимает каскадное проявление оползней и селей, нередко имеющее катастрофический характер, обусловленный усилением масштабности проявлений в результате самонарастающего развития рассматриваемых опасных геологических процессов. Наиболее часто каскадность селевых и оползневых процессов, при котором селевой поток является "первичным" процессом, заключается в реализации цикла, включающего три фазы:

- эрозионный размыв движущимся селевым потоком основания склона;
- оползневые смещения, формирующие дамбу, перекрывающую (полностью или частично) селевое русло;
- прорыв оползневого перекрытия с образованием селевого вала с дальнейшим размывом основания склона.

На рис. 3 показано общее схематическое представление о каскадности развития селевых и оползневых процессов при реализации описанного цикла взаимодействия этих процессов.

Вместе с тем, каскадность оползневых и селевых процессов может иметь и иной вид, когда причиной образования селя выступает непосредственное развитие оползня. В этом случае реализации вышеописанного цикла не происходит, а наблюдается "простая" последовательность геологических процессов, включающая на начальном этапе смещение оползня, достигающего водного объекта (либо реки, либо озера), что провоцирует на следующем этапе селеобразование. Примером проявления такого рода каскадности является последовательное развитие склоновых процессов в Долине

гейзеров (Камчатка, Россия), где формирование несколько крупномасштабных оползней (в 2007 г. и в 2014 г.) сопровождалось последующим селеобразованием.

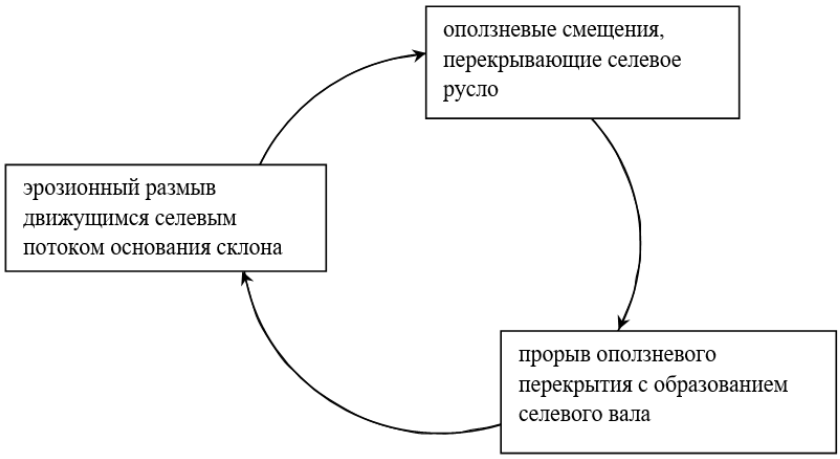


Рис. 3. Схематическое представление о каскадности развития селевых и оползневых процессов (по О.В. Зеркалю)

Таким образом, можно сделать вывод, что в развитии селевых и оползневых процессов каскадность возможна двух типов:

- I тип, при котором "первичным" процессом каскада является селеобразование, а дальнейшая последовательность формирования геологических событий носит цикличный, описанный выше (см. рис. 3) характер;
- II тип, в составе которого "первичным" процессом каскада выступает оползнеобразование, провоцирующее в дальнейшем формирование геологических событий в виде "простой" последовательности геологических процессов.

Каскадное развитие оползневых и селевых процессов в Долине гейзеров

Природно-климатические условия района Долины гейзеров

Природно-климатические особенности территории определяются ее положением вблизи Тихоокеанского побережья Камчатки, для которого характерна активная циклоническая деятельность и смена атмосферной циркуляции над материковой частью и прилегающей акваторией Тихого океана. Удаление Долины Гейзеров от побережья почти на 40 км и превышение отметок рельефа над уровнем моря на 600–1400 м приводит к более контрастным температурам воздуха и меньшей облачности, чем на побережье. Среднегодовые температуру воздуха на рассматриваемой территории составляют порядка +1,9°С при годовой амплитуде температур 20–25°С [*Кондратюк, 1974*]. Среднегодовое количество осадков в рассматриваемом районе составляет порядка 1240 мм, достигая в отдельные годы 2000 мм. Большая часть осадков выпадает в виде снега в холодный период года, а устойчивый снежный покров имеет высоту до 2 м, а в понижениях рельефа – до 3 м, держится с ноября по май. Пиковое выпадение осадков для рассматриваемой территории характерно для осеннего периода, когда суточные значения сумм осадков могут достигать 60–80 мм. Так, например, в период прохождения циклона "Эльза" (04–06.10.1981) сумма осадков составила 92 мм, в то время как в предшествующий циклону месяц количество осадков в районе Долины Гейзеров составило 200 мм [*Сугробова, 1985*].

Распределение растительного покрова территории подчиняется высотной зональности. Прирусловые части долин рек заняты пойменными лесами. Средние части

склонов долин (до высоты около 600 м) покрыты березовым лесом с участками кедрового и ольхового стланика, занимающего обычно верхние части склонов долин. Водораздельные пространства вулканического нагорья характеризуются разреженной растительностью горных тундр с обширными пространствами с лишайнико-моховым покровом, со стелющимися низкорослыми зарослями стланика и отдельными кустарниками.

Геоморфологические и геологические условия

«Долина гейзеров» располагается в нижней и средней части долины реки Гейзерной, выработанной в восточной части Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии, представляющей собой типичную кальдеру обрушения со сложной структурой. Образование Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии произошло в пределах обширного вулканического нагорья, сформировавшегося в пределах Восточно-Камчатской грабен-синклинали в результате современной вулканической деятельности. Абсолютные отметки рельефа в пределах вулканического плато в рассматриваемом районе составляют 900–1100 м. Борта депрессии представляют собой тектонически обусловленные практически отвесные (>70° в верхней части) уступы в современном рельефе, имеющие высоту до 400–500 м. Верхняя и средняя части долины р. Гейзерной имеют форму каньона глубиной от 120–150 м в верховьях и до 300–350 м в средней части при ширине 900–1000 м.

Для рассматриваемого района характерно наличие длительно существующего (начиная с плиоцена) корового магматического очага, предопределяющего формирование гидротермальных систем Долины гейзеров.

Изучение экструзивно-эффузивных образований в пределах рассматриваемой территории позволили выделить три цикла магматической активности. Первый цикл (начало среднего неоплейстоцена) сопровождался излияниями лав андезитового и липарит-дацитового (в заключительной стадии) состава, потоки и экструзии которых формируют водораздельные поверхности долины р. Гейзерной вдоль юго-восточного обрамления Узон-Гейзерной депрессии [*Белоусов, 1983*]. Для второго цикла магматической активности характерно излияние лав и формирование экструзий дацит-липаритового состава, происходившее во внутренних частях Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии [*Белоусов, 1983*]. Третий цикл магматической активности, представляющий собой этап кислого вулканизма, проявляется в последние 30–40 тыс. лет.

Каменная лавина 04.01.2014 г.

Образование каменной лавины 04.01.2014 г. произошло в восточной части сопки Желтая (в верховьях ручья Горячая речка, Верхнегейзерное поле), представляющей собой лавовый купол риодацитового состава. Общая высота склона на участке формирования склоновых деформаций составляет около 300–350 м, а протяженность склона (от бровки уступа до русла р. Гейзерной) – 650–680 м. Уклон наиболее крутого участка склона в его верхней части достигал 70° при перепаде высот порядка 100 м. Протяженность зоны обрушения (поперек направления смещения) составила около 250–270 м, при ширине массива (по склону) – до 80–100 м. Таким образом, объем первичного обвала достигал 2,2–2,7 млн м^{3}. Ранее, начиная с 1975–76 гг., на этом участке отмечалось большое количество трещин растяжения [*Leonov, 2014*]. При обрушении на склоне сформировался шлейф общей шириной до 380–410 м, достигший русловой части р. Гейзерной (рис. 4). Можно предположить, что на начальной стадии смещений деформации развивались по механизму топлинга, на что указывает наличие отложений каменной лавины, «перехлестнувших» через локальный водораздел на склоне (между долинами ручья Горячая речка и ручья Теплый, высотой до 30 м) и перекрывших соседнюю долину ручья Теплый. Такое залегание не могло бы образоваться, если бы

смещения, развивавшиеся в верховьях Горячей речки, на начальной стадии происходили бы по механизму сдвига [*Zerkal, 2019*].

Следует отметить, что нижняя треть массива смещенных отложений отделена от верхней части полосой шириной 40–70 м с минимальными мощностями гравитационных образований. Наблюдаемая ситуация характерна для каменных лавин, при движении которых между областью обрушения и областью аккумуляции образуется зона транзита (с практически полным отсутствуем обвально-оползневых отложений) за счет высокой энергии движения обвальных масс. Незначительная ширина зоны транзита (несколько десятков метров) объясняется небольшой общей протяженностью склона. Вместе с тем, энергия обрушения была достаточной для того, чтобы обвально-оползневые массы, достигнув русла реки и перекрыв его, частью "поднялись" на противоположный борт долины на 15–18 м, а частью изменили траекторию движения, трансформировавшись во вдольрусловую каменную лавину. Вдольрусловое перемещение оползневого материала привело к образованию водного вала перед фронтом быстро движущегося оползневого языка, скорость смещения (расчетная) которого достигала 17–19 м/с, что в дальнейшем способствовало формированию селевого потока [*Zerkal, 2019*]. Пройдя вдоль русла р. Гейзерной порядка 680–700 м, смещенные оползневые массы образовали конус протяженностью 140–160 м (по долине), шириной (поперек долины) до 120 м и высотой до 40–50 м. Таким образом, объем обвально-оползневых масс в «зоне торможения» оценивается в 800–850 тыс. м^3.

Образование каменной лавины 04.01.2014 г., отложившиеся в русловой части долины р. Гейзерной, сформировали завальную плотину, выше которой образовалось озеро глубиной (вблизи завала) до 15–18 м и протяженностью до 400 м и средней шириной до 80–90 м (максимальная ширина – до 180 м) (рис. 4). В дальнейшем прорыва озера не произошло.

Основными предпосылками формирования каменной лавины 04.01.2014 г. в средней части долины р. Гейзерной следует считать геолого-геоморфологические условия на участке обрушения. Среди факторов, также внесших свой вклад в подготовку, дестабилизация склона, несомненно, выступают климатическое влияние (циклон 17–19 сентября 2013 г.) и сейсмическая активность в рассматриваемом районе. Не менее важным фактором явилась интенсивная гидротермальная деятельность в виде разгрузки кислых парогазовых струй с температурой более 100°С, в результате которой в средней и нижней частях склона сформировалась ослабленная зона гидротермально измененных пород [*Gvozdeva, 2016, Фролова, 2023*]. Соответственно, эти породы активно разрушались вследствие эрозионной деятельности реки, выветривания, мелкомасштабных гравитационных процессов, что постепенно ослабляло основание всего массива и привело к его обрушению.

Сель 04.01.2014 г.

Смещение каменной лавины, достигшей р. Гейзерной и прошедшей вдоль ее русла порядка 0,7 км, привело к формированию селевого потока по руслу реки ниже оползневого завала (рис. 5). Протяженность селевого потока, двигавшегося вниз по долине, составила более 3 км. Объем селевого материала, перемещавшегося с весьма большой скоростью, оценивается в 2,5 млн м^3 [*Лебедева, 2020*]. Значительный объем твердого материала, вовлеченного в селевой поток, по-видимому, объясняется наличием малопрочных, легко размываемых гидротермально измененных пород, как вовлеченных в смещение и дезинтегрированных в составе каменной лавине, так и слагающих нижнюю часть склона бортов долины р. Гейзерной ниже оползневого завала.

При движении селевого потока на поворотах русла р. Гейзерной сформировались заплески высотой до 15 м, указывая на то, что скорость движения селя (до 16–17 м/с) была сопоставима (наследуема) скорости смещения (расчетной) каменной лавины. В результате прохождения селевого потока в нижней части долины реки (в районе Трехкаскадного водопада) были срезаны несколько гейзеритовых построек, а также частично перекрыты и забиты селевыми массами несколько гейзеров.

Рис. 4. Общий вид каменной лавины, образовавшейся 04.01.2014 г. в средней части долины р. Гейзерной (фото И.Е. Большакова, 2022 г.)

Селевой поток достиг озера Гейзерного, образованного завальной плотиной оползня 3 июня 2007 г., где сформировал конус мощностью от 3–4 м до 10–15 м, практически заполнив селевыми отложениями озерную котловину (рис. 6, 7). Ударное воздействие селевой волны способствовало окончательному разрушению завальной плотины 2007 г., после чего озеро постепенно стало спускаться и к настоящему времени практически перестало существовать как постоянный водоем (рис. 6, 7).

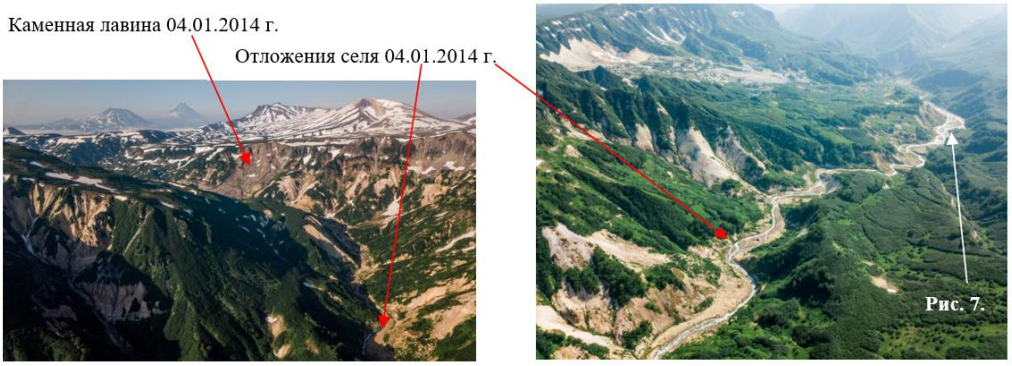


Рис. 5. Общий вид долины р. Гейзерной после прохождения селевого потока, каскадно образовавшегося в результате каменной лавины 04.01.2014 г. (фото И.Е. Большакова, 2022 г.)

Рис. 6. Озеро, образованное в 2007 г., в результате оползневого перекрытия долины р. Гейзерной. Фото О.В. Зеркаля, 2010 г.

Рис. 7. Заполнение селевым материалом озерной котловины в долине р. Гейзерной в 2014 г. Фото И.Е. Большакова, 2022 г.

Заключение

Селевые и оползневые процессы, являясь одними из наиболее опасных геологических процессов, нередко, в особенности в тектонически активных горных регионах, характеризуются взаимообусловленностью, когда либо селевые процессы являются триггерным фактором для оползнеобразования, либо оползневые процессы выступают причиной селей. Такого рода последовательность в формировании геологических событий, зачастую представляя собой самонарастающий процесс, определяется как каскадность в развитии геологических процессов.

Каскадность в развитии селевых и оползневых процессов может быть двух типов:

I тип – «первичным» процессом каскада является селеобразование и дальнейшая последовательность формирования геологических событий носит цикличный (трехфазный) характер;

II тип – «первичным» процессом каскада является оползнеобразование с последующим формированием геологических событий в виде «простой» последовательности геологических процессов.

Рассмотрение развития оползневых и селевых процессов в Долине гейзеров (долина р. Гейзерной, Камчатка, Россия) в 2014 г. показало, что на анализируемой территории имел место II тип каскадности. Образованию селя в Долине гейзеров 04.01.2014 г. предшествовало смещение каменной лавины, выступившей первичным процессом при образовании каскада проявлений опасных геологических процессов.

Список литературы

Белоусов В.И., Гриб Е.Н., Леонов В.Л. Геологические позиции гидротермальных систем Долины гейзеров и кальдеры Узон // Вулканология и сейсмология. – 1983. – № 1. – С. 65–79

Зеркаль О.В., Калинин Э.В., Барыкина О.С. и др. Склоновые геологические процессы/Под ред. В.Т. Трофимова, О.В. Зеркаля. – М.: Изд-во «Перо», 2022. – 724 с.

Кондратюк В.И. Климат Камчатки. – М.: Гидрометеоиздат, 1974. – 204 с.

Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чижова В.П., Завадская А.В. Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования//Геоморфология. – 2020. – № 2. – С. 60–73

Сугробов В.М. Жемчужина Камчатки – Долина гейзеров. – Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. 108 с.

Сугробова Н.Г., Сугробов В.М. Изменение режима термопроявлений Долины гейзеров под влиянием циклона "Эльза"//Вопросы географии Камчатки. – Петропавловск-Камчатский, 1985. – Вып. 8. – С. 88–94

Устинова Т.И. Камчатские гейзеры. – М.: Географгиз, 1955. – 120 с.

Фролова Ю.В., Зеркаль О.В., Большаков И.Е. Гидротермальные преобразования пород как фактор развития оползневых процессов в геотермальных районах Курило-Камчатской вулканической дуги // Грунтоведение. – 2023. – № 2. – С. 36–43

Gvozdeva I.P., Zerkal O.V. Hydrothermally altered rocks as a field of dangerous slope processes (the Geysers Valley, Kamchatka peninsula, Russia)//Volcanic Rocks and Soils: Proc. of the Internat. Workshop on Volcanic Rocks and Soils. – London: CRC Press, 2016. – pp. 115–118

Leonov A.V, Leonov V.L. Valley of Geysers, Kronotsky Reserve, Kamchatka: Features Seen by the 1991 GOSA Expedition and Changed by the 2007 Landslide, 2013 Cyclone and 2014 Landslide//The Geyser Gazer Sput. The Newsletter of The Geyser Observation and Study Association. – 2014. – 28(2). – pp. 5–26

Zerkal O.V., Gvozdeva I.P. Landslide Activity and Landslide Hazard in Geyser Valley (Kamchatka Peninsula, Russia)//Natural Hazards and Risk Research in Russia: Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. – Springer, 2019. – pp. 317–344

Characteristics, driving factors of spatial and temporal variations and tendency of debris flows in the Yunnan section of the Salween River mainstream

J. Zhang[1,2,3,4], D. Yang[3], B. Gao[1,2], L. Chen[1,2,3], Y. Li[1,2,3], Y. Tian[1,2], H. Huang[1,2,3], H. Li[1,2], J. Li[1,2], Y. Li[5]

[1]Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu, China, jimjia2008@163.com

[2]Institute of Exploration Technology, Chengdu, China

[3]Chengdu University of Technology, Chengdu, China

[4]Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

[5]East China University of Technology, Nanchang, China

Abstract. Salween River is an important international river in China. The Yunnan section of the Upper Salween Valley (YUSV) has become one of the key energy sources in China due to its vast and unexploited hydropower resource. However, the area experiences the most serious debris flow disasters in Yunnan Province. Many disasters occurred and caused huge loss of life and property. Based on data collection, remote sensing interpretation, field investigation and visits, the authors have obtained more detailed field primary data than previous studies. On this basis, the authors analyzed the developing characteristics of debris flows, and then analyzed the driving factors of spatial and temporal variations of debris flows in the YUSV. And further predicted the future developing trend of debris flows in the YUSV. The results show that: (1) the debris flow is characterized by spatial differentiation with the boundary of Shangjiang Town, Lushui City, which is strong in the north and weak in the south. (2) The main controlling factors for the spatial variation of the debris flow in the north and south are climatic conditions, tectonic faults, topography and geomorphology, and the main controlling factors for the temporal differentiation are rainfall and earthquakes; (3) The debris flows have shown a trend of becoming more and more active, and have shown a cycle of ~3 years since 2000, which is consistent with the overall trend and the active cycle of local precipitation. Extreme rainfall and sudden strong earthquakes, which are on the rise, can trigger concentrated outbreaks of debris flows and require more attention.

Key words: *spatial-temporal variations; driving factors; Tendency; debris flow; the Yunnan section of the Upper Salween Valley*

Cite this article: Zhang J., Yang D., Gao B., Chen L., Li Y., Tian Y., Huang H., Li H., Li J., Li Y. Characteristics, driving factors of spatial and temporal variations and tendency of debris flows in the Yunnan section of the Salween River mainstream. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 535–549.

Характеристики, движущие факторы пространственных и временных изменений и тенденции развития селевых потоков на Юньнаньском участке главной долины реки Салуин

И. Чжан[1,2,3,4], Д. Ян[3], Б. Гао[1,2], Л. Чен[1,2,3], Ю. Ли[1,2,3], Ю. Тянь[1,2], Х. Хуан[1,2,3], Х. Ли[1,2], Ц. Ли[1,2], И. Ли[5]

[1]Технологический инновационный центр по предотвращению рисков и смягчению последствий геоопасностей, Министерство природных ресурсов, Чэнду, Китай, jimjia2008@163.com

[2]Институт геологоразведочных технологий, Чэнду, Китай

[3]*Университет технологий Чэнду, Чэнду, Китай*
[4]*Университет Гренобль-Альпы, Гренобль, Франция*
[5]*Восточно-китайский Университет технологий, Наньчан, Китай*

Аннотация. Река Салуин — важная международная река в Китае. Юньнаньский участок долины Верхнего Салуина (YUSV) стал одним из ключевых источников энергии в Китае благодаря своим обширным и неразработанным гидроэнергетическим ресурсам. Однако в этом районе происходят самые серьезные селевые катастрофы в провинции Юньнань. Произошло множество стихийных бедствий, которые привели к огромным человеческим жертвам и имущественным потерям. На основе сбора данных, интерпретации данных дистанционного зондирования, полевых исследований и посещений авторы получили более подробные полевые первичные данные, чем предыдущие исследования. На этой основе авторы проанализировали развивающиеся характеристики селевых потоков, а затем проанализировали движущие факторы пространственных и временных изменений селевых потоков в ЮСВ. И далее спрогнозировали будущую тенденцию развития селевых потоков в ЮСВ. Результаты показывают, что: (1) селевой поток характеризуется пространственной дифференциацией с границей городов Шанцзян и Лушуй, которая сильна на севере и слаба на юге. (2) Основными определяющими факторами пространственной изменчивости селевого потока на севере и юге являются климатические условия, тектонические разломы, топография и геоморфология, а главными определяющими факторами временной дифференциации – осадки и землетрясения; (3) Селевые потоки имеют тенденцию становиться все более активными и имеют цикл длительностью ~3 года с 2000 г., что соответствует общей тенденции и активному циклу местных осадков. Чрезвычайные осадки и внезапные сильные землетрясения, число которых растет, могут спровоцировать концентрированные выбросы селевых потоков и требуют большего внимания.

Ключевые слова: *селевой поток; пространственно-временные вариации; движущие факторы; тенденция; Юньнаньский участок долины Верхнего Салуина*

Ссылка для цитирования: Чжан И., Ян Д., Гао Б., Чен Л., Ли Ю., Тянь Ю., Хуан Х., Ли Х., Ли Ц., Ли И. Характеристики, движущие факторы пространственных и временных изменений и тенденции развития селевых потоков на Юньнаньском участке главной долины реки Салуин. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 535–549.

Introduction

The Yunnan section of the Upper Salween Valley (YUSV for simplification) is one of the areas with the most developed debris flow disasters in Yunnan Province, and is also one of the areas with the most developed debris flow disasters in southwestern China, where debris flow disasters occur frequently (Fig. 1) [*Tang et al., 2003; Yang et al., 2017; Kong et al., 2018; Huang et al., 2020*]. Historical debris flow events, especially major debris flow events with clear disaster losses, can effectively reflect the development patterns, control factors, disaster losses and disaster prevention capabilities of regional debris flow, and provide important data support for the evaluation and prediction of future debris flow [*Simoni et al., 2011; Kirschbaum et al., 2015; Wang et al., 2022; Wan et al., 2023*]. The authors traced the debris flow events in the YUSV for 72 years, according to available event records, a total of 134 debris flow events occurred in the YUSV from 1950 to 2021. The oldest traceable debris flow event was the debris flow occurred in Latu River in the December 1950, during which 2 people were killed. The year with the highest number of outbreaks was 2020, with 14 major debris flow events occurring in one year. Except the two debris flow events, the Dongyueguyima debris flow occurred on August 18, 2010, which killed 96 people and destroyed the Dongyuegu Iron factory in the gully, causing direct economic losses of 140 million yuan [*Su et al., 2012; Zhou et al.,*

2018; Tang et al., 2018]. On June 28, 2012, a debris flow broke out in the Bibili River in Gongshan County, blocking the Salween River for more than 8 h and forming a 3 km long barrier lake [*Yang et al., 2021*]. On May 10, 2014, a debris flow occurred in the Latudi River in Fugong County, destroying 14 houses [*Guo et al., 2015*]. On May 25, 2020, a group of debris flows broke out along G219 in Gongshan County [*Tie et al., 2021*], causing casualties and property losses, etc.

Some debris flow events may not have been recorded due to their long history, but the existing records of debris flow events and the sensitivity evaluation results of debris flow in the YUSV are sufficient to show that it is a highly prone and high-risk area for debris flow disasters [*Tang, 2005; Liu et al., 2012; Kong et al., 2019; Xu et al., 2022; Liu et al., 2024*], which requires great attention. On the one hand, due to the landforms of many mountains and canyons in YUSV, the contradiction between man and land is prominent. Inhabited areas such as counties, towns, and villages are mostly directly distributed in the flat dam areas of river valleys on both sides of the main stream, and are often located directly at the mouth of debris flow ravines. On the other hand, most human-related engineering facilities are also distributed in the main stream valley and its branch ditches on both sides, such as national highway G219 and tourism-related facilities, state grid transmission lines, bridges, factories and mines, etc. In recent years, with the economic development, the infrastructure construction of the YUSV has made very significant progress, which has also put forward greater demand for risk prevention of debris flow disasters.

Relying on the the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP), the authors have carried out debris flow investigation and research work in the YUSV for three years. Based on data collection, remote sensing interpretation, on-site surveys, and visits, we obtained more detailed first-hand field data than previous studies, especially the updated database of debris flow events in the main stream of the Nu River. On this basis, the patterns and differentiation characteristics of debris flows in the main stream of the upper Salween River at the temporal and spatial levels are analyzed, and then the influence mechanism of different driving factors on the spatial and temporal distribution of debris flows is analyzed, so as to determine the future development trend of debris flows in the YUSV. It should be pointed out that previous research is the basis for the relevant work of this article [*Tang et al., 2003; Xu, 2016; Feng, 2020; Huang et al., 2020*]. Different from previous research, the progress of this article not only further enriches the database of debris flow outbreaks, but also extracts the main influencing factors of debris flow through quantitative methods, especially analyzing the impact of earthquakes and active faults on the spatiotemporal differentiation of debris flows in the YUSV, and extracted the activity cycle of debris flow outbreaks since 2000, and predicted the future evolution trend of debris flows. Relevant results will deepen the research on debris flow in the YUSV, with a view to benefiting the risk prevention of debris flow disasters in towns, settlements and important traffic arteries along the river.

Regional background

The study area locates in the southern section of the Sanjiang tectonic belt. Neotectonic movements are active in the area [*Li et al., 2019*]. Faults are developed, the Nujiang Fault zone runs through the north and south of the study area. There are also Longling-Ruili fault zone, Puladi-Caojian fault which is the secondary fault (Fig. 1*a*). Among them, the Nujiang fault zone is the main active fault, which is right-lateral strike-slip with a thrust component, and the average annual slip rate is 0.42 mm [*Wang et al., 2008*]. The fault zone trends nearly north-south and dips steeply to the west, and the damage zone is several kilometers wide. The rock in the damage zone is strongly fractured, and fault breccia, mylonitization, and schistification zones are developed [*Li, 2008*]. The strata in the area are mostly distributed in a nearly north-south direction, which is consistent with the regional tectonic trend. In terms of stratigraphic lithology, the right bank of the YUSV is dominated by Proterozoic gneiss and Mesozoic basic and ultrabasic rocks, while the left bank is dominated by Paleozoic limestone and Mesozoic sand and mudstone. In terms of topography, the YUSV belongs to the longitudinal valley zone

in the southern section of the Hengduan Mountains. The elevation of the study area is high in the north and low in the south. The landform is generally controlled by the north-south tectonics. It is an alpine canyon landform with two mountains sandwiched by a river. The main stream of the upper Salween runs through the entire area from north to south, with east and west sides are Gaoligong Mountain and Biluo Snow Mountain respectively. Valleys grow vertically on both sides of the YUSV, providing favorable topographic and geomorphological conditions for the occurrence of debris flows. In terms of climate, the study area belongs to the southwest monsoon climate type. Bounded by Liuku, the northern section of the study area is dominated by temperate monsoon climate, while the southern section has a subtropical monsoon climate. Due to the large span from north to south, the climate is greatly affected by topography and atmospheric circulation, and the three-dimensional climate characteristics are obvious. Most areas in the region do not have severe cold in winter, and the average annual temperature is 15.1°. Affected by the warm and humid airflow of the Indian Ocean, water and heat appear at the same time. The rainfall in the rainy season accounts for more than 80% of the total annual precipitation [*Zhang et al., 2007*]. The rainfall in the upper Salween valley in the region is more in the north and less in the south. The annual total in the northern section is 1,000–1600 mm, 750–1000 mm in the southern section, and the rainfall increases sharply towards the watersheds on both sides of the main stream. The vegetation coverage rate in the study area is relatively high, which is similar to the climate segmentation. With Liuku as the boundary, the vegetation in the study area also shows obvious north-south differences. Obvious vertical zoning can be seen in the northern section, transitioning from shrubs, broad-leaved forests, coniferous forests to alpine meadows from low to high elevation. The vertical distribution of vegetation in the southern section is not obvious, and the main vegetation types are broad-leaved forests, shrubs, and grassy slopes. Mountains with higher altitudes are covered by coniferous forests, with a smaller proportion. The intermountain basin is mainly cultivated land, mostly paddy fields, and is the main crop area in the YUSV.

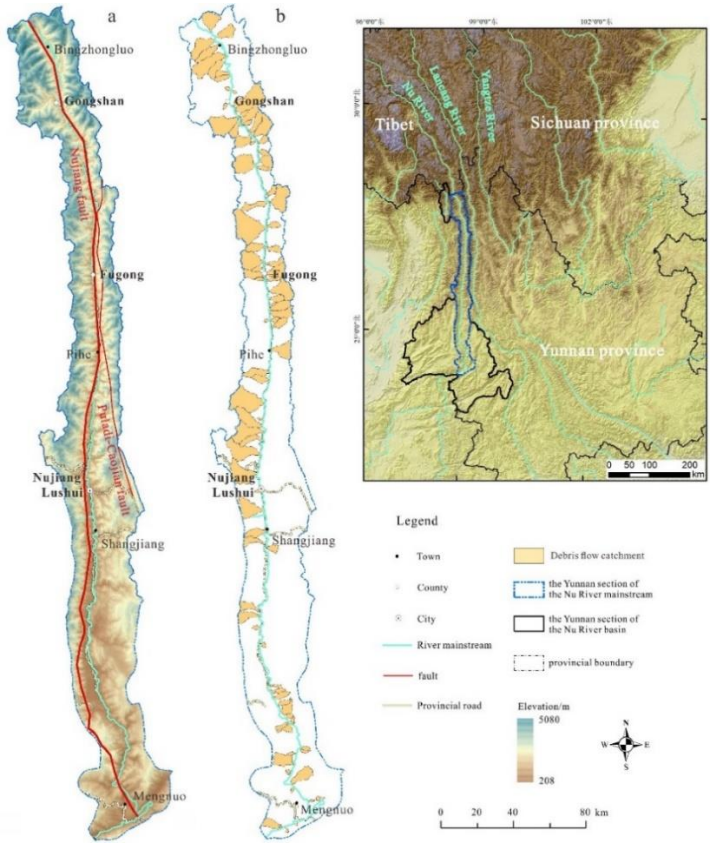


Fig. 1. Location of the study area and distribution of debris flows: a – main faults and terrain; b – distribution of major debris flows

Data and method

Data

Debris flow inventory comes from reference, on-site visits, field surveys and remote sensing interpretation. The remote sensing images involved mainly include Keyhole, Spot, Planet, and Google Earth from 1965 to 1976. DEM comes from NASA's SRTM DEM, which is used for delineating debris flow basin boundaries and extracting topographic parameters of debris flow influencing factors. NDVI (normalized vegetation index) and land use type data are extracted based on Landsat8 satellite images. Average annual rainfall data are based on the national monitoring stations published by the Meteorological Bureau, and are interpolated by the Kriging method using ArcGIS software. The strata and fault data are derived from the 1:50 0000 regional geological map, and are calculated according to the main faults, secondary faults of main fault and other small faults, which are assigned to the impact weight of the faults, and then ArcGIS software is used to generate a fault density distribution map (Fig. 2).

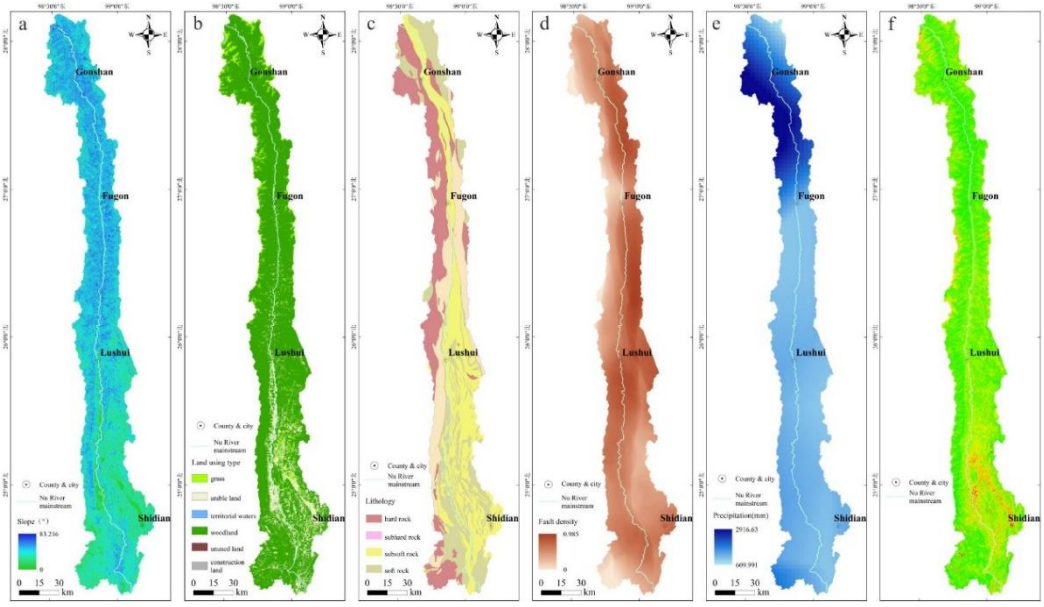


Fig. 2. The influencing factors of debris flow in YUSV: a – slope; b – land using type; c – lithology; d – fault density; e – precipitation; f – NDVI

Method

Field surveys used traditional geological survey methods, and remote sensing interpretation was based on visual interpretation before and after the debris flow event. Based on statistical methods, the temporal differentiation and spatial differentiation characteristics of debris flow are analyzed. The weight analysis of driving factors is completed on the ArcGIS platform using Geodetector.

Geodetector is a set of statistical methods that detect spatial differentiation and reveal the driving force behind it. The basic idea is: assuming that the research area is divided into several sub-regions, if the sum of the variances of the sub-regions is less than the total regional variance, then there is space differentiation [*Wang et al., 2017*]. Assuming that the spatial distribution of a set of independent variables. This paper takes each debris flow basin as the analysis unit and uses a Geodetector model to detect the degree of influence of various influencing factors on the development of debris flows. The Geodetector formula is expressed as follows:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2}\sum_{h=1}^{L} N_h \, \sigma_{h^2}.$$

In Formula 1: h is the classification of debris flow influencing factors, $h \in [1, L]$; N_h is the number of analysis units corresponding to a certain classification h, and N is the analysis unit of all debris flows in the study area; σ_h^2 and σ^2 are the influencing factors of a certain variance of h at one level and the variance of the whole region. $q \in [0, 1]$, the larger the q value, the more obvious the stratification heterogeneity is. Since the development of debris flow is the result of the joint action of various factors, the larger the q value, the stronger the explanatory power of the influencing factors on the development of debris flow, on the contrary the weaker it is; when $q = 1$, it indicates that the influencing factor completely controls the development of debris flow; when $q = 0$, it indicates that the development of debris flow is not affected by this factor.

In order to more accurately characterize the development degree of different debris flows and reflect the differences, the frequency of debris flow outbreaks in the study area in the past 50 years was selected as the dependent variable Y. The data came from on-site surveys, interviews and reference analysis. The influencing factor is the independent variable X, in order to highlight the role of the dominant factors in the formation of debris flows in this study area, six influencing factors including slope, NDVI index, precipitation, fault density, lithology, and land use type were finally selected to analyze the main controlling factors of debris flows in the YUSV (Fig. 2).

Inventory of debris flow

Distribution of debris flow

In order to obtain an accurate inventory of debris flows, reference analysis, on-site visits, field surveys, and remote sensing interpretation methods are used to supplement each other for verification. Previous reference has recorded some debris flow outbreaks in the YUSV, especially typical events with direct economic losses, as part of this debris flow inventory; because debris flows have a time dimension, the oldest debris flow that can be accessed on site is 1950, so the record of debris flow events is limited to 1950–2021, mainly interviewing residents near the debris flow ravine, so as to ensure the accuracy of the interview results to the greatest extent; on-site investigation is an important method for debris flow research, which can directly obtain the detailed debris flow information such as volume, scale, stage, source distribution, blockage situation, etc.; remote sensing interpretation can intuitively identify two-dimensional debris flow accumulation fans, source distribution, blockage situation, etc. Based on the multi-stage remote sensing image interpretation, the topographic and geomorphological characteristics before and after the debris flow can also be compared and analyzed to identify the debris flow. On-site surveys and remote sensing interpretation can verify the results of reference and on-site visits. Combining the debris flow activity level, outflow volume, material source distribution, and disaster and danger information obtained through the above methods, the inventory of 103 major debris flows in the YUSV was finally formed, and the basin boundaries of the debris flows were delineated based on DEM data, remote sensing images, and GIS platforms, the spatial distribution data of debris flows in the main stream of the upper Salween River was obtained finally (Fig. 1*b*).

Debris flow events

On the basis of referring to existing reference [*Tang et al., 2003; Xu, 2016; Feng, 2020; Huang et al., 2020*], in order to fully obtain records of major debris flow events in the YUSV in addition to on-site surveys and interviews, Multi-period remote sensing image data including Keyhole, RapidEye, Planet, and Google Earth were used to interpret and analyze debris flow events (Fig. 3), and finally the number of debris flow events was reduced from 86 in the original reference [*Huang et al., 2020*] to 134 times. But even so, because the debris flow events that can be recalled or recorded are often large-scale or major debris flow with serious disasters, the actual debris flow events should be larger than the statistical results of this time.

09/11/2009 21/09/2010

Fig. 3. Comparison of remote sensing interpretation before and after a typical debris flow outbreaking based on RapidEye imagery (Dongyueguyima gully)

Spatial and temporal variations of debris flows along the YUSV

Spatial variations of debris flows

Debris flows in the YUSV generally show spatial differentiation characteristics of strong in the north and weak in the south, with Shangjiang Town, Lushui City as the boundary, and the junction of Yunnan and Tibet in Bingzhongluo, Gongshan county in the north as the debris flow-prone section (Fig. 1). The overall development level of debris flow on the China-Myanmar border from the south of Shangjiang town to Mengpeng town, Zhenkang County, Lincang city is relatively low. Subdivided into local sections, from north to south, from Bingzhongluo town in Gongshan to Fugong County, a relatively equal number of debris flows develop on both sides of the main stream of the upper Salween River. Debris flow from Fugong County to the south to Pihe town is concentrated on the right bank of the main stream of the Salween River, while debris flow from Pihe town to the south to Shangjiang town, Lushui City is mainly distributed on the left bank of the main stream of the Salween River. There is no obvious difference in the number of debris flows on both sides of the Salween main stream south of Shangjiang Town.

In terms of debris flow scale and frequency, there were 11 small-scale debris flows, 86 medium-scale debris flows, and 6 large-scale debris flows in the entire section (Fig. 4*a*); there were 58 low-frequency debris flows, 24 medium-frequency debris flows, and 21 high-frequency debris flows. (Fig. 4*b*). Generally speaking, the debris flows in the Yunnan section of the main stream of the Nu River are mainly medium-sized and medium to low frequency debris flows, among which large-scale and high-frequency debris flows are mainly distributed in the section north of Shangjiang town, Lushui city (Fig. 4).

Temporal variations of debris flows

(1) Multi-year time scale

According to the statistical results of the frequency of major annual debris flow events in the YUSV that can be traced from 1950 to 2021 (Fig. 5), a total of 6 debris flows occurred in the study area in the 1950s, of which 5 occurred in 1952. A total of 4 debris flows occurred in the 1960s. A total of 13 mudslides occurred in the 1970s, including 9 in 1979. A total of 7 debris flows occurred in the 1980s. A total of 7 debris flows occurred in the 1990s. A total of 26 debris flows occurred in the 2000s. A total of 55 debris flows occurred in the 2010s,

including 10 in 2010. In 2020, 14 debris flows occurred in the study area, and in 2021, 1 debris flow occurred. From 1950 to 2021, there have been a total of 134 major debris flow events.

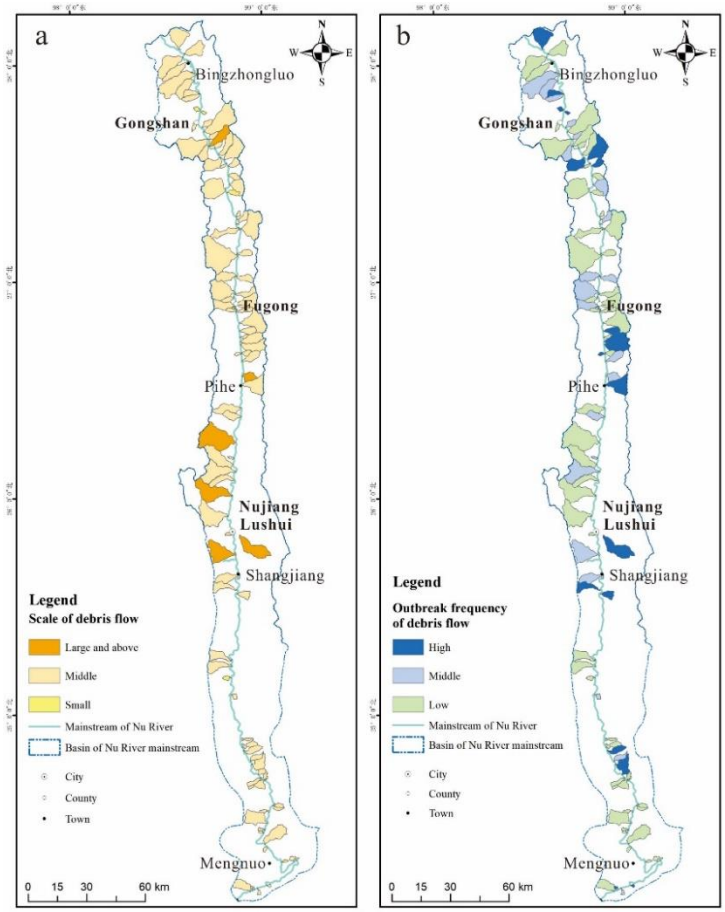


Fig. 4. Spatial distribution feature of debris flows' scale and outbreaking frequency in YUSV: a – scale of debris flow; b – outbreak frequency of debris flow

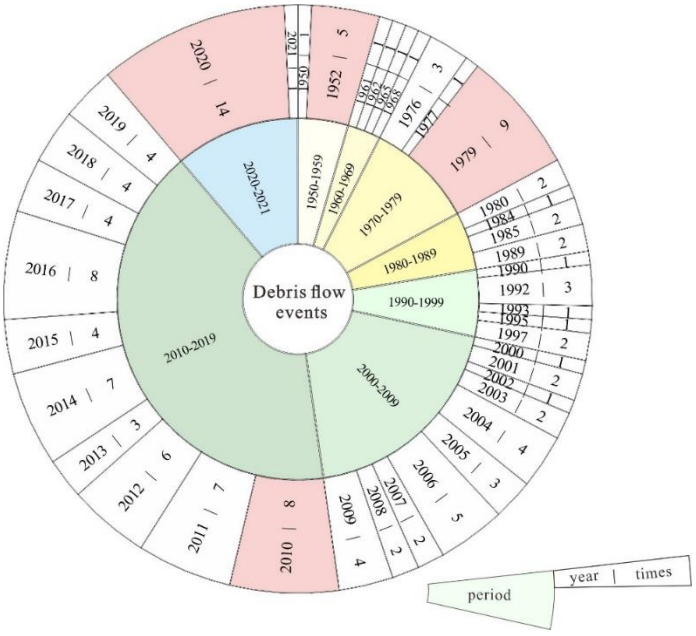


Fig. 5. Statistical results on the annual frequency of debris flows in YUSV from 1950 to 2021

(2) Monthly time scale

Based on the historical debris flow outbreak month information obtained through surveys, interviews, and reference analysis, it can be concluded that debris flows in the study area mainly occur from March to October, and March to May and July to October are two concentrated outbreak periods, with the highest number in August. This result is consistent with previous research [*Huang et al., 2020*] (Fig. 6). It shows significant differentiation characteristics between different months, which is obviously closely related to the climatic conditions of the study area.

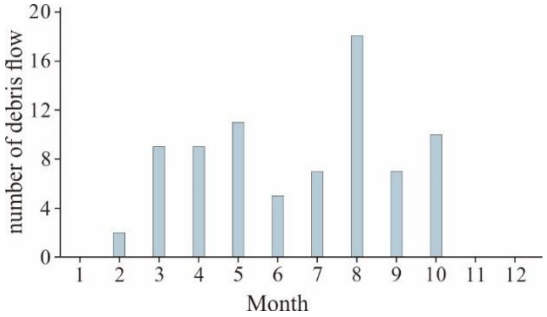


Fig. 6. Statistical results on the monthly frequency of debris flows in YUSV from 1950 to 2021

Driving factors of spatial variations of debris flows

Weight result of driving factors

Using Geodetector, the geodetector is generally classified into six categories: topography, lithology, fault, meteorological conditions, vegetation and land use, based on the aforementioned six characteristic variables related to debris flows (Fig. 2). Analyze the contribution of different driving factors to the spatial distribution of debris flows. The results show that precipitation, fault density and slope are the three factors with the largest q values (Table 1). These three factors also correspond to climate conditions, fault, and topography respectively.

Table 1. Impact factor *q*-values based on the Geodetector

Independent variable	Slop	NDVI	Precipitation	Fault density	Land using type	Lithology
q-value	0.026	0.020	0.058	0.036	0.019	0.010

Analysis of main driving factors

(1) Climate

As mentioned before, the debris flows in the YUSV generally show spatial differentiation characteristics of strong in the north and weak in the south. The occurrence of rainfall-type debris flows is closely related to climatic conditions. In fact, the multi-year average rainfall values in the study area also show very significant north-south differentiation characteristics (Fig. 2*e*). Taking Liuku as the boundary, the precipitation in the north of Liuku is significantly greater than that in the south of Liuku. The trend is increasing from the north of Liuku to Gongshan. Gongshan has the highest average annual rainfall, reaching 1800 mm/a. The trend is generally decreasing from the south of Liuku to Zhenkang, Lincang city, and in Zhenkang county, Lincang City reached the lowest value, about 700 mm/a (Fig. 2*e*). Therefore, as the factor with the largest influence, the climatic conditions in the YUSV largely determine the spatial differentiation characteristics of debris flow distribution.

(2) Fault

There are a large number of faults developed in the Salween Basin, including the Nujiang fault and other secondary faults (Fig. 1). Due to the significant differences in fault scale and activity, the Nujiang fault has a significant impact on the rock strength and topography of the fault zone and surrounding areas. The degree of influence is much greater than that of other faults, and this feature can also be clearly seen in the fault density map formed after fault classification (Fig. 2*d*). The overall trend of the Nujiang fault is nearly north-south, and it has different spatial intersection relationships with the valleys on both sides of the Salween main stream, which also affects the contribution of the fault to the occurrence of debris flows to a certain extent. From the junction of Yunnan and Tibet southward to Pihe, the Nujiang fault basically extends along the main stream valley, and the number, scale, and frequency of debris flows on both sides are relatively even (Fig. 1). Debris flows from Pihe to the south to Shangjiang are mainly distributed on the left bank of the main stream of the Upper Salween River. This spatial differentiation feature may be largely controlled by the Nujiang fault (Fig. 7).

(3) Topography

Due to differences in regional uplift rates and climate, the topographic and geomorphological characteristics of the valleys on both sides of the YUSV are significantly different from north to south. In fact, not only the slope factor (Fig. 2*a*), but also factors such as relative height difference show similar north-south differences, which results in different topographic and geomorphological conditions of debris flows in the north and south of the main stream of the upper Salween River. It is obvious that the average slope of the debris flow gully basin is higher. The larger the relative height difference, the more favorable it is for the occurrence of debris flows. Based on the comparative analysis of statistical data, the topography of the 103 debris flows in the study area is very different. The results show that the average slope and relative height difference of the 73 debris flows in the northern area are significantly larger than those in the southern area (Fig. 8), which is roughly bounded by Shangjiang town. The spatial differentiation of debris flows in the Yunnan section of the YUSV is closely related to topographic and geomorphological conditions.

The open circles represent the relative height difference, and the open triangles represent the average slope.

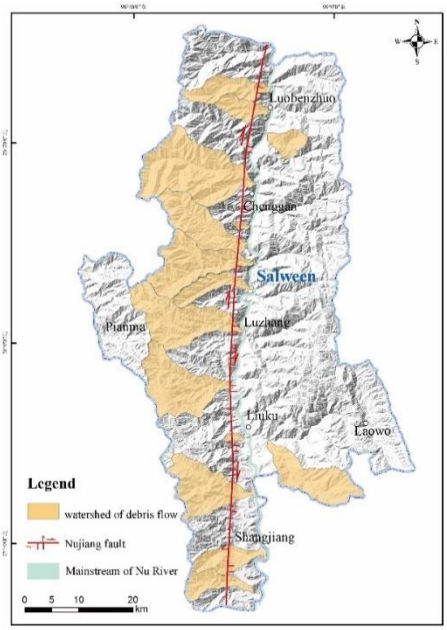


Fig. 7. Spatial distribution relationship between major debris flows and Nujiang fault zone

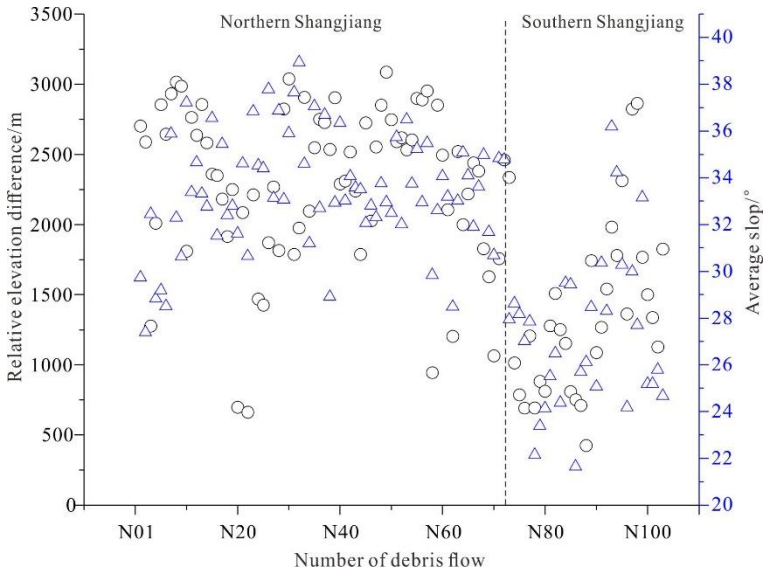


Fig. 8. Comparison of geomorphologic parameters of northern and southern debris flows in YUSV

Driving factors of temporal variations of debris flows

Precipitation

The study area is dominated by rainfall-type debris flows, and the occurrence of debris flows in the area is closely related to changes in climatic conditions. Based on the statistical results of the annual frequency of major debris flow events from 1950 to 2021, it can be concluded that before 1980, except for the frequent debris flow events in 1952 and 1979, interannual debris flow outbreaks in the study area were relatively rare. After 1980, the frequency of debris flow disaster outbreaks in the study area was low in the 1980s and 1990s. After 2000, the outbreak period ushered in, and the frequency of outbreaks was significantly higher than in previous years. From 2001 to 2003, the frequency of debris flow outbreaks was low. In the three years from 2004 to 2006, the frequency of debris flow disasters was high. From 2007 to 2009, the activity of debris flow was low. From 2010 to 2012, the frequency of debris flow disasters in the study area was the most frequent. During the period of frequent disasters, especially in 2010, the frequency of debris flow disasters was the highest, causing heavy casualties and property losses; in 2013, the frequency of debris flow disasters was relatively low, and then increased significantly from 2014 to 2016, and from 2017 to 2019, the frequency of debris flow disasters increased again. There was a relative lull, but an outbreak occurred again in 2020, with 14 debris flow gullies recorded in a single year. It can be concluded that the overall trend of debris flow disasters in the high-mountain canyons in the YUSV is becoming more active, although the average annual rainfall in this region has no significant increasing trend [*Fan et al., 2012; Liu et al., 2017; Yang et al., 2021*], but extreme rainfall events show a clear upward trend (Fig. 9). The occurrence of debris flows since 2000 has a certain periodicity, and the cycle is roughly three years. This cycle is also consistent with the rainfall cycle of the main stream of the upper Salween River obtained based on the Daojieba site [*Liu et al., 2017*].

In terms of the seasonal pattern of debris flow outbreaks, the climate in the study area is a warm temperate plateau monsoon climate. Affected by the warm and humid air flow from the Indian Ocean, water and heat appear at the same time. The rainy season in the study area can last up to 9 months, but rainfall characteristics are inconsistent in different regions. Taking Liuku, Fugong and Gongshan, where debris flows are most common in the study area, as examples, the monthly rainfall in Liuku is unimodal, with the rainy season from May to October, while Fugong and Gongshan are bimodal, with rainfall begins to increase significantly from mid-February every year, reaches the maximum value around late March, and then

gradually decreases. There is another peak period from June to September, which provides good meteorological conditions for the development of geological disasters. Monthly rainfall trend is basically consistent with the monthly time scale outbreak frequency trend of debris flow calculated in this article (Figs. 6, 10). Therefore, the time pattern of debris flow occurrence in the study area is consistent with the pattern of concentrated rainfall and has obvious seasonality. It generally occurs in the rainy season from March to October. Debris flow disasters account for more than 80% of all debris flow disasters in the area (Fig. 6).

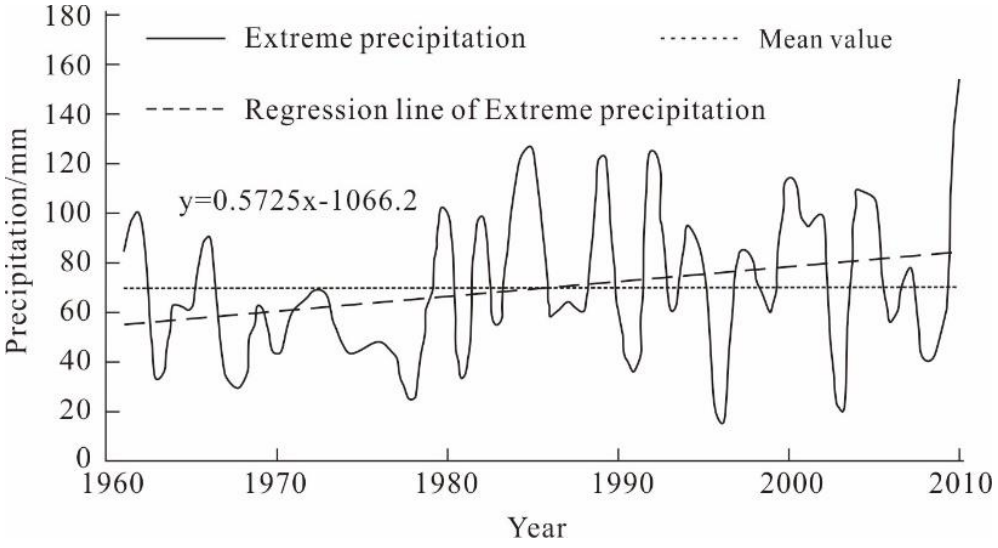


Fig. 9. Trend in rainstorm in the Yunnan section of Nu River Basin [*Liu et al., 2019*]

It should be pointed out that although the occurrence pattern of debris flow in the study area is consistent with the monthly rainfall pattern, occasional extreme rainfall often triggers concentrated outbreaks of debris flow events. For example, extreme rainfall in October 1989 caused a large number of debris flows, destroying 1,397 houses, killing 17 people, and causing direct economic losses of 36 million yuan [*Tang et al., 2003*]. The rainfall for four consecutive days from May 24 to 27, 2020 reached 348.2 mm, which was the largest continuous heavy rainfall weather process in Gongshan since meteorological records were recorded. The concentrated heavy rainfall caused 208 new geological disasters in Gongshan. Among them, 65 were new debris flows [*Tie et al., 2021*].

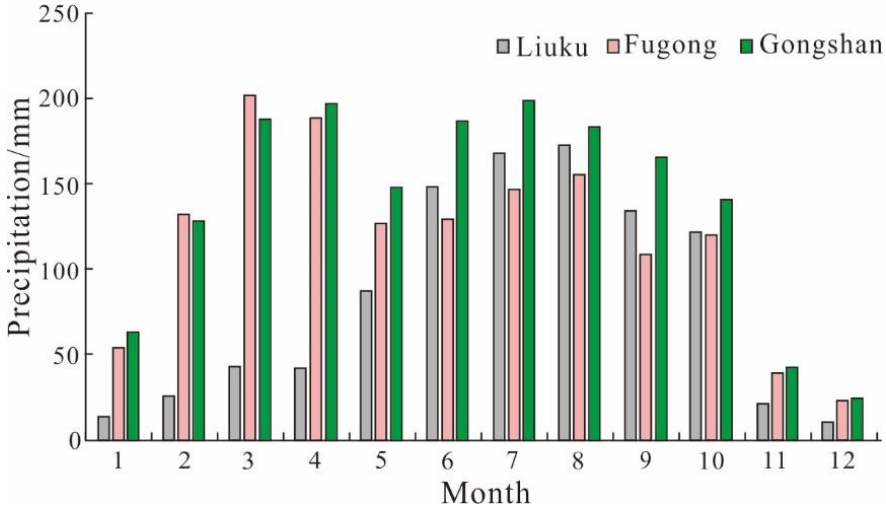


Fig. 10. Comparison of average monthly rainfall in typical towns in YUSV

Earthquake

In areas where rainfall-type debris flows are prone to occur, an outbreak period of debris flows often following some exact earthquakes [*Tang, 2008; Cui et al., 2013; Zhang et al., 2023*]. The YUSV is generally located in the Tengchong-Longling seismic zone in western Yunnan. The two earthquake events that have had the greatest impact on the study area since 1950 are the Motuo earthquake in 1950 and the Tengchong, Luxi earthquakes in Yunnan in 1976. After the earthquake, the study areas all ushered in a period of debris flow outbreaks. Two years after the 1950 Motuo earthquake, in 1952, there was a concentrated outbreak period of debris flows in the study area, and they were all located in areas closer to the epicenter such as Fugong and Gongshan. From May to July 1976, five earthquakes of magnitude 6 or above occurred in Tengchong and Luxi, Yunnan, with the maximum magnitude Ms6.6 [*China Seismological Network, 2023*]. Three years after the earthquake, in 1979, the debris flow in the YUSV ushered in an explosive period, there were 9 major debris flow events recorded in a single year, causing a large number of casualties and property losses (Fig. 5, Table 1). Therefore, earthquakes are a very important indirect triggering factor for debris flows in the study area. After the earthquake, the study area will usher in a concentrated outbreak period of debris flows.

Conclusion

(1) Debris flows in the YUSV generally show spatial differentiation characteristics of strong in the north and weak in the south. The debris flow-prone section is bounded by Shangjiang town, Lushui city, and the section from Shangjiang to Bingzhongluo is a section prone to large-scale and high-frequency debris flows. The main controlling factors of spatial variation are climate conditions, fault structures, and topography.

(2) Since 1950, debris flow disasters in the high-mountain canyons of the YUSV have generally shown an increasingly active trend, but there has been a surge in debris flow outbreaks in some years. March to October in every year is the period of concentrated debris flow outbreaks. Rainfall and earthquakes are the main factors controlling the temporal variation of debris flows.

(3) Debris flow activity has shown an activity cycle of about 3 years since 2000, which is generally consistent with the precipitation activity cycle. Rising extreme rainfall and sudden strong earthquakes will trigger concentrated outbreaks of debris flows and require much attention.

Acknowledgments

The field work was supported by Nujiang Prefecture Natural Resources and Planning Bureau, Baoshan City Natural Resources and Planning Bureau, and Fugong County Natural Resources and Planning Bureau. RapidEye and Planet remote sensing images came from Planet Company, and Google Earth images came from Google Company.

References

Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhang Jianqiang, Yang zongji, You Yong, Fan Jianrong, Su Fenghuan, Kong Yingde, Zhu Xinghua. 2013. Activities and Tendency of Mountain Hazards Induced by the Ms7.0 Lushan Earthquake, April 20, 2013. Journal of Mountain Science, 31(3): 257–265 (in Chinese with English abstract).

CEIC. 2023. Chinese historical earthquake catalog [EB/OL]. https://www.ceic.ac.cn/history (in Chinese).

Fan Hui, He Daming. 2012. Regional climate and its change in the Nujiang River basion. Acta Geographyca Sinica, 67 (05): 621–630 (in Chinese with English abstract).

Feng Qianqian. 2020. The formation environment and disaster trend research with debris flow in Bingzhongluo-Pihe of Nujiang River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–122 (in Chinese with English abstract).

Guo Rongfen, Luo Yan, Tang Sheng. 2015. Analysis on the causes of mudslides in Fugong on May 10, 2014. Journal of Catastrophology. 30 (1): 102–107 (in Chinese with English abstract).

Hong Meiling, He Shi Hua. 2019. Spatial and temporal change of rainfall in Nujiang basin in recent 50 years. Research of Soil and Water Conservation, 26 (03): 248–252 (in Chinese with English abstract).

Huang Jiangcheng, Xu Huijuan, Duan Xingwu, Li Xu, Wang Peijia. 2020. Activity patterns and controlling factors of debris flows in the Upper Salween Alpine Valley, Natural Hazards, 103:1367-1383, DOI: 10.1007/s11069-020-04039-z.

Kirschbaum D, Stanley T, Zhou Y P .2015. Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. Geomorphology. 249:4–15. https ://doi.org/10.1016/j.geomo rph.2015.03.016

Kong Yan, Wang Baoyun, Yang Kun, Wei Bao, Zheng Lu, Zhang Zhuhong. 2018. Analysis on the spatial-temporal distribution and the typical areas disaster-pregnant features of debris flows in Yunnan Province. Journal of Yunnan Normal University, 38(06): 55–63 (in Chinese with English abstract).

Kong Yan, Wang Baoyun, Wang Naiqiang, Wei Bao. 2019. Debris flow risk assessment in the alpine canyon of western Yunnan: a case study in Nujiang Lisu autonomous prefecture. Journal of Yunnan Normal University, 39(3): 63–70 (in Chinese with English abstract).

Li Guangtao. 2008. Tectonics activity of the Nujiang fault zone in Quaternary in the southern Yunnan[D]. Beijing: Institute of Earthquake forecasting, CEA, 1–74 (in Chinese with English abstract).

Liu X L, Yu C J, Shi P J, Fang W H. 2012. Debris flow and landslide hazard mapping and risk analysis in China. Front Earth Sci 6:306–313. https ://doi.org/10.1007/s1170 7-012-0328-9.

Liu Xinyou, Li Zishun, Liu Yongxing, Xie Feifan. 2017. Analysis of temporal and spatial variation of rainfall in Yunnan province of Nujiang River basin. Yangtze River, 46 (18): 39–44 (in Chinese with English abstract).

Liu Suxia, Ding Wenhao, Mo Xingguo, Wang Sheng, Liu Changming. Luo Xian, He Daming. 2017. Climate change and its impact on runoff in Lancang and Nujiang River basin. Climate Change Research, 13(04): 356–365 (in Chinese with English abstract).

Li Shun, Yin Changqing, Guilmette Carl, Ding Lin, Zhang Jian. 2019. Birth and Demise of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean: A Review from the Gerze Area of Central Tibet. Earth-Science Reviews 198: 102907.

Liu Cunxi, Wang Baoyun. 2024. Gully-type debris flow susceptibility assessment based on a multi-channel multi-scale residual network fusing multi-source data: a case study of Nujiang Prefecture. All Earth, 36:1, 1–18. DOI: 10.1080/27669645.2023.2292311.

Simoni A, Mammoliti M, Berti M. 2011. Uncertainty of debris flow mobility relationships and its influence on the prediction of inundated areas. Geomorphology. 132(3–4): 0-259. https ://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.05.013

Su Pengcheng, Wei Fangqiang, Xie Tao. 2012. Causal analysis of debris flow on August 18, 2010 in Gongshan, Yunnan province and its harm to the development and utilization of mineral Resources. Resource Science, 34 (7): 1248–1256 (in Chinese with English abstract).

Tang Chuan, Zhu Jing. 2003. Study on debris flow and landslide in Yunnan province[M]. Beijing: The Commercial Press, 14–25 (in Chinese).

Tang Chuan. 2005. Susceptibility spatial analysis of debris flows in Nujiang River basin of Yunnan. Geological Research, 24 (2):178–185 (in Chinese with English abstract).

Tang Chuan, Liang Jingtao. 2008. Characteristics of Debris flows in Beichuan Epicenter of the Wenchuan Earthquake Triggered by Rainstorm on September 24 2008. Journal of Engineering Geology.16(6): 751–758 (in Chinese with English abstract).

Tang Y J, Xu Z M, Yang T Q, Zhou ZH, Wang K, Ren Z, Yang K, Tian L. 2018. Impacts of small woody debris on slurrying, persistence, and propagation in a low-gradient channel of the dongyuege debris flow in nu river, southwest China. Landslides 15:2279–2293. https ://doi.org/10.1007/s10346-018-1036–7.

Tie Yongbo, Ruan Chongfei, Yang Shun, Zeng Bo, Zhang Hongbing, Li Fuqiang, Sun Jinfeng, He Zhenqiang. 2021. Characteristics and Mechanism of geological disasters induced by “5.25” Rainstorm in Gongshan county of Yunnan province. Bulletin of Soil and Water Conservation, 41 (2): 10–24 (in Chinese with English abstract).

Wang Yanzhao, Wang Enning, Shen Zhengkang, Wang Min, Gan Weijun, Qiao Xuejun, Meng Guojie, Li Tieming, Tao Wei, Yang Yonglin, Cheng Jia, Li Peng. 2018. Constrained inversion of present-day activity rates of major ruptures in Sichuan and Yunnan based on GPS data, 38(5): 582–597 (in Chinese).

Wang Jinfeng, Xu Chengdong. 2017. Geodetector: Principle and Prospective. Acta Geographica Sinica, 72(1): 116–134 (in Chinese with English abstract).

Wang Gaofeng, Gao Youlong, Yao Yahui, Tian Yuntao, Xu Youning, Sun Xiujuan, Li Ruidong, He Yuanxiao, Deng Bing, Ye Zhennan, Chen Zongliang, Guo Ning. 2022. Prediction model of potential debris flow hazard of rainfall type in Bailong River Basin, Gansu Province. GEOLOGY IN CHINA, 49(3): 732–748. DOI: 10.12029/gc20220305 (in Chinese with English abstract).

Wan Feipeng, Yang Weimin, Qiu Zhanlin, Xiang Lingzhi, Qu Jingkai, Wu Jihuan, Zhang Tiantian. 2023. Disaster mechanism and evolution of Nagune Gully landslide-debris flow disaster chain in Minxian County, Gansu Province. GEOLOGY IN CHINA, 50(3): 911–925. DOI: 10.12029/gc20220323005 (in Chinese with English abstract).

Xu Huijuan. 2016. Study on debris-flow activity patterns and hazard driving forces of the alpine valley area in Nujiang River basion[D]. Kunming: Yunnan University, 1–112 (in Chinese with English abstract).

Xu Fanshu, Wang Baoyun. 2022. Debris flow susceptibility mapping in mountainous area based on multi-source data fusion and CNN model – taking Nujiang Prefecture, China as an example. International Journal of Digital Earth, 15:1, 1966-1988. DOI: 10.1080/17538947.2022.2142304.

Yang Yingdong, Tang Pei, Xiao Huazong, Yan Xiangsheng. 2017. Preliminary Analysis on Relationships between Geo-hazards and River Systems of Yunnan Province. Journal of Catastrophology, 32(3): 36–39 (in Chinese with English abstract).

Yang Shun, She Tao, Zhang Yong, Liu Jiankang. 2021. The research on the hazard risk of blocking river in Nujiang great valley, Yunnan province. Geological Review. 67 (s1): 25–27(in Chinese).

Yang Fan, Lu Hui, Yang Kun, Huang Guangwei, Li Yishan, Wang Wei, Lu Ping, Tian Fuqiang, Huang Yugang. 2021. Hydrological characteristics and changes in the Nu-Salween River basin revealed with model-based reconstructed data. Journal of Mountain Science. 18. 2982–3002. 10.1007/s11629-021-6727-1.

Zhang WanCheng, Xiao Ziniu, Zheng JianMeng, Ren Juzhang. 2007. Characteristics of the Nujiang River Runoff for a Long Term and its Response to Climate Change. Chinese Science Bulletin 52 (2): 156–163.

Zhou Zhenhua, Ren Zhe, Wang Kun, Yang Kui, Tang Yongjun, Tian Lin, Xu Zemin, 2018. Effect of excess pore pressure on the long runout of debris flows over low gradient channels: A case study of the Dongyuege debris flow in Nu River, China, Geomorphology, 308, 40. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.01.01253.

Zhang Jiajia, Chen Long, Li Yuanling, Liu Mingsheng, Shi Shengwei, Yi Jingsong, Zhang Wen, Zhang Shilin, Sun Jinhui, Yang Dong, Xian Jieliang, Cai Jiajun. 2023. Development characteristics and controlling factors of coseismic geohazards triggered by the Luding MS6.8 earthquake occurred on September 5, 2022. Acta Seismologica Sinica, 45(2): 167–178. DOI: 10.11939/jass.20220215 (in Chinese with English abstract).

Численное моделирование волн, вызванных сходом оползня или связного селя в водохранилище

Л. Чжао

Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия, l.chzhao1@g.nsu.ru

Аннотация. Приведены результаты численного моделирования возникновения поверхностных волн в водохранилище при сходе в него берегового надводного оползня. Простая математическая модель, описывающая движение оползня по криволинейному береговому склону с последующим его входом в водоем и движением по дну водоема, является универсальной и позволяет использовать ее также и для исследования движения связных селей по криволинейным наклонным руслам. Модели оползня и селя отличаются только значениями определяющих параметров. Эти параметры разные для случаев движения оползня или связного селя по береговому склону или по дну водоема. Конкретные значения параметров модели корректировались, чтобы приблизить результаты численного моделирования к данным реальных событий. Например, для модели надводного оползня использовались результаты натурных обследований последствий схода берегового оползня в водохранилище Бурейской ГЭС, случившимся 11 декабря 2018 г. и вызвавшим крайне разрушительную волну, похожую на цунами. Для случая плоского берегового склона и рельефа дна водохранилища получено точное решение дифференциальных уравнений модели. Для расчета поверхностных волн применяется явная схема предиктор-корректор на подвижной сетке, основанная на одномерной модели мелкой воды. Показано, что неровность дна водоема оказывает заметное влияние на высоту генерируемых волн.

Ключевые слова: *береговой оползень, связный сель, водохранилище, поверхностные волны, уравнения мелкой воды, численный алгоритм, подвижные сетки, результаты расчетов*

Ссылка для цитирования: Чжао Л. Численное моделирование волн, вызванных сходом оползня или связного селя в водохранилище. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 550–562.

Numerical modeling of waves caused by a landslide or debris flow in a reservoir

L. Zhao

Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, l.chzhao1@g.nsu.ru

Abstract. The results of numerical simulation demonstrate the occurrence of surface waves in a reservoir when a subaerial landslide descends into it. A simple mathematical model that describes this landslide along a curved coastal slope with its subsequent entry into the reservoir and the subaqueous movement along the bottom of the reservoir is universal. This model can also be applied to study the movement of viscous debris flows along curvilinear channels. The distinction between the model of landslide and debris flow is only in the values of the defining parameters. According to the different situations, which are the landslides along a coastal slope or the bottom of a reservoir, and moving debris flow along a coastal slope or the bottom of a reservoir, parameters are dissimilar. Specific values of the model parameters were adjusted to bring the numerical simulation results closer to the actual data. For example, on December 11, 2018, a coastal landslide occurred at the hydroelectric power plant of the Bureya Dam, created a highly destructive tsunami

wave. The model parameters for this event were modified based on the results of field investigations. For the case of a flat coastal slope and the topography of the reservoir bottom, an exact solution of the model differential equations was obtained. An explicit predictor-corrector scheme on a moving grid based on a one-dimensional shallow water model is utilized for computing surface waves. It was observed that the unevenness of the bottom of the reservoir has a significant effect on the generated wave heights.

Key words: *coastal landslide, viscous debris flow, reservoir, surface waves, shallow water equations, numerical algorithm, moving grids, calculation results.*

Cite this article: Zhao L. Numerical modeling of waves caused by a landslide or debris flow in a reservoir. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 550–562.

Введение

Цель работы заключалась в проведении численного моделирования возникновения поверхностных волн в водохранилище при сходе в него берегового надводного оползня или связного селя. Актуальность этого направления исследований связана с тем, что сели и оползни являются одними из самых опасных и распространенных стихийных бедствий [*Михайлов и Черноморец, 2011; Ward et al., 2011*].

Надводные оползни являются более мобильными по сравнению с подводными, поскольку в воде эффект действия силы тяжести уменьшается из-за плавучести (действие силы Архимеда), а также потому, что вязкое сопротивление в воде намного больше, чем в воздухе. Поэтому надводные оползни движутся с существенно большей скоростью, чем подводные с той же массой, и при входе в воду они могут генерировать очень высокие волны. Оценка опасности оползневых цунами, возникающих при сходе надводного оползня в водохранилище, включает анализ геологических полевых данных [*Коковкин, 2020; Кулаков и др., 2019; Махинов и др., 2019; Gusiakov et al., 2021; Huang et al., 2016; Higman et al., 2018; Sepulveda et al., 2009*] в сочетании с численным моделированием [*Fructus et al., 2007; Paris et al., 2019; Xu et al., 2021*] или лабораторными экспериментами [*Cea et al., 2004; Lindstrom et al., 2014; Ma et al., 2013; Mohammed et al., 2012*] для оценки устойчивости склонов, понимания механизмов возникновения оползня и сценариев его движения по склону, а также механизмов генерации и распространения волн в водохранилище.

В настоящей работе предлагается простая математическая модель и численный алгоритм для расчета движения оползня по неровному береговому склону и неровному дну водохранилища, для расчета поверхностных волн, вызванных входом оползневой массы в водоем, и некоторые результаты численного моделирования поверхностных волн, возникших при обрушении берегового склона водохранилища Бурейской ГЭС 11 декабря 2018 г. Эта же модель может использоваться для исследования движения связных селей.

Уравнения движения оползня

Для описания движения оползня по криволинейному склону часто используется модель движения твердого недеформируемого тела по плоскому склону [*Ataie-Ashtiani et al., 2011; Delis et al., 2011*]. В работе [*Ma et al., 2013*] оползни моделируются водно-песчаными смесями, в [*Sabeti et al., 2022*] создана численная модель движения зернистого оползня, а в [*Ward et al., 2011*] в качестве модели оползня взято множество упруго взаимодействующих между собой твердых шаров. В сообщении [*Иванова и др., 2020*] движение оползня по склону рассматривалось как поток сыпучего материала, в книге [*Khakimzyanov et al., 2020*] предложена модель трехмерного деформируемого

подводного оползня, модификация которой используется в настоящей работе для описания движения надводного оползня. Обзор существующих математических моделей и созданных на их основе комплексов программ дан в книге [*Михайлов и Черноморец, 2011*].

В настоящей работе движение оползня по склону рассматривается в одномерном приближении, при котором параметры потока оползневой массы зависят только от одной пространственной координаты, а горный склон представляется «одномерной» поверхностью. Эта модель является одной из простейших в иерархической цепочке моделей, каждая из которых обобщает предыдущие [*Шокин и др., 2020*]. В одномерном приближении можно выполнять моделирование в системе координат *Oxz* с вертикальной осью *Oz* и горизонтальной *Ox* , в которой поверхность реального горного склона, изображенного на рис. 1*а*, представляется в виде кривой *1* (рис. 1*б*), заданной функцией

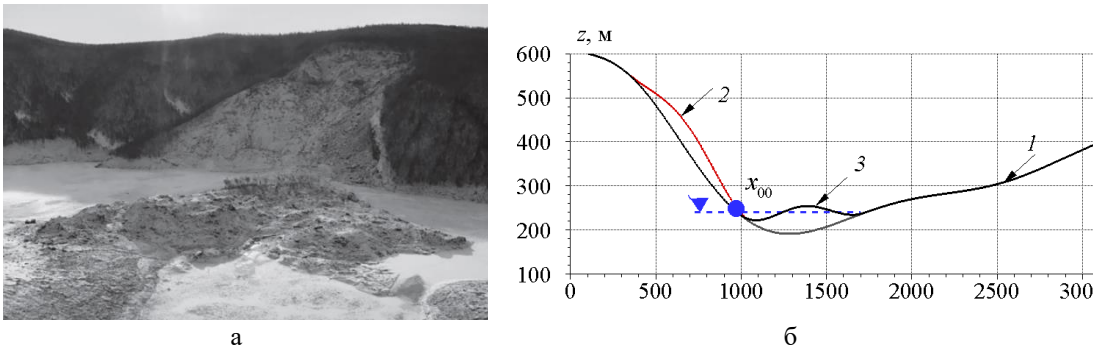
$$z = h_{\mathrm{bt}}(x), \qquad x \ge 0. \tag{1}$$

На рис. 1*б* изображена форма оползня в начальный момент времени $t = 0$, расположенного на левом береговом склоне. Форму оползня будем описывать функцией $z = h_{\mathrm{sl}}(x,t)$. В начальный момент времени форма оползня известна: $z = h_{\mathrm{sl}}(x,0) = h_{\mathrm{sl}}^0(x)$. В настоящей работе будет использоваться представление оползня в виде квазидеформируемого тела [*Khakimzyanov et al., 2020*]. Это означает, что в каждый момент времени форма оползня определяется формулой

$$h_{\mathrm{sl}}(x,t) = h_{\mathrm{sl}}^0\left(x + x_c^0 - x_c(t)\right), \tag{2}$$

где $x_c(t)$ – абсцисса некоторой фиксированной точки $\mathbf{x}_c(t) = \left(x_c(t),\, z_c(t)\right)$ оползневой массы (например, центра масс), движущейся по искривленному склону (1), x_c^0 – абсцисса этой точки при $t = 0$, $x_c(0) = x_c^0$. Таким образом, оползневая масса ограничена снизу твердым склоном (1), а сверху – поверхностью

$$z = h_{\mathrm{bt}}(x) + h_{\mathrm{sl}}(x,t).$$



а б

Рис. 1. Изображения реального рельефа горного склона (а) и одномерного рельефа (б) береговых склонов и дна водохранилища (1) с оползневой массой в начальный момент времени на левом береговом склоне (2) и в момент остановки оползня в водохранилище (3)

Для описания движения оползневой массы достаточно найти закон движения $x = x_c(t)$ выделенной точки. Этот закон будем искать как решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений, полученных путем модификации известных уравнений движения подводного квазидеформируемого оползня [*Beisel et al., 2012; Khakimzyanov et al., 2020*]. Надводный оползень вначале скользит по береговому

склону, а в водоеме он перемещается только на финальной стадии движения. Поэтому характеристики движения надводного оползня будут другими, чем в случае подводного, и для их исследования решаются следующие уравнения:

$$\frac{dx_c(t)}{dt} = u(t)\ , \tag{3}$$

$$\frac{d}{dt}\left(g_{11}(x_c(t))u(t)\right) = \frac{g'_{11}(x_c(t))}{2}u^2(t) - \\ -\left[g\left(I_1(t)+\sigma I_2(t)\right)+\sigma u^2(t)\left(\gamma I_3(t)+\frac{T}{2}C_{\text{res}}(x_c(t))g_{11}(x_c(t))\right)\right]\frac{\sqrt{g_{11}(x_c(t))}}{\left(\gamma + C_{\text{add}}(x_c(t))\right)S_0}, \tag{4}$$

где $u(t)$ – скорость движения оползня в горизонтальном направлении, g – ускорение свободного падения, T – максимальная толщина оползня в вертикальном направлении, $\sigma = \operatorname{sgn} u$, $g_{11} = 1 + (h'_{\text{bt}})^2$ – компонента метрического тензора, отвечающая за геометрические характеристики криволинейного рельефа, $g'_{11} = dg_{11}/dx$, $h'_{\text{bt}} = dh_{\text{bt}}/dx$, $\gamma = \rho_{\text{sl}}/\rho_{\text{w}} > 1$, ρ_{w} – плотность воды, ρ_{sl} – плотность оползневой массы, S_0 – площадь продольного сечения оползня плоскостью Oxz,

$$S_0 = \int_{x_l(t)}^{x_r(t)} h_{\text{sl}}(x,t)\,dx = \int_{x_l(0)}^{x_r(0)} h^0_{\text{sl}}(x)\,dx = \text{const}\ ,$$

где $x_l(t)$ и $x_r(t)$ – соответственно левая и правая границы оползневой массы в момент времени $t \ge 0$, которые, согласно (2), вычисляются по формулам $x_{\text{l}}(t) = x_{\text{l}}(0) + x_c(t) - x_c^0$ и $x_{\text{r}}(t) = x_{\text{r}}(0) + x_c(t) - x_c^0$, при этом $x_c(t) \in \left(x_{\text{l}}(t), x_{\text{r}}(t)\right)$.

Уравнение движения (4) является интегро-дифференциальным, поскольку в него входят интегралы, зависящие от искомого решения:

$$I_1(t) = \int_{x_l(t)}^{x_r(t)} G_1(x)h_{\text{sl}}(x,t)\frac{h'_{\text{bt}}(x)}{\sqrt{g_{11}(x)}}\,dx\ , \qquad I_2(t) = \int_{x_l(t)}^{x_r(t)} G_1(x)G_2(x)\frac{h_{\text{sl}}(x,t)}{\sqrt{g_{11}(x)}}\,dx\ ,$$

$$I_3(t) = \int_{x_l(t)}^{x_r(t)} G_2(x)h_{\text{sl}}(x,t)\frac{h''_{\text{bt}}(x)}{\sqrt{g_{11}(x)}}\,dx\ ,$$

где функция $G_1(x)$ указывает на то, что сила Архимеда, выталкивающая оползневую массу из воды, действует только на те части оползневой массы, которые вошли в воду, и не действует на надводную часть оползня,

$$G_1(x) = \begin{cases} \gamma, & \text{если} \quad x \le x_{00}, \\ \gamma - 1, & \text{если} \quad x > x_{00}, \end{cases} \qquad G_2(x) = \begin{cases} C_{\text{fr},1}, & \text{если} \quad x \le x_{00}, \\ C_{\text{fr},2}, & \text{если} \quad x > x_{00}, \end{cases}$$

где через x_{00} обозначена абсцисса точки уреза на левом берегу водохранилища (см. рис. 1*б*). Функция $G_2(x)$ связана с коэффициентом трения, который будет разным на склоне и в водохранилище. Поэтому используются два значения коэффициента трения скольжения: $C_{\text{fr},1} = \operatorname{tg}\theta_{*,1}$ для надводной части оползня и $C_{\text{fr},2} = \operatorname{tg}\theta_{*,2}$ – для подводной, $\theta_{*,1} > \theta_{*,2}$.

В правой части уравнения (4) присутствует функция $C_{\text{res}}(x)$, в которой учитывается отличие сопротивлений окружающей среды при движении оползня в воздухе и в воде:

$$C_{\text{res}}(x)=\begin{cases}0, & \text{если} \quad x\le x_{00},\\ C_{\text{d}}, & \text{если} \quad x>x_{00}.\end{cases}$$

Таким образом, предполагается, что сопротивление воздуха пренебрежимо мало, а сопротивление воды определяется постоянным коэффициентом сопротивления $C_{\text{d}}>0$.

Наконец, в уравнении (4) учитывается также присоединенная масса воды при движении подводной части оползня. Коэффициент присоединенной массы $C_{\text{w}}>0$ становится значительным только при входе оползня в воду, для надводной части он пренебрежимо мал в силу относительно малой плотности воздуха. Этот эффект учитывается функцией

$$C_{\text{add}}(x)=\begin{cases}0, & \text{если} \quad x\le x_{00},\\ C_{\text{w}}, & \text{если} \quad x>x_{00}.\end{cases}$$

Для уравнений (3), (4) ставится задача Коши: в начальный момент времени задается положение x_c^0 оползневой массы и предполагается, что оползень начинает свое движения из состояния покоя:

$$x_c(0)=x_c^0,\ u(0)=0. \tag{5}$$

С помощью модифицированного метода Эйлера нелинейные уравнения (3), (4) решались численно до момента времени $t=t_{\text{кон}}$, когда в результате воздействия на оползень сил трения и сопротивления воды произойдет его остановка: $u(t_{\text{кон}})=0$.

Выполнена верификация численного алгоритма путем сравнения результатов расчетов с точным решением задачи для случая плоского берегового склона (1), который переходит в плоский подводный откос в точке уреза $x=x_{00}$:

$$z=h_{\text{bt}}(x)=z_{00}-(x-x_{00})\text{tg}\,\varphi, \tag{6}$$

где z_{00} – ордината точки уреза, $0<\varphi$ – угол наклона плоского берегового склона. Для такого склона справедливо следующее утверждение.

Лемма. Точное решение задачи (3)–(6) выражается формулами

$$u(t)=\begin{cases}Q_1 t, & \text{если} \quad t\le t_{00},\\ r\cdot\dfrac{r\sinh\left(s(t-t_{00})\right)+Q_1 t_{00}\cosh\left(s(t-t_{00})\right)}{r\cosh\left(s(t-t_{00})\right)+Q_1 t_{00}\sinh\left(s(t-t_{00})\right)}, & \text{если} \quad t>t_{00},\end{cases} \tag{7}$$

$$x_c(t)=\begin{cases}x_c^0+Q_1\dfrac{t^2}{2}, & \text{если} \quad t\le t_{00},\\ x_{00}+\dfrac{r}{s}\ln\left[\cosh\left(s(t-t_{00})\right)+\dfrac{Q_1 t_{00}}{r}\sinh\left(s(t-t_{00})\right)\right], & \text{если} \quad t>t_{00},\end{cases} \tag{8}$$

где

$$Q_1=g\left(\sin\varphi-C_{\text{fr},1}\cos\varphi\right)\cos\varphi,\ r=\sqrt{\frac{2Q_2S_0}{C_{\text{d}}T}}\cos\varphi,\ s=\sqrt{\frac{Q_2C_{\text{d}}T}{2S_0}}\,\frac{1}{\gamma+C_{\text{w}}},$$

$$t_{00} = \sqrt{\frac{2\left(x_{00} - x_c^0\right)}{Q_1}}\ ,\ Q_2 = g(\gamma - 1)\left(\sin\varphi - C_{\mathrm{fr},2}\cos\varphi\right).$$

Валидация математической модели движения оползня выполнена на оцифрованном поперечном сечении (рис. 1*б*) реального рельефа береговых склонов и дна водохранилища Бурейской ГЭС [*Кулаков и др., 2019; Махинов и др., 2019*]. Береговые склоны лежат выше уровня воды $z_{00} = 240{,}3$м, изображенного на рис. 1*б* штриховой линией. Абсцисса точки уреза на левом берегу водоема имеет значение $x_{00} = 976{,}1$ м. Начальная форма оползневой массы (2) задавалась по формуле

$$h_{\mathrm{sl}}^0(x) = \begin{cases} \dfrac{T}{2}\left[1 + \cos\left(\dfrac{2\pi(x - x_c^0)}{b}\right)\right], & \text{если} \quad \left|x - x_c^0\right| \le b/2, \\ 0, & \text{если} \quad \left|x - x_c^0\right| > b/2, \end{cases} \tag{9}$$

где параметр b характеризует длину (вдоль оси Ox) оползневой массы, а T – ее максимальную толщину. Для такой формы оползневой массы площадь S_0 ее продольного сечения вычисляется по формуле $S_0 = bT/2$.

Параметр b выбирался так, чтобы в случае остановки оползня в средней части водохранилища он смог перекрыть его своим телом, как плотиной, что наблюдалось в реальном событии. Исходя из геометрических размеров начальной оползневой массы, приведенных в [*Коковкин, 2020; Кулаков и др., 2019; Махинов и др., 2019*], были взяты следующие значения параметров в (9):

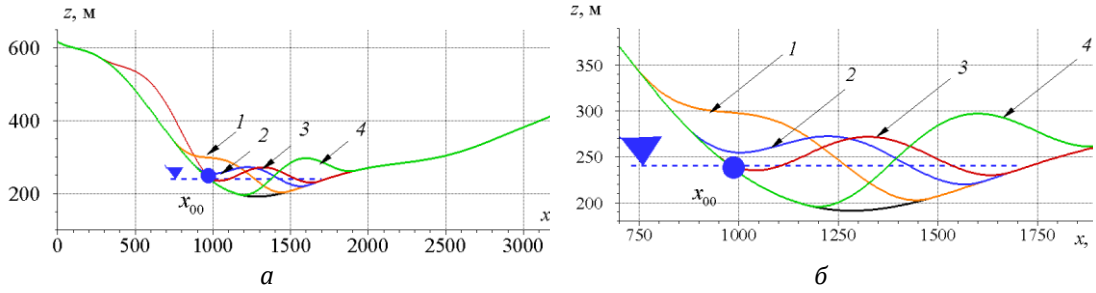
$$b = 750 \text{ м};\ T = 80 \text{ м};\ x_c^0 = 650 \text{ м}. \tag{10}$$

Поверхность начальной оползневой массы с параметрами (10) изображена линией *2* на рис. 1*б*.

Коэффициенты C_{w} и C_{d} влияют на движение оползня только при его движении в воде, поэтому значения этих параметров взяты такими же, как для подводного оползня [*Khakimzyanov et al., 2020*]. Плотность оползневой массы $\rho = 2500$ кг/м^3 указана в работе [*Иванова и др., 2020*]. Таким образом, в расчетах использованы следующие значения параметров:

$$C_{\mathrm{w}} = 1;\ C_{\mathrm{d}} = 1;\ \gamma = 2{,}5. \tag{11}$$

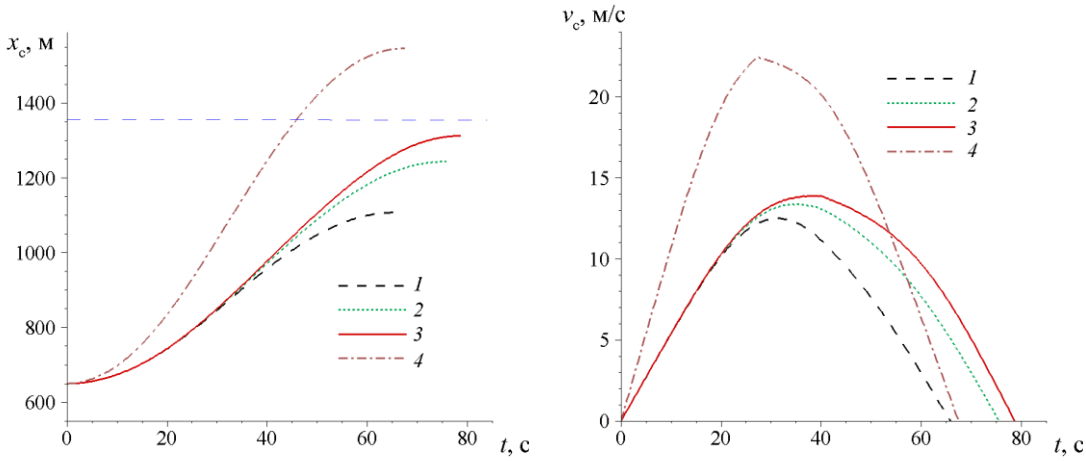
Коэффициенты трения $C_{\mathrm{fr},1}$ и $C_{\mathrm{fr},2}$ подбирались экспериментально так, чтобы при их оптимальных значениях оползень остановился непосредственно в ложе водохранилища. Некоторые результаты расчетов изображены в виде графиков на рис. 2, 3. На рис. 2 показана форма поверхности оползневой массы в момент ее остановки. Видно, что если задать большие значения коэффициентов трения на суше и в воде, то оползень остановится на левом береговом склоне в положении частичного погружения в водохранилище (линия *1*). Если уменьшить значения коэффициентов трения, то он продвинется дальше (линия *2*). При дальнейшем уменьшении этих значений оползень может остановиться в ложе водохранилища так, что он почти перекроет русло (линия *3*), что и было обнаружено во время первого экспедиционного обследования [*Махинов и др., 2019*]. Если задать малые значения коэффициентов трения, то оползень не только сойдет с левого склона и пройдет через водохранилище, но и взойдет на правый береговой склон (линия *4*), что не соответствует реальности.



а *б*

Рис. 2. Форма поверхности оползневой массы в момент остановки в зависимости от коэффициентов трения на береговом склоне и в воде (а) и увеличенный фрагмент (б): 1 – $\theta_{*,1}=25^\circ$, $\theta_{*,2}=15^\circ$; 2 – $\theta_{*,1}=25^\circ$, $\theta_{*,2}=10^\circ$; 3 – $\theta_{*,1}=25^\circ$, $\theta_{*,2}=8^\circ$; 4 – $\theta_{*,1}=22^\circ$, $\theta_{*,2}=5^\circ$

Графики на рис. 3 демонстрируют зависимости от времени абсциссы $x_c(t)$ (траектории центра масс) и скорости $v_c(t)$ движения оползня по криволинейному рельефу. Видно, что при разных значениях коэффициентов трения оползень, начав движение из одного и того же начального положения, может остановиться так, что его центр масс не достигает середины водохранилища (траектории *1*, *2* на рис. 3*а*), достигает (*3*) или существенно преодолевает его. Середина водохранилища обозначена на рис. 3*а* штриховой горизонтальной линией. Также видно, что время движения оползня сильно зависит от коэффициентов трения на суше и в воде, при этом уменьшение трения может приводить как к росту времени движения, так и его уменьшению. Отметим, что с уменьшением коэффициентов трения максимальное значение скорости движения оползня растет. Стоит заметить также, что графики скоростей (см. рис. 3*б*) имеют заметные изломы, что связано с разрывным характером параметров, управляющих движением.



а б

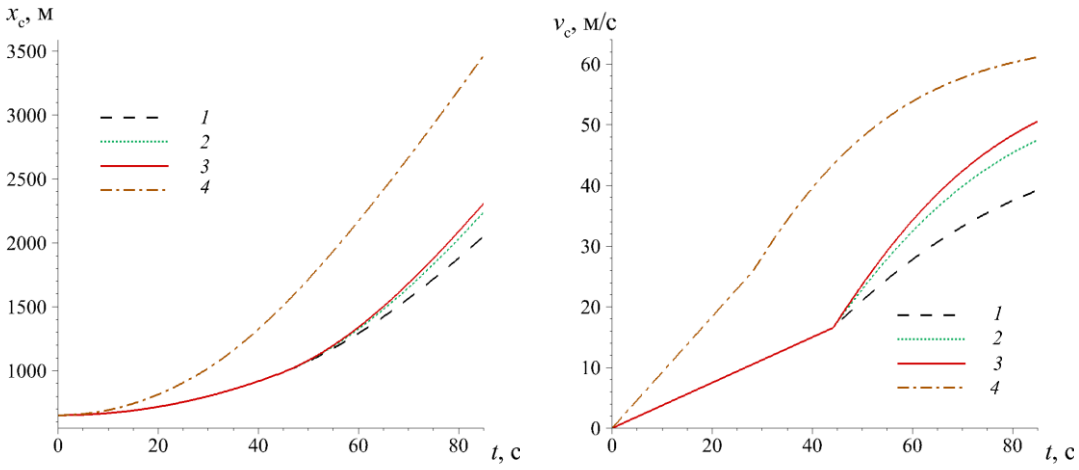
Рис. 3. Траектория (а) и скорость (б) центра масс оползня в зависимости от коэффициентов трения на береговом склоне и в воде: 1 – $\theta_{*,1}=25^\circ$, $\theta_{*,2}=15^\circ$; 2 – $\theta_{*,1}=25^\circ$, $\theta_{*,2}=10^\circ$; 3 – $\theta_{*,1}=25^\circ$, $\theta_{*,2}=8^\circ$; 4 – $\theta_{*,1}=22^\circ$, $\theta_{*,2}=5^\circ$

На основе результатов анализа вычислительных экспериментов для дальнейшего использования был выбран вариант с параметрами

$$\theta_{*,1}=25^\circ,\ \theta_{*,2}=8^\circ. \qquad (12)$$

Окончательному набору параметров (10)–(12) соответствуют линии *3* на рис. 2 и 3. Время движения оползня составляет около 80 с, максимальное значение скорости примерно равно 13 м/с, а перемещение оползневого тела составляет приблизительно 700 м. Эти численные значения удовлетворительно согласуются с оценками работы [*Коковкин, 2020*], в которой приведены результаты полевого изучения последствий Бурейского оползня и утверждается, что имело место почти километровое сравнительно медленное перемещение оползневой массы.

Возникает вопрос, нельзя ли вместо решения задачи о движении оползня по криволинейному склону использовать точное решение (7), (8) задачи о движении оползня по плоскому склону (6) с подходящим наклоном φ. В отличие от криволинейного склона (рис. 3), в плоском случае скорость движения оползня приближается с ростом времени к постоянному положительному значению (рис. 4), т.е. оползень не останавливается, как это наблюдается для криволинейного склона (см. рис. 3*б*), а движется вниз с возрастающей скоростью. Поэтому при решении задач о сходе оползня в водоем нецелесообразно заменять криволинейный береговой склон плоским.



а б

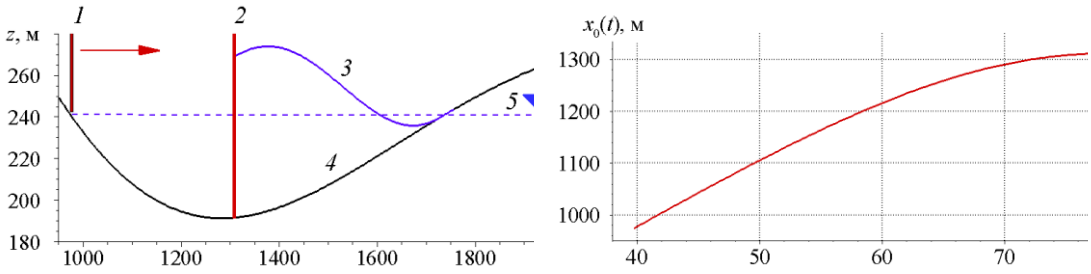
Рис. 4. Траектория (а) и скорость (б) центра масс оползня при движении по плоскому склону (6) с углом наклона $\varphi = 26.983^\circ$: $\theta_{*,1} = 25^\circ$ (1–3), $\theta_{*,2} = 15^\circ$ (1); $\theta_{*,2} = 10^\circ$ (2); $\theta_{*,2} = 8^\circ$ (3); 4 – $\theta_{*,1} = 22^\circ$, $\theta_{*,2} = 5^\circ$

Численное моделирование поверхностных волн, возникающих при сходе берегового оползня в водохранилище

Расчет поверхностных волн, сгенерированных оползнем, выполнялся в рамках модели мелкой воды в одномерном приближении с помощью схемы предиктор-корректор на подвижных сетках [*Федотова и др., 2017*], модифицированной на случай области течения с подвижной границей. В отличие от [*Иванова и др., 2020*], неровность дна водохранилища здесь учитывается.

Задача о генерации волн оползневым телом, входящим в воду, заменяется задачей о генерации волн подвижной левой стенкой бассейна, непроницаемой для воды. В качестве закона движения этой стенки используется закон $x = x_c(t)$ движения центра масс оползня, траектория которого изображена линией *3* на рис. 3*а*. Центр масс достигает точку уреза $x_{00} = 976{,}1$ м при $t_{00} = 39{,}75$ с, далее замедляется и останавливается в момент времени $t_{\text{кон}} = 78{,}75$ с в точке $x_{\text{кон}} = 1312$ м. Часть траектории, соответствующая движению центра масс в воде, и берется в качестве закона движения $x = x_0(t)$ левой вертикальной стенки бассейна (рис. 5*б*). Таким образом,

вертикальная стенка вначале (в момент времени $t = t_{00}$) находится в точке с координатой $x = x_{00}$ (позиция *1* на рис. 5*а*), затем она начинает резкое движение вправо (с ненулевой скоростью около 13 м/с), толкая воду и генерируя поверхностную волну (линия *3* на рис. 5*а*), а в момент времени $t = t_{\text{кон}}$ останавливается (позиция *2* на рис. 5*а*).



а б

Рис. 5. Генерация поверхностных волн при сходе надводного оползня в водохранилище: а – форма модельного водоема; б – траектория движения левой границы расчетной области

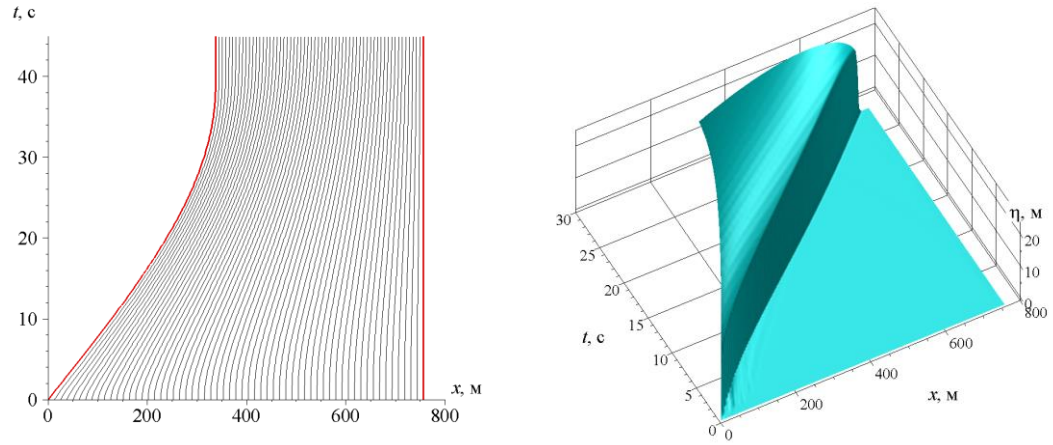
Особый интерес представляют максимальные значения заплеска возникших волн на правый берег водохранилища (противоположный склону, с которого сошел оползень). Для этого необходимо решать сложную нелинейную задачу с подвижной линией уреза на правом берегу [*Khakimzyanov et al., 2016*]. На данном этапе исследований используется упрощенная постановка: вместо наката на берег будет рассматриваться накат волн на вертикальную непроницаемую стенку, установленную на правом берегу водохранилища в точке $l = 1732{,}2$ м, совпадающей с урезом спокойной воды. Таким образом, уравнения мелкой воды решаются в меняющейся во времени области с подвижной левой границей и неподвижной правой.

На рис. 6*а* показаны траектории движения узлов сетки, на рис. 6*б* изображена картина возникающих волн в сдвинутой системе координат с началом в точке x_{00}, z_{00}, t_{00}. Видно, что движение левой стенки модельного водоема генерирует волну в виде бора значительной высоты, который впоследствии распространяется по покоящейся воде со скоростью, большей, чем скорость стенки, поэтому он удаляется от движущейся стенки. В процессе движения бор трансформируется в волну с вертикальным передним фронтом, сглаженной вершиной и пологим задним склоном, при этом крутизна заднего склона волны уменьшается в процессе движения, а протяженность увеличивается.

На рис. 7 показаны изолинии свободной поверхности, по распределению которых можно судить о высоте возникающих волн. Рис. 7*а* соответствует бассейну с горизонтальным дном и средней глубиной водохранилища. Видно, что наибольшую высоту сгенерированная волна имеет в начальные моменты времени. В процессе движения волна удаляется от левой стенки с почти постоянной скоростью, и высота волны уменьшается. На левой стенке уровень воды монотонно уменьшается. В случае неровного дна (рис. 7*б*) картина течения меняется существенно. В начальные моменты времени возникает волна небольшой высоты, которая возрастает при распространении волны в глубоководную часть водохранилища. Кроме того, наибольшее возвышение поверхности воды наблюдается не на фронте бора, как в случае горизонтального дна, а сзади от него. Также следует отметить, что на левой стенке уровень воды вначале повышается, а затем уменьшается.

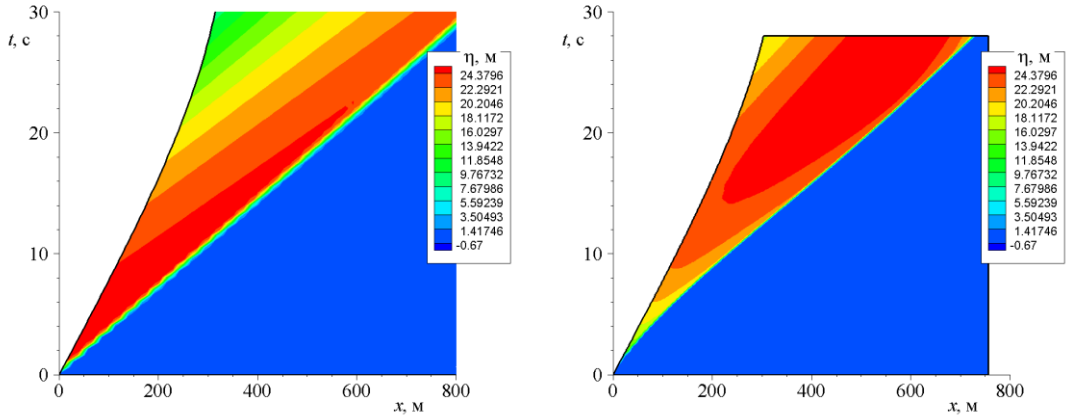
Отличие волновых режимов, возникающих в бассейне с горизонтальным дном и бассейне с неровным дном, можно увидеть также по графикам на рис. 8. В случае горизонтального дна (рис. 8*а*) максимальное возвышение уровня воды наблюдается на фронте бора, а за фронтом уровень монотонно падает. Неровность дна (рис. 8*б*) существенно влияет на профиль свободной поверхности. Так, за фронтом бора свободная поверхность не является монотонной функцией: при удалении от фронта бора влево уровень воды сначала монотонно возрастает до высоких значений (больше, чем 26

м в момент времени $t = 25$ с) и только потом начинает монотонно уменьшаться. Другое отличие заключается в том, что при движении волны происходит постепенное увеличение ее высоты.



а б

Рис. 6. Траектории движения узлов сетки (а) и динамика поверхности воды (б) при внезапном сдвиге левой стенки бассейна с неровным дном



а б

Рис. 7. Изолинии поверхности воды для бассейна с горизонтальным дном (а), с неровным дном (б)

Таким образом, учет неровности дна водохранилища имеет важное значение при моделировании поверхностных волн, вызванных сходом оползня.

На рис. 9*а* показана динамика свободной границы воды при накате волны, возникшей при сходе оползня в водохранилище, на правую вертикальную стенку. Видно, что в момент, когда сгенерированная волна достигает правой стенки, возникает мощный заплеск и образуется отраженная волна, высота которой постепенно падает.

Более детальное представление о поведении уровня воды на правой стенке может дать хронограмма изменения уровня со временем (рис. 9*б*). Видно, что при ударе по стенке переднего вертикального фронта набежавшей волны возникает большой вертикальный заплеск, затем уровень воды несколько понижается. Далее, при более позднем накате на стенку сглаженной, наиболее высокой части волны, которая двигалась за вертикальным фронтом (см. рис. 8*б*), возникает второй локальный максимум, после чего уровень воды постепенно уменьшается. Анализ результатов расчетов показывает,

что первый максимум в 60,65 м происходит при $t = 29{,}32$ с. Второй максимум возникает примерно через 2 с (при $t = 31.61$ с), принимая значение 60,15 м.

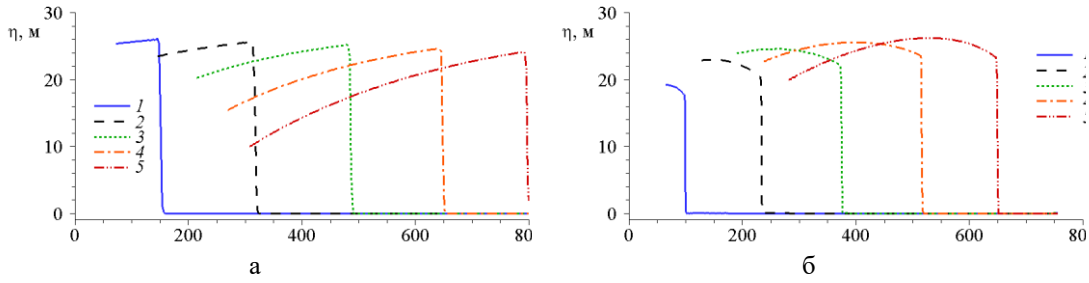


Рис. 8. Профили свободной границы в моменты времени $t = 5$ с (*1*), 10 с (*2*), 15 с (*3*), 20 с (*4*), 25 с (5): бассейн с горизонтальным дном (*а*), с неровным дном (*б*)

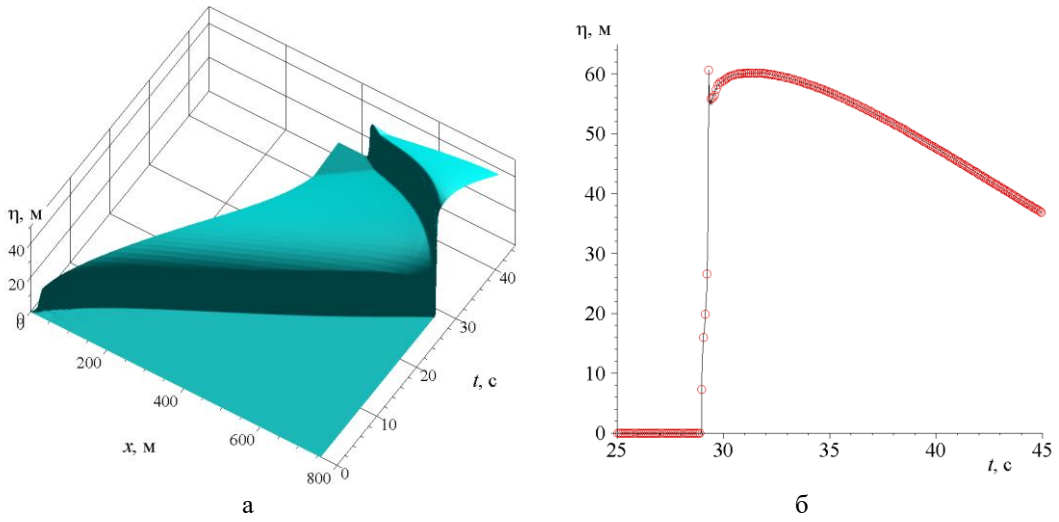


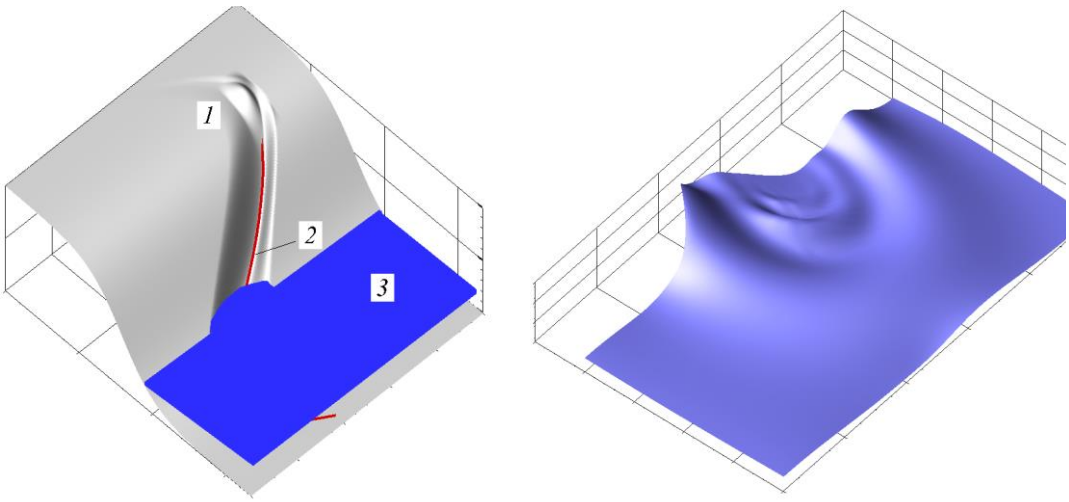
Рис. 9. Динамика поверхности воды при распространении сгенерированной волны через водохранилище и ее отражении от вертикального правого берега (а); хронограмма уровня воды на правой стенке (б)

По полученным значениям максимального заплеска на вертикальную стенку можно дать приближенную оценку максимального вертикального заплеска на криволинейный правый берег водохранилища. Значение этого максимума зависит от типа набегающей волны, от формы берегового склона и многих других факторов, но в любом случае вертикальный заплеск на береговой склон будет больше [*Федотова и др., 2017*], чем на вертикальную стенку, установленную в точке первоначального уреза спокойной воды. Таким образом, можно сказать, что максимальный вертикальный подъем уровня воды на правом берегу водохранилища будет не менее 60 м. Эта оценка находится в качественном соответствии с результатами полевого исследования Бурейского цунами. Так, в [*Кулаков и др., 2019*] указано, что волна продвинулась вверх по пологому склону почти на 1 км, достигнув высоты около 56 м над первоначальным урезом. В [*Gusiakov et al., 2021*] отмечается, что высота вертикального заплеска на противоположный (правый) берег была до 62 м, если судить по полностью срезанным деревьям и разрушенному почвенному покрову, однако аэро- и спутниковые снимки показывают, что реальный заплеск водно-ледяного потока был еще на 5–10 м выше.

Таким образом, даже в предложенной упрощенной постановке рассчитанные значения максимальных вертикальных заплесков на правый берег оказались в удовлетворительном соответствии с результатами полевых исследований.

Численное моделирование поверхностных волн, возникающих при входе в водохранилище связного селя

Разработанная модель может использоваться, как одна из простейших, для исследования движения по криволинейным наклонным руслам связных селей и генерируемых ими поверхностных волн. Результаты расчетов будут изложены с достаточно подробностью в отдельной публикации. Здесь лишь укажем на то, что для таких задач вместо одномерных уравнений (3), (4) используются двумерные, в которых учитывается [*Шокин и др., 2020*] криволинейность горного склона с расположенным на нем криволинейным водотоком (рис. 10*а*), а исследование поверхностных волн, возникающих в месте входа связного селя в ограниченное водохранилище (рис. 10*б*), выполняется в рамках плановой модели мелкой воды [*Beisel et al., 2012*].



а б

Рис. 10. Генерация поверхностных волн при входе связного селя в водохранилище: а – форма модельного горного склона с селевой массой (1) в начальный момент времени, траектория (2) движения селя по криволинейному водотоку и дну водоема, поверхность воды в начальный момент времени (3); б – увеличенное в вертикальном направлении изображение поверхностных волн, распространяющихся по водохранилищу от места входа селя

Благодарности

Автор благодарит научного руководителя д.ф.-м.н., профессора Г.С. Хакимзянова за постановку задачи и обсуждение результатов исследования.

Список литературы

Иванова А.А., Куликов Е.А. (2020). Оползневое цунами на р. Бурея. II Всеросс. научн. конф. «Волны цунами: моделирование, мониторинг, прогноз»: Сб. тез. докл., М.: Научн. совет по проблемам цунами ОНЗ РАН, 25–26.

Коковкин А.А. (2020). Феномен Бурейского оползня: данные полевых исследований и модель формирования. Отечественная геология, 4–5: 48–63.

Кулаков В.В., Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В. (2019). Катастрофический оползень и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС (бассейн Амура). Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 3: 12–20.

Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В., Матвеенко Д.В. (2019). Крупный оползень в долине реки Бурея и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС. Вестн. Дальневосточного отд. РАН, 2: 35–44.

Михайлов В.О., Черноморец С.С. (2011). Математическое моделирование селей, обвалов и оползней. М.: МГУ, 131 с.

Федотова З.И., Хакимзянов Г.С., Гусев О.И., Шокина Н.Ю. (2017). Нелинейно-дисперсионные модели волновой гидродинамики: уравнения и численные алгоритмы. Новосибирск: Наука, 456 с.

Шокин Ю.И., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б., Гусев О.И., Бейзель С.А. (2020). О близости принципов математического моделирования селей и подводных оползней. Материалы респ. научн. конф. по актуальным проблемам матем. моделирования, вычисл. математики и программной инженерии, Карши, Узбекистан, Каршинский гос. университет, 63–67.

Ataie-Ashtiani B., Yavari-Ramshe S. (2011). Numerical simulation of wave generated by landslide incidents in dam reservoirs. Landslides, 8: 417–432.

Beisel S.A., Chubarov L.B., Dutykh D., Khakimzyanov G.S., Shokina N.Yu. (2012). Simulation of surface waves generated by an underwater landslide in a bounded reservoir // RJNAMM, 27(6): 539–558.

Cea L., Ferreiro A., Vazquez-Cendon M.E., Puertas J. (2004). Experimental and numerical analysis of solitary waves generated by bed and boundary movements. Int. J. Numer. Methods Fluids, 46(8): 793–813.

Delis A.I., Kazolea M. (2011). Finite volume simulation of waves formed by sliding masses. Int. J. Numer. Methods Biomedical Eng., 27: 732–757.

Fructus D., Grue J. (2007). An explicit method for the nonlinear interaction between water waves and variable and moving bottom topography. J. Comput. Physics, 222(2): 720–739.

Gusiakov V., Makhinov A. (2021). December 11, 2018 landslide and 90-m icy tsunami in the Bureya water reservoir. In: Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk: Vol. 1. Sendai Landslide Partnerships and Kyoto Landslide Commitment, Springer, 351–360.

Higman B., Shugar D.H., Stark C.P. et al. (2018). The 2015 landslide and tsunami in Taan Fiord, Alaska. Scientific Reports, 8: 12993.

Huang B., Yin Y., Du C. (2016). Risk management study on impulse waves generated by Hongyanzi landslide in Three Gorges Reservoir of China on June 24, 2015. Landslides, 13: 603–616.

Khakimzyanov G., Dutykh D., Fedotova Z., Gusev O. (2020). Dispersive Shallow Water Waves. Theory, Modeling, and Numerical Methods. Basel: Birkhauser, 284 p.

Khakimzyanov G., Shokina N.Yu., Dutykh D., Mitsotakis D. (2016). A new run-up algorithm based on local high-order analytic expansions. J. Comput. Applied Math., 298: 82–96.

Lindstrom E.K., Pedersen G.K., Jensen A., Glimsdal S. (2014). Experiments on slide generated waves in a 1:500 scale fjord model. Coast. Eng., 92: 12–23.

Ma G., Kirby J.T., Shi F. (2013). Numerical simulation of tsunami waves generated by deformable submarine landslides. Ocean Modelling, 69: 146–165.

Mohammed F., Fritz H.M. (2012). Physical modeling of tsunamis generated by threedimensional deformable granular landslides. J. Geophys. Res., 117: C11015.

Paris A., Okal E.A., Gu´erin C. et al. (2019). Numerical modeling of the June 17, 2017 landslide and tsunami events in Karrat Fjord, West Greenland. Pure and Applied Geophys., 176: 3035–3057.

Sabeti R., Heidarzadeh M. (2022). Numerical simulations of water waves generated by subaerial granular and solid-block landslides: Validation, comparison, and predictive equations. Ocean Eng., 266(3): 112853.

Sepulveda S., Serey A. (2009). Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the April 21, 2007 Aisen earthquake, southern Chile (45.5° S). Andean Geology, 36(1): 131–136.

Ward S.N., Day S. (2011). The 1963 landslide and flood at Vaiont Reservoir Italy. A tsunami ball simulation. Italian J. Geosciences, 130: 16–26.

Xu W.-J., Dong X.-Y. (2021). Simulation and verification of landslide tsunamis using a 3D SPH-DEM coupling method. Computers and Geotechnics, 129: 103803.

Метеорологические условия формирования водоледовых селей на горных реках Иле Алатау

В.В. Жданов[1], Н.У. Кужагельдина[2,3]

[1]АО «Институт географии и водной безопасности» Министерства науки и высшего образования, Алматы, Казахстан, ZhdanovVitaliy@yandex.kz

[2]РГП «Казгидромет», Астана, Казахстан

[3]Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Аннотация. 13.12.2022 г. и 16.12.2023 г. на реке Есентай в черте города Алматы прошли потоки, состоящие изо льда, снега и воды. Они обладали большими скоростями течения (4–5 м/с) и отличались от шугоходов на равнинных реках. Они напоминали грязекаменные сели, потому что происходило вовлечение нового материала и лавинообразный рост расхода водо-ледяной смеси. Был нанесен материальный ущерб. Подобное явление, прошедшее 6 января 2006 г. на реке Узын Каргалы в Иле Алатау, привело к человеческим жертвам.

В течении многих лет изучением водоледовых потоков занималась группа специалистов из РГП Казгидромет, ГУ Казселезащита и Института географии. В результате исследований были собраны архивные сведения об этом явлении и проанализированы причины его возникновения.

Для среднеазиатского климата похолодание до 20–25 мороза является аномальным явлением. Это вызывает скопление внутриводного и донного льда и значительный рост уровня воды в русле: на 1–2 м выше уровня зимней межени. Если похолодание сменяется резким потеплением до положительных температур, происходит разрушение ледовых конструкций и формирование водоледовых потоков. Установлено, что в день прохождения таких потоков скорость повышения температуры воздуха составляла от 6 до 10 °С/сут.

Причиной аномальных похолоданий на юго-востоке Казахстана являются ультраполярные вторжения холодного воздуха из районов Карского и Баренцева морей. В это время минимальная температура воздуха падает на 10–15 °С ниже многолетних значений. Обычно эти похолодания длятся 5–7 дней, а затем происходит выход южных циклонов и резкое потепление. Изучение их влияния на гидрологические процессы позволяет определить периоды возможного формирования внутриводного и донного льда и образования водоледовых потоков. Это в свою очередь позволит составлять оповещения для местного населения и администрации.

Ключевые слова: *Республика Казахстан, горы Иле Алатау, горные реки, водоледовые сели, внутриводный и донный лед, аномальное похолодание*

Ссылка для цитирования: Жданов В.В., Кужагельдина Н.У. Метеорологические условия формирования водоледовых селей на горных реках Иле Алатау. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 563–571.

Meteorological conditions of the formation of water-ice debris flows on mountain rivers of Ile Alatau

V.V. Zhdanov[1], N.U. Kuzhageldina[2,3]

[1]JSC "Institute of Geography and Water Security" of the Ministry of Science and Higher Education, Almaty, Kazakhstan; ZhdanovVitaliy@yandex.kz

[2]RSE "Kazhydromet", Astana, Kazakhstan

[3]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Abstract. On December 13, 2022 and December 16, 2023, streams of ice, snow and water passed on the Esentai River within the city of Almaty. They detect high-speed obstacles (4–5 m/s) and differ from sludge vehicles on sharp rivers. They resembled mud-stone debris flows, because new material was involved and an avalanche-like increase in the flow of the water-ice mixture occurred. There was material damage. A small phenomenon that took place on January 6, 2006 on the Uzyn Kargaly River in Ile Alatau resulted in casualties.

For many years, a group of specialists from the RSE Kazhydromet, the State Institution Kazselezaschita and the Institute of Geography have been studying water-ice flows. As a result of the investigation, archival data about this phenomenon was collected and the reasons for its occurrence were analyzed.

For the Central Asian climate, cooling to 20–25 degrees below zero is an anomalous phenomenon. This causes the accumulation of intra-water and bottom ice and a low increase in the water level in the channel: 1–2 m above the winter low-water level. If a cooling shift occurs with a sharp warming to a given temperature, ice structures are destroyed and water-ice flows are blocked. It has been established that on the day of such flows, the rate of air temperature measurement is from 6 to 10 °C per day.

The reason for the anomalous cold snaps in the southeast of Kazakhstan are ultrapolar intrusions of cold air from the Kara and Barents Sea regions. At this time, the minimum air temperature drops 10–15 °C below long-term indicators. Typically, these cold spells last 5–7 days, and then southern cyclones emerge and a sharp warming occurs. The study of their hydrological processes makes it possible to determine the periods of possible inland and bottom ice and the formation of water-ice flows. This, in turn, will provide alerts to local residents and administrations.

Key words: *Republic of Kazakhstan, Ile Alatau Mountains, mountain rivers, water-ice debris flows, in-water and bottom ice, anomalous cooling*

Cite this article: Zhdanov V.V., Kuzhageldina N.U. Meteorological conditions of the formation of water-ice debris flows on mountain rivers of Ile Alatau. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 563–571.

Введение

Существует огромное множество опасных ледовых явлений на реках климатического умеренного пояса. Их разновидности сильно зависят от морфологических особенностей рек. Для равнинных рек с малыми скоростями течения характерны сплошные ледоставы в зимние месяцы и заторно-зажорные явления в период образования и разрушения ледостава [*Чижов, 1972*]. Шугоходы и разливы обычно проходят с малыми скоростями и занимают продолжительный период. Но горные реки среднеазиатского региона обладают своими отличительными особенностями. Из-за мягкого климата и бурного потока здесь не бывает сплошного ледостава, шугоход имеет скоротечный характер [*Степанов, 2009, Бекенов, 2023*]. Из-за больших уклонов русла на горных реках их характер движения сильно напоминает турбулентный поток с включением твердой составляющей. Они обладают большими скоростями и расход увеличивается из-за вовлечения нового материала [*Степанов, 1985*].

В последние годы в большинстве справочников по селеведению и гляциологии водоледовые явления выделены в отдельный класс, отличный от шугохода [*Перов, 2006*]. Водоледовые сели, разновидность селевых потоков, где твердая составляющая представлена льдом и снегом. Среди специалистов гидрологов до сих пор нет единого мнения по классификации этого явления. Поскольку в большинстве справочников по гидрологии дается характеристика селя, как потока высокой плотности и большой эрозионно-сдвиговой способностью. До сих пор эти явления очень слабо изучены, потому что отсутствует статистическая архивная информация. Изучение условий их

формирования представляет научный интерес. Это необходимо для прогнозирования и своевременного предупреждения населения.

Водоледовые сели на реке Есентай 13 декабря 2022 г. и 16 декабря 2023 г.

13 декабря 2022 г. в пределах г. Алматы на реке Есентай прошел катастрофический поток. Он состоял из смеси воды, льда и снега. Потоком был разрушены сооружения в русле реки, но жертв не было. Свидетелями стали многочисленные жители города. Прохождение потока было зафиксировано камерами видеонаблюдения. Мгновенно информация появилась в соцсетях и стало главной новостью местных информагенств [*Алхабаев, 2022*]. Фото отложений приведено на рис. 1.

Поток двигался со значительными скоростями, не менее 4–5 м/с. Он вовлекал новый материал и отмечалось лавинообразный рост объема и высоты волны. Этому способствовали большие уклоны русла и наличие донного и внутриводного льда. По характеру движения он напоминал грязекаменные селевые потоки [*Степанов, 1985*]. Потому что при классических шугаходах на равнинных реках наблюдается маленькая скорость и затухание волны ниже ледового затора. После прохождения потока все русло реки было очищено ото льда. Все отложения вынесло в селехранилище на проспекте аль-Фараби в г. Алматы.

Причиной потока стали несколько факторов. Во-первых был искусственный сброс воды на вододелителе «Дамба», контролирующей распределение воды в реках Киши Алматы и Есентай. Во вторых из-за резких изменений погоды в русле сформировались большие скопления внутриводного и донного льда. Эти чашеобразные ледовые конструкции имеют слоистую структуру и обладают низкой прочностью.

Рис. 1. Последствия прохождения водоледового селя на р. Есентай 16.12.2023 г. Фото В. Жданова

Аномальная ледовая обстановка довольно часто отмечается на горных реках Южного Казахстана. Из-за мягкого климата здесь не бывает сплошного ледостава [*Ахметжанова, 1985*]. Поэтому резкие похолодания приводят к образованию внутриводного и донного льда в руслах рек. Это вызывает повышение уровня воды на 1–1,5 м и сильно затрудняет эксплуатацию гидротехнических сооружений зимой. В период 9–13 декабря отмечалось похолодание со среднесуточной температурой воздуха –8…–10 °С. Это значительное понижение поскольку средняя температура декабря в Алматы составляет – 4,3 °С [*Справочник по климату Казахстана, 2004*]. В день прохождения потока отмечалось резкое потепление, что привело к потере прочности ледовых образований в русле реки.

16 декабря 2023 г. катастрофа повторилась вновь. Она сильно напомнила декабрь 2022 г. Во время резкого похолодания, вызванного вторжением холодных воздушных масс, началось накопление внутриводного и донного в руслах горных рек и значительный рост уровня воды. Это привело к подтоплению гидротехнических сооружений и вынужденному перераспределению воды на вододелителе рек Киши Алматы и Есентай. Рост расходов воды и ослабление льда из-за потепления вызвало шугоход. Значительные уклоны русла привели к скоротечному селеподобному движению потока и вовлечению новых масс снега и льда. Уже в водоотстойнике на проспекте им. аль-Фараби отмечался расход воды более 20 $м^3/с$ и объем отложений несколько тыс. $м^3$. Также, как и в 2022 г. были разрушены заграждения и беседки, прилегающие к руслу.

Архивные сведения о водоледяных селях на горных реках Алматинской области

Катастрофические водоледовые потоки уже отмечались на горных реках Иле Алатау. В том же месте на р. Есентай сель отмечался 20 ноября 1987 г. Причиной его формирования стало резкое похолодание, аномальная ледовая обстановка и антропогенный сброс воды в реке. Был нанесен материальный ущерб, без человеческих жертв. Были разрушены гидротехнические сооружения [*Мочалов, 1989*]. Самое трагическое явление зарегистрировано 6 января 2006 г. на реке Узынкаргалы [*Яфязова, 2005*]. В том потоке кроме ущерба были и человеческие жертвы. Погибли два человека.

По данным гидротехника Назарова в 1960-е гг. отмечено прохождение нескольких водоледовых потоков, которые наносили ущерб объектам в руслах рек [*Назаров, 1968*]. Автор отметил особенность, что причиной потоков становилось разрушение внутриводного и донного льда. Большой архив данных был собран Т.Л. Киренской и опубликован в монографии [*Медеу, 2016*]. Она собирала данные из архивов ГУ Казселезащита и РГП Казгидромет. Кроме крупных явлений с жертвами и ущербом отмечались локальные потоки, затрудняющие работу гидротехнических сооружений. Данные о локализации явлений приведены на рис 2.

Исторические сведения об катастрофических водоледовых потоках в конце 19 – начале 20 в. в городе Верный (Алматы) описаны путешественниками географами Русского географического общества В.Д. Городецким и Д.О. Святским. Ими описаны потоки, отмечавшиеся на реках Большая и Малая Алматинки (Улкен и Киши Алматы) в 1889, 1896, 1901 гг. Причиной также было резкое потепление и таяние льда и снега в руслах горных рек. Потоки обладали большой скоростью и нанесли ущерб близлежащим хозяйственным постройкам.

Рис. 2. Карта-Схема опасных участков горных рек, где отмечено прохождение водоледовых селевых потоков

Метеорологические и синоптические условия формирования водоледовых селей

Водоледовые сели – это очень редкое явление. Отсутствие статистики затрудняет его изучение. Известен только такой факт – во время резких похолоданий на горных реках Алматинской области формируются значительные скопления внутриводного и донного льда [*Яфязова, 2007, Степанов 2009*]. Это вызывает повышение уровня воды на 1,5–2 м выше уровня зимней межени (рис. 3). Аномальная ледовая обстановка может сохраняться в течении 5–15 дней, вызывает резкий подъем уровня воды и затрудняет работу гидротехнических сооружений. Чаши и плотины, состоящие из слоистого льда и воды, обладают очень низкой прочностью. Во время резких потеплений или при антропогенном воздействии легко происходит их разрушение.

В период прохождения потока отмечался значительный суточный градиент потепления температуры воздуха. Перед этим несколько дней сохранялись сильные морозы (минимальная температура воздуха ниже 20 °С), аномальные для среднеазиатского региона. Ход температуры воздуха приведен на рис. 4.

Рис. 3. Скопления внутриводного и донного льда в руслах горных рек, вызывающие подъем уровня воды. р. Есентай февраль 2024 г. Фото В. Жданова

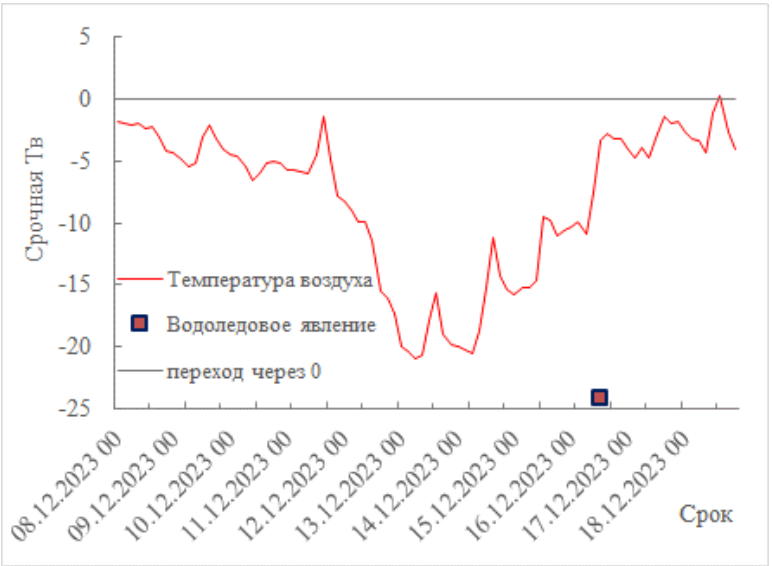


Рис. 4. Изменение срочных температур воздуха на метеостанции Алматы во время периода похолодания, приведшего к формированию водоледового селя

Для изучения условий формирования был обработан архив многолетних данных наблюдений на метеорологических станциях и постах РГП «Казгидромет» [*Архив РГП Казгидромет*]. Анализировалась среднесуточная температура воздуха ($T_в$) на старейшей в регионе реперной метеорологической станции г. Алматы. Уровни воды для анализа накопления внутриводного и донного льда взяты на гидрологическом посту Алматы-Дамба, расположенном в районе вододелителя р. Есентай – р. Киши Алматы. Были сопоставлены условия, при которых отмечались водоледовые сели и условия накопления внутриводного и донного льда. Результаты приведены в таблице 1. Можно сделать выводы, что при значительных похолоданиях происходит резкий рост уровня воды в русле из-за скоплений льда, а в период перехода температуры через 0 градусов отмечается ослабление льда и формирования шугоходов. А выбранные пункты наблюдений являются репрезентативными для оценки и прогноза водоледовых селевых потоков.

Таблица 1. Средние значения метеорологических элементов в периоды образования внутриводного и донного льда на реках Иле Алатау

Характеристика периодов похолодания	Продолжительность похолодания, дни	Средняя суточная Тв, °С	Минимальная средняя суточная $T_в$ за период похолодания, °С	Сумма $T_в$ за предыдущие 5 сут, °С	Суточный градиент $T_в$, °С	Аномалия $T_в$, °С	Максимальный градиент $T_в$ за период похолодания, °С	Максимальная аномалия $T_в$ за период похолодания, °С	Рост уровня воды в р. Есентай, см
С водоледовыми селями	6	-8,9	-16,5	-63,9	4,4	-3,8	-6,4	-12,1	64
С ростом уровня воды в р. Есентай	6	-8,8	-17,2	-67,6	5,5	-3,0	-6,2	-11,6	78

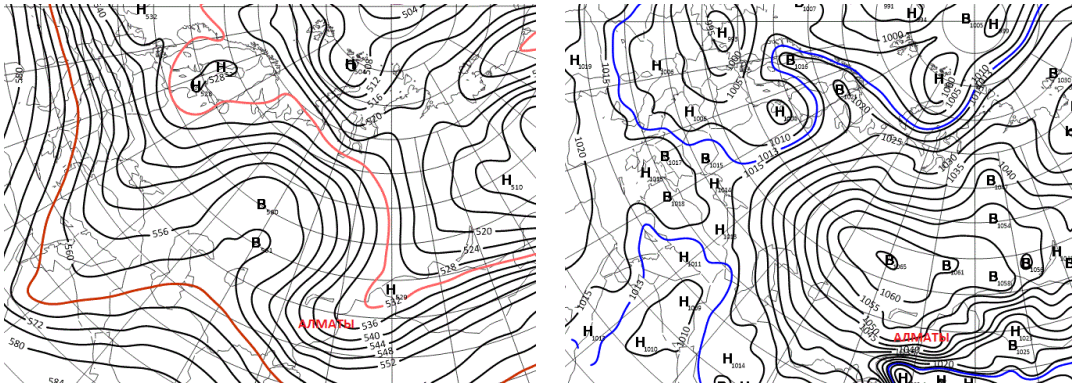
Синоптические условия, при которых происходит похолодание на юго-востоке Казахстана хорошо изучены [*Бугаев, 1957, Коженкова 1967*]. Это типичные ультраполярные вторжения по типизации З.П. Коженковой. Они хорошо прогнозируются. Обычно вторжения холодного воздуха из районов Карского и Баренцева морей вызывают похолодание на всем Юго-Востоке Казахстана. Температура воздуха в течении 5–15 дней может опускаться на 5–10 °С ниже средних многолетних значений. Меридиональный перенос способствует формированию высотной ложбины и проникновению полярных воздушных масс глубоко на юг. Однако в условиях мягкого среднеазиатского климата выходы южных циклонов с потеплением и осадками могут резко изменить синоптическую обстановку в регионе. Градиенты потепления могут достигать 6–10 °С/сут. Такие погодные аномалии неблагоприятно влияют на режим горных рек, вызывая таяние льда и снега и подтопления вблизи русел. Синоптические карты вторжений перед прохождением водоледового селя показаны на рис. 5*а*, *б*.

Обсуждение результатов исследований

Проблема зимних селевых потоков известна во всем мире. Подобные потоки причиняют ущерб в Японии, Канаде и Китае. То есть в тех регионах умеренного пояса, где есть горные реки с турбулентным потоком и большими уклонами. В иностранной литературе явление водоледовых селей получило название ice-jam flood – заторный прорыв, а явление внутриводного льда получило название anchor ice – якорный лед [*Turcotte, 2011, Dubé, 2014, Barrette, 2021, Shen, 2003, Barrette, 2023*]. Из-за опасности

явлений возникла необходимость изучения и разработки методов защиты. Многие авторы пришли к мнению, что слабый пористый якорный лед очень сильно связан с термическим режимом. Он начинает накапливаться в руслах с турбулентным потоком в период резких похолоданий и разрушается, когда суточный градиент потепления достигает значительных величин 5–10 °C. Эти условия схожи с условиями формирования водоледовых селей на реках Иле Алатау. А наши исследования подтверждаются исследованиями других специалистов [*White, 2022, Tullos, 2016, Wang, 2023, Nafziger, 2017*].

В течении нескольких лет в Институте географии проводится экспериментальный выпуск снеголавинного бюллетеня. Информация о погоде и лавинной опасности выкладывается на сайте института (https://ingeo.kz уровень лавинной опасности) и в телеграмм-канале по ссылке (https://t.me/lavinny_bulleten_almaty). Подписчиками являются многочисленные туристы и любители зимнего отдыха в горах. Для этого регулярно анализируется метеорологическая и снеголавинная обстановка в горах Иле Алатау. 11 декабря 2023 г. синоптическая обстановка предвещала классическое полярное вторжение и аномальное похолодание (рис. 5.). Нами было составлен экспериментальный прогноз об опасных ледовых условиях и возможных формированиях водоледовых потоков. Информация была доведена до подписчиков. То, что условия совпали и явление повторилось, говорит об перспективности прогностического метода. Выявление синоптических условия похолоданий и их влияние на образование внутриводного и донного льда необходимо для заблаговременного предупреждения населения и спасательных служб.



А Б

Рис. 5. Синоптические карты холодного полярного вторжения перед прохождением водоледового селя: А – высотная карта АТ-500; Б – приземная синоптическая карта (13.12.2023 г.)

Заключение

На горных реках Алматинской области прохождение водоледовых селевых потоков причиняет материальный ущерб. Предшествующая этому аномальная ледовая обстановки сильно затрудняет работу гидротехнических сооружений. Редкость этого явления затрудняет сбор статистических данных и изучение процесса. Но уже известны некоторые особенности прохождения и формирования водоледовых селей. Они отмечаются во время резкого потепления, когда внутриводный и донный лед в русле реки теряет прочность. Прохождению потока предшествуют длительные периоды аномального похолодания. Когда из-за накопления льда происходит резкий подъем уровня воды в горных реках. Аномальные похолодания на Юго-Востоке Казахстана связаны с ультраполярными вторжениями холодного воздуха из районов Карского и Баренцева морей. Изучение влияния аномальных похолоданий на гидрологические процессы позволяет дать рекомендации заинтересованным организациям и населению о возможной опасной обстановке на горных реках. Это в свою очередь очень важно для уменьшения риска жертв и ущерба от возможных водоледовых селей.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела изучения и прогноза селевых потоков Филиала РГП «Казгидромет» по г. Алматы в сборе материала.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме «Научно-прикладное обоснование селе-, оползне- и лавинобезопасности в горных районах Иле и Жетысу Алатау Республики Казахстан». Программно-целевое финансирование № BR21881982.

Список литературы

Архив метеорологических данных РГП «Казгидромет». https://meteo.kazhydromet.kz/database_meteo/ (режим доступа). (дата посещения 10.01.2023 г.)

Алхабаев Ш. Ледяная лавина снесла ограждения реки Есентай. Информационное агентство Tengri news. URL: https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/ledyanaya-lavina-snesla-ograjdenie-reki-esentay-v-almatyi-485966/ (дата обращения 13.12.2022 г.)

Бекенов К.А., Касенов М.К. Селевая безопасность. 50 лет деятельности Казселезащиты: итоги, эффективность, перспективы. 1973–2023 гг. Алматы: Zialy bacpasy, 2023. 208 с.

Бугаев В.А., Джорджио В.А. Синоптические процессы средней Азии. Ташкент: АН УзССР, 1957. –650 с.

Жданов В.В. Прогноз водоледяных селей и пути их предотвращения. Автореферат на соискание ученой степени кандидата наук. Алматы, 2010 г.

Коженкова З.П. Курс лекций по синоптической метеорологии. Алма-Ата: КазГУ, 1967. 544 с.

Климат Алматы. Под ред. Ахмеджанова Х.А., Швер Ц.А. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1985. 266 с.

Мочалов В.П., Шевырталов Е.П. Краткие сведения о паводке на р. Малая Алматинка 28 ноября 1987 г. // Селевые потоки. М.: Гидрометеоиздат, 1989. № 11. С. 76–78.

Назаров Ц.А. Водоселевые потоки на горных реках Казахстана / Труды координационных совещаний по гидротехнике. Вып.42. Л.: Энергия, 1968. С. 110–115.

Перов В.Ф. Селеведение. Учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.

Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Антология селевых явлений и их исследования / Медеу А.Р., Баймолдаев Т.А., Киренская Т.Л. –Т.4, Ч.1. Алматы, 2016. 576 с.

Справочник по климату Казахстана. Многолетние данные. Разделы 1–2. Выпуск 13. Алматы: РГП «Казгидромет», 2004. 295 с.

Степанов Б.С. Транспортно-сдвиговый и сдвигово-эрозионный селевые процессы // Селевые потоки. М.: Гидрометеоиздат, 1985. № 9. С. 3–16.

Степанов Б.С., Яфязова Р.К., Жданов В.В. Водоледяные сели. К механизму формирования водоледяных конструкций // Гидрометеорология и экология. № 3. 2009. С. 143–152.

Чижов А.Н. Особенности зажорообразования на горных реках // Труды ГГИ. 1972. Вып. 192. С. 44–52.

Яфязова Р.К. О катастрофических явлениях на горных реках в зимний период // Гидрометеорология и экология. 2005. –№ 4. С. 114–124.

Яфязова Р.К. Природа селей Заилийского Алатау. Проблемы адаптации. Алматы, 2007. 158 с.

Benoit Turcotte, Brian Morse. Ice processes in a steep river basin // Cold Regions Science and Technology. Vol. 67, Issue 3. 2011. P. 146–156. ISSN 0165-232X. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.04.002.

Daniel C. White, Ryan R. Morrison, Ellen Wohl. Fire and ice: Winter flooding in a Southern Rocky Mountain stream after a wildfire // Geomorphology, Vol. 413, 2022, 108370. ISSN 0169-555X. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108370.

Hung Tao Shen, Lianwu Liu. Shokotsu River ice jam formation // Cold Regions Science and Technology, Vol. 37, Issue 1, 2003. P. 35–49, ISSN 0165-232X. https://doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00034-X

Mathieu Dubé, Benoit Turcotte, Brian Morse. Inner structure of anchor ice and ice dams in steep channels // Cold Regions Science and Technology. Vol. 106–107, 2014, P. 194–206. ISSN 0165-232X. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.06.013.

Jennifer Nafziger, Yuntong She, Faye Hicks, Richard A. Cunjak. Anchor ice formation and release in small regulated and unregulated streams // Cold Regions Science and Technology. Vol. 141, 2017. P. 66–77. ISSN 0165-232X. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.05.008.

Tullos, D., Byron, E., Galloway, G. *et al.* Review of challenges of and practices for sustainable management of mountain flood hazards. Nat Hazards 83, 1763–1797 (2016). https://doi.org/10.1007/s11069-016-2400-3

Paul D. Barrette. Understanding frazil ice: The contribution of laboratory studies // Cold Regions Science and Technology. Vol. 189, 2021, 103334, ISSN 0165-232X, https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103334.

Paul Dominique Barrette and Karl-Erich Lindenschmidt. Frazil ice events: Assessing what to expect in the future. Hydrology ResearchVol54No6,770doi:10.2166/nh.2023.008

Wang, X., Qu, Z., Tian, F. *et al.* Ice-jam flood hazard risk assessment under simulated levee breaches using the random forest algorithm. Nat Hazards 115, 331–355 (2023). https://doi.org/10.1007/s11069-022-05557-8

Закрепление оползневых массивов свайной конструкцией

Ю.А. Мажайский[1], Н.В. Шешенев[2]

[1]Мещерский филиал ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, Рязань, Россия

[2]Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, Рязань, Россия

Аннотация. В данной работе рассмотрены вопросы закрепления оползней сваями, описаны принципы работы свай-шпилек и свай-надолбов. Предложена эффективная конструкция парных свай, сочетающая в себе достоинства свай-шпилек и столбов-надолбов. Представлены теоретические предпосылки и компьютерные расчеты предлагаемой конструкции, позволяющей закреплять оползневые массы, обладающие реологическими свойствами.

Ключевые слова: *свая, оползень, свайная конструкция, оползневый массив, противооползневые мероприятия*

Ссылка для цитирования: Мажайский Ю.А., Шешенев Н.В. Закрепление оползневых массивов свайной конструкцией. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 572–576.

Securing landslides with pile structures

Yu.A. Mazhaisky[1], N.V. Sheshenev[2]

[1]Meshchersky branch of the Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Ryazan, Russia

[2]Ryazan Institute (branch) of Moscow Polytechnic University, Ryazan, Russia

Abstract. This paper discusses the issues of securing landslides with piles, describes the principles of operation of stud piles and superstructure piles. An effective design of paired piles is proposed, combining the advantages of stud piles and superstructure piles. Theoretical background and computer calculations of the proposed design, which makes it possible to secure landslide masses with rheological properties, are presented.

Key words: *pile, landslide, pile structure, landslide massif, anti-landslide measures.*

Cite this article: Mazhaisky Yu.A., Sheshenev N.V. Securing landslides with pile structures. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 572–576.

Введение

Человечество все чаще страдает от чрезвычайных ситуаций, связанных с экологическими проблемами. Одной из основных задач, стоящих перед инженерами, является разработка механизмов управления такими процессами [*Буслов, 2018*].

Стихийные бедствия угрожают обитателям нашей планеты с начала цивилизации. Где-то в большей мере, в другом месте менее. Стопроцентной безопасности не существует нигде. Природные катастрофы могут приносить колоссальный ущерб, размер которого зависит не только от интенсивности самих катастроф, но и от уровня развития общества и его политического устройства [*Фомичев, 2017*].

Например, от оползней ежегодно страдают десятки и сотни зданий и сооружений, происходит разрушение полотен дорог, обвалы откосов и склонов, обрушение сооружений и различные аварии. И, конечно, нельзя не отметить, что во время оползней ежегодно становятся жертвами тысячи человек. Это само по себе является наиважнейшим фактором, говорящим об актуальности данной проблемы [*Симонян, 2011*].

Краткий обзор проблемы

Оползень можно охарактеризовать как отделившуюся массу рыхлых либо связных пород, с разной степенью динамичности оползающую по наклонной поверхности [*Буслов, 2018*].

Современная зарубежная классификация оползней-потоков выделяет следующие схемы их движения: вязкое течение; вязкопластическое течение; скольжение по твердой поверхности; смешанная форма течения и скольжения; растекание, а также некоторые виды селевых потоков с выраженной поверхностью скольжения по неподвижному подстилающему слою [*Cruden, 1996*].

Методы

Оползни по форме «обрушение со срезом и вращением» могут быть рассчитаны методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения или с помощью метода равнопрочного откоса, покровные оползни рассчитываются методом «горизонтальных сил». Однако на выбор расчетной модели потока грунтовой массы в значительной степени влияет ее состав, состояние увлажнения и предполагаемая динамика движения [*Бурмина, 2017*].

Поэтому целесообразно применять реологические модели вязко-пластического течения оползня в виде структурированной среды как одного из наиболее катастрофичных явлений. С реологической точки зрения структурированная среда – это среда, обладающая начальным сопротивлением сдвигу. Она характеризуется тем, что в отличие от неструктурированных сред в ней при напряжениях больше нуля, но меньше начального сопротивления сдвигу, течение не происходит. Вязкое течение неструктурированных сред возможно при любых значениях касательных напряжений, отличных от нуля [*Буслов, 2018*].

В нашем случае моделирование склона выполнялось с помощью методов теории упругости и заключалось в разбиении грунтового массива, расчетная схема которого представлена на рис. 1, на множество конечных элементов в программном комплексе Plaxis.

Данные

Одним из возможных способов закрепления оползневого делювия является использование свай. Для закрепления или предотвращения оползней, когда имеется прочный подстилающий слой, в котором возможна заделка нижних концов свай или столбов, применяют удерживающие свайные конструкции из одного или двух рядов железобетонных свай, как правило, буронабивных, с ростверком или в виде отдельных свайных кустов, а также железобетонные столбы, сооружаемые враспор с грунтом в шахтах или в скважинах большого диаметра [*Ночуйкина, 2022*]. Многочисленные факты применения свай в этой области свидетельствует об их эффективности и стабильности как средства борьбы против оползней.

Известно применение столбов-надолбов и свай-шпилек в качестве закрепления оползневого массива грунта. Столбы-надолбы представляют собой жесткий элемент, который воспринимает оползневое давление и работает на изгиб. Сваи-шпильки подобны гибкому элементу, работающему на растяжение.

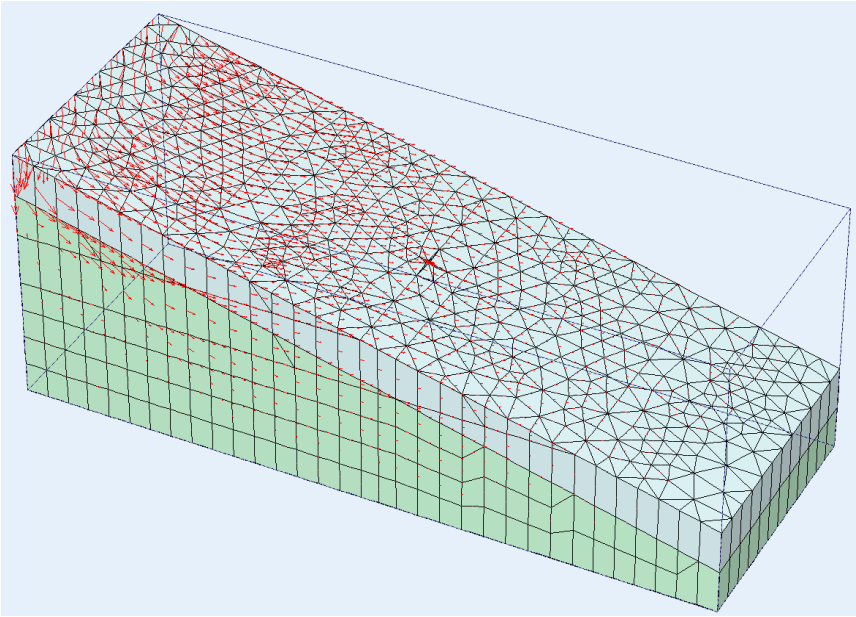


Рис. 1. Схема деформации грунтового массива в случае оползневого эффекта в программном комплексе Plaxis

При большой мощности оползающего слоя изгибающий момент, подлежащий восприятию столбами-надолбами, оказывается большим. Вследствие этого на закрепляемом слое необходимо использовать значительное число столбов-надолбов большого сечения из железобетона. Такое решение является слишком сложным, поэтому используют принцип «шпильки», уподобляемой работе гвоздя, который может изгибаться.

Для обеспечения закрепляющей работы свай-шпилек в земляном массиве необходимо, чтобы они могли работать на растяжение и были надежно закреплены против вырывания как в оползающей, так и в неподвижной толще. Добиться таких условий в практической деятельности также очень сложно. Поэтому авторами предлагается использовать свайную конструкцию, сочетающую в себе достоинства столба-надолба и гибкой сваи-шпильки.

Данная конструкция представляет собой совокупность двух свай (рис. 2), соединенных между собой шарнирно и заделанных в несущий слой грунта или коренную породу, по которой происходит скольжение оползневых масс делювия.

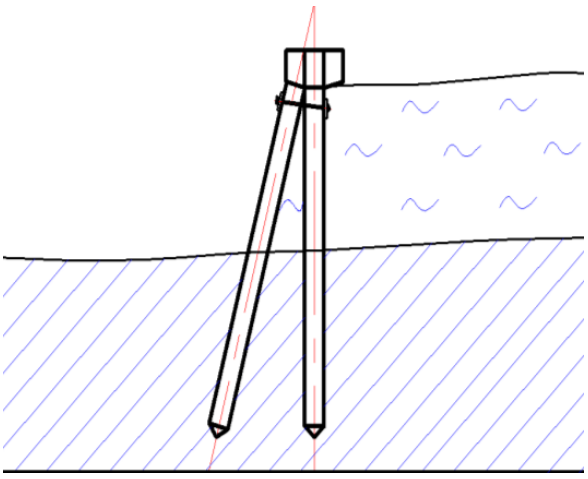


Рис. 2. Схема парной конструкции свай

Анализ

Шарнирное сопряжение позволяет вертикальной свае, воспринимающей давление от движения оползня, работать подобно гибкой свае-шпильке, а наклонной – воспринимать давление от оползня вследствие передачи его через шарнир и передачи его на основание, выполняя функцию распора, благодаря чему не происходит отрыва вертикальной сваи. В целом конструкция подобна работе столба-надолба. Деформации и эпюры моментов данной конструкции можно определить методами строительной механики или моделированием в программном комплексе LinPro. Результаты расчета показаны на рис. 3.

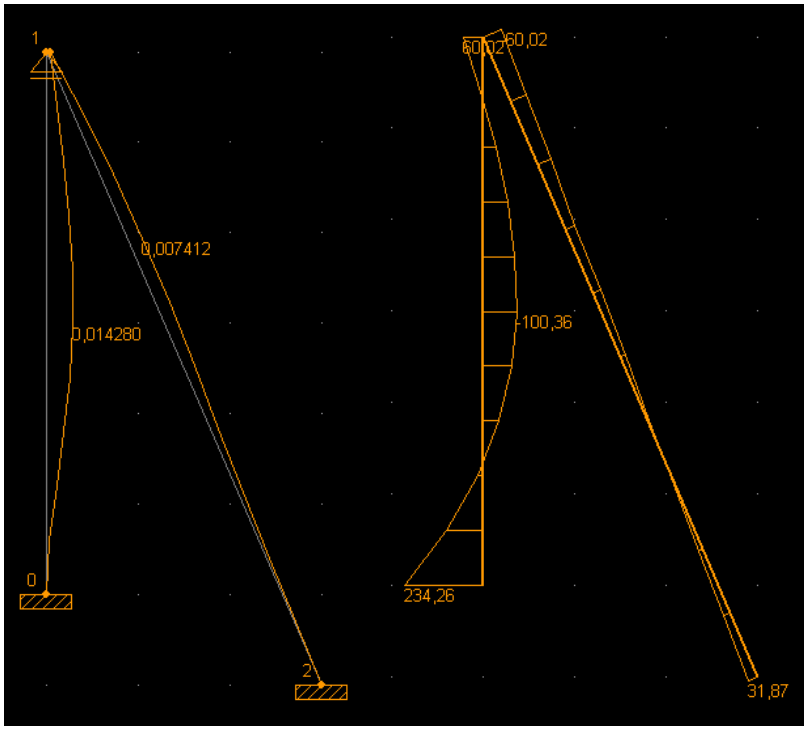


Рис. 3. Эпюры деформаций и моментов в программном комплексе LinPro

Расположение в плане таких конструкций целесообразно выполнять в шахматном порядке, так как такое расположение обосновано при размещении одиночных свай, что позволяет замедлить скорость движения оползневых масс. Возможно соединение шарнирных оголовков рядовых конструкций с помощью ростверка или введение крестообразных связей для придания большей жесткости и устойчивости комплекса предлагаемых конструкций для закрепления оползневых масс. Для облегчения погружения свай целесообразно применение технологии геополимерной «самообмазки», которая также способствует укреплению макропористых грунтов благодаря попаданию смолы в поры [*Буслов, 2017*].

Выводы

Конструкция из двойных свай позволяет укрепить массив слабого грунта, обладающий реологическими свойствами, однако в поверхностной зоне возможно «переползание» шарнирного оголовка. Вследствие этого необходимо принять меры по снижению оползневого давления, приходящегося на каждую бисвайную конструкцию. Борьба с этим явлением должна вестись с одновременным уменьшением расстояния между рядами свай и между сваями, использованием осушительных поверхностных мер и фитогенных мероприятий.

Достоинством предлагаемой конструкции является простота монтажа, меньшая глубина заделки свай в несущий слой по отношению к столбам-надолбам и сваям-шпилькам, а также меньшая величина поперечного сечения железобетонной сваи – это обусловлено перераспределением усилий в парной конструкции свай, соединенных шарнирно. Однако вопрос, касающийся размеров поперечного сечения свай, шага в ряду и между рядами парных конструкций свай требует дополнительной проработки с учетом угла наклона дополнительной опоры, который будет зависеть от характера оползня, физико-механических свойств слабых грунтов и коренной породы, а также инженерно-геологических условий [*Шешенев, 2016*].

Список литературы

Cruden, D.M. and Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes. In Turner, A.K. and Schuster, R.L. (eds.), Landslides--Investigation and Mitigation. Washington D.C., National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 247, pp. 36–75.

Бурмина Е.Н., Бакулина А.А., Суворова Н.А. Выбор расчетных моделей потока в зависимости от динамики оползня/ в сборнике: принципы и технологии экологизации производства в сельском, лесном и рыбном хозяйстве// Материалы 68-ой Международной научно-практической конференции, посвященной Году экологии в России. Министерство сельского хозяйства российской федерации; ФГБОУВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева». 2017. С. 70–74.

Технологическая и прочностная эффективность геополимерной технологии «самообмазки» при забивке свай / А.С. Буслов, А.А. Бакулина, Е.Н. Бурмина [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – № 5. – С. 51–56.

К вопросу моделирования вязко-пластического течения грунта / А.С. Буслов, А.А. Бакулина, Е.Н. Бурмина, Н.В. Шешенев // Новые технологии в учебном процессе и производства: Материалы XVI межвузовской научно-технической конференции, Рязань, 17–19 апреля 2018 года / Под ред. Платонова А.А., Бакулиной А.А. – Рязань: Индивидуальный предприниматель Жуков Виталий Юрьевич, 2018. – С. 258–268.

Ночуйкина, А. Ю. способы укрепления грунтовых откосов и склонов / А.Ю. Ночуйкина, Н.В. Шешенев // Наука, техника, педагогика высшей школы. Новые технологии = Science, Engineering, Higher Education Pedagogics. New Technologies, Москва, 01–04 марта 2022 года / Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Москва: Московский политехнический университет, 2022. – С. 590–596.

Симонян В.В. Изучение оползневых процессов геодезическими методами: Монография / Моск. гос. строит. ун-т. – М.: МГСУ, 2011. 172 с.

Фомичев К.В. и др. Ошибки в строительстве приводящие к разрушениям. Фомичев К.В., Шемякина А.В., Бакулина А.А. В сборнике: Новые технологии в учебном процессе и производстве Материалы XV межвузовской научно- технической конференции. Под редакцией начальника НИО Платонова А.А., канд. техн. наук Бакулиной А.А. 2017. С. 110–113.

Шешенев Н.В. Рассмотрение вопроса об использовании конструкции свай для закрепления оползней / Н.В. Шешенев // Строительство – формирование среды жизнедеятельности : сборник материалов XIX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных, Москва, 27–29 апреля 2016 года / ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2016. – С. 1100–1102.

Simulation analysis of debris flow caused by dam break in construction waste disposal site based on EDDA

K. He, F. Chen, H. Lu, J. Ma

Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou, China, hekun@stu.ouc.edu.cn

Abstract. Taking the Lingdun construction waste soil disposal site in Haishu District, Ningbo City as the research object, based on the EDDA numerical model, the reliability of the model was verified, and the parameters of debris flow accumulation range, accumulation depth, flow velocity, and impact force value under different working conditions were explored. The simulation results can provide reference and guidance for the prevention and early warning of large-scale debris flow caused by dam break.

Key words: *EDDA numerical model, debris flow, dam break, construction waste soil disposal site*

Cite this article: He K., Chen F., Lu H., Ma J. Simulation analysis of debris flow caused by dam break in construction waste disposal site based on EDDA. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 577.

Анализ результатов моделирования селевых потоков, вызванных разрушением дамбы на полигоне строительных отходов, на основе численной модели EDDA

К. Хэ, Ф. Чэнь, Х. Лу, Ц. Ма

Чжэцзянский институт гидравлики и устьев рек, Ханчжоу, Китай, hekun@stu.ouc.edu.cn

Аннотация. На примере полигона строительных отходов Линдунь (район Хайшу города субпровинциального значения Нинбо) была проверена надежность модели и исследованы величина и глубина накопления селевого материала, скорости потока и величины силы удара при различных условиях работы на основе численной модели EDDA. Результаты моделирования могут служить основой для разработки рекомендация и руководств для предотвращения и раннего предупреждения крупномасштабных селевых потоков, вызванных разрушением плотины.

Ключевые слова: *численная модель EDDA, селевой поток, разрушение плотины, полигон для захоронения строительных отходов*

Ссылка для цитирования: Хэ К., Чэнь Ф., Лу Х., Ма Ц. Анализ результатов моделирования селевых потоков, вызванных разрушением дамбы на полигоне строительных отходов, на основе численной модели EDDA. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 577.

The full text of the article will be published in the Journal of Mountain Science.

Extreme rainfall event affecting a Brazilian Pipeline – emergency evaluation and mitigation works

H.R. Oliveira, P.V.S. Mascarenhas, J.D.G. Neto, T.C. Santos, W.C. Russo Jr

Petrobras Transporte S.A., Rio de Janeiro, Brazil, hudson.regis@transpetro.com.br

Abstract. The aim of this paper is present the emergency evaluation and mitigation works on a Brazilian Pipeline, located in the city of São Sebastião, at the coast of São Paulo state, affected by a unprecedent intense rainfall in February 2023. The pipeline is one of the most important lines to Brazilian crude oil and due this extreme rainfall event, it had to be preventively stopped until a strict evaluation and mitigation works were performed to liberate its operation, with continuous monitoring and definitive stabilization and protection works in course. The event resulted in numerous landslides and mud/debris flows, affecting both the community and local infrastructure. The pipeline was affected by 52 geotechnical risk points with 5 of them were consider impeditive to continue operation of the oil pipeline. A careful assessment was carried out and mitigation measures were implemented to allow pipeline operation return. A group of internal and external entities technical experts were mobilized to carry out the evaluation criteria and the mitigating measures. Existing geotechnical monitoring points had extemporaneous readings carried out. Daily inspections by helicopter, drones and ROW patrols by geotechnical engineers were carried out for the purpose of mapping and classifying risk points. From an integrity point of view, an inertial PIG was sent, and pressure tests were also performed after displacing the oil with water. In places with large mass flows that crossed the ROW, emergency excavation works was carried out to remove the load on the pipeline and to check the visual conditions of integrity, which, once confirmed, were subject to emergency protection works. After 20 days, the pipeline could return its operation with safety, together with monitoring and definitive works in progress. The paper will describe the steps of the evaluation and criteria adopted and the major preventive/mitigation solutions and making discussing about lessons learned in this challenging integrity situation after this extreme rainfall event.

Key words: *geotechnical emergency, extreme rainfall*

Cite this article: Oliveira H.R., Mascarenhas P.V.S., Neto J.D.G., Santos T.C., Russo Jr W.C. Extreme rainfall event affecting a Brazilian Pipeline – emergency evaluation and mitigation works. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 578–579.

Экстремальные осадки, обрушившиеся на Бразильский трубопровод: оценка чрезвычайной ситуации и работы по смягчению последствий

Х.Р. Оливейра, П.В.С. Маскареньяс, Ж.Д.Г. Нето, Т.К. Сантос, В.К. Руссо (мл.)

Petrobras Transporte S.A., Рио-де-Жанейро, Бразилия,
hudson.regis@transpetro.com.br

Аннотация. Цель данной статьи – показать результаты оценки чрезвычайной ситуации и работ по смягчению ее последствий на Бразильском трубопроводе, расположенном в городе Сан-Себастьян, на побережье штата Сан-Паулу, пострадавшем от интенсивных осадков в феврале 2023 г. Этот объект является одним из важнейших трубопроводов бразильской сырой нефти. Из-за указанного экстремального ливня транспортировку нефти пришлось превентивно остановить

до тех пор, пока не будут выполнены оценка и смягчение последствий, а также пока не будут обеспечены непрерывный мониторинг и завершены работы по стабилизации и защите линейного сооружения. Событие привело к многочисленным оползням и грязевым/грязекаменным селям, затронувшим как население, так и местную инфраструктуру. На трубопровод повлияли 52 геотехнических риска, 5 из которых были оценены как препятствующие продолжению эксплуатации нефтепровода. Была проведена детальная оценка и приняты меры по смягчению последствий события, что позволило возобновить эксплуатацию трубопровода. Была мобилизована группа технических экспертов (как внутренних, так и из сторонних организаций) для проведения оценки и разработки мер по смягчению последствий. Ежедневно в целях картирования и классификации точек риска проводились проверки с вертолета, с помощью беспилотных летательных аппаратов и патрулирования полосы отвода инженерами-геотехниками. Для проверки целостности трубопровода был запущен внутритрубный снаряд и проведены испытания под давлением после вытеснения нефти водой. В местах схода крупных селевых потоков, пересекающих полосу отвода, были организованы аварийные земляные работы для снятия нагрузки с трубопровода и визуальной проверки целостности (выявленные нарушения были устранены в ходе аварийных защитных работ). Через 20 дней трубопровод смог возобновить свою работу в штатном режиме, параллельно проводились мониторинг и завершался комплекс необходимых работ. Авторы представляют этапы оценки и принятые критерии, а также основные превентивные/смягчающие решения и обсуждают уроки, извлеченные из этой ситуации.

Ключевые слова: *geotechnical emergency, extreme rainfall*

Ссылка для цитирования: Оливейра Х.Р., Маскареньяс П.В.С., Нето Ж.Д.Г., Сантос Т.К., Руссо В.К. (мл.). Экстремальные осадки, обрушившиеся на Бразильский трубопровод: оценка чрезвычайной ситуации и работы по смягчению последствий. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 578–579.

The full text of the article will be published in the Journal of Mountain Science.

Тенденции изменения селевой опасности, обусловленные климатическими изменениями в субтропическом поясе Кавказа

Л.М. Дзагания[1], Е.В. Дзагания[2], Г.Н. Сухаржевский[3], В.С. Бригида[4]

[1]Сочинский институт (филиал) Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Сочи, Россия, dzagluba@gmail.com

[2]ООО «ГК «Инжзащита», Сочи, Россия, krylenka@gmail.com

[3]Географическое общество Израиля, Иерусалим, Израиль, gleb.dzag@gmail.com

[4]Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», Сочи, Россия, 1z011@inbox.ru

Аннотация. В ходе данной работы выполнялось выявление региональных особенностей развития опасных селевых процессов, обусловленных климатическими изменениями в субтропической зоне Кавказа, в одной из привлекательных для жизни и туризма частей планеты.
Методика исследований заключалась в сборе и обработке данных из открытых источников о климатических и географических параметрах субтропической зоны Кавказа, анализе закономерностей изменений характеристик температуры и атмосферных осадков в зонах сухого и влажного климата. На основании динамики климатических изменений определены тенденции и степень изменения селевой активности в различных областях субтропического пояса Кавказа.

Ключевые слова: *субтропический пояс Кавказа, динамика, климатические изменения, температура воздуха, атмосферные осадки, селевой поток, селевой очаг, растительный покров, прогнозы, селевая опасность*

Ссылка для цитирования: Дзагания Л.М., Дзагания Е.В., Сухаржевский Г.Н., Бригида В.С. Тенденции изменения селевой опасности, обусловленные климатическими изменениями в субтропическом поясе Кавказа. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 580–590.

Trends in changes in debris flow hazard caused by climate change in the subtropical zone of the Caucasus

L.M. Dzaganiia[1], E.V. Dzaganiia[2], G.N. Sukharzhevskii[3], V.S. Brigida[4]

[1]Sochi Institute (Branch) of Peoples' Friendship University of Russia, Sochi, Russia, dzagluba@gmail.com

[2]LLC "GK "Inzhzashchita", Sochi, Russia, krylenka@gmail.com

[3]Israeli Geographical Association, Jerusalem, Israel, gleb.dzag@gmail.com

[4]Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia, 1z011@inbox.ru

Abstract. In the course of this work, the regional features of the development of dangerous debris flow processes caused by climate changes in the subtropical zone of the Caucasus, one of the most attractive parts of the planet for life and tourism, were identified.
The research methodology consisted of collecting and processing data from open sources on the climatic and geographical parameters of the subtropical zone of the Caucasus, analyzing patterns of changes in temperature and precipitation characteristics in dry and humid climate zones. Based on the dynamics of climate change, the trends and degrees of

change in debris flow activity in various areas of the subtropical zone of the Caucasus were determined.

Key words: *subtropical belt of the Caucasus, dynamics, climate change, air temperature, precipitation, debris flow, debris flow source, vegetation cover, forecasts, debris flow hazard*

Cite this article: Dzaganiia L.M., Dzaganiia E.V., Sukharzhevskii G.N., Brigida V.S. Trends in changes in debris flow hazard caused by climate change in the subtropical zone of the Caucasus. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 580–590.

Введение

Цель данного исследования состояла в изучении динамики климатических изменений последних двенадцати лет, определении трендов режимов температуры воздуха и атмосферных осадков на ближайшие годы, а также в прогнозе влияния этих изменений на проявления опасных селевых процессов в субтропической зоне Кавказа.

Особенности каждого климатического пояса являются весомым фактором в развитии и масштабе геоэкологических процессов. Мониторинг, учет и прогнозирование селевых и других опасных природных процессов производится официальными органами (МЧС России, Росгидромет) обычно в привязке к субъектам Российской Федерации либо к крупным природным комплексам, то есть преимущественно по административному принципу, а не по природным факторам.

В настоящей работе предлагается использовать географический подход изучения динамики селевой опасности на основе климатического и ландшафтного районирования (на примере субтропической зоны Кавказа). Для исследования выделяются области, расположенные в приморских и континентальных частях субтропического пояса Кавказа, на юге и на севере, во влажных и сухих зонах.

Климатический фактор, обуславливающий поверхностный сток (атмосферные осадки, формирующие и температурный режим, вызывающий оттепели и снеготаяние) является одним из трех обязательных условий образования селевых потоков, наряду с крутизной склонов и наличием селевых очагов в виде скоплений рыхлообломочного материала.

В связи с изменениями климата не остаются постоянными и границы климатических поясов. Поэтому в работе было важно определить современные границы субтропической зоны Кавказа, выделить различные по природным условиям области региона и рассмотреть особенности формирования селевых потоков с учетом направленности климатических изменений в каждой из областей.

Изменения климата в течении более десяти лет отражаются на видоизменениях растительных сообществ территории, что также влияет на процессы эрозии, скорость накопления рыхлообломочного материала и является весомым фактором образования селевых потоков.

Краткий обзор проблемы

Уникальность природы Кавказа привлекает миллионы туристов. Благоприятный субтропический климат способствует увеличению численности населения в странах субтропического пояса Кавказа: России, Грузии, Азербайджане, Армении, Турции. Увеличивается необходимость обеспечения безопасности селитебных территорий, территория которых расширяется все выше в горы.

Согласно исследованиям Н.Н. Коршуновой и др. [*2023*], в Южном федеральном округе Российской Федерации также наблюдается увеличение числа дней с аномально большими осадками во все сезоны. При наложении снеготаяния и дождевых осадков, а

также увеличении числа дней с аномально большими осадками, увеличивается опасность наводнений и схода селевых потоков. На большей части России весной и осенью возрастает число дней с аномально высокими температурами воздуха. С изменением температуры воздуха связано такое явление как оттепели. Оттепели относятся к неблагоприятным явлениям погоды, которые оказывают влияние на снеготаяние и повышение влажности подстилающих грунтов. Большое количество осадков зимой и весной обуславливают высокий уровень весеннего половодья. Образование селевых очагов в руслах рек в результате лавинных, эрозионных, оползневых, обвально-осыпных процессов при выпадении интенсивных осадков (более 30 мм за 12 ч) способствует повышению вероятности формирования селевых процессов. Так, в течение последних десятилетий в пределах территории Муниципального образования (МО) город Сочи в результате природных экзогенных процессов в долинах рек Кепша (Адлерский район Сочи) и Бжижу (Лазаревский район Сочи) естественным образом образовались мощные селевые очаги, вызвавшие сход селевых потоков на села Кепша и Тхагапш (рис. 1).

Рис. 1. Последствия схода природного селевого потока по руслу реки Бжижу на село Тхагапш 05.06.2016

Опасные природные процессы в регионе тесно связаны с климатическими условиями. В данной работе определялись тренды температуры воздуха и атмосферных осадков. Продолжительность периода исследований изменений параметров выбрана примерно равной одному циклу солнечной активности (12 лет). Также продолжительность ряда выбрана с учетом временной достаточности времени для преобразований биоценозов и растительных сообществ территорий.

В данной работе выполнялась задача определения параметров изменения климата и поиск закономерностей их пространственного распределения для региона. По полученным данным можно выявить области, наиболее подверженные опасности формирования селей в ближайшие годы.

Субтропическая зона Кавказа

Высокогорная система Кавказ является естественной границей поясов умеренного и субтропического климата. Северный склон Кавказа относят к умеренному поясу, а Закавказье - к субтропическому [*Батхиев, 2008*].

Согласно работе М.И. Давыдовой и др. [*1966*], горная система Кавказа занимает перешеек между Черным и Каспийским морями. Северная граница Кавказа проводится

по Кумо-Манычской впадине, которая в четвертичное время являлась проливом, соединявшим Каспийское море с Азовским морем.

Условная южная граница Кавказа проводится от Черного моря южнее устья реки Чорох. Далее на восток она идет по средневысотным хребтам и Карскому плоскогорью до реки Ахурян (Арпачай), левого притока реки Аракс. Затем она проходит по крупному естественному рубежу - эрозионно-тектонической долине реки Аракс. От нижнего течения реки Аракс граница идет по гребню Талышского хребта и выходит к побережью Каспийского моря у пункта Астара.

Согласно классификации климатов Земли, распределение осадков обусловливает принципиальное отличие субтропиков от умеренного климата, где по количеству преобладают летние осадки. По данному признаку, для уточнения климатических границ субтропического климата, может быть использовано соотношение осадков за тёплое и холодное полугодия.

Относительный индекс осадков представляет собой частное сумм осадков за теплое и холодное полугодия, которое в субтропической зоне, как правило, меньше единицы.

Нормированный индекс осадков равен частному разности сумм осадков теплого и холодного полугодия и годовой суммы осадков. Субтропическую зону выделяют по отрицательному значению этой величины.

По температурным параметрам территорию относят к субтропикам, если среднегодовая температура составляет более чем 14°С, а средняя температура наиболее холодного месяца (в северном полушарии – января, иногда февраля) превышает 0°С.

Для исследования климатических условий субтропического пояса Кавказа авторами выделены следующие области (таблица 1).

Таблица 1. Метеостанции климатических зон и областей субтропического пояса Кавказа, для которых выполнялись расчеты

Зона	Название области	Метеостанции			
		Пункт	Широта	Долгота	Высотные отметки, м
Влажная зона	Восточного Черноморского побережья	Туапсе	44°06'	39°04'	63
		Сочи	43°36'	39°43’	142
	Колхидской низменности	Кутаиси	42°10'	42°29’	68
	Ленкоранской низменности	Ленкорань	38°45'	48°49'	15
Сухая зона	Северо-Восточного Черноморского побережья	Анапа	44°54'	37°20'	32
		Новороссийск	44°45'	37°46’	3
		Геленджик	44°33.	38°4	14
	Куринской низменности	Тбилиси	41°42'	44°45'	425
	Среднего течения реки Аракс	Ыгдыр	39°56'	44°02'	858
	Западного Каспийского побережья	Махачкала	42°58'	47°30'	18
		Дербент	42°03'	48°18'	19
		Баку	40°25'	49°47'	60

Так как климат меняется во времени, то и границы субтропического пояса могут расширяться или сокращаться. Помимо климатических показателей, при определении границ пояса целесообразно учитывать особенности растительного покрова территорий [*Дзагания, 2020*]. Для влажной зоны пояса характерно произрастание вечнозеленых лиственных пород деревьев, кустарников и лиан. Видовое многообразие растительности (около 6000 видов) значительно превышает количество видов растений умеренного пояса (3500 видов). В сухих субтропиках распространен средиземноморский тип растительности [*Давыдова, 1966*].

Современные изменения климата в субтропической зоне Кавказа

Температура воздуха

Для оценки и анализа современных климатических изменений были определены количественные значения изменений климатических параметров (температуры атмосферного воздуха и осадков) за период 2012–2023 гг. для субтропиков Кавказа в пунктах, представленных в таблице 1. Для расчетов использовались исходные данные метеонаблюдений, опубликованные в открытом источнике.

Климатические параметры температуры атмосферного воздуха в различных областях субтропической зоны Кавказа за указанный период представлены в таблице 2. Среднегодовые температуры в пунктах наблюдений составляли по поясу от +13,7 до +16,0°С. Максимальная температура (+16,0°С) наблюдалась во влажной зоне в Кутаиси (Колхидская область). Минимальные температуры наблюдались на северной границе субтропического пояса Кавказа в условиях сухого климата в Анапе (+14,0°С) на Черноморском побережье (44°54' с.ш.) и в Махачкале (+13,7°С) на Каспийском побережье (42°58' с.ш.).

Таблица 2. Показатели температуры атмосферного воздуха и ее трендов за год в различных областях субтропической зоны Кавказа за период 2012–2023 гг.

Метеостанция	Показатели среднегодовой температура воздуха, °С		Показатели средней месячной температура воздуха января, °С		Разность температур среднегодовой и января, °С	
	Средняя $T_{год}$	Тренд $\Delta T_{год}$	$T_{янв}$	Тренд $\Delta T_{янв}$	Средняя $T_{год} - T_{янв}$	Тренд $\Delta(T_{год} - T_{янв})$
Зона влажного субтропического климата						
Туапсе	15,4	0,03	6,2	0,12	9.2	–0,09
Сочи	15,1	0,06	6,9	0,10	8,2	–0,04
Кутаиси*	16,0	–0,005	5,5	–0,18	10.5	0,17
Ленкорань*	15,6	0,03	5,1	–0,04	10.5	0,07
Зона сухого субтропического климата						
Анапа	14,0	0,06	4,0	0,18	9,9	–0,12
Новороссийск	14,4	0,18	5,4	0,16	9,5	–0,03
Геленджик	14,6	0,17	5,6	0,14	8,8	0,06
Тбилиси	14,4	0,07	3,4	0,04	11,0	0,03
Ыгдыр*	15.6	0,25	0,0	–0,23	15,6	0,49
Махачкала*	13,7	0,01	2,5	0,16	11,2	–0,18
Дербент	14,6	0,08	3,8	0,20	10,9	–0,12
Баку	15,6	0,07	5,2	0,25	10.4	–0,17
Среднее	15,2	0,08	4,6	0,08	10,8	0,00
Мин.	13,7	–0,01	0,00	–0,23	8,80	–0,18
Макс.	16,0	0,25	6,9	0,25	15,6	0,49

Условные обозначения (степень изменения характеристики)

Понижение	Описание	Баллы
0	отсутствует	0
0 > ΔT >- 0,10	Слабое	–1
-0,10 ≥ ΔT > -0.20	умеренное	–2
-0,20 ≥ ΔT > -0.30	среднее	–3
-0,30 ≥ ΔT	сильное	–4

Повышение	Описание	Баллы
0	отсутствует	0
0 < ΔT < 0,10	слабое	1
0,10 ≤ ΔT < 0.20	умеренное	2
0,20 ≤ ΔT < 0.30	среднее	3
0,30 ≤ ΔT	сильное	4

Примечание*: период наблюдений отличается.

Линейный тренд температуры в среднем по поясу был положительным и составлял в 0,08°С/год. Максимальный тренд наблюдался в сухой зоне: на континентальном юге – в Ыгдыре (+0,25°С/год), на Черноморском побережье в Новороссийске и Геленджике (+0,18 и +0,17°С/год). Слабый отрицательный тренд наблюдался в Кутаиси (–0,005°С/год), в условиях влажного континентального климата.

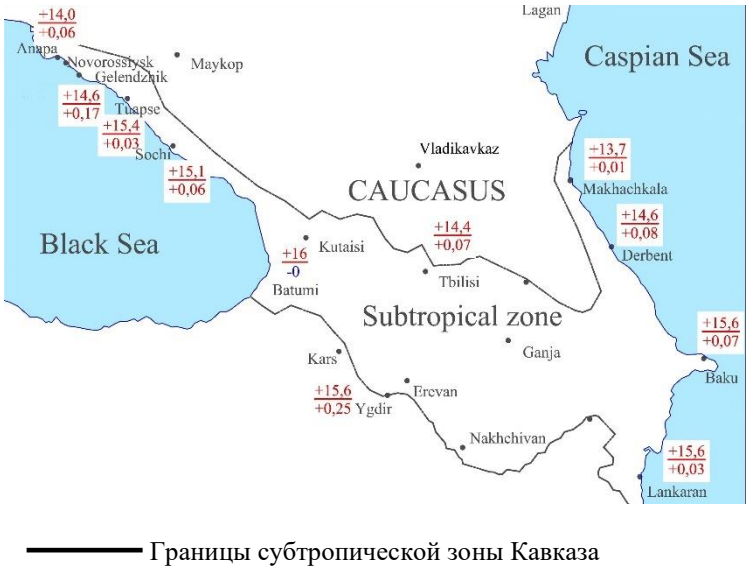


Рис. 2. Среднегодовая температура (в числителе) и ее среднее изменение за 1 год (в знаменателе) (° С) за период 2012–2023 гг.

Как следует из таблицы 2 и рис. 3, средние температуры января за последние 12 лет наблюдений составляли по региону от +0°С до +6,9°С. Максимальная средняя температура января наблюдалась в Сочи (западная морская влажная область). Минимальная среднемесячная температура января за период наблюдалась на южной границе субтропического пояса Кавказа в условиях сухого климата в Ыгдыре (+0°С, континентальная область). Средняя температура января субтропической зоны Кавказа за расчетный период составила +4,6°С.

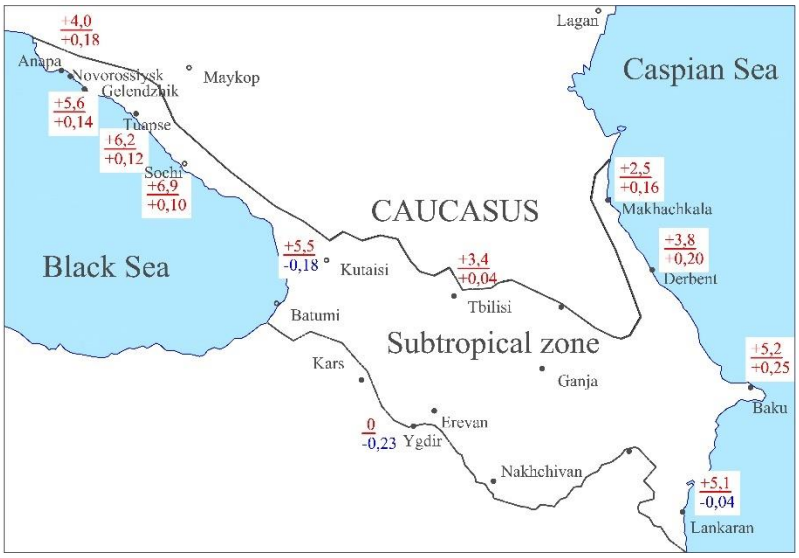


Рис. 3. Средняя температура января (в числителе) и ее среднее изменение за 1 год (в знаменателе) (° С) за период 2012–2023 гг.

В субтропическом поясе Кавказа за последние 12 лет наблюдалось повышение средней температуры января в среднем по региону на +0,08°С/год. Наибольшее повышение средней температуры января наблюдалось в Баку в условиях сухого морского климата Каспийского побережья (+0,25°С/год). Значительный рост средней температуры января отмечен в Дербенте, Анапе (+0,20, +0,18°С/год), в приморских северных сухих областях пояса. Максимальное понижение температуры января

происходило в южных областях в Ыгдыре (–0,23°С/год). Также похолодание происходило в Кутаиси (–0,18°С/год) и Ленкорани (–0,04°С/год).

Разность между среднегодовой температурой и температурой января в среднем по субтропическому поясу не изменялась. Уменьшалась разность среднегодовой и январской температур на морских побережьях (Махачкала (+0,18°С/год), Дербент, Баку, Анапа, Туапсе, Сочи) и увеличивалась – в континентальной области в Ыгдыре (+0,49°С/год), Кутаиси, Геленджике, Тбилиси.

Атмосферные осадки

Для определения категории селевой опасности в условиях высотной поясности предлагается использовать универсальный ландшафтный метод, который заключается в реализации шагов согласно приведенному ниже алгоритму.

В формировании значительной части опасных природных процессов одним из определяющих климатических воздействий является фактор степени увлажнения (количества осадков). Поэтому выполнены расчеты следующих климатических параметров: суммы осадков за год, суммы осадков за теплый период года, суммы осадков за холодный период года и изменений этих величин за период 2012–2023 гг. и, в среднем за один год.

В таблице 3 представлены показатели количества атмосферных осадков в различных областях субтропической зоны Кавказа за расчетный период с оценкой степени величины изменений. Из нее следует, что в субтропическом поясе Кавказа наблюдается весьма неоднородное увлажнение с разнонаправленными тенденциями.

Таблица 3. Показатели количества атмосферных осадков, дней с атмосферными осадками и трендов за год в различных областях субтропического пояса Кавказа за период 2012 – 2023 гг.

Станция	Количество осадков за год, $R_{год}$, мм		Количество осадков за теплый период года (апрель – октябрь), мм		Количество осадков за холодный период года (ноябрь – март), мм		Количество дней с осадками	
	Средняя	Тренд	Среднее	Тренд	Среднее	Тренд	За год	Тренд
Зона влажного субтропического климата								
Туапсе	1383	21	693	–11	691	31	168	2,6
Сочи	1389	62	644	23	473	39	130	6,9
Кутаиси	1347	46	696	27	651	19	154	0,4
Ленкорань*	1602	24	733	24	869	–0,1	142	5,1
Зона сухого субтропического климата								
Анапа	622	14	348	16	274	2	114	3,1
Новороссийск	664	32	350	16	313	16	139	14,3
Геленджик*	588	30	320	13	268	17	111	5,6
Тбилиси	262	–1	198	–1	63	–0,1	73	–0,1
Ыгдыр*	236	–3,3	159	–2,2	77	–1,1	106	–1,1
Махачкала*	404	–18	225	–9	179	–9	116	0,3
Дербент	412	2	212	0,3	197	1,6	104	–0,8
Среднее	810	19	416	9	369	10	123	3
Мин.	236	–18	159	–11	63	–9	73	–1,1
Макс.	1602	62	733	27	869	39	168	14,3

Условные обозначения (степень изменения характеристики)

Понижение	Описание	Баллы		Повышение	Описание	Баллы
0	отсутствует	0		0	отсутствует	0
0 > ΔR >- 1	слабое	–1		0 < ΔR < 1	слабое	1
–1 ≥ ΔR > –10	умеренное	–2		1 ≤ ΔR < 10	умеренное	2
–10 ≥ ΔR > –20	среднее	–3		10 ≤ ΔR < 20	среднее	3
–20 ≥ ΔR	сильное	–4		20 ≤ ΔR	сильное	4

Примечание: знак «*» означает, что расчетный период отличается.

На рис. 4 представлено пространственное распределение показателей количества осадков (мм) среднего за год и дней с осадками в году, и их изменений за один год в среднем в течение расчетного периода.

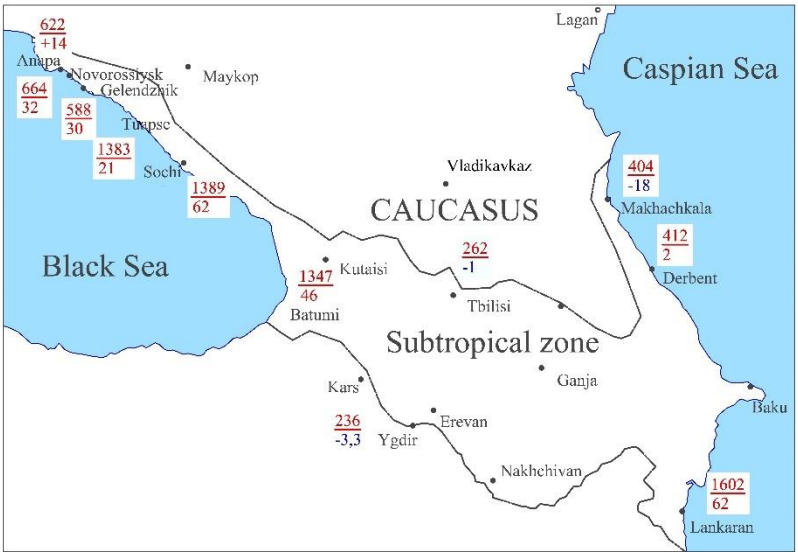


Рис. 4. Среднегодовое количество (мм) осадков (в числителе) и тренд за 1 год (в знаменателе), по наблюдениям за период 2012–2023 гг.

Величина годовой суммы осадков за последние 12 лет наблюдений (2012–2023 гг.) составляла по региону от 232 мм (Ыгдыр) до +1602 мм (Ленкорань). В областях влажного субтропического климата средняя сумма осадков составила 1375 мм (от 1285 мм до 1602°мм), в областях сухого субтропического климата – 470 мм (от 232 мм до 663 мм).

При этом повсеместно наблюдается, за исключением юго-восточной части пояса (в Баку – минус 26 мм/год, в Игдыре – минус 8 мм/год) прирост среднегодовой суммы осадков в среднем на 24 мм/год (от 8 мм в Махачкале до 72 мм – в Сочи). Средний прирост сумм осадков за год для влажной зоны составил +41 мм / год, для сухой зоны – +14,5 мм/год.

Таким образом, во влажных зонах пояса повсеместно наблюдалось увеличение количества осадков и дней с осадками, которые вызывают паводки, в том числе и селевые. В континентальных областях и Каспийского побережья сухой зоны наблюдалось сокращение количества осадков и дней с осадками. На Черноморском побережье в сухой зоне отмечено увеличение количества осадков и дней с осадками.

Влияние климатических изменений на селевые процессы

По сочетанию темпов и направленности климатических изменений авторами выделено несколько типов и подтипов изменений климата в субтропической зоне Кавказа (таблица 4).

Таблица 4. Типизация изменений климата в субтропическом поясе Кавказа за 2012–2023 гг.

Тип изменения климата		Зона	Область	Станция	Характеристика изменений климатических параметров
1	1а	Влажного субтропи-ческого климата	Побережья Черного моря	Туапсе	Умеренное потепление с сокращением разности $T_{год}$ и $T_{янв}$ и сильное увлажнение (наибольшее в Сочи: +62 мм/год)
				Сочи	
		Сухого субтропи-		Анапа	
				Новороссийск	

Тип изменения климата		Зона	Область	Станция	Характеристика изменений климатических параметров
	1б	ческого климата		Геленджик	-//- с увеличением разности $T_{год}$ и $T_{янв}$
2		Влажного субтропи-ческого климата	Колхидской низменности	Кутаиси	Слабое похолодание с увеличением разности $T_{год}$ и $T_{янв}$ и с сильным увлажнением
3			Ленкоранской низменности	Ленкорань	Среднегодовое потепление, похолодание в январе с увеличением разности $T_{год}$ и $T_{янв}$, значительным ростом количества осадков в теплый период и понижением – в холодный период
4	4а	Сухого субтропи-ческого климата	Каспийского побережья	Махачкала Дербент	Потепление с сокращением разности $T_{год}$ и $T_{янв}$ и с ростом засушливости климата (незначительное увеличение количества осадков в Дербенте)
	4б		Куринской низменности	Тбилиси	
5			Долины реки Аракс	Ыгдыр	Среднегодовое потепление, похолодание в январе с увеличением разности $T_{год}$ и $T_{янв}$ и ростом засушливости климата

Оценим влияние климатических изменений на увеличение селевой опасности. Для этого оценим влияние изменений климата на основные факторы формирования селевых потоков по пятибальной шкале на селеформирующие факторы.

При определении направленности изменений селевой опасности приняты допущения, что в областях исследования возможно образование селевых потоков. Начальные селевые условия областей не оценивались и не сравнивались. Также в настоящей работе не учитывалось антропогенное воздействие на территории.

Выделены основные факторы образования селей, на которые влияет климат: осадки и снеготаяние, которые вызывают склоновый сток, паводки и половодье, смерчи, обвалы и осыпи, оползни, эрозия склонов, растительный покров.

Предполагается, что при увеличении количества осадков в теплом субтропическом климате создаются благоприятные условия для роста и распространения растительности, в результате чего сокращается эрозия склонов.

Обвальные и осыпные процессы при увеличении увлажнения могут усиливаться. Зарастание склонов лесом при достаточном увлажнении в теплом климате может укреплять склоны [*Дзагания, 2020*] и препятствовать развитию разрушительных гравитационных процессов, в результате которых происходит скопление рыхлообломочного материала.

Смерчи наблюдаются в приморских областях.

Результаты определений влияния климата и среднее обобщенное значение по типу климата представлено в таблице 5.

Таблица 5. Оценка динамики селевой опасности, вызванной колебаниями климата в субтропическом поясе Кавказа за период 2012–2023 гг. для выделенных типов климатических изменений по пятибальной шкале (0 баллов – без увеличения, 4 балла – сильное воздействие)

Тип изменения климата (по таблице 4)		Дождевые осадки	Снего-таяние	Смерч	Обвалы, осыпи	Оползни	Эрозия склонов	Расти-тельный покров	Оценка изменений селевой опасности (балл)
1	1а	4	4	1	2	4	–4	–4	1,0
	1б	4	2	4	3	4	–3	–3	1,6
2		4	3	0	2	4	–3	–3	1,0
3		4	–1	2	2	4	–3	–3	0,7
4	4а	–3	–2	1	4	–3	4	4	0,7
	4б	–2	–1	0	2	–2	3	2	0,3

Тип изменения климата (по таблице 4)	Дождевые осадки	Снего-таяние	Смерч	Обвалы, осыпи	Оползни	Эрозия склонов	Расти-тельный покров	Оценка изменений селевой опасности (балл)
5	–2	1	0	2	–2	2	2	0,4

В таблице 6 представлена характеристика тенденций селевой опасности по областям субтропического пояса Кавказа в соответствии с выделенными типами изменений климата за последние 12 лет.

Таблица 6. Оценка динамики селевой опасности, вызванной климатическими изменениями в субтропическом поясе Кавказа по областям и типам климатических изменений за 2012–2023 гг.

Тип изменения климата		Зона	Область	Станция	Характеристика динамики селевой опасности
1	1а	Влажного субтропического климата	Побережья Черного моря	Туапсе	умеренный рост
				Сочи	
		Сухого субтропического климата		Анапа	
				Новороссийск	
	1б			Геленджик	умеренный рост
2		Влажного субтропического климата	Колхидской низменности	Кутаиси	умеренный рост
3			Ленкоранской низменности	Ленкорань	слабый рост
4	4а	Сухого субтропического климата	Каспийского побережья	Махачкала Дербент	слабый рост
	4б		Куринской низменности	Тбилиси	
5			Долины реки Аракс	Ыгдыр	слабый рост

Выводы

По результатам проведенных исследований климатических данных в субтропическом поясе Кавказа за период 2012–2023 гг., авторами выделено пять основных сценариев изменения режимов температуры воздуха и атмосферных осадков (таблицы 2–4) с их пространственным распределением по семи областям пояса и двум климатическим зонам (сухой и влажной). Наиболее сильное повышение количество осадков имело место на Черноморском побережье, независимо того, сухая или влажная зона. Повсеместно, кроме Колхидской и Ленкоранской низменностей, повысилась температура воздуха, более всего в среднем течении Куры (Ыгдыр).

Выявлено две основные тенденции изменения селевой опасности в субтропическом поясе Кавказа под воздействием изменений климата: умеренный рост и слабый рост (таблицы 5, 6).

Наибольший рост селевой опасности отмечен в области Черноморского побережья субтропического пояса Кавказа в зоне морского сухого климата (Геленджик), где происходило сильное увлажнение, умеренное потепление с увеличением разности среднегодовой температуры воздуха и температуры января. Несколько ниже умеренный рост селевой опасности выявлен во влажных и сухих зонах областей Черноморского побережья (Новороссийск, Туапсе, Сочи). В этих местностях резко увеличились осадки, происходили умеренный рост температуры воздуха и сокращение разности среднегодовой температуры воздуха и средней температуры января.

Тенденции слабого увеличения активизации селевых процессов отмечены во влажных и сухих областях Каспийского побережья и Ленкоранской низменности. Наименьший слабый рост селевой опасности определен в континентальных областях Куринской низменности, долины реки Аракс.

Для поиска закономерностей тенденций селевой опасности в зависимости от изменений климата авторами применена оригинальная методика, которая может быть усовершенствована и апробирована для различных по длительности метеорологических циклов. В дальнейшем, для оценки достоверности и определения длительности обнаруженных тенденций и совершенствования методики, может быть проведен ретроспективный сравнительный анализ аналитических выводов и фактических событий. Полученные данные могут быть использованы для предупреждения чрезвычайных ситуаций, вызванных селевыми процессами.

Благодарности

Авторы благодарят руководство и преподавателей Сочинского института (филиала) РУДН за полученные знания, научную и методическую поддержку и помощь. Также выражаем признательность руководству и коллективу ООО «ГК «Инжзащита» – за содействие и предоставленную возможность выполнения исследований.

Список литературы

Батхиев А.М. Своеобразие физико-географических условий Кавказа как основа дифференциации природных экосистем / А.М. Батхиев // Рефлексия. – 2008. – № 2. – С. 3-13. – EDN WFRZQJ.

Давыдова М.И. Физическая география СССР / М.И. Давыдова [и д.р.]. – М.: Просвещение, 1966 – 847 с.

Дзагания Л.М. Применение лесомелиорации для селезащиты на Черноморском побережье Западного Кавказа / Л.М. Дзагания // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Труды 6-й Международной конференции, Душанбе–Хорог, Таджикистан, 20–26 сентября 2021 года / Отв. редакторы С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. Том 1. – Душанбе–Хорог, Таджикистан: Общество с ограниченной ответственностью "Промоушн", 2020. – С. 405–417. – EDN JKEEUX.

Интернет-ресурс https://rp5.ru/ Copyright © ООО «Расписание Погоды», 2004–2023.

Коршунова Н.Н. Региональные особенности изменения норм основных климатических параметров на территории России / Н.Н. Коршунова, Н.В. Швець // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2023. – № 1(387). – С. 131–147. – DOI 10.37162/2618-9631-2023-1-131-147. – EDN ZNTUYC.

Селевые паводки северного склона хребта Хамар-Дабан в 2019 году

А.А. Рыбченко, А.В. Кадетова, А.А. Юрьев

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, rybchenk@crust.irk.ru

Аннотация. Склоны хребта Хамар-Дабан известны своей селеактивностью, этот район по праву считается одним из самых селеопасных районов южного Прибайкалья. Опасность активизации селевых процессов наиболее актуальна в пределах населенных пунктов и объектов промышленной и дорожной отраслей, которые расположены в предгорной зоне. Последний раз катастрофические селевые потоки в этом районе сходили с гор в июле 1971 г. В 2019 г., в последнюю декаду июля, на склонах хребта Хамар-Дабан была зафиксирована селевая активность, вызванная выпадением экстремального количество атмосферных осадков. Обильные атмосферные осадки сталь причиной формирования селевых паводков (с плотностью потока около 1100 кг/м^3). Сход селевых поводков привел к трансформации русел горных рек, к изменению их положения, аккумуляции в предгорной части селевого материала. Однако по масштабам проявления селевых процессов и их последствий событие 2019 г. существенно уступает событию 1971 г. По мнению авторов, причина этого в преобладающем механизме питания селевых потоков твердой составляющей в каждом событии. В 1971 г. в питании твердой фазы селевых потоков преобладал оползневой механизм, а в 2019 г. участков с оползневым механизмом питания было немного, основное питание твердой фазой осуществлялось за счет эрозионного механизма.

Ключевые слова: *экстремальные осадки, селевые паводки, хребет Хамар-Дабан, селевая опасность*

Ссылка для цитирования: Рыбченко А.А., Кадетова А.В., Юрьев А.А. Селевые паводки северного склона хребта Хамар-Дабан в 2019 году. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 591–595.

Mountain debris flows on the northern slope of the Khamar-Daban Range in 2019

A.A. Rybchenko, A.V. Kadetova, A.A. Yuryev

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia, rybchenk@crust.irk.ru

Abstract. The slopes of the Khamar-Daban Range are known for their debris flow activity; this area is rightfully considered one of the most debris flow-prone areas of the southern Baikal region. The hazard of increased debris flows is most acute in areas of settlements and industrial and road facilities located within the foothill zone. The last catastrophic debris flows in this area occurred in July 1971. At the end of July 2019, debris flow activity was recorded on the slopes of the Khamar-Daban Range, caused by extreme amounts of precipitation. Heavy precipitation caused the formation of mountain debris flow (the flow density reached about 1100 kg/m^3). Debris flows have led to the transformation of mountain river beds, to a change in their position, and to the accumulation of debris flow material in the foothills. However, in terms of scale and consequences, the debris flows of 2019 are significantly inferior to the event of 1971. According to the authors, the reason for this is the predominant mechanism of feeding debris flows of the solid component in each event. In 1971, the landslide mechanism predominated in the feeding of the solid phase of debris flows, and in 2019 there were few areas with a landslide feeding

mechanism; the main feeding of the solid phase was carried out due to the erosion mechanism.

Key words: *extreme precipitation, debris flows, Khamar-Daban ridge, debris flow hazard*

Cite this article: Rybchenko A.A., Kadetova A.V., Yuryev A.A. Mountain debris flows on the northern slope of the Khamar-Daban Range in 2019. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 591–595.

Введение

Селевые потоки являются одними из наиболее опасных экзогенных геологических процессов. Причина высокой опасности селевого процесса – высокая плотность и скорость движения селевых масс, что обеспечивает большую разрушительную силу селевого потока. Селевые процессы распространены во многих горных районах мира. Наибольшее распространение, около 70%, имеют сели дождевого генезиса [*Dowling, Santi, 2014*].

Одним из селеопасных районов Российской Федерации является Южное Прибайкалье. В Иркутской области самым селеопасным районом являются бассейны горных рек хребта Хамар-Дабан. Селевая активность в этом районе фиксировалась в: 1849, 1863, 1890, 1903, 1905, 1910, 1915, 1919, 1925, 1927, 1932, 1934, 1935, 1938, 1940, 1942, 1945, 1947, 1952, 1956, 1959, 1960, 1962, 1965, 1971, 1973 гг. [*Агафонов, Макаров, 1996*], последний раз крупные (катастрофические) селевые потоки в этом районе были зафиксированы в 1971 г. Повторяемость схода селевых потоков в районе Хамар-Дабана у разных исследователей отличается. Так, по данным Б.П. Агафонова и С.А. Макарова повторяемость схода приходится на 17–20 лет [*Агафонов, Макаров, 1996*], совпадая с солнечными циклами. По данным В.К. Лапердина, повторяемость селевых потоков составляет 12–40 лет [*Лапердин, Качура, 2010*]. По данным В.П. Солоненко, в районе г. Слюдянка повторяемость схода селевых потоков составляет 7–8 лет [*Солоненко, 1960*].

Условия развития селевых процессов хребет Хамар-Дабан

Анализ природных факторов, определяющих активизацию селевых процессов в Южном Прибайкалье, позволяет выделить следующие факторы селеформирования:

– высокая раздробленность коренных пород и их физико-механические и физико-химические свойства по отношению к агентам выветривания;

– наличие большого количества рыхлообломочных отложений, скопившихся в виде больших и малых очагов, имеющих различный гранулометрический состав от крупно- до мелкообломочного материала;

– значительная крутизна тальвегов;

– высокая сейсмотектоническая активность региона;

– особенность тепло- и влагообеспеченности территории, определяющая неравномерный характер выпадения и распределения осадков и температурного режима по годам и сезонам года.

Горная часть территории сложена магматическими и метаморфическими породами докембрийского возраста, кайнозойскими базальтами, приуроченными к водораздельной части хребта Хамар-Дабан. Они представлены гранитоидами, гнейсами, сланцами, мраморами, песчаниками, имеющими различные физико-химические и физико-механические свойства, которые определяют различную устойчивость пород к агентам выветривания и их гранулометрический состав.

Выходы гранитоидов встречаются в виде останцев на водоразделах или в виде отдельных даек, выступающих на склонах и в днищах долин водотоков. По физико-

механическим свойствам граниты относятся к прочным и устойчивым к выветриванию породам (250–50 МПа), но при водонасыщении они теряют прочность на 10–25 %. В местах тектонических нарушений граниты разрушены до щебня, дресвы, песка и тектонической глинки, например, имеющих место в долине правого нижнего притока ручья Сухого. Скорость выветривания (денудации) гранитоидной группы пород по данным многолетних (более 35 лет) наблюдений находится в пределах 0,020–0,008 мм/год. Комплекс метаморфических пород с учетом свойств по отношению к агентам выветривания разделен на две группы. В общем прочность метаморфических пород в естественном состоянии варьируется в пределах 100–300 МПа, они устойчивы по отношению к агентам выветривания и имеют скорость денудации от 0,1034 до 0,0090 мм/год. В первую группу объединены породы слюдянской серии, которые в основном представлены мраморами чистого состава, иногда с включениями линз и прослоев кварцитов, скарноидов и гнейсов. При выветривании мраморов большую роль играет карстовая денудация, которая создает в них различные полости, ниши и т.п. Выветриваясь, породы распадаются или на очень мелкие фракции – дресву, щебень, или на крупные глыбы. Об этом свидетельствуют развалы глыб на склонах и валунов на конусах выноса, величина которых составляет 2,5–3,0 м. Во вторую группу включены биотитово-гранатовые гнейсы и пироксено-амфиболитовые сланцы, которые за счет рассланцованности и высокой тектонической трещиноватости поддаются интенсивному выветриванию и распадаются на различные по величине фракции с постепенным переходом от крупных глыб до щебня и дресвы.

Четвертичные рыхлые образования развиваются на фоне дезинтеграции разнообразных комплексов коренных пород. Рыхлые грунты имеют широкий спектр геолого-генетических и возрастных групп, отличающихся механическим составом и инженерно-реологическими свойствами (сыпучими, плывунными и т.д.), и представлены аллювиальными, озерными, ледниковыми, флювиогляциальными и элювиальными отложениями (галечниками с редкими валунами, с прослоями песков, глин темно-серых или песками разнозернистыми с редкой галькой и валунами). Например, озерные слагают разновысокие (52–60, 72–82 и более 100 м) террасы оз. Байкал, а мощность толщи, установленная по естественным обнажениям, составляет 80–120 м. Мощность рыхлых отложений на склонах долин находится в пределах 0,1–10 м, они неоднородны по гранулометрическому составу. Их физико-механические характеристики имеют признаки тиксотропности. По этим свойствам породы песчаного и дресвяно-песчаного состава можно отнести к плывунам первого типа, способным переходить в разжиженное состояние при воздействии фильтрационного потока, а суглинки и супеси относятся к плывунам второго типа с тиксотропно-дилатантными свойствами, т.е. они способны переходить в плывунное состояние даже при сейсмических воздействиях. У этих пород наблюдается уменьшение угла естественного откоса под водой (на 7–10°). В основной массе, в условиях превосходства денудации над осадконакоплением, преобладает грубообломочный материал (глыбы, щебень, дресва) – на склонах и полуокатанные глыбы, песок с незначительным содержанием пылеватых и глинистых фракций – в пределах конусов выноса.

Геоморфологические особенности южного побережья оз. Байкал способствуют формированию селей, благодаря тому что северный склон хребта Хамар-Дабан дробно расчленен эрозионной сетью, где в среднем на 3 км длины берега приходится одна речка и два суходола, выработанные преимущественно по сейсмотектоническим нарушениям. Относительное превышение устьев рек над истоками достигает 1970 м, что при малой длине рек обусловливает большие уклоны тальвегов, поэтому большинство рек и даже суходолов с площадью бассейнов до 50 км^2 являются селеопасными.

Сейсмотектоника является неотрывной частью современной геодинамики всей Байкальской рифтовой зоны, включая и Южное Прибайкалье. В поднятиях хребта Хамар Дабан сосредоточены многочисленные сейсмогенные разрывы, связанные с землетрясениями недавнего прошлого в 10 и 11 баллов [*Хромовских, 1963; Солоненко, 1964*]. Южное Прибайкалье относится к наиболее сейсмоактивным районам Байкальской рифтовой зоны. За период с начала освоения данной территории в XVII в. и до наших

дней здесь зарегистрировано более 600 землетрясений. Высокая сейсмическая активность стимулирует развитие селеформирующих процессов. Устойчивость рыхлообломочного материала на склонах при различной величине сотрясаемости зависит не только от силы землетрясений, но и от крутизны, высоты, экспозиции, расчлененности склонов и мощности рыхлых грунтов, их увлажненности, сыпучести, вязкости и криогенных особенностей. Преобладание кристаллических пород и глубокое сезонное промерзание создают благоприятные условия для слабого затухания сейсмических волн на протяжении 7–8 месяцев в году. При оттаивании льда, связующего раздробленные коренные породы и рыхлые отложения, сейсмическая устойчивость на склонах заметно снижается. В связи с этим роль сезонного аспекта землетрясений существенно влияет на интенсивность селеформирующих процессов и зависит от времени года. Например, движение дисперсных образований при увлажнении дождевыми или талыми водами может произойти при землетрясениях интенсивностью 4–5 баллов – особенно в период максимального оттаивания грунтов, что приводит к формированию оползней-сплывов и, как следствие, трансформированию их в сели.

Поскольку по генетической классификации зафиксированные селевые потоки хребта Хамар-Дабана относятся к дождевому типу селевых потоков, то климатическому фактору отводится ведущая роль в формировании селей и паводков в Южном Прибайкалье. Особенности тепло- и влагообеспеченности региона характеризуются неравномерным распределением и выпадением атмосферных осадков (70% осадков приходится на теплый период), вероятность выпадения селеформирующих осадков с суточным количеством 100 мм в среднем составляет один раз в 15 лет, 200 мм и более – один раз в 50 лет.

Селевой паводок 2019 года

В июле 2019 г. с северного склона хребта Хамар-Дабан активизировались селевые процессы. В предгорной зоне с наиболее развитой инфраструктурой селевые процессы прошли в виде селевых паводков. Причиной активизации стало выпадение аномального количества жидких атмосферных осадков, в период с 25 по 29 июля общая сумма осадков составила 449 мм, максимальное суточное значение зарегистрировано 28 июля и составило 209 мм (по данным метеостанции «Хамар-Дабан»). Для этого района выпадения жидких атмосферных осадков является основной причиной формирования селевых потоков.

После схода поводка было проведено полевое обследование в юго-западной части оз. Байкал в селеопасных бассейнах рек, в районе г. Байкальск – Большая Осиновка, Солзан, Харлахта и Бабха. В результате выпадения аномального количества осадков поднялся уровень воды в реках Солзан, Утулик, Снежная, Слюдянка. Максимально зафиксированные значения на гидропостах составили: Солзан-Байкальск – 417 см, при критическом значении 400 см, Утулик-Утулик – 349 см при критическом значении 450 см, Снежная-Выдрино – 378 см при критическом значении 390 см, Слюдянка-Слюдянка – 398 см при критическом значении 290 см.

На момент обследования уровень существенно снизился, позволив увидеть последствия высокого паводка.

Обследование бассейнов рек Большая Осиновка, Солзан, Харлахта и Бабха показало широкое развитие процессов в пределах русел этих рек. Зафиксированы процессы преобразования русел в результате боковой и донной эрозии – перераспределение русловых отложений, размыв берегов (рис. 1) после прохождения селевого паводка, который занимает промежуточное положение между типичным селевым (грязе- и водокаменным) потоком и паводком. От типичных селевых потоков он отличается слабой насыщенностью обломочным материалом, плотностью менее 1100 кг/м³. В процессе прохождения селевого паводка вовлечение твердой составляющей в водный поток происходило за счет эрозионного размыва донных и береговых отложений. Перемещения твердой фазы осуществлялось как за счет взвешенных наносов мелкой фракции, так и за счет влекомых наносов – крупной

фракции, перемещение которых осуществляется в придонном слое путем волочения и перекатывания, что сопровождается характерным звуком при соударении крупных валунов и глыб, зафиксированное при наземном обследовании р. Большая Осиновка.

а б

Рис. 1. Изменение русла р. Большая Осиновка: а – до прохождения паводка; б – после прохождения паводка (31.07.2019)

Были зафиксированы проявления экзогенных геологических процессов гравитационного генезиса – оползни-сплывы, обвалы, но их проявления были единичными и незначительными по объему перемещенной горной породы. В пределах русел рек были зафиксированы аккумулятивные формы селевых потоков – селевые валы, террасы.

Выводы

Аномальное количество жидких атмосферных осадков в июле 2019 г. привело к активизации селевых процессов на горных реках северного склона хребта Хамар-Дабан. Наибольшая активизация селевых процессов, закономерно, зафиксирована в горной части района. В предгорной, наиболее освоенной части селевые процессы проявились в виде селевых паводков. Анализируя катастрофические селевые процессы 1971 г. и селевую активность 2019 г., следует предположить, что в 1971 г. за счет оползневого механизма питания [*Лапердин и др., 1971*] происходило формирование селевых потоков с более высокой плотностью, чем в 2019 г., при котором выявлено преобладание эрозионного механизма питание селевых потоков твердой составляющей.

Список литературы

Dowling C. A., Santi P. M. Debris flows and their toll on human life: a global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011 //Natural hazards. – 2014. – Т. 71. – №. 1. – С. 203-227

Агафонов Б.П., Макаров С.А. Ареалы селевых потоков в Прибайкалье // Геоэкология. – 1996. – № 2. – С. 65–71.

Лапердин В.К., Качура Р.А. Геодинамика опасных процессов в зонах природно-техногенных комплексов Восточной Сибири. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010. – 312 с.

Солоненко В.П. Очерки по инженерной геологии Восточной Сибири. – Иркутск, 1960. – 88 с.

Солоненко В.П. Сейсмичность Южного Прибайкалья и опыт сейсмического микрорайонирования конуса выноса на озере Байкал // Труды Института земной коры, 1964. Вып. 18, С. 169 203.

Хромовских В.С. Сейсмогенные структуры Южного Прибайкалья // Геология и геофизика. – 1963. – № 8. – С. 68–81.

Лапердин В.К., Демьянович Н.И., Тржцинский Ю.Б. Катастрофические паводки 1971 г. и склоновые процессы // Инфор. сб. ИЗК СО АН СССР. – Иркутск, 1971. – С. 19–23.

Author's Index

Adzhiev A.Kh.	10, 17
Agzamov F.S.	86
Akaev A.R.	50
Akshayakov Z.T.	252
Aldabergen U.R.	334
Alekperova S.O.	28
Aleshin Yu.G.	500
Alexandrov P.A.	68
Ali H.	429
Ali L.	511
Anaev M.A.	307
Ashabokov A.B.	252
Awan A.A.	429
Banerjee A.	445
Baranovsky A.F.	38
Barykina O.S.	526
Bekkiev M.Yu.	50
Blagoveshchensky V.P.	60
Bogdanov I.S.	68
Bolshakov I.E.	526
Brigida V.S.	580
Bulanov S.A.	226
Chadromtsev B.	115
Chen F.	577
Chen J.C.	77, 166
Chen L.	535
Chen S.L.	179
Chernomorets S.S.	200, 458
Chiu W.-Y.	285
Chou H.T.	189
Dekayir A.	147
Delgado-Téllez R.	84, 367
Dergachev K.V.	86
Dergacheva I.V.	86, 94
Dey L.	224
Ding M.	367
Dokukin M.D.	50, 307
Dzaganiia E.V.	104, 262, 580
Dzaganiia L.M.	580
Dzaganiia M.Yu.	262
Efremov Yu.V.	338
Fan J.Q.	77, 166
Fang Y.M.	179

Fazylov A. 445
Frolova J.V. 526
Fuchs S. 115
Gao B. 535
Gao H.M. 140
Garova E. 115
Gavardashvili G.V. 125
Gaysarova A.A. 212
Gergokova Z.Zh. 134
Gokceoglu C. 147
Goncharenko V.V. 273
Gorbunov A.S. 226
Gou Y. 140
Grebennikov P. 115
Grigoriev I.I. 418
Gulakhmadov A.A. 232
Gulayozov M. 445
Gulyaeva T.S. 60
Gunya A.N. 226
Harmouzi H. 147
He K. 577
Hsieh M.H. 157
Hsu H.-C. 285
Huang H. 535
Huang K.L. 189
Huang W.S. 77, 166
Huang Y.M. 179
Hübl J. 470
Iltuganov I. 115
Imronshoev Kh.A. 394
Iudina V.A. 200
Ivanenko T.A. 212
Jan C.-D. 224
Janjua M.A. 429
Kadetova A.V. 591
Kaitna R. 470
Kalashnikova O.Yu. 359
Kalov R.Kh. 50
Kamalbekova A.N. 334
Kang S. 445
Karavaev V.A. 226
Karieva F.A. 232
Karimov F.H. 238
Kerefova Z.M. 17
Kerimov A.M. 252
Khadzhiev M.M. 307
Khar'kovets E.G. 200
Kirenskaya T.L. 60

Klimov S.I. 336
Kondratyeva N.V. 10, 17
Korneva I.A. 260
Kornilova E.D. 260
Kortiev A.L. 17
Koschuch R. 470
Krylenko I.N. 260
Krylenko I.V. 262
Krylenko V.I. 262
Kuo F.Y. 285
Kurasheva O.A. 252
Kuzhageldina N.U. 563
Lai X.Z. 77, 166
Lebedeva L.S. 273
Li F.B. 77, 166
Li G.L. 77, 166
Li H. 535
Li J. 535
Li Y. 535
Lin B.-S. 285
Liu K.-F. 302
Lobanov P. 115
Lu H. 577
Ma J. 577
Malneva I.V. 307
Mamadjonov Y. 445
Mamiyeva S.A. 316
Mascarenhas P.V.S. 578
Matsiy S.I. 327
Matsiy V.S. 327
Mazhaisky Yu.A. 572
McArdell B. 470
Medeu A.R. 60, 334
Merkushkin A.S. 86, 336
Mirjaparov M. 94
Mironyuk S.G. 338
Motovilov Yu.G. 260
Myagkov S.S. 86
Myagkov S.V. 94
Navruzshoev H. 445
Nefeslioglu H.A. 147
Neto J.D.G. 578
Nigmatov A.N. 349
Niyazov J.B. 359
Oliveira H.R. 578
Pedanov A. 115
Peña-de la Cruz A. 84, 367
Petrova E.G. 376

Petrushina M.N. 226
Ponomarev A.A. 384
Ponomarjovs P. 115
Popov N.V. 334
Postnikova T.N. 260
Raimbekov Yu.Kh. 394
Ranova S.U. 60, 334
Rets E.P. 260
Romanenko F.A. 401
Rouai M. 147
Russo W.C. Jr 578
Rybak O.O. 260
Rybalchenko S.V. 408
Rybchenko A.A. 591
Rysin I.I. 418
Sadiq S. 429
Safarov M. 445
Samarkina-Dzharskaia L.M. 104
Samarkin-Dzharskii K.G. 104
Santos T.C. 578
Savernyuk E.A. 200, 458
Savón-Vaciano Y. 84, 367
Schöffl T. 470
Seminozhenko S.S. 226
Sezer E.A. 147
Sherkhov A.Kh. 479
Sheshenev N.V. 572
Sidaravičute U.R. 327
Song Y.T. 140
Stepanov B.S. 485
Strom A.L. 487
Sukharzhevskii G.N. 580
Tarikhazer S.A. 489
Tian Y. 535
Tillahodjaeva Z.D. 94
Torgoev I.A. 500
Trofimov G.N. 336
Uddin N. 511
Uddin Z. 511
Ulaeva L.N. 517
Vetrova N.M. 212
Viña-Dávila N. 84
Viskhadzhieva K.S. 200
Voskova A.V. 226
Wei S.-C. 302
Yafyazova R.K. 485
Yang D. 535
Yuryev A.A. 591

Zaporozhcheno E.V. 38
Zeng Y.-C. 224
Zerkal O.V. 384, 458, 526
Zhang J. 535
Zhao L. 550
Zhdanov V.V. 563

Авторский указатель

Аван А.А.	429
Агзамов Ф.С.	86
Аджиев А.Х.	10, 17
Акаев А.Р.	50
Акшаяков З.Т.	252
Алдаберген У.Р.	334
Алекперова С.О.	28
Александров П.А.	68
Алешин Ю.Г.	500
Али Л.	511
Али Х.	429
Анаев М.А.	307
Ашабоков А.Б.	252
Банерджи А.	445
Барановский А.Ф.	38
Барыкина О.С.	526
Беккиев М.Ю.	50
Благовещенский В.П.	60
Богданов И.С.	68
Большаков И.Е.	526
Бригида В.С.	580
Буланов С.А.	226
Вей С.Ч.	302
Ветрова Н.М.	212
Винья-Давила Н.	84
Висхаджиева К.С.	200
Воскова А.В.	226
Гавардашвили Г.В.	125
Гайсарова А.А.	212
Гао Б.	535
Гао Х.М.	140
Гарова Е.	115
Гергокова З.Ж.	134
Гокджеоглу Дж.	147
Гончаренко В.В.	273
Горбунов А.С.	226
Гоу И.	140
Гребенников П.	115
Григорьев И.И.	418
Гулаезов М.	445
Гулахмадов А.А.	232
Гуляева Т.С.	60
Гуня А.Н.	226

Декайир А. 147
Дельгадо-Теллез Р. 84, 367
Дергачев К.В. 86
Дергачева И.В. 86, 94
Джанджуа М.А. 429
Дзагания Е.В. 104, 262, 580
Дзагания Л.М. 580
Дзагания М.Ю. 262
Дин М. 367
Докукин М.Д. 50, 307
Дэй Л. 224
Ефремов Ю.В. 338
Жданов В.В. 563
Запорожченко Э.В. 38
Зеркаль О.В. 384, 458, 526
Иваненко Т.А. 212
Ильтуганов И. 115
Имроншоев Х.А. 394
Кадетова А.В. 591
Каитна Р. 470
Калашникова О.Ю. 359
Калов Р.Х. 50
Камалбекова А.Н. 334
Канг С. 445
Караваев В.А. 226
Кариева Ф.А. 232
Каримов Ф.Х. 238
Керефова З.М. 17
Керимов А.М. 252
Киренская Т.Л. 60
Климов С.И. 336
Ко Ф.-И. 285
Кондратьева Н.В. 10, 17
Корнева И.А. 260
Корнилова Е.Д. 260
Кортиев А.Л. 17
Кошух Р. 470
Крыленко В.И. 262
Крыленко И.В. 262
Крыленко И.Н. 260
Кужагельдина Н.У. 563
Курашева О.А. 252
Лай С.Ч. 77, 166
Лебедева Л.С. 273
Ли Г.Л. 77, 166
Ли И. 535
Ли Ф.Б. 77, 166
Ли Х. 535

Ли Ц. 535
Ли Ю. 535
Линь Б.-Ш. 285
Лобанов П. 115
Лу Х. 577
Лю К.Ф. 302
Ма Ц. 577
Макардел Б. 470
Мальнева И.В. 307
Мамаджонов И. 445
Мамиева С.А. 316
Маскареньяс П.В.С. 578
Маций В.С. 327
Маций С.И. 327
Медеу А.Р. 60, 334
Меркушкин А.С. 86, 336
Мирджапаров М. 94
Миронюк С.Г. 338
Мотовилов Ю.Г. 260
Мягков С.В. 94
Мягков С.С. 86
Наврузжоев Х. 445
Нето Ж.Д.Г. 578
Нефеслиоглу Х.А. 147
Нигматов А.Н. 349
Ниязов Дж.Б. 359
Оливейра Х.Р. 578
Педанов А. 115
Пенья де ла Круз А. 84, 367
Петрова Е.Г. 376
Петрушина М.Н. 226
Пономарев А.А. 384
Пономарев П. 115
Попов Н.В. 334
Постникова Т.Н. 260
Раимбеков Ю.Х. 394
Ранова С.У. 60, 334
Рец Е.П. 260
Романенко Ф.А. 401
Руаи М. 147
Руссо В.К. (мл.) 578
Рыбак О.О. 260
Рыбальченко С.В. 408
Рыбченко А.А. 591
Рысин И.И. 418
Савернюк Е.А. 200, 458
Савон-Васиано И. 84, 367
Садик С. 429

Самаркина-Джарская Л.М. 104
Самаркин-Джарский К.Г. 104
Сантос Т.К. 578
Сафаров М. 445
Сезер Э.А. 147
Семиноженко С.С. 226
Сидаравичуте У.Р. 327
Сие М.С. 157
Степанов Б.С. 485
Стром А.Л. 487
Сун И.Т. 140
Сухаржевский Г.Н. 580
Тарихазер С.А. 489
Тилляходжаева З.Д. 94
Торгоев И.А. 500
Трофимов Г.Н. 336
Тянь Ю. 535
Уддин З. 511
Уддин Н. 511
Улаева Л.Н. 517
Фазылов А. 445
Фан И.М. 179
Фань Ц.Ц. 77
Фролова Ю.В. 526
Фукс С. 115
Хаджиев М.М. 307
Хармоузи Х. 147
Харьковец Е.Г. 200
Хсу Х.-Ч. 285
Хуан В.С. 77, 166
Хуан И.М. 179
Хуан К.Л. 189
Хуан Х. 535
Хэ К. 577
Хюбль Й. 470
Цзань Ч.Д. 224
Цзэн И.Ч. 224
Чадромцев Б. 115
Чен Л. 535
Черноморец С.С. 200, 458
Чжан И. 535
Чжао Л. 550
Чиу В.-Ю. 285
Чоу Х.Т. 189
Чэнь С.Л. 179
Чэнь Ф. 577
Чэнь Ц.Ч. 77, 166
Шерхов А.Х. 479

Шофл Т.	470
Юдина В.А.	200
Ян Д.	535
Юрьев А.А.	591
Яфязова Р.К.	485

Contents

Preface ..... **vii**

Influence of degradation of mountain glaciation of Mount Elbrus on debris flow activity **10**

A.Kh. Adzhiev, N.V. Kondratyeva

Spread and features of the manifestation of debris flows at the all-season tourist and recreational complex "Mamison" **17**

A.Kh. Adzhiev, N.V. Kondratyeva, A.L. Kortiev, Z.M. Kerefova

Assessment of debris flow risk on population settlement in mountain regions of Azerbaijan (a case of the Shinchay River basin) **28**

S.O. Alekperova

Tectonic structures in the Kolka Glacier area and their influence on the development of exogenous and endogenous processes **38**

A.F. Baranovsky, E.V. Zaporozhchenko

Extraordinary debris flows in the Caucasus in 2022–2023 ..... **50**

M.Yu. Bekkiev, M.D. Dokukin, R.Kh. Kalov, A.R. Akaev

Interannual and intraannual variability of debris flow activity in the Ile Alatau Mountains **60**

V.P. Blagoveshchensky, A.R. Medeu, T.S. Gulyaeva, S.U. Ranova, T.L. Kirenskaya

Debris flow protective structures installation in narrow right of way **68**

I.S. Bogdanov, P.A. Alexandrov

Applicability of a rainfall-induced debris flow warning model: A case from Typhoon Khanun in Nantou County, Taiwan, 2023 ..... **77**

J.C. Chen, W.S. Huang, X.Z. Lai, J.Q. Fan, F.B. Li, G.L. Li

Vegetation recovery and debris flow effects following tropical cyclone-induced disturbances in Eastern Cuba **84**

R. Delgado-Téllez, N. Viña-Dávila, A. Peña-de la Cruz, Y. Savón-Vaciano

Debris flow and flood phenomena on the territory of the Republic of Uzbekistan: Experience in using tools for assessing the risk of flash floods (FFGS) **86**

I.V. Dergacheva, A.S. Merkushkin, F.S. Agzamov, S.S. Myagkov, K.V. Dergachev

High-mountain lakes of Uzbekistan and transboundary territories as a potential source of debris flows **94**

I.V. Dergacheva, M. Mirjaparov, Z.D. Tillahodjaeva, S.V. Myagkov

Methodology for assessing debris flow hazard (a case of the Western Caucasus, Sochi region) **104**

E.V. Dzaganiia, K.G. Samarkin-Dzharskii, L.M. Samarkina-Dzharskaia

Infrastructure safety in Russian mountains: From debris flow assessment to technical mitigation 115

E. Garova, S. Fuchs, B. Chadromtsev, A. Pedanov, P. Grebennikov, I. Iltuganov, P. Lobanov, P. Ponomarjovs

Forecasting of debris flow processes and control with innovative construction along the Military Georgian Road 125

G.V. Gavardashvili

Increased risks of man-made disasters due to global climate change 134

Z.Zh. Gergokova

Weather background analysis of debris flows in southeastern Guizhou, China 140

Y. Gou, H.M. Gao, Y.T. Song

AI landslide susceptibility mapping and statistical interpretation in the Mediterranean coastal zone between Oued Laou and El Jebha, Morocco 147

H. Harmouzi, A. Dekayir, H.A. Nefeslioglu, M. Rouai, E.A. Sezer, C. Gokceoglu

Evaluating earthquake-induced landslide potential under different scenarios using empirical landslide fragility model – A case study on Taiwan 157

M.H. Hsieh

Effects of structure conservation implementation on landslide and debris flow hazards: A case study in Chenyulan watershed, Taiwan 166

W.S. Huang, J.C. Chen, J.Q. Fan, X.Z. Lai, F.B. Li, G.L. Li

Characteristics of the debris-flow-triggering rainfalls recorded in the Shenmu area of Central Taiwan: An update 179

Y.M. Huang, S.L. Chen, Y.M. Fang

Detecting the debris flow frontal velocity by the mud droplets impinging on rigid surfaces 189

K.L. Huang, H.T. Chou

Reconstruction of the October 2022 debris flow in the Sultan-Gara-Su River valley (Malka River basin, Elbrus Mountain) 200

V.A. Iudina, E.A. Savernyuk, K.S. Viskhadzhieva, E.G. Khar'kovets, S.S. Chernomorets

Features of integrated monitoring of debris flows hazard to justification for engineering protection (a case study of South-Eastern Crimea) 212

T.A. Ivanenko, N.M. Vetrova, A.A. Gaysarova

Investigating the influence of groundsill array density on debris flow behavior using numerical simulations 224

C.-D. Jan, Y.-C. Zeng, L. Dey

Debris flow as the final process in the cycle of extreme exogenous processes in mountain landscapes 226

V.A. Karavaev, A.S. Gorbunov, A.V. Voskova, S.A. Bulanov, A.N. Gunya, S.S. Seminozhenko, M.N. Petrushina

About the main natural threats and risks in Tajikistan 232

F.A. Karieva, A.A. Gulakhmadov

Analysis of the surging of the Medvezhiy Glacier on Pamirs 238

F.H. Karimov

Calculation, mapping and risk assessment of debris flow vulnerability in the Baksan River basin (Kabardino-Balkarian Republic) 252

A.M. Kerimov, Z.T. Akshayakov, O.A. Kurasheva, A.B. Ashabokov

How do climate change and deglaciation affect the runoff formation mechanisms in the high-mountain river basins of the North Caucasus? 260

E.D. Kornilova, I.N. Krylenko, Yu.G. Motovilov, E.P. Rets, I.A. Korneva, T.N. Postnikova, O.O. Rybak

Natural debris flows in the Western Caucasus, Sochi area 262

V.I. Krylenko, I.V. Krylenko, E.V. Dzaganiia, M.Yu. Dzaganiia

Streamflow formation of the rock glacier creeks in the Northern Tien Shan, Republic of Kazakhstan 273

L.S. Lebedeva, V.V. Goncharenko

Hazard potential change for rain-induced debris flow in silty clay mudstone environment after large earthquake and continuous rainfall sediment deposit 285

B.-S. Lin, H.-C. Hsu, W.-Y. Chiu, F.Y. Kuo

Intelligent debris flow monitoring and warning system 302

K.-F. Liu, S.-C. Wei

Analysis of debris flow formation conditions in the Elbrus region in the 21st century 307

I.V. Malneva, M.D. Dokukin, M.A. Anaev, M.M. Khadzhiev

Development of debris flow processes in the Goshgarchay River basin (a case of the northeastern slope of the Lesser Caucasus, Azerbaijan) 316

S.A. Mamiyeva

Risk assessment of debris flows in vulnerable areas 327

S.I. Matsiy, U.R. Sidaravičute, V.S. Matsiy

Experience of creation of complex protection from debris flows of the key section of Ile Alatau (a case of the Ulken River basin, Almaty) 334

A.R. Medeu, N.V. Popov, S.U. Ranova, A.N. Kamalbekova, U.R. Aldabergen

Approach to flash flood risk assessment for the problematic territories in Uzbekistan .. 336

A.S. Merkushkin, G.N. Trofimov, S.I. Klimov

Features of debris flows formation in the Shakhe River basin (Northwest Caucasus) and assessment of the possibility of their transformation into turbid flows in the coastal zone of the Black Sea 338

S.G. Mironyuk, Yu.V. Efremov

Debris flow phenomena and their assessment using geoinformation system technologies for the development of the tourist industry of Uzbekistan 349

A.N. Nigmatov

MODIS imagery-based water content forecasting methodology for the Kyzylsu River 359

J.B. Niyazov, O.Yu. Kalashnikova

Debris flows and climate dynamics in natural areas of Eastern Cuba 367

A. Peña-de-la-Cruz, R. Delgado-Téllez, M. Ding, Y. Savón-Vaciano

Debris flows as triggers of accidents in the infrastructure 376

E.G. Petrova

Structural features of ancient debris flow cones in the upper part of the Mzymta River valley 384

A.A. Ponomarev, A.A. Ponomarev, O.V. Zerkal

Experience of the Aga Khan Agency for Habitat (AKAH) in glacial lakes' analysis and their outbursts' simulations in Tajikistan 394

Yu.Kh. Raimbekov, Kh.A. Imronshoev

Debris flow processes on Arctic islands 401

F.A. Romanenko

Features of the formation of debris flow-prone areas in the transition zones "mainland – ocean" (a case of the of Sakhalin Island) 408

S.V. Rybalchenko

Gullies and landslides as one of the factors of debris flows occurrence in the conditions of plain territories 418

I.I. Rysin, I.I. Grigoriev

Debris flow phenomenon: A potential outcome of the changing climatic pattern in Northern Pakistan 429

S. Sadiq, M.A. Janjua, H. Ali, A.A. Awan

Mapping the territories of the mountain-foothill zone of Tajikistan exposed to natural hazards 445

M. Safarov, A. Fazylov, S. Kang, M. Gulayozov, H. Navruzshoev, A. Banerjee, Y. Mamadjonov

Debris flows in the Ikhir River valley (Mt. Shalbuzdag, Dagestan, Russia) and their relationship with landslides 458

E.A. Savernyuk, O.V. Zerkal, S.S. Chernomorets

Deciphering the interplay of surface velocity and flow height in natural debris flows: Field observations from the Illgraben, Switzerland 470

T. Schöffl, B. McArdell, R. Kaitna, R. Koschuch, J. Hübl

Improvement of technologies for accounting and storing data about debris flow events 479

A.Kh. Sherkhov

Ultra-short-term forecast for debris flows induced by rainfall 485

B.S. Stepanov, R.K. Yafyazova

Thick alluvial fans – indicator of the past rivers' damming 487

A.L. Strom

Assessment of landslide susceptibility of debris flow hazardous of Shamakhi administrative district of Azerbaijan (based on ArcGIS) 489

S.A. Tarikhazer

Radioactive debris flows in the valley of the Mailuu-Suu River (Kyrgyzstan) 500

I.A. Torgoev, Yu.G. Aleshin

Evaluation of decadal rainfall variability's effect on debris flow intensity and frequency in the Brep Area of Chitral, Pakistan 511

N. Uddin, L. Ali, Z. Uddin

Glacial lake outbursts: A case of the Spartakovskoe Lake. Study methods and forecasting features 517

L.N. Ulaeva

Cascading mode of landslide and debris flow processes in the Valley of Geysers (Kamchatka, Russia) 526

O.V. Zerkal, O.S. Barykina, J.V. Frolova, I.E. Bolshakov

Characteristics, driving factors of spatial and temporal variations and tendency of debris flows in the Yunnan section of the Salween River mainstream 535

J. Zhang, D. Yang, B. Gao, L. Chen, Y. Li, Y. Tian, H. Huang, H. Li, J. Li, Y. Li

Numerical modeling of waves caused by a landslide or debris flow in a reservoir 550

L. Zhao

Meteorological conditions of the formation of water-ice debris flows on mountain rivers of Ile Alatau 563

V.V. Zhdanov, N.U. Kuzhageldina

Securing landslides with pile structures 572

Yu.A. Mazhaisky, N.V. Sheshenev

Simulation analysis of debris flow caused by dam break in construction waste disposal site based on EDDA 577

K. He, F. Chen, H. Lu, J. Ma

Extreme rainfall event affecting a Brazilian Pipeline – emergency evaluation and mitigation works 578

H.R. Oliveira, P.V.S. Mascarenhas, J.D.G. Neto, T.C. Santos, W.C. Russo Jr

Trends in changes in debris flow hazard caused by climate change in the subtropical zone of the Caucasus 580

L.M. Dzaganiia, E.V. Dzaganiia, G.N. Sukharzhevskii, V.S. Brigida

Mountain debris flows on the northern slope of the Khamar-Daban Range in 2019 591

A.A. Rybchenko, A.V. Kadetova, A.A. Yuryev

Author's Index 596

Contents 606

Содержание

Предисловие ..... **ix**

Влияние деградации горного оледенения горы Эльбрус на селевую активность **10**

А.Х. Аджиев, Н.В. Кондратьева

Распространение и особенности проявления селей на всесезонном туристско-рекреационном комплексе «Мамисон» **17**

А.Х. Аджиев, Н.В. Кондратьева, А.Л. Кортиев, З.М. Керефова

Оценка селевого риска на расселение населения горных регионов Азербайджана (на примере бассейна р. Шинчай) **28**

С.О. Алекперова

Тектонические структуры в районе ледника Колка и их влияние на развитие экзогенных и эндогенных процессов **38**

А.Ф. Барановский, Э.В. Запорожченко

Необычные селевые потоки на Кавказе в 2022–2023 годах **50**

М.Ю. Беккиев, М.Д. Докукин, Р.Х. Калов, А.Р. Акаев

Межгодовая и внутригодовая изменчивость селевой активности в горах Иле Алатау **60**

В.П. Благовещенский, А.Р. Медеу, Т.С. Гуляева, С.У. Ранова, Т.Л. Киренская

Выполнение селезащитных сооружений в узкой полосе отвода автодорог **68**

И.С. Богданов, П.А. Александров

Применимость модели предупреждения о дождевых селях на примере тайфуна «Ханун» в уезде Наньтоу, Тайвань, 2023 год **77**

Ц.Ч. Чэнь, В.С. Хуан, С.Ч. Лай, Ц.Ц. Фань, Ф.Б. Ли, Г.Л. Ли

Восстановление растительности и последствия селевых потоков, вызванных тропическими циклонами на востоке Кубы **84**

Р. Дельгадо-Теллез, Н. Винья-Давила, А. Пенья де ла Круз, И. Савон-Васиано

Селе-паводковые явления на территории Республики Узбекистан. Опыт использования инструментов по оценке риска возникновения быстроразвивающихся паводков (ИДСП) **86**

И.В. Дергачева, А.С. Меркушкин, Ф.С. Агзамов, С.С. Мягков, К.В. Дергачев

Высокогорные озера Узбекистана и трансграничных территорий, как потенциальный источник возникновения селей **94**

И.В. Дергачева, М. Мирджапаров, З.Д. Тилляходжаева, С.В. Мягков

Методика оценки селевой опасности на примере Западного Кавказа, Сочинский район **104**

Е.В. Дзагания, К.Г. Самаркин-Джарский, Л.М. Самаркина-Джарская

Безопасность инфраструктуры в горах России – от оценки селевой опасности до защиты от селей 115

Е. Гарова, С. Фукс, Б. Чадромцев, А. Педанов, П. Гребенников, И. Ильтуганов, П. Лобанов, П. Пономарев

Прогнозирование и контроль селевых процессов с помощью инновационного строительства на Военно-Грузинской дороге 125

Г.В. Гавардашвили

Увеличение рисков техногенных катастроф вследствие глобальных климатических изменений 134

З.Ж. Гергокова

Анализ погодных условий формирования селевых потоков на юго-востоке Гуйчжоу, Китай 140

И. Гоу, Х.М. Гао, И.Т. Сун

Картографирование оползневой опасности прибрежной зоны Средиземного моря между Уэд-Лау и Эль-Джебхой (Марокко) с помощью ИИ и статистическая интерпретация результатов 147

Х. Хармоузи, А. Декайир, Х.А. Нефеслиоглу, М. Руаи, Э.А. Сезер, Дж. Гокджеоглу

Оценка вероятности схода оползней, вызванных землетрясениями, при различных сценариях с использованием эмпирической модели поведения оползней на примере Тайваня 157

М.С. Сие

Влияние инженерных мероприятий на опасность оползней и селей на примере бассейна Чэньюлан, Тайвань 166

В.С. Хуан, Ц.Ч. Чэнь, С.Ч. Лай, Ф.Б. Ли, Г.Л. Ли

Характеристики дождей, вызвавших селевые потоки, зарегистрированные в районе Шэньму в Центральном Тайване: новые данные 179

И.М. Хуан, С.Л. Чэнь, И.М. Фан

Определение скорости фронтальной части селевого потока по каплям грязи, ударяющимся о твердые поверхности 189

К.Л. Хуан, Х.Т. Чоу

Реконструкция селевого потока в октябре 2022 г. в долине реки Султан-Гара-Су (бассейн реки Малка, гора Эльбрус) 200

В.А. Юдина, Е.А. Савернюк, К.С. Висхаджиева, Е.Г. Харьковец, С.С. Черноморец

Особенности комплексного мониторинга селевой опасности для обоснования инженерной защиты (на примере юго-восточного Крыма) 212

Т.А. Иваненко, Н.М. Ветрова, А.А. Гайсарова

Исследование влияния плотности фундаментов на поведение селевых потоков с помощью численного моделирования 224

Ч.Д. Цзань, И.Ч. Цзэн, Л. Дэй

Сель как завершающий процесс в цикле экстремальных экзогенных процессов в горных ландшафтах 226

В.А. Караваев, А.С. Горбунов, А.В. Воскова, С.А. Буланов, А.Н. Гуня, С.С. Семиноженко, М.Н. Петрушина

Об основных природных угрозах и рисках в Таджикистане 232

Ф.А. Кариева, А.А. Гулахмадов

Анализ механизмов пульсаций ледника Медвежьего на Памире 238

Ф.Х. Каримов

Расчет, картографирование и оценка риска уязвимости селевыми потоками в бассейне реки Баксан (Кабардино-Балкарская Республика) 252

А.М. Керимов, З.Т. Акшаяков, О.А. Курашева, А.Б. Ашабоков

Как изменение климата и дегляциация влияют на механизмы формирования стока в высокогорных бассейнах рек Северного Кавказа? 260

Е.Д. Корнилова, И.Н. Крыленко, Ю.Г. Мотовилов, Е.П. Рец, И.А. Корнева, Т.Н. Постникова, О.О. Рыбак

Природные селевые потоки на Западном Кавказе в районе Сочи 262

В.И. Крыленко, И.В. Крыленко, Е.В. Дзагания, М.Ю. Дзагания

Особенности формирования стока ручьев каменных глетчеров Северного Тянь-Шаня, Республика Казахстан 273

Л.С. Лебедева, В.В. Гончаренко

Изменение опасности селевых потоков дождевого генезиса, формирующихся в алеврито-глинистых отложениях после сильного землетрясения и продолжительных осадков 285

Б.-Ш. Линь, Х.-Ч. Хсу, В.-Ю. Чиу, Ф.-И. Ко

Интеллектуальная система мониторинга и предупреждения селевых потоков 302

К.Ф. Лю, С.Ч. Вей

Анализ условий формирования селей в Приэльбрусье в XXI веке 307

И.В. Мальнева, М.Д. Докукин, М.А. Анаев, М.М. Хаджиев

Развитие селевых процессов в бассейне реки Гошгарчай (на примере северо-восточного склона Малого Кавказа в пределах Азербайджана) 316

С.А. Мамиева

Оценка риска селевых потоков на незащищенных территориях 327

С.И. Маций, У.Р. Сидаравичуте, В.С. Маций

Опыт создания комплексной защиты от селевых потоков ключевого участка Иле Алатау (на примере бассейна реки Улкен Алматы) 334

А.Р. Медеу, Н.В. Попов, С.У. Ранова, А.Н. Камалбекова, У.Р. Алдаберген

Подход к оценке риска, связанного с селе-паводковой активностью для проблемных территорий в Узбекистане 336

А.С. Меркушкин, Г.Н. Трофимов, С.И. Климов

Особенности формирования селей в бассейне р. Шахе (Северо-Западный Кавказ) и оценка возможности их трансформации в турбидные потоки в прибрежной зоне Черного моря 338

С.Г. Миронюк, Ю.В. Ефремов

Селевые явления и их оценка с использованием ГИС-технологий для развития туристической отрасли Узбекистана 349

А.Н. Нигматов

Методика прогнозирования водности реки Кызылсу на основе снимков MODIS..... 359

Дж.Б. Ниязов, О.Ю. Калашникова

Селевые потоки и динамика климата в природных зонах Восточной Кубы 367

А. Пенья де ла Круз, Р. Дельгадо-Теллез, М. Дин, И. Савон-Васиано

Селевые потоки как причины аварий на объектах инфраструктуры 376

Е.Г. Петрова

Особенности строения древних селевых конусов в верхней части долины р. Мзымта 384

А.А. Пономарев, А.А. Пономарев, О.В. Зеркаль

Опыт Агентства Ага Хана по Хабитат (АКАН) в области оценки ледниковых озер и моделирования их прорывов в Таджикистане 394

Ю.Х. Раимбеков, Х.А. Имроншоев

Селевые процессы на арктических островах 401

Ф.А. Романенко

Особенности формирования селеопасных районов в переходных зонах «материк – океан» на примере о. Сахалин 408

С.В. Рыбальченко

Овраги и оползни как один из факторов возникновения селей в условиях равнинных территорий 418

И.И. Рысин, И.И. Григорьев

Феномен селевых потоков: потенциальный результат изменения климатического режима в Северном Пакистане 429

С. Садик, М.А. Джанджуа, Х. Али, А.А. Аван

Картографирование территорий горно-предгорной зоны Таджикистана, подверженных опасным природным явлениям 445

М. Сафаров, А. Фазылов, С. Канг, М. Гулаезов, Х. Навруззжоев, А. Банерджи, И. Мамаджонов

Сели в долине реки Ихир (горный массив Шалбуздаг, Дагестан, Россия) и их взаимосвязь с оползнями 458

Е.А. Савернюк, О.В. Зеркаль, С.С. Черноморец

Установление взаимосвязи между поверхностной скоростью и высотой потока в природных селях: полевые наблюдения в Илльграбене, Швейцария 470

Т. Шофл, Б. Макардел, Р. Каитна, Р. Кошух, Й. Хюбль

Совершенствование технологий учета и хранения данных о селепроявлениях 479

А.Х. Шерхов

Сверхкраткосрочный прогноз селей дождевого генезиса 485

Б.С. Степанов, Р.К. Яфязова

Мощные аллювиальные конусы – индикатор запруживания древних рек 487

А.Л. Стром

Оценка оползневой восприимчивости селеопасного Шамахинского административного района Азербайджана (на основе ArcGIS) 489

С.А. Тарихазер

Радиоактивные сели в долине реки Майлуу-Суу (Кыргызстан) 500

И.А. Торгоев, Ю.Г. Алешин

Влияние десятилетней изменчивости осадков на интенсивность и частоту селевых потоков в районе Бреп (округ Читрал, Пакистан) 511

Н. Уддин, Л. Али, З. Уддин

Прорывы ледниковых озер на примере озера Спартаковское. Методы изучения и особенности прогнозирования 517

Л.Н. Улаева

Каскадность оползневых и селевых процессов в Долине гейзеров (Камчатка, Россия) 526

О.В. Зеркаль, О.С. Барыкина, Ю.В. Фролова, И.Е. Большаков

Характеристики, движущие факторы пространственных и временных изменений и тенденции развития селевых потоков на Юньнаньском участке главной долины реки Салуин 535

И. Чжан, Д. Ян, Б. Гао, Л. Чен, Ю. Ли, Ю. Тянь, Х. Хуан, Х. Ли, Ц. Ли, И. Ли

Численное моделирование волн, вызванных сходом оползня или связного селя в водохранилище 550

Л. Чжао

Метеорологические условия формирования водоледовых селей на горных реках Иле Алатау 563

В.В. Жданов, Н.У. Кужагельдина

Закрепление оползневых массивов свайной конструкцией 572

Ю.А. Мажайский, Н.В. Шешенев

Анализ результатов моделирования селевых потоков, вызванных разрушением дамбы на полигоне строительных отходов, на основе численной модели EDDA 577

К. Хэ, Ф. Чэнь, Х. Лу, Ц. Ма

Экстремальные осадки, обрушившиеся на Бразильский трубопровод: оценка чрезвычайной ситуации и работы по смягчению последствий 578

Х.Р. Оливейра, П.В.С. Маскареньяс, Ж.Д.Г. Нето, Т.К. Сантос, В.К. Руссо (мл.)

Тенденции изменения селевой опасности, обусловленные климатическими изменениями в субтропическом поясе Кавказа 580

Л.М. Дзагания, Е.В. Дзагания, Г.Н. Сухаржевский, В.С. Бригида

Селевые паводки северного склона хребта Хамар-Дабан в 2019 году 591

А.А. Рыбченко, А.В. Кадетова, А.А. Юрьев

Авторский указатель 601

Содержание 612

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection.
Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China)

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита.
Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай)

泥石流：灾害、风险、预测、防治.
會議記錄 第七届国际会议.中国成都

Ответственные редакторы
С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова)
К. Ху (Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук)
К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова)

Edited by
S.S. Chernomorets (Lomonosov Moscow State University)
K. Hu (Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS)
K.S. Viskhadzhieva (Lomonosov Moscow State University)

Издательство
ООО «Геомаркетинг»
115088, Россия, Москва, ул. Машиностроения 1-я, д. 5

Publisher
Geomarketing LLC
115088, Russia, Moscow, Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5

ISBN 978-5-6050369-6-8

Подписано в печать 04.09.2024
Тираж 250 экз.
Количество страниц: 622

Signed to press on September 4, 2024.
Print in 250 copies.
Number of pages: 622

Conference organizers and partners

Financial support