მე-8
საერთაშორისო კონფერენცია
ღვარცოფებში, კატასტროფებში,
რისკი, პროგნოზი, დაცვა
თბილისი, საქართველო
6–10 ოქტომბერი, 2025

8-я
международная конференция
СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: КАТАСТРОФЫ,
РИСК, ПРОГНОЗ, ЗАЩИТА
Тбилиси, Грузия
6–10 октября 2025 г.

8th International Conference

DEBRIS FLOWS:
DISASTERS, RISK, FORECAST, PROTECTION

Tbilisi, Georgia
October 6–10, 2025

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
8-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 6–10 октября 2025 г.

Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2025

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 8th International Conference

Tbilisi, Georgia, 6–10 October 2025

Edited by
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
Moscow
2025

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

მე–8 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები

თბილისი, საქართველო, 6–10 ოქტომბერი, 2025

რედაქტორები
ს. ს. ჩერნომორეც, გ. ვ. გავარდაშვილი, კ.ს. ვისხაჯიევა

შპს „გეომარკეტინგი“
მოსკოვი
2025

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2025. 496 с.

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC, 2025. 496 p.

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა. მე–8 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო. – პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი, კ.ს. ვისხაჯიევა. – მოსკოვი: შპს „გეომარკეტინგი“, 2025. 496 с.

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), Г.В. Гавардашвили (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (M.V. Lomonosov Moscow State University), G.V. Gavardashvili (Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University), K.S. Viskhadzhieva (M.V. 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).

ISBN 978-5-6053539-4-2

© Селевая ассоциация
© Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета

© Debris Flow Association
© Ts. Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University

© ღვარცოფების ასოციაცია
© საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტი

Организаторы и партнеры конференции

Национальная академия наук Грузии

Селевая ассоциация

Грузинский технический университет

Институт водного хозяйства им. Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета

Министерство образования, науки и молодежи Грузии

Министерство охраны окружающей среды и сельского хозяйства Грузии

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

Институт земной коры Сибирского отделения РАН

Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН

Чунцинский институт зеленых и интеллектуальных технологий Китайской академии наук

Колледж наук о Земле и окружающей среде Университета Ланьчжоу

Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук

Экоцентр охраны окружающей среды

Финансовая поддержка

Caucasus Science and Engineering

IBTP Koschuch

Информационный партнер

Издательский центр ООО «Геомаркетинг» (журнал «ГеоРиск»)

Conference organizers and partners

National Academy of Sciences of Georgia

Debris Flow Association

Georgian Technical University

Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University

Ministry of Education, Science and Youth of Georgia

Ministry of Environmental Protection and Agriculture of Georgia

M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

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

Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences

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

College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University

Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences

Ecocenter for Environmental Protection

Financial support

Caucasus Science and Engineering

IBTP Koschuch

Information partner

Geomarketing Publishing Center (Georisk World journal)

Оргкомитет конференции

Сопредседатели Оргкомитета

Роин Метревели (Национальная академия наук Грузии, Грузия)

Гиви Гавардашвили (Национальная академия наук Грузии, Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Грузия)

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

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

Свен Фукс (Caucasus Science and Engineering, Грузия и Университет природных ресурсов и наук о жизни, Австрия)

Члены Оргкомитета

Нана Болашвили (Институт географии Тбилисского государственного университета имени Иванэ Джавахишвили, Грузия)

Нодар Варамашвили (Институт геофизики имени М. Нодиа Тбилисского государственного университета имени Иванэ Джавахишвили, Грузия)

Мераб Гаприндашвили (Департамент геологии Национального агентства по окружающей среде Грузии, Грузия)

Зураб Гвишиани (Грузинский технический университет, Грузия)

Давид Гургенидзе (Грузинский технический университет, Национальная академия наук Грузии, Грузия)

Леван Джафаридзе (Национальная академия наук Грузии)

Роберт Диаконидзе (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Грузия)

Ирина Иорданишвили (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Грузия)

Инга Иремашвили (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Грузия)

Георгий Квеситадзе (Национальная академия наук Грузии, Грузия)

Давид Кереселидзе (Тбилисский государственный университет имени Иванэ Джавахишвили, Грузия)

Шорена Купреишвили (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Грузия)

Эдуард Кухалашвили (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Грузия)

Георгий Ломинадзе (Институт географии Тбилисского государственного университета имени Иванэ Джавахишвили, Грузия)

Тамар Ломинадзе (Тбилисский государственный университет имени Иванэ Джавахишвили, Грузия)

Марина Мгебришвили (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Грузия)

Владимир Папава (Национальная академия наук Грузии, Грузия)

Рамаз Хуродзе (Национальная академия наук Грузии, Грузия)

Рамаз Читанава (Национальная гидрометеорологическая служба Грузии, Грузия)

Николоз Чихрадзе (Национальная академия наук Грузии, Грузия)

Тамаз Шилакадзе (Национальная академия наук Грузии, Грузия)

Секретариат Оргкомитета

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

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

Нана Бераиа (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Грузия)

Кетеван Дадиани (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Грузия)

Софио Модебадзе (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Грузия)

Виктория Шатохина (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия)

Академический консультативный комитет

Члены Академического консультативного комитета

Раджендра Кумар Айзик (Университет сельского хозяйства, технологий и наук имени Сэма Хиггинботтома, Индия)

Владимир Бойнагрян (Ереванский государственный университет, Армения)

Лоренцо Брецци (Падуанский университет, Италия)

Игорь Бычков (Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения РАН, Россия)

Алексей Виноградов (НПО «Гидротехпроект», Россия)

Юрий Генсиоровский (Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН, Россия)

Любовь Гертман (Белорусский государственный университет, Беларусь)

Абделилах Декайир (Университет Мулая Исмаила, Марокко)

Цзе Доу (Китайский университет геонаук, Китай)

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

Юрий Ефремов (Русское географическое общество, Россия)

Виталий Загинаев (Университет Центральной Азии, Кыргызстан)

Эдуард Запорожченко (Селевая Ассоциация, Россия)

Риналдо Женевуа (ранее Падуанский университет, Италия)

Медетхан Заппаров (Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Казахстан)

Мурат Касенов (Казахстанско-китайская совместная лаборатория «Технология дистанционного зондирования и применения», Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Казахстан)

Алан Кортиев (Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Россия)

Ахметкал Медеу (Институт географии и водной безопасности, Казахстан)

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)

Карла Прието (Национальный центр мониторинга и оповещения о стихийных бедствиях, Бразилия)

Артём Рыбченко (Институт земной коры Сибирского отделения РАН, Россия)

Джаба Самушиа (Национальная академия наук Грузии, Тбилисский государственный университет имени Иванэ Джавахишвили, Грузия)

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

Александр Стром (Институт Гидропроект, Россия)

Евгений Таланов (Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Казахстан)

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

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

Кайхэн Ху (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)

Роза Яфязова (Национальная гидрометеорологическая служба Республики Казахстан, Казахстан)

Organizing Committee of the Conference

Co-Chairs of the Organizing Committee

Roin Metreveli (National Academy of Sciences of Georgia, Georgia)

Givi Gavardashvili (National Academy of Sciences of Georgia, Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University, Georgia)

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

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

Sven Fuchs (Caucasus Science and Engineering, Georgia, and BOKU University, Austria)

Members of the Organizing Committee

Nana Bolashvili (Vakhushti Bagrationi Institute of Geography, Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Georgia)

Nikoloz Chikhradze (Georgian National Academy of Sciences, Georgia)

Ramaz Chitanava (National Hydrometeorological Survey of Georgia, Georgia)

Robert Diakonidze (Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University, Georgia)

Merab Gaprindashvili (Department of Geology, National Environmental Agency of Georgia, Georgia)

David Gurgenidze (Georgian Technical University, Georgian National Academy of Sciences, Georgia)

Zurab Gvishiani (Georgian Technical University, Georgia)

Irina Iordanishvili (Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University, Georgia)

Inga Iremashvili (Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University, Georgia)

Levan Japaridze (National Hydrometeorological Survey of Georgia, Georgia)

David Kereselidze (Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Georgia)

Ramaz Khurodze (National Academy of Sciences of Georgia, Georgia)

Eduard Kukhalashvili (Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University, Georgia)

Shorena Kupreishvili (Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University, Georgia)

Giorgi Kvesitadze (National Academy of Sciences of Georgia, Georgia)

George Lominadze (Vakhushti Bagrationi Institute of Geography, Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Georgia)

Tamar Lominadze (Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Georgia)

Marina Mgebrishvili (Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University, Georgia)

Vladimir Papava (National Academy of Sciences of Georgia, Georgia)

Tamaz Shilakadze (National Academy of Sciences of Georgia, Georgia)

Nodar Varamashvili (Mikheil Nodia Institute of Geophysics, Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Georgia)

Secretariate of the Organizing Committee

Elena Savernyuk (M.V. Lomonosov Moscow State University, Russia)

Karina Viskhadzhieva (M.V. Lomonosov Moscow State University, Russia)

Nana Beraia (Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Georgia)

Ketevan Dadiani (Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Georgia)

Sophio Modebadze (Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Georgia)

Victoria Shatokhina (M.V. Lomonosov Moscow State University, Russia)

Academic Advisory Committee

Members of the Academic Advisory Committee

Vladimir Boynagrian (Yerevan State University, Armenia)

Lorenzo Brezzi (University of Padua, Italy)

Igor Bychkov (V.M. Matrosov Institute of Dynamics of Systems and Control Theory, Siberian Branch of RAS, Russia)

Abdelilah Dekayir (Moulay Ismail University, Morocco)

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

Jie Dou (China University of Geosciences, China)

Yuri Efremov (Russian Geographical Society, Russia)

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

Rinaldo Genevois (formerly University of Padua, Italy)

Yuri Gensiorovsky (Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Russia)

Lyubov Gertman (Belarus State University, Belarus)

Kaiheng Hu (Key Laboratory of Mountain Hazards and Geomorphological Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, China)

Rajendra Kumar Isaac (Sam Higginbottom University of Agriculture, Technology and Sciences, India)

Murat Kasenov (Kazakhstan-China Joint Laboratory “Remote Sensing Technology and Applications”, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan)

Alan Kortiev (North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Russia)

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

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

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

Marina Pirulli (Turin Polytechnic Institute, Italy, and representative of the International Organizing Committee of the DFHM Conference Series)

Carla Prieto (National Center for Disaster Monitoring and Warning, Brazil)

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

Jaba Samushia (National Academy of Sciences of Georgia, Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Georgia)

Sergey Sokratov (M.V. Lomonosov Moscow State University, Russia)

Alexander Strom (Institute Hydroproject, Russia)

Evgeny Talanov (Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan)

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

Alexey Vinogradov (NPO “Gidrotekhproekt”, Russia)

Roza Yafyazova (National Hydrometeorological Service of the Republic of Kazakhstan, Kazakhstan)

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

Vitaly Zaginaev (University of Central Asia, Kyrgyzstan)

Eduard Zaporozhchenko (Debris Flow Association, Russia)

Medetkhan Zapparov (K.I. Satpaev Kazakh National Research Technical University, Kazakhstan)

Болеслав Игнатьевич Статковский (1825–1898)
выдающийся инженер и исследователь, создатель проекта Военно-Грузинской дороги, начальник Кавказского округа путей сообщения и первый исследователь селевых потоков на Кавказе

Boleslaw Statkowski (1825–1898)
distinguished outstanding engineer and scientist, the author of the Georgian Military Road project, the head of the Caucasian Road Department and the first researcher of debris flows in the Caucasus

Предисловие

В настоящем сборнике публикуются труды участников **8-й конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита» (Тбилиси, Грузия, 6–10 октября 2025 г.).**

Селевые потоки в горных регионах наносят значительный ущерб хозяйству и нередко приводят к жертвам среди населения. С середины 19 в. в Грузии изучались отдельные случаи селей, создавались карты селевой опасности и селевого районирования, проводились стационарные исследования на контрольных водосборах, осуществлялись эксперименты по воспроизведению селей в специальном лотке, разрабатывались и строились селезащитные сооружения. 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 Грузии является восьмой 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-за пандемии проведена в заочном формате), Чэнду (2024).

Инициатором конференций является Селевая ассоциация, отмечающая в 2025 г. своё 20-летие. Ассоциация основана в 2005 г. в Пятигорске. Она 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 гг. В настоящее время Селевая ассоциация является самым крупным в мире объединением специалистов по селям и защите от них, в которое на данный момент вступили 193 эксперта из 25 стран.

Конференция в Грузии организована Селевой ассоциацией, Национальной академией наук Грузии, Институтом водного хозяйства им. Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Экоцентром охраны окружающей среды при участии следующих организаций: Министерство образования, науки и молодежи Грузии, Министерство охраны окружающей среды и сельского хозяйства Грузии, Географический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Институт земной коры Сибирского отделения РАН, Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН, Чунцинский институт зеленых и интеллектуальных технологий Китайской академии наук, Колледж наук о Земле и окружающей среде Университета Ланьчжоу, Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук.

Конференция проходит в год 200-летия основоположника селевой науки Болеслава Статковского (1825–1898), первого исследователя селей Кавказа.

Сайт конференции: **www.debrisflow.ru/df25**.

В сборник трудов конференции вошла 51 статья, авторами которых являются специалисты из Австрии, Азербайджана, Армении, Германии, Грузии, Казахстана, Канады, Китая, Кыргызстана, России, Таджикистана и Швейцарии. Названия статей, фамилии авторов, резюме и ключевые слова приведены на русском и английском языках, основной текст – на одном из указанных языков. Главным информационным партнером и издателем трудов конференции выступает компания «Геомаркетинг».

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

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

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

Preface

This volume contains the Proceedings of the **8th conference "Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection" (Tbilisi, Georgia, October 6–10, 2025).**

Debris flows in mountainous regions cause significant damage to the economy and often lead to casualties among the population. Since the mid-19th century, some cases of debris flows have been studied in Georgia. Maps of debris flow hazard and zoning have been created, stationary studies have been conducted on control catchments, experiments have been carried out to reproduce debris flows in flumes, and protective structures have been developed and built for mitigation.

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 eights 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), and Chengdu (2024).

The initiator of the conferences is the Debris Flow Association, which celebrates its 20th anniversary in 2025. The association was 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 193 experts from 25 countries.

The conference in Georgia is organized by the Debris Flow Association, the Georgian National Academy of Sciences, the Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management of the Georgian Technical University, the Ecocenter for Environmental Protection, with the participation of the following organizations: the Ministry of Education, Science and Youth of Georgia, the Ministry of Environmental Protection and Agriculture of Georgia, the Faculty of Geography of the M.V. Lomonosov Moscow State University, the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, the Far Eastern Geological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, the Chongqing Institute of Green and Intelligent Technologies of the Chinese Academy of Sciences, the College of Earth and Environmental Sciences of Lanzhou University, the Institute of Mountain Hazards and Environment of the Chinese Academy of Sciences.

The conference is held in the year of the 200th anniversary of the founder of debris flow science Boleslaw Statkowski (1825–1898), the first researcher of debris flows in the Caucasus.

Conference website: **www.debrisflow.ru/en/df25**.

Here we publish the Proceedings of the conference. It includes 51 articles, the authors of which are experts from Austria, Armenia, Azerbaijan, Canada, China, Georgia, Germany, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Russia, Switzerland, and Tajikistan. 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 and publisher of the conference proceedings is Geomarketing LLC.

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

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

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

Оценка селевой опасности автомобильного пункта пропуска Нижний Зарамаг

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

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

[2]Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

Аннотация. Работы на участке протяженностью 2 км вдоль автомобильной дороги в селении Нар проводились в январе 2024 г. Данная дорога ведет к всесезонному туристско-рекреационному комплексу (ВТРК) «Мамисон». Цель обследований заключалась в оценке селевой опасности и получении количественных параметров возможных селевых потоков для определения основных параметров сооружений инженерной защиты и гидрометеорологических условий их эксплуатации.

Ключевые слова: *селевой поток, селевая активность, горная местность, селевая опасность, границы селесборов*

Ссылка для цитирования: Аджиев А.Х., Кондратьева Н.В., Керефова З.М., Кортиев А.Л. Оценка селевой опасности автомобильного пункта пропуска Нижний Зарамаг. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 15–26.

Debris flow hazard assessment of the automobile checkpoint Nizhniy Zaramag

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

[1]High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, zknyaz-kbsu@mail.ru

[2]North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Abstract. Work on a 2 km section along the road in the village of Nar was carried out in January 2024. This road leads to the all-season tourist and recreational complex (ATRC) “Mamison”. The purpose of the survey was to assess the debris flow hazard and obtain quantitative parameters of possible debris flows to determine the main parameters of engineering protection structures and hydrometeorological conditions for their operation.

Key words: *debris flow, debris flow activity, mountainous terrain, debris flow hazard, debris flow boundaries*

Cite this article: Adzhiev A.Kh., Kondratyeva N.V., Kerefova Z.M., Kortiev A.L. Debris flow hazard assessment of the automobile checkpoint Nizhniy Zaramag. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 15–26.

Введение

Северная Осетия – Алания один из наиболее селеопасных районов России. Селевые потоки в республике проявляются ежегодно. Наиболее разрушительные сели наблюдались в 1953, 1958, 1967, 1973, 1975, 2000, 2002 гг. [*Агибалов, 1983*]. Мощные

селевые потоки формируются в долинах рек Цеядон, Ардон, Караугом [*Герасимов, 1974; Герасимов, 1985*].

В долине р. Цеядон 23 июля 1975 г. был вынесен значительный объем материала: 300 тыс. м^3 из Орахкомского ущелья (вблизи Цейского ледника) и 180 тыс. м^3 из Сказского ущелья. В тот же день Касайкомдонским селем было вынесено на дно Кассарского ущелья р. Ардон 120 тыс. м^3 твердого материала. 28 июля 1975 г. Бартуйским селем в долину р. Караугомдон вынесено около 100 тыс. м^3. 20 сентября 2002 г. в долине реки Геналдон на северном склоне Большого Кавказа в Северной Осетии произошла крупнейшая в истории России ледниковая катастрофа. Значительная часть ледника Колка пришла в движение, и, увлекая камни, рыхлый снег, воду и льды, устремилась вниз по долине, сметая жилые дома и базы отдыха. Основная часть льда остановилась и отложилась в Кармадонской котловине перед Скалистым хребтом.

В данной работе выполнены исследования по оценке селевой опасности автомобильного пункта пропуска Нижний Зарамаг, с. Нар Республики Северная Осетия-Алания. Участок расположен рядом с р. Закка. По этому участку проходит дорога к всесезонному туристско-рекреационному комплексу (ВТРК) «Мамисон». Основные направления туристического использования здесь: в зимнее время – горнолыжный курорт, в летнее – экологический, горный туризм, познавательный туризм на основе многочисленных объектов культурного наследия. Таким образом, участок исследования является важным транспортным узлом и на рассматриваемой территории необходимо создать все условия для безопасного движения автотранспорта и людей.

Цель работы заключалась в проведении оценки селевой опасности и получения количественных параметров селевых потоков в пределах площадки строительства для определения основных параметров сооружений инженерной защиты и гидрометеорологических условий их эксплуатации.

Ставились такие задачи, как: сбор, анализ и обобщение материалов гидрометеорологической и картографической изученности территории; рекогносцировочное обследование района исследования; изучение опасных гидрометеорологических процессов и явлений; обработка материалов и определение необходимых расчетных характеристик селей.

Проявление селевой деятельности в горах Северной Осетии обусловлено следующими основными факторами: наличием в приледниковой зоне огромных массивов рыхлообломочного мореного материала, крутых склонов, способствующих поверхностному интенсивному стоку и чрезмерному увлажнению мореного материала в очагах зарождения селей.

Главной причиной формирования селей являются ливневые дожди, зачастую играющие роль толчка или спускового импульса для возникновения селя в предварительно хорошо увлажненных талыми водами или длительными моросящими осадками рыхлообломочных массивах. По соотношению жидкой и твердой составляющих селя, в Северной Осетии преобладают несвязные водокаменные и грязекаменные сели. В пределах Бокового хребта и в западной (Дигорской) части Главного Кавказского хребта они состоят преимущественно из крупных и мелких валунов различных кристаллических пород, включенных в песчано-гравийный заполнитель. В районах же более низких хребтов – Скалистого и восточной части Главного Кавказского, а также в межгорных продольных долинах распространены в основном грязекаменные сели, состоящие из крупного и мелкого щебня в суглинистом заполнителе [*Поповнин, 1992*].

Материалы и методы исследования

Исследования выполнены по реке Закка и её притоках. Рельеф в пределах участка исследований имеет ярко выраженный горный и техногенный характер, спланированный в результате хозяйственной деятельности при проведении строительных работ по возведению автодороги А-164 «Транскам» буровзрывным способом, и более поздним строительством сооружений инженерной защиты.

Среди четвертичных отложений рассматриваемой территории выделяются следующие генетические типы: аллювиальные, пролювиально-делювиальные и коллювиальные (обвально-осыпные) образования.

В геоморфологическом отношении участок расположен на древней высокой надпойменной речной террасе р. Закка.

Долина р. Закка представляет собой типичный ледниковый трог. Борта долины асимметричны: левый склон имеет крутизну до 40˚, более мягкие формы рельефа здесь обусловлены наличием древних высоких надпойменных речных террас. Дно долины р. Закка имеет ширину от 30–40 м до 80 м и представляет собой современную рабочую пойму реки, сложенную аллювиальными галечниками с песчаным и супесчаным заполнителем (рис. 1).

Рис. 1. Река Закка на участке исследования

Поверхность поймы ровная, изрезана брошенными руслами реки, местами задернована. Ледники по долинам рек Закка, Льядон, Нардон спускались до с. Зарамаг. Об этом однозначно свидетельствуют остатки морен и ледниковые узкие шпоры коренных пород в районе сс. Нар и Зарамаг.

Основной водной артерией района является р. Ардон, которая образуется от слияния четырех рек в Зарамагской котловине – Мамисондон, Нардон, Цмиакомдон и Адайкомдон.

Река Нардон образуется у одноименного села после слияния рр. Льядон, Закка и Зругдон.

Все водотоки района являются типичными горными реками с водным режимом, определяемыми источниками питания и характеризующимися весенне-летними половодьями и устойчиво низкими расходами в осенне-зимний период.

Для выполнения работы использованы данные ФГБУ «Северо-Кавказское ВС» и ФГБУ «Высокогорный геофизический институт».

На участке работ (рис. 2) ранее инженерно-гидрометеорологические изыскания по оценке селевой опасности не проводились.

Выполнены следующие виды работ:

- анализ материалов исследований прошлых лет, включая информацию о наличии, распространении и региональных закономерностях проявления селевых процессов;
- оценка условий селеформирования и режима селей;
- оценка степени активности и опасности селевого процесса;
- качественный прогноз развития селевого процесса;
- рекомендации по защите проектируемых объектов от селевых процессов.

Были собраны, проанализированы и обобщены материалы гидрометеорологической и картографической изученности территории для использования в расчетах, и для выявления опасных процессов и явлений в районе исследования.

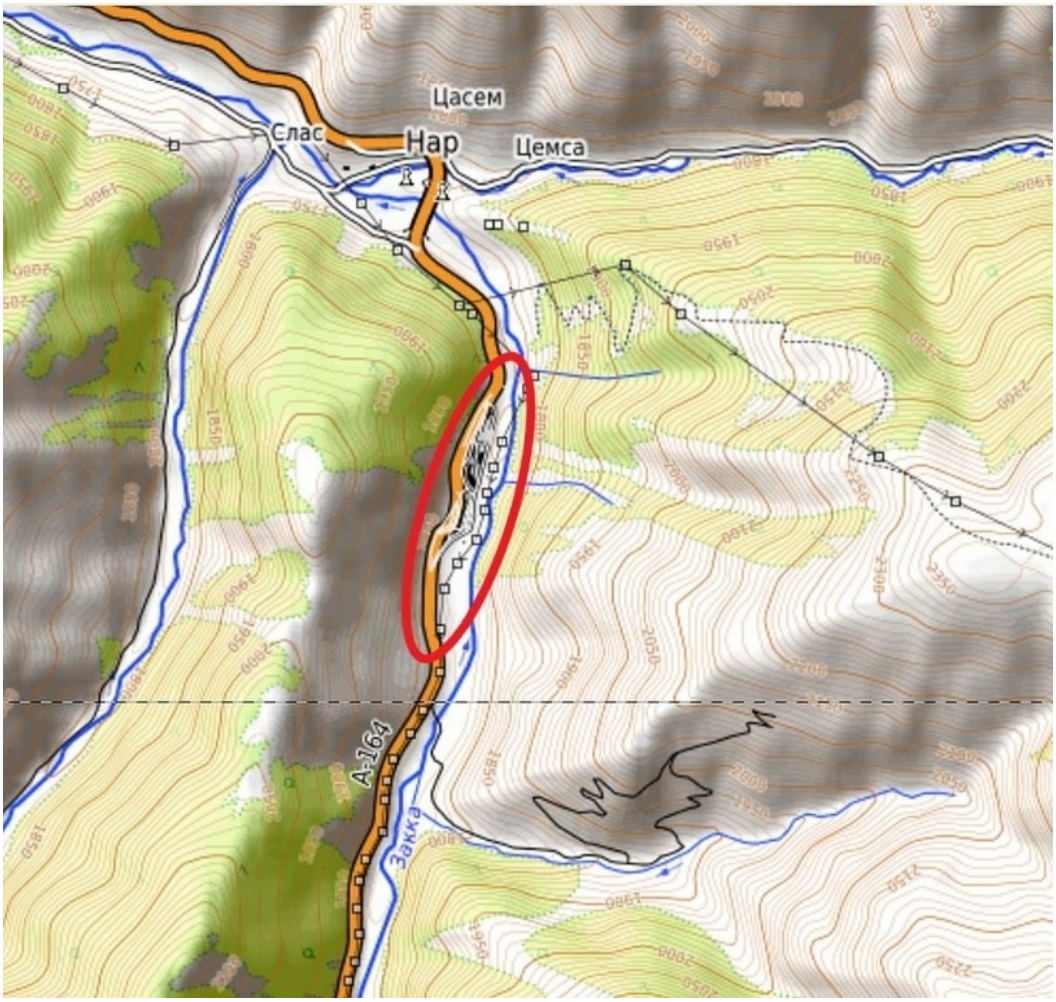


Рис. 2. Положение участка исследования – красная линия на топографической карте

Заккинский участок автодороги (место исследования автомобильного пункта пропуска через государственную границу Российской Федерации «Нижний Зарамаг», Республика Северная Осетия – Алания) располагается в нижнем и среднем течении р. Закка.

Рекогносцировочное обследование производится на территориях проявления селей, с описанием следов схода селей, фотографированием селеопасных участков, повреждений от селей.

Рекогносцировочное обследование бассейна рек проводилось вдоль проектируемого объекта для обследования растительности и почв на склонах. Схема маршрутных обследований представлена на рис. 3. Для проектируемого объекта

проводилось рекогносцировочное обследование бассейнов р. Закка и его притоков с целью выявления следов селепроявлений. Устанавливались границы селесборов, следы селепроявления, определялись потенциальные зоны зарождения селей.

Рис. 3. Схема рекогносцировочного обследования (желтая линия) участка исследования

Определялись фактические характеристики селевых процессов согласно п. 7 СП 11-103-97 и требованиям СП 479.1325800.2019, ВСН 03-76: объемы и максимальные расходы селевого потока; русловые характеристики селевых потоков.

Согласно п. 7.2.1 СП 116.13330.2012 для расчётов принимались с вероятностью превышения 2% для защиты зданий и сооружений нормального уровня ответственности.

Результаты и обсуждение

В горной части РСО-Алания к настоящему времени выявлено 145 селевых бассейнов [*Кадастр…, 2015*]. Наибольшая площадь пораженности селями (937 км^2), в Северной Осетии в долине реки Ардон. Площадь селевых бассейнов меняется в интервале от 0,1 км^2 до 100 км^2, поэтому средняя площадь равна 15,3 км^2. Суммарная длина селевых русел 389 км, средняя длина 6,5 км. Средние уклоны селевых русел меняются от 45 до 681‰.

Селевые явления в Северной Осетии достаточно хорошо изучены многими учеными страны. По территории республики проходит Транскавказская автомагистраль, которая является одним из сложных участков (в селевом и лавинном отношении) на территории Северной Осетии. Участок расположения объекта изыскания находится непосредственно на автомагистрали. Карта селевых бассейнов Республики Северная Осетия – Алания представлена на рис. 4.

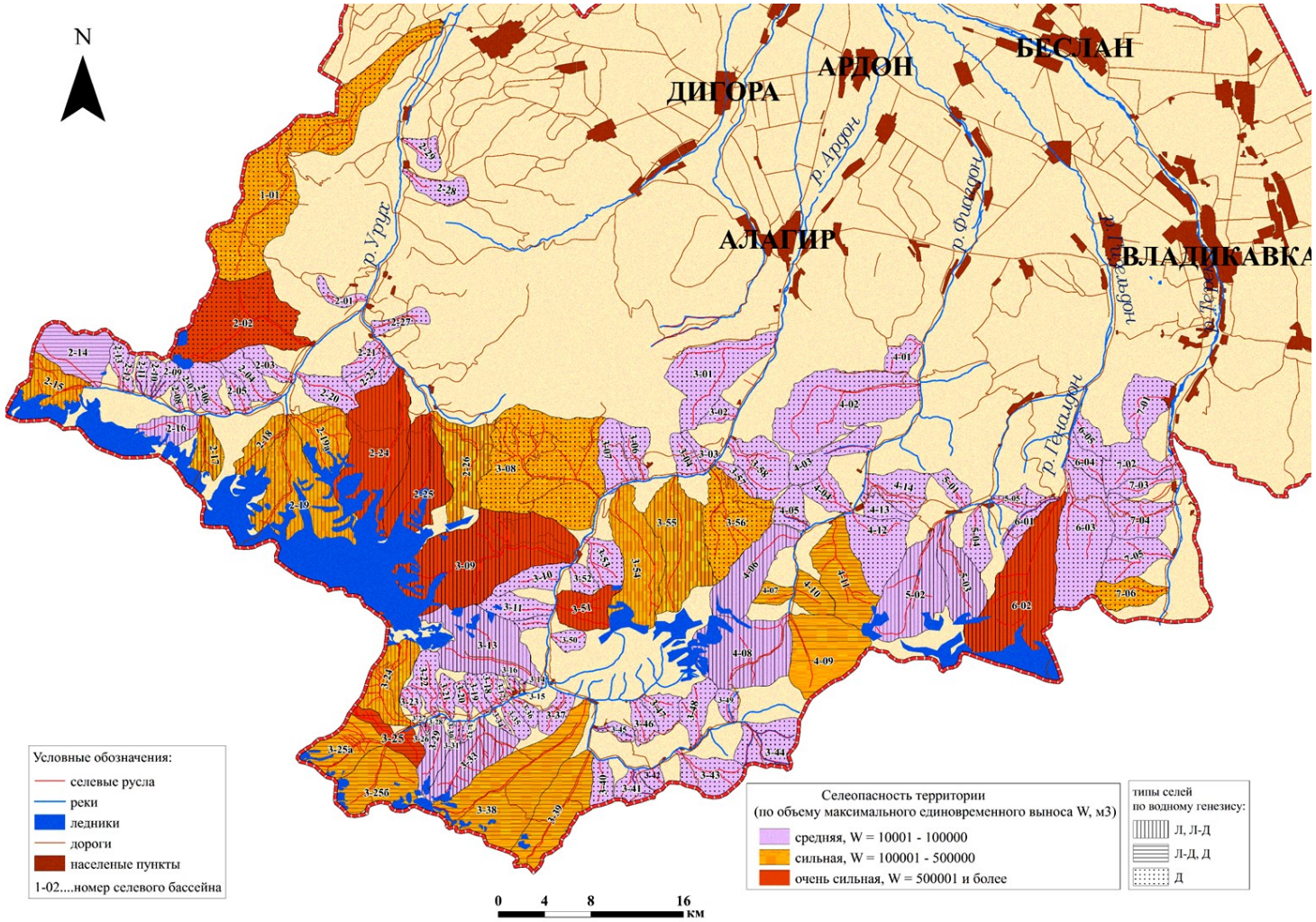


Рис. 4. Карта селевых бассейнов Республики Северная Осетия – Алания

Проведенные обследования подтвердили результаты оценки в [*Кадастр…, 2015*]. На р. Закка (или р. Заккадон) расположены селевые бассейны со следующими характеристиками, представленными на рис. 5 и таблице 1.

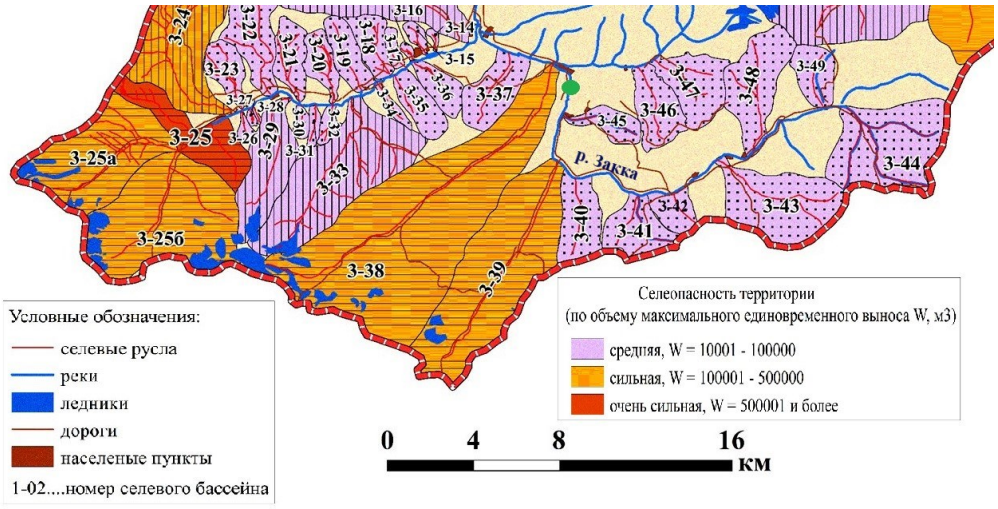


Рис. 5. Расположение участка изыскания (показано зеленым цветом) на карте селевых бассейнов Республики Северная Осетия – Алания

Согласно вышеуказанному каталогу, по данным ФГБУ «ВГИ» и Северо-Осетинского ЦГМС, выявлено, что прохождение селей на участке расположения объекта автомобильного пункта пропуска через государственную границу Российской Федерации Нижний Зарамаг, Республика Северная Осетия – Алания не отмечено. Хотя выше расположения объекта на притоках р. Закка, как показано в таблице 1, сходили сели небольших объемов, которые аккумулировались в руслах самих притоков. В ходе выполнения полевых работ, признаков прохождения селевых потоков по р. Закка на участке расположения объекта не выявлено.

В непосредственной близости от объекта исследования находится селевой бассейн 3-45 – ручей б/н (см. рис. 5, таблицу 1), приток р. Закка. Для этого бассейна определены максимальные расходы селевого стока дождевого происхождения вероятностью превышения Р = 1% и 2% и соответствующие динамические характеристики.

Параметры селевых потоков рассчитывались для 1%-ной обеспеченности.

Максимальный расход селевого паводка вероятностью превышения *P%* определялось на участке изыскания по формуле 16 [*ВСН 03-76*]:

$$Q_{cP} = q_{1\%} m_a \lambda_p (1/W_{otp})^{1.08}, \quad (1)$$

где $q_{1\%}$ – модуль максимального дождевого стока вероятностью превышения 1%, м^3/(скм^2), определяемый согласно таблице 9 [*ВСН 03-76*] в зависимости от бассейнового времени добегания τ; m_a – коэффициент зависящий от гидрологического района расположения водосбора, принимается по таблице 10 [*ВСН 03-76*] и формуле $m_a = H_{1\%}/250$; λ_p – переходный коэффициент от селевого расхода обеспеченностью 1% к расходу другой обеспеченности, определяется по таблице 11 [*ВСН 03-76*] и равен 1; F – площадь водосбора, км^2.

Бассейновое время добегания **τ** определяется по формуле 17 [*ВСН 03-76, с. 12*]:

$$\tau = \frac{L}{2{,}45 \cdot \sqrt[4]{I}} = \frac{3}{2{,}45 \cdot \sqrt[4]{347}} = 0{,}28 \text{ ч}, \quad (2)$$

где τ – время добегания, ч; L – длина реки по основному тальвегу от водораздела до замыкающего створа, км; I – средний уклон реки, промилле.

Таблица 1. Каталог селевых бассейнов на участке расположения объекта

№	Название водотока	Генезис селя	Тип селя	Площадь бассейна, S км^2	Средний уклон русла, α, ‰	Длина реки, L, км	Высота истока, H, м. абс.	Объем максимального единовременного выноса, W, м³ [*Разумов и др., 2001*]	Максимальный объем твердых отложений селя, W, м³ (аналитическим методом), [*Кондратьева, 2014*]	Дополнительные сведения	Повторяемость 1 раз в n лет/ даты схода [*Разумов и др., 2001*]
3–39	Гинат	Л-Д; Д	ГК, ВК	32,2	127	9,8	3080	-	288 350	Угроза ТрансКАМу, с. Нар	8–16/ 1988, 1989
3–40	Дзенина	Д	ГК	7,4	222	3,6	2680	50 000	36 815	Угроза ТрансКАМу, с. Нар	8–16/ 1989
3–41	б/н	Д		6,3	179	5,8	3000	30 000	30 933	Склон, пораженный мелкими русловыми селями	3/ 1987
3–42	Той	Д	ГК	3,1	478	1,6	2800	50 000	31 208	Угроза ТрансКАМу	-/-
3–43	Санат	Д	ГК	15,6	130	8,3	3200	50 000	63 752	Угроза автодороге	3–7/-
3–44	б/н	Д		17,6	89	12,6	3400	50 000	69 561	Угроза с. Сахсат	-/-
3–45	б/н	Д		5	347	3	2800	50 000	32 952		-/-
3–48	б/н	Д	ГК	7,6	175	4,8	2840	50 000	35 637		
3–49	б/н	Д	ГК	4,4	336	2,6	3153	50 000	30 254		

Примечание: «-» – данных нет; б/н – без названия. Генезис водной составляющей: Д – дождевой, Л-Д – ледниково-дождевой. Тип селя по гранулометрическому составу: ГК – грязекаменный, ВК – водокаменный.

$$q_{1\%} = f(t) = 15{,}0\ \text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2). \quad (3)$$

При расчете $q_{1\%}$ принято, что рассматриваемый водоток находится во II гидрологическом районе. Корректирующий коэффициент (m_a) для II гидрологического района равен

$$m_a = \frac{H_{1\%}}{250} = \frac{148{,}8}{250} = 0{,}59 < 0{,}75. \quad (4)$$

Для расчета m_a значение максимального суточного слоя осадков принят 148,8 мм по метеостанции «Владикавказ».

В соответствии с примечаниями к таблице 10 ВСН 03-76 в расчетах принято $m_a = 0{,}75$. Переходный коэффициент (λ_p) при вероятности превышения максимального расхода P = 1% равен $\lambda_p = 1$; при P = 2% – $\lambda_p = 0{,}71$ [*ВСН 03-76, таблица 11*].

Значение площади водосбора F= 5 км^2 определено по топооснове.

Коэффициент текучести селевой массы для пиковой фазы селевого потока ($W_{\text{отР}}$) вычисляет по формуле:

$$W_{\text{отР}} = 1 - \frac{S_{oP}}{S_{\text{пт}}}. \quad (5)$$

Объемная концентрация селевой массы (S_{oP}) зависит от коэффициента селеактивности бассейна (μ) и среднего уклона тальвега *I* [*ВСН 03-76, формула 3, таблица 5*]. Вследствие отсутствия данных полевых обследований, коэффициент селеактивности (μ) определяется по формуле:

$$\mu = 0{,}063 \cdot I^{0.40} = 0{,}063 \cdot 347^{0{,}40} = 0{,}65,$$

$$S_{o1\%} = f(\mu, I) = 0{,}625,$$

$$S_{o2\%} = S_{o1\%}\, \lambda_S = 0{,}625 \cdot 0{,}96 = 0{,}6,$$

где λ_S определено по таблице 7 [*ВСН 03-76*].

Согласно разделу 2.2 [*ВСН 03-76*] принимаем $S_{\text{пт}} = 0{,}705$, вычисляем:

$$W_{\text{от } 1\%} = 1 - \frac{0{,}625}{0{,}705} = 0{,}11 \quad (6)$$

$$W_{\text{от } 2\%} = 1 - \frac{0{,}6}{0{,}705} = 0{,}15 \quad (7)$$

С учетом найденных коэффициентов по формуле (1) определим максимальный расход селевого паводка вероятностью превышения *P%*:

$$Q_{c\ 1\%} = 15{,}0 \cdot 0{,}59 \cdot 1 \cdot (1/0{,}11)^{1.08} \cdot 5 = 479{,}96\ \text{м}^3/\text{с} \quad (8)$$

$$Q_{c\ 2\%} = 15{,}0 \cdot 0{,}59 \cdot 0{,}71 \cdot (1/0{,}15)^{1.08} \cdot 5 = 243{,}78\ \text{м}^3/\text{с} \quad (9)$$

Средняя глубина селевого потока 1%-ной обеспеченности h_{cp} определена по формуле 34 [*ВСН 03-76*]:

$$h_{cp} = 0{,}245 Q_{c1\%}^{2/5} / I_y^{1/15}\ W_{om1\%}^{4/15}, \quad (10)$$

где Q_c – расход селя 1% обеспеченности в заданном створе, м^3/с; I_y – уклон на расчетном участке, промилле; $W_{om1\%}$ – коэффициент текучести селевой массы для пиковой фазы потока.

В ходе полевых работ выше участка расположения объекта в пойме притока (ручей б/н) р. Закка был заложен морфоствор для определения уклона I_y и ширины створа (рис. 6). Ширина русла реки в точке морфоствора составляет 17 м, уклон русла в точке морфоствора I_y = 1,03° = 18‰.

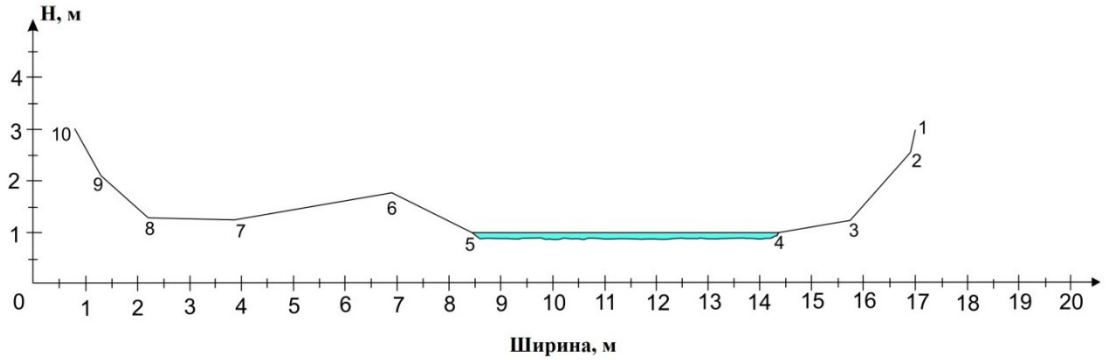


Рис. 6. Профиль притока р. Закка (3–45 по [*Кондратьева и др., 2015*]), расположенного выше участка расположения объекта

С учетом параметров морфоствора по формуле (10) рассчитаны средняя глубина селевого потока 1%-ной и 2%-ной обеспеченностей:

$$h_{\text{ср1\%}} = \frac{0{,}245 \cdot 479{,}96^{2/5}}{18^{1/15} \cdot 0{,}11^{4/15}} = \ 4{,}3 \text{ м} \tag{11}$$

$$h_{\text{ср2\%}} = \frac{0{,}245 \cdot 243{,}78^{2/5}}{18^{1/15} \cdot 0.15^{4/15}} = 3{,}0 \text{ м} \tag{12}$$

Согласно СП 116.13330.2012 (п. 6.2.1.) для проектирования противоселевых сооружений необходимо знать:

- статическое давление отложившейся массы селевого потока;
- динамическое давление селевого потока на плоскость, перпендикулярную направлению его движения.

Статическое давление отложившейся массы селевого потока $P_{ст}$, кПа, в точке, находящейся на глубине H, м, в течение времени аккумуляции селевого потока, определяется по формуле в СН 518-79:

$$P_{\text{ст}} = g\rho_c H, \tag{13}$$

где g – ускорение силы тяжести, равное 9,81 м/с^2; ρ_c – плотность селевого потока, т/м^3, при $H_{1\%}$ равном 4,3 м. С учетом полученных данных получаем: $P_{\text{ст}}$ = 9,81·2,0·4,3 = 84,4 кПа.

Динамическое давление селевого потока выражается формулой [*Методические рекомендации…, 1978*]:

$$P_{\text{дин}} = kV_c^2\rho_c, \tag{14}$$

где $P_{\text{дин}}$ – динамическое давление селевого потока, кПа; k – экспериментальный коэффициент равный 4,5; V_c – скорость селевого потока, м/с; ρ_c – плотность селевой массы, т/м^3.

Для оценки скорости селевого потока $V_{c1\%}$ в створе по р. Закка использовалась формула Голубцова, рекомендуемая для водокаменных потоков:

$$V_{c1\%} = 4{,}5 \cdot h_{cp1\%}^{0{,}67} \cdot I^{0{,}17}, \tag{15}$$

где $h_{cp1\%}$ – средняя глубина потока, м; I – продольный уклон водотока в створе сооружения, в долях единицы.

Тогда получим:

$$V_{c1\%} = 4{,}5 \cdot 4{,}3^{0{,}67} \cdot 18^{0{,}17} = 19{,}5 \text{ м/с}.$$

С учетом найденного значения скорости селевого потока по формуле (14) определяем динамическое давление селевого потока:

$$P_{\text{дин}} = 4{,}5 \cdot 19{,}5^2 \cdot 2 = 3422{,}3 \text{ кПа}.$$

Транспортная и эрозионно-аккумулятивная деятельность селевых потоков зависит от концентрации твердого материала и уклона поверхности. По мере роста концентрации селевого материала, уклоны необходимые для эрозионной деятельности селя увеличиваются, и начинается аккумуляция материала [*Флейшман, 1978*]. В мировой практике критическим углом для селевой эрозии при прохождении грязекаменных потоков принимается 8°, при прохождении водокаменных потоков 3,5° [*Jakob, Hungr, 2005*]. Эти данные подтверждаются и фактическими материалами из Приэльбрусья, в частности, постоянным чередованием зон преобладающей эрозии, транзита и аккумуляции селевого материала при прорыве озера Башкара в 2017 г. [*Черноморец и др., 2018*].

Судя по материалам полевых обследований, угол наклона русла от устья правого притока р. Закка (рассмотренного выше) до объекта составляет около 1°. При таком угле наклона селевая эрозия отсутствует, в случае прохождения грязекаменного селя будет преобладать селевая аккумуляция, в случае прохождения водокаменного селя - транзит и аккумуляция. При этом на участке поймы р. Закка в зоне расположения объекта может отмечаться водная эрозия. Данный факт – отсутствие селепроявлений на р. Закка на участке расположения объекта, подтверждается результатами полевых обследований, а также данными, представленными в работе [*Кадастр…, 2015*].

Основным источником селевой опасности на притоках р. Закка являются гляциальные и дождевые сели, сходящие по руслам водотоков с ледниковым питанием. При сокращении оледенения, как правило, происходит рост селевой активности. Такая ситуация отмечалась и в Приэльбрусье [*Золотарев, Сейнова, 1997*]. Мировой опыт свидетельствует о том, что на определенном этапе сокращения ледников селевая активность начинает снижаться.

Выводы

Оценка селевой опасности выполнена на участке объекта «Реконструкция автомобильного пункта пропуска через государственную границу Российской Федерации Нижний Зарамаг, Республика Северная Осетия-Алания» находится на левом борту р. Закка.

Природные условия бассейнов притоков р. Закка благоприятны для формирования селевых потоков по руслам водотоков. На крутых склонах морен отмечается формирование микроселей. По архивным данным и в ходе полевых работ установлено, что по р. Закка в районе расположения объекта селепроявления и условия для формирования селевых очагов отсутствуют.

Специфика селевого режима ограничена селепроявлениями в девяти притоках р. Закка сели, из которых не доходят до месторасположения объекта.

По ближайшему к проектируемому объекту притоку (река б/н) р. Закка сделаны следующие расчеты:

- максимальные расходы селевого стока дождевого генезиса 1%- и 2%-ной обеспеченностей;
- статическое давление отложившейся массы селевого потока;
- динамическое давление селевого потока.

Водоток находится на расстоянии около 1 км от объекта.

Инфраструктура объекта находится вне зоны селевой опасности на значительном удалении от селевых водотоков.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (Соглашение № 23-17-20001).

Список литературы

Агибалова В.В. Сели в Северной Осетии. – Орджоникидзе: Изд-во Ир, 1983. – 115 с.

Герасимов В.А. О селях на северном склоне Центрального и Восточного Кавказа // Труды ВГИ. – 1974. – № 27. – С. 63.

Герасимов В.А. Селеопасные территории Северного Кавказа // Труды ВГИ. – 1985. – № 57. – С. 39.

Золотарев Е.А., Сейнова И.Б. Катастрофические сели Приэльбрусья за два последних тысячелетия. – Материалы гляциологических исследований. – 1997. – № 82. – С. 184–189.

Кадастр селевой опасности юга европейской части России / отв. ред. Н.В. Кондратьева. – Нальчик: Печатный двор, 2015. – 148 с.

Кондратьева Н.В. Предварительная оценка максимального объема твердых отложений селя методами математической статистики для Центрального Кавказа [Электронный журнал] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – http://www.science-education.ru/118-13897.

Методические рекомендации по гидравлическому расчету селезадерживающих и селепропускных сооружений. – Тбилиси, 1978. – 58 с.

Поповнин В.В. Современное оледенение в верховьях реки Баксан. // Природопользование Приэльбрусья. – М: МГУ, 1992. – 75 с.

Разумов В.В., Стрешнева Н.П., Перекрест В.В. Кадастр лавинно-селевой опасности Кабардино-Балкарской республики. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. – 64 с.

Флейшман С.М. Сели. – Л., Гидрометеоиздат, 1978. – 312 с.

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.

Jakob M., Hungr O. (eds.) Debris-flow hazards and related phenomena. – Springer, 2005. – 739 p.

Концепция подхода к оценке риска, связанного с селевой активностью в Шеки-Загатальском экономическом районе

С.О. Алекперова

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

Аннотация. Статья посвящена разработке концепции подхода к оценке риска, связанного с селевой активностью в Шеки-Загатальском экономическом районе. Используя современные географические методы и инновационные аналитические инструменты, проведен комплексный анализ факторов, влияющих на динамику селевых процессов в регионе. В условиях усиливающихся природных угроз и изменений климата, важность точной и своевременной оценки рисков становится все более актуальной. В работе применены инновационные методы, включая пространственное моделирование и анализ данных с использованием современных технологий. На основе статистических материалов определено количество населения, проживающего в районах с риском возникновения селевых явлений, а также изучено влияние селей на перспективные направления развития хозяйственных секторов. Изучена пространственно-временная динамика селевых явлений на территории за период с 2000 по 2024 г. На основе дешифрирования космического снимка определена угроза селевых очагов для населенных пунктов в бассейнах рек, а также составлена карта оценки материального ущерба от селевых процессов в Шеки-Загатальском экономическом районе. Проведен анализ рисков и факторов угроз, связанных с селевыми явлениями. Оценка риска, основанная на новейших научных подходах, позволяет детально изучить механизмы формирования селевых процессов и выявить ключевые факторы, влияющие на их активность в данном регионе. Результаты исследования имеют важное значение для разработки эффективных мер по минимизации ущерба и повышению устойчивости территорий к селевым процессам.

Ключевые слова: *селевые процессы, оценка риска, современный подход, инновационные методы, статистический анализ, пространственное моделирование, устойчивое развитие, природные угрозы, оценка риска*

Ссылка для цитирования: Алекперова С.О. Концепция подхода к оценке риска, связанного с селевой активностью в Шеки-Загатальском экономическом районе. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 27–36.

The conceptual approach to risk assessment related to debris flow activity in the Sheki-Zagatala economic region

S.O. Alakbarova

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 is devoted to the development of a conceptual approach to risk assessment related to debris flow activity in the Sheki-Zagatala economic region. Using modern geographic methods and innovative analytical tools, a comprehensive analysis of factors influencing the dynamics of debris flow processes in the region has been carried out. In the context of increasing natural hazards and climate change, the importance of

accurate and timely risk assessment is becoming increasingly relevant. The study applies innovative methods, including spatial modeling and data analysis using advanced technologies. Based on statistical data, the population living in areas at risk of debris flows has been identified, and the impact of debris flows on the prospective development of economic sectors has been examined. The spatio-temporal dynamics of debris flow events in the territory during the period from 2000 to 2024 have been studied; based on satellite image interpretation, the threat of debris flow hotspots for settlements in river basins has been determined. Additionally, a damage assessment map for debris flow processes in the Sheki-Zagatala economic region has been compiled. An analysis of risks and threat factors related to debris flow phenomena has been conducted. The risk assessment, based on the latest scientific approaches, enables a detailed study of the mechanisms of debris flow formation and the identification of key factors influencing their activity in the region. The research results are of great importance for the development of effective measures aimed at minimizing damage and enhancing the resilience of territories to debris flow processes.

Key words: *debris flow processes, risk assessment, modern approach, innovative methods, statistical analysis, spatial modeling, sustainable development, natural hazards, risk assessment*

Cite this article: Alakbarova S.O. The conceptual approach to risk assessment related to debris flow activity in the Sheki-Zagatala economic region. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 27–36.

Введение

Достижение устойчивого экономического развития Шеки-Загатальского региона, который является одним из наиболее уязвимых к селям в Азербайджанской Республике, предотвращение селей на этой территории и минимизация наносимого ими ущерба в настоящее время являются одними из наиболее актуальных тем. Территория Шеки-Загатальского экономического района в основном состоит из высокогорных и предгорных районов, общая площадь которых составляет 8,96 тыс. км^2, что составляет примерно 10,3% территории страны. Почти 60–70% территории региона находится под постоянной угрозой селей. Сели, наблюдаемые в Шеки-Загатальском регионе, оказывают негативное влияние на развитие хозяйство, ослабляют развитие экономики. Вследствие резкого увеличения антропогенной нагрузки в области исследований наблюдается рост активности селевых явлений. Перенаселение, строительство жилых и частных домов, прокладка новых дорог, развитие горных курортов и рекреационных зон, вырубка лесов, чрезмерный выпас скота в бассейнах рек часто связаны с риском повреждений и способствуют увеличению угрозы селей. Шеки-Загатальский экономический район в ближайшие годы будет оцениваться как имеющий высокий уровень риска возникновения крупных чрезвычайных ситуаций различного характера, это, в свою очередь, существенно замедлит экономический рост в регионе и его переход к стратегии устойчивого развития.

Целью данной работы является определение зон риска связанная с селеопасностью в Шеки-Загатальского экономического района, анализ методов исследования в этом направлении и подходов к оценке рисков, связанных с селевой активностью, а также изучение концепций экономико-географического подхода и оценка риска, связанного с селеопасностью в исследуемый районе. Учитывая разрушительные сели, происходящие на исследуемой территории, главными задачами являются их изучение с экономико-географической точки зрения, подготовка предложений и рекомендаций по минимизации ущерба, наносимого экономике от селей, изучение способов защиты от селей на основе мирового опыта, а также выявление и оценка зон риска.

Краткий обзор проблемы

Благодаря выгодному географическому положению Шеки-Загатальский экономический район, охватывающий южный склон Большого Кавказа, стал одним из ведущих регионов, интенсивно развивающихся в последние годы. На исследуемой территории интенсивно ведется строительство многочисленных жилых домов, гостиниц, мотелей, зоны отдыха, туристических комплексов, а также прокладка дорог и линий электропередач. Поэтому для проведения комплексного анализа и изучения опасных селевых явлений очень важно создать базу данных по рельефу и морфодинамике региона.

В данной статье за основу при рассмотрении методов концепция «экономико-экологического» подхода к оценке риска, связанного с селевой активностью, были взяты результаты исследований в области физической географии, экономической и социальной географии, а также экологии.

Сафаров М.С. и Фазылов А.Р. для дистанционного зондирования и мониторинг селеопасных районов используют современные методы дистанционного зондирования и мониторинга с использованием беспилотных летательных аппаратов, адаптированные для условий горно-предгорных зон, позволившие получить цифровые данные. [*Сафаров и др. 2023*].

Тарихазер С.А. и Мамедов С.Г. применяют метод соотношения частотностей для оценки и зонирования селевой опасности. Метод широко практикуется для прогнозирования вероятности возникновения геологических процессов для классов связанных факторов как гипсометрия, углы наклона, экспозиция склонов и т.д. [*Мамедов и др.2023, Tarikhazer и др. 2023*].

Бабаханов Н.А. рассматривает экономические и социально-географические аспекты изучения селевых явлений, зонирование Азербайджана по интенсивности проявления стихийных бедствий. Также он изучает влияние селей на территориальную организацию экономики методом математического анализа статистических материалов, применяя результаты для эффективной меры борьбы с ними [*Бабаханов, 2009*].

Медеу А.Р. на основе комплексного подхода, необходимого при выработке научных основ управления селевыми процессами на разных этапах, обращает внимание к решению этой задачи путем составления различных специальных карт, основанных на принципах типологизации объекта исследования. В своих исследованиях ученый анализирует научные и практические аспекты управления селевыми процессами, основываясь на комплексном изучении системы селеформирующей среды и селетехнических сооружений с целью обеспечения безопасности населения и социально-экономических объектов [*Медеу, 2011*].

Подходы, применённые вышеупомянутыми исследователями, включая концепцию оценки риска, связанного с селевой активностью, сыграли ключевую роль в формировании методологической основы нашего анализа. Это позволило всесторонне рассмотреть основную цель, изложенную в статье, и обеспечить научную обоснованность полученных результатов.

Методы

При проведении исследования применялись следующие географические методы: сравнительный статистический анализ — для выявления динамики и закономерностей развития селевых процессов в разных регионах; системный анализ — для комплексного рассмотрения природных, социально-экономических и экологических факторов; картографирование — с целью визуализации пространственного распределения селевых очагов; дешифрирование аэрофотоснимков и космических снимков — для анализа селевых потоков.

В настоящем исследовании подробно проанализированы научные труды как зарубежных, так и отечественных учёных в данной области. Особое внимание уделено вкладу следующих исследователей: Медеу А.Р., Есжанова А.С., Ранова С.У., Сафарова М.С., Бабаханова Н.А., Будагова Б.А., Махмудова Р.Н., Марданова Э.И.,

Рустамова С.Г., Тарихазер С.А. и др. Их исследования сыграли важную роль в формировании методологической базы данного труда.

Данные

Работа основывалось на данных, предоставленных Государственным Комитетом по Статистике Азербайджанской Республики (далее АР) и Министерством по Чрезвычайным Ситуациям АР, материалах переписи населения, планах, изложенных в государственных программах социально-экономического развития регионов, годовых отчетах Управления Гидрометеорологии АР и Института географии имени академика Г.А. Алиева, а также на анализе аналогичных работ, проведённых отечественными и зарубежными исследователями, и на результатах собственных полевых исследований автора.

Анализ

Шеки-Загатальский экономический район располагается на южном склоне Большого Кавказа, который расположены Туфанский антиклинорий, Загатало-Говдагский синклинорий, Кахетино-Вандамский антиклинорий [*Рустамов, 1970; Марданов и др., 1978; Будагов, 1993; Будагов и др., 2002*]. На южном склоне Большого Кавказа, в зависимости от вертикальных изменений рельефа, выделяются следующие высотные зоны: 1) высокогорная (от 2000–2200 м до 3000 м и выше); 2) среднегорная (от 600–800 м до 2000–2200 м); 3) низкогорная и предгорная (от 200 м до 600–800 м) [*Ализаде и др.,* 2010; *Тарихазер и др., 2023*].

Нижний предел селевых отложений р. Демирапаранчай расположен на высоте 700 м, рр. Кишчай и Шинчай – 400 м, р. Катехчай – 300 м и т.д. [*Будагов и др., 2002; Тарихазер и др., 2014*]. Изучение динамики развития и распространения конусов выноса на фототоне космоснимкам бассейнов рек Кишчай и Шинчай показывает, что усиление селевых явлении на реке приводит к увеличению площади селевых очагов и расширению конусов выноса (рис. 1). Поскольку конусы выноса рек Киш и Шин динамично развиваются, то с каждым годом увеличивается экономический ущерб, наносимый селями хозяйствам, садам, полям, приусадебным участкам и дорогам в таких селах, как Балталы, Гохмуг, Охуд и др., расположенных в межконусной понижение, которая привлекает внимание выходом грунтовых вод на поверхность и образованием болот.

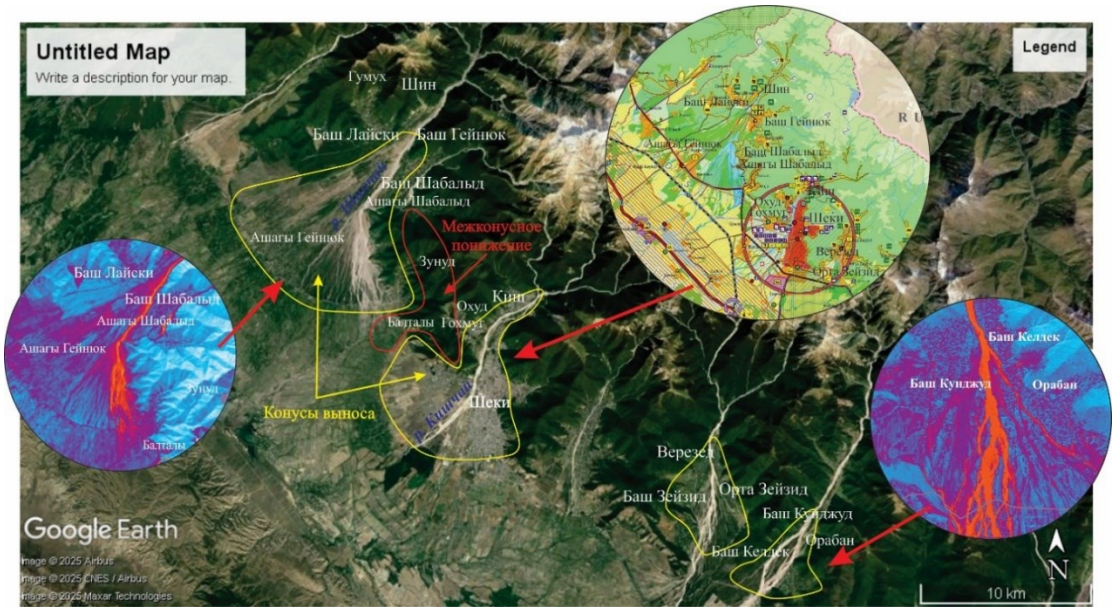


Рис. 1. Угроза селевых очагов для населенных пунктов в бассейнах рек (на основе дешифрирования космического снимка Google Earth SPOT Image)

На рис. 1 на основе космического снимка, полученного с платформы Google Earth со спутника SPOT Image, с использованием современных компьютерных технологий визуально выделены территории с наивысшим риском селевых явлений. С помощью примененных современных методов были увеличены участки, считающиеся наиболее критичными с точки зрения селевых рисков, и в соответствии с принципом температурной окраски эти зоны были отображены с использованием шкалы цветовых переходов (в сине–красных тонах). Также с помощью эффекта линзы была визуализирована степень освоения и уровень территориального планирования в зонах риска. Такой подход обеспечивает более точную и наглядную визуализацию уровня населения исследуемой территории, ее морфологической структуры и степени риска.

Формирование и мощность селей также зависят от интенсивности геоморфологических процессов, таких как осыпи, оползни и др. В верховьях высокогорных участков рек Балакенчай, Мухахчай, Курмухчай и Мазымчай широко распространены осыпи; в пределах среднегорной зоны бассейнов рек Гирдыманчай, Фильфиличай, Кишчай, Шинчай и Бумчай преобладают оползни. Низкогорные и предгорные районы отличаются расчленённостью рельефа и складчатой структурой основных горных пород. В результате таких геоморфологических процессов на склонах накапливаются рыхлые и твёрдые материалы, которые питают селевые потоки, определяя их устойчивость и разрушительную силу [*Будагов, 1993; Будагов и др., 2002; Ализаде и др., 2010; Тарихазер, 2023*; *Алекперова, и др., 2024*].

Населенные пункты, расположенные в бассейнах селеносных рек, периодически подвергаются воздействию селей. Рост населения и плотность заселения приводят к увеличению антропогенной нагрузки. Учитывая это, нами был проведен математический анализ статистических материалов на исследуемой территории и определена динамика численности и плотности населения за последние двадцать лет. По статистическим материалам на 01.01.2024 г., численность населения составляет 626,6 тыс. человек (здесь проживает 6,3% населения страны) плотность населения составляет 71 чел./км^2. В экономическом районе 28,7% населения проживает в городах, 71,3% в деревнях. Шеки-Загатальский экономический район включает Балакенский, Загатальский, Гахский, Шекинский, Огузский и Габалинский районы (таблица 1).

Таблица 1. Численность населения Шеки-Загатальского экономического района

Районы	Площадь, тыс. кв. км	Текущая численность населения, тыс. человек			Количество людей, проживающих в селеопасных районах, тыс. человек		
		1999	2009	2019	1999	2009	2019
Балакен	0,94	83,7	89,8	97,6	10,5	12,8	8,3
Загатала	1,35	107,2	118,2	127,3	18,3	16,5	12,5
Гах	1,49	51,1	53,3	57,3	10,2	11,8	9,2
Шеки	2,43	157,3	170,7	180,5	28,9	26,6	15,3
Огуз	1,08	36,5	40,2	43,2	7,3	7,8	5,2
Габала	1,55	82,8	63,6	105,3	12,6	12,8	10,2
по региону	8,84	518,6	535,8	611,2	87,8	88,3	60,7

Источник: [*Перепись населения, 2022.; Регионы АР, 2024; Будагов, 1993; Эюбов, и др. 1998; Бабаханов, 2009*]

По результатам анализа статистических материалов за 2009 г. в исследуемом регионе постоянно или периодически подвергались негативному воздействию селевых явлении 88,3 тыс. человек в 171 населенном пункте с численностью населения 535,8 тыс. человек, а в 2019 г. 60,7 тыс. человек в 193 населенных пунктах с численностью населения 611,2 тыс. человек. За 2024 г. количество населенных пунктов увеличилось до 241, что свидетельствует об увеличении числа проживающих в них семей, а также из 626,6 тыс. человек 58,9 тыс. человек поселились в селеопасных бассейнах рек.

Несмотря на проведение многочисленных мероприятий по борьбе с селями и защите от них, полностью предотвратить их или эффективно контролировать

невозможно. За период 2000 по 2010 г. коэффициент рождаемости на 1000 человек населения увеличился с 16,1 до 18,8. Коэффициент естественного прироста за этот период увеличился с 9,3 до 12,0. Помимо увеличения естественного прироста, в 2010–2024 гг. наблюдается также рост численности населения за счёт миграции: численность населения экономического района увеличилась на 250 человек за счёт миграции и на 31,7 тыс. человек за счёт естественного прироста. Общий прирост по экономическим районам был наивысшая оценка в Загатальском 9,2 тыс. человек, Шекинском 7,1 тыс. человек и Габалинском 5,8 тыс. человек районах. Полученные результаты показывают, что с 2000 по 2024 г. в Шеки-Загатальском экономическом районе частота селевых потоков увеличилась в 2 раза, а площадь их распространения в 0,5 раза. В исследуемый зоне 2000–2010 гг. ущерб от селей составлял около 20–25 млн манатов, а по оценкам 2010–2024 гг. эта сумма равнялась 30–35 млн манатов.

В результате проведенного нами анализа в этом направлении выясняется, что за период 2000–2024 гг. на территории было зафиксировано 228 селевых явлений в том числе, произошли сели различной мощности в рр. Кишчай 25, Шинчай 22, Демирапаранчай 18, Курмукчай 17, Талачай 11, Дашагылчай 11, Фильфиличай 9 и т.д. что в итоге оказало негативное воздействие на население и хозяйству региона. Расположенные на конусе выноса населенные пункты, хозяйственные предприятия, сада и т.д. всегда находятся под селевым риском (рис. 2).

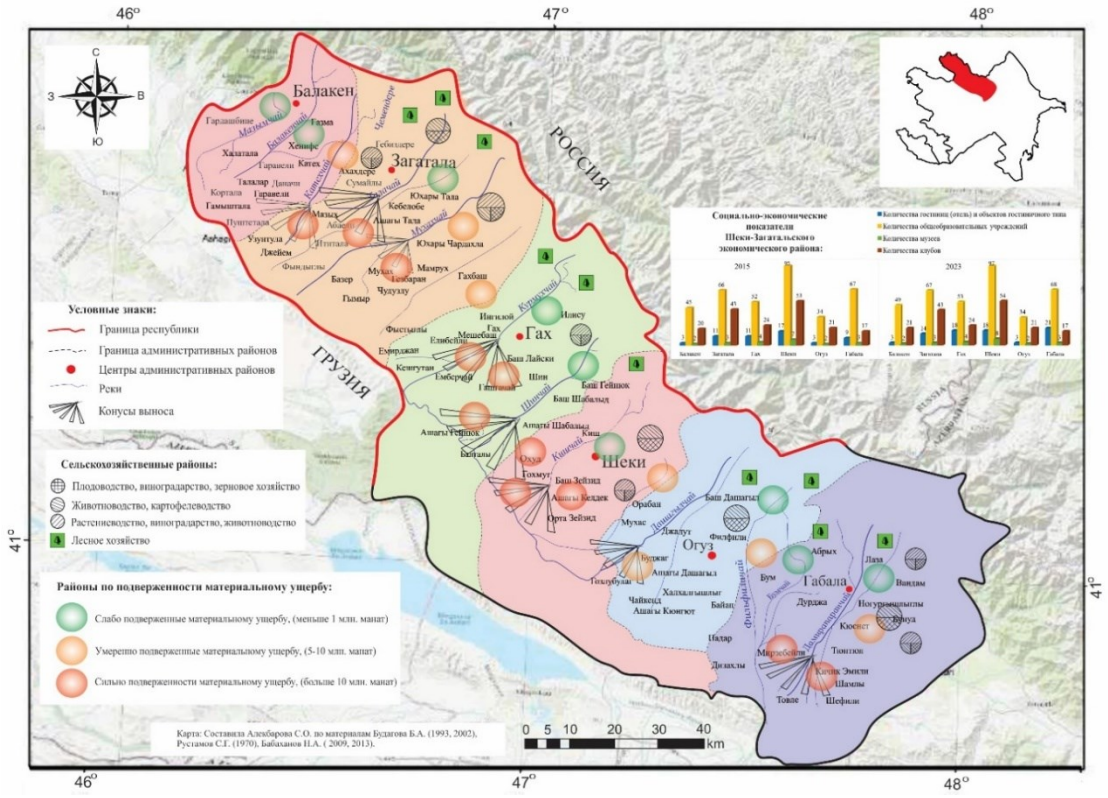


Рис. 2. Карта оценки материального ущерба от селевых процессов

На рис. 2 в зависимости от величины материального ущерба были выделены три типа районов: с низким (высокогорные малозаселённые территории), умеренным (средне- и низкогорные зоны с высокой плотностью населения и инфраструктурой) и значительным ущербом (область конуса выноса с обширными селевыми отложениями).

В Шеки-Загатальском экономическом районе даже при учете влияния селей на развитие и организацию сельское хозяйства, пахотные земли, плодовые сады, страдают от селевых потоков, в том числе и несвоевременное проведение защитных мероприятий увеличивает размер наносимого ущерба. В регионе тысячи гектаров пригодных для земледелия в результате селей стали непригодными для использования.

Одной из областей подвергающаяся воздействию селевых потоков и терпящая от них большие убытки является растениеводство. По статистическим данным 2023 г. в Шеки-Загатальском экономическом районе площади сельскохозяйственных культур составляют 110 155,2 га зерновых и бобовых, 2594,2 га табака, 77,7 га сахарной свеклы, 3916,5 га картофеля, 5985,9 га овощей, 945,4 га виноградников, 60,0 га чайных плантаций, 1493,2 га бахчевых культур, 70 816,3 га садов и ягодников, при этом урожайность снижается на десятках гектаров пахотных земель из-за частых наводнений в районе. В Шеки-Загатальском экономическом районе ежегодный ущерб растениеводству от селей составляет около 10–12 млн манатов.

Соответственно, в Балакен зерновые и бобовые культуры занимают 9806,0 га, табак 64,6 га, картофель 627,0 га, овощи 2065,0 га, бахчевые 344,0 га, сады и ягодники 13 256,2 га, в Загатала зерновые и бобовые культуры занимают 11 318,7 га, табак 429,0 га, картофель 1635,0 га, овощи 2174,0 га, виноградники 48,0 га, бахчевые 837,0 га, сады и ягодники 22535,8 га, в Гах зерновые и бобовые культуры занимают 14 295,1 га, табак 450,5 га, картофель 303,0 га, овощи 323,4 га, виноградники 152,0 га, бахчевые 133,2 га, сады и ягодники 12 052,6 га, в Шеки зерновые и бобовые культуры занимают 42 861,8 га, табак 1467,1 га, сахарная свекла 27,7 га, картофель 646,5 га, овощи 773,5 га, виноградники 307,0 га, бахчевые 173,0 га, сады и ягодники 8024,6 га, в Огуз зерновые и бобовые культуры занимают 16 159,0 га, табак 163,0 га, картофель 290,0 га, овощи 280,0 га, виноградники 31,0 га, бахчевые 4,0 га, сады и ягодники 6255,8 га, в Габале зерновые и бобовые культуры занимают 15 714,6 га, табак 20,0 га, картофель 415,0 га, овощи 370,0 га, виноградники 407,4 га, бахчевые 2,0 га, сады и ягодники 8691,3 га. На территории примерно 35,8% пригодных для сельского хозяйства постоянно находятся под селевой угрозой.

По сравнению с другими отраслями сельского хозяйства животноводство несет меньше убытка от селей [*Бабаханов, 2013; Алекперова, 2024; Мамиева, и др, 2025*]. Но несмотря на то, что убыток в животноводстве меньше, чем от растениеводства следует отметить, что в отдельные годы в результате очень сильных селей тысячи голов крупного и мелкого рогатого скота, домашней птицы погибло. По статистическим данным на 2023 г. в Шеки-Загатальском экономическом районе насчитывается 214 444 голов крупного и мелкого рогатого скота, в том числе 109 352 – коровы и буйволы, 535 659 – бараны и козы, 2098 – свиньи, 1 309 430 – птица. В разные годы указанные отрасли животноводства подвергались воздействию селей.

Например, в 1910 г. в результате произошедшего селей на р. Шинчай в селе Баш Гейнюк погибло 98 человек и сотни домашних животных. В 2004 г. в результате селей Талачай в Загатальском районе погибло 20 голов скота и птицы, разрушено 2 жилых дома, 6 населенных пунктов пришли в негодность. в 2006 г. в результате произошедшего селей на реке Шинчай селах Ашагы Лайский, Ашагы Гейнюк, Балталы, Ашагы Шабалыд погибли несколько домашний скот и птица, разрушен мост через реку, 2 человека погибло, 3 жилых дома полностью разрушено. В результате селей, произошедшего в р. Кишчай Шекинского района в 2008 г., погибло 15 голов скота, 34 дома пришли в негодность [*Алекперова, 2024; Бабаханов, 2013*].

От селевых процессов страдают также транспортная и курортно-рекреационная сферы. Сели тормозят развитие транспортной сети и социальной инфраструктуры [*Мамиева, и др, 2019*]. Согласно данным МЧС, в Шеки-Закатальском экономическом районе Республики дороги Шеки – Закатала, Шеки – Балакен, Шеки – Гах – Огуз, Габала – Вандам, Исмаиллы – Габала – Огуз – Шеки – Балакан и Халдан – Шеки – Закатала – Балакан страдают от селей больше всего, так как проходят через бассейны рр. Кишчай, Шинчай, Талачай, Курмукчай, Балакенчай, Дашагылчай и Демирапаранчай.

На территории Шеки-Загатальского экономического районе ремонт и ввод в эксплуатацию автомобильных дорог, пришедших в негодность в результате селей, осуществляется на основе плана мероприятий, предусмотренных Государственными программами. За период 2000–2024 гг. отремонтировано 14 км дороги Индже – Ашагы – Баш Шабалыд (израсходовано 63,2 тыс. манатов), 87 км дорог Мирзебейли – Чухур Габала (32,8 тыс. манат), 13,2 км дорог Сейидгышлаг-Меммедагалы (82,6 тыс. манат),

55 км дорог Нохургышлаг – Енгидже – Тунтул (324,7 тыс. манат), 3 км дорог Бум – Тиканлы – Абрых (107,9 тыс. манат), 13,7 км дорог Габала – Бум – Гемерван (345 тыс. манат), 2,1 км дорог Салаван – Бейли – Гушлар (10,7 тыс. манат), 3 км дорог Гах – Илису Сарыбаш (37,5 тыс. манат) и 2,3 км дорог Гах – Гашкарчай – Армудлу (160 тыс. манат). Например, в результате селей, произошедшего в река Гирдыманчай в 2008 г., плотина протяженностью 220 м в этом районе пришла в негодность, а центральные улицы Лагича и больница, расположенная в центре района, стали непригодными для эксплуатации; в результате селей в рр. Балакенчай и Катехчай в 2010 г. была затоплена автодорога Халдан – Балакен – Грузия и др.

Концепция обеспечения безопасности территорий, подверженных риску селевого воздействия, представляет собой теоретическую основу для разработки мер по снижению селевой опасности и защите населения [*Медеу, и др., 2000*]. Таким образом, можно заключить, что Концепция обеспечения безопасности территорий, подверженных селевому риску, служит научной основой для разработки мероприятий по защите населения и снижению селевой опасности.

Учитывая этот фактор, с целью проведения комплексного исследования мы проанализировали пространственно-временную динамику селевых явлений на территории Шеки-Загатальского экономического района с использованием современных компьютерных технологий (рис. 3).

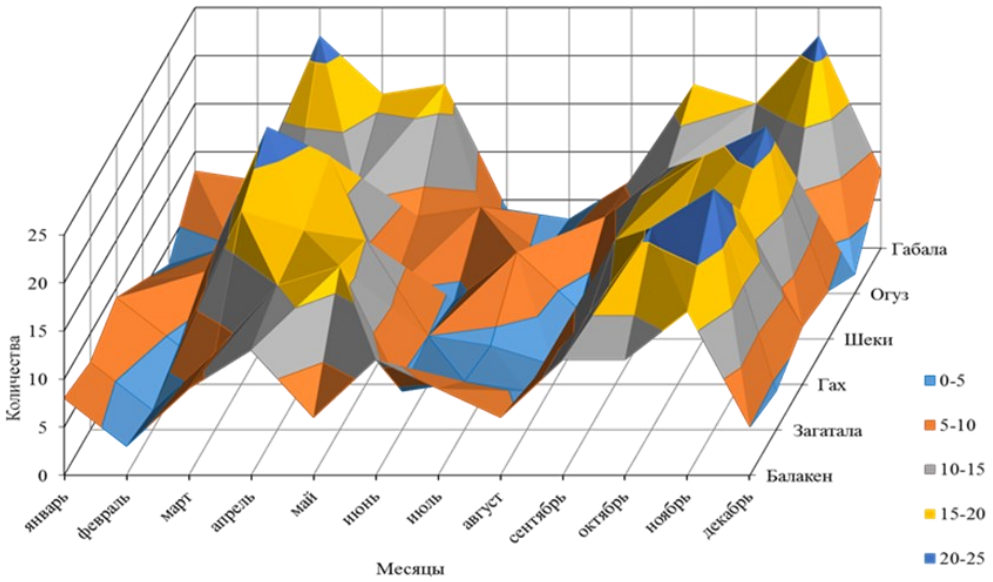


Рис. 3. Пространственно-временная динамика селевых явлений (2000–2024 гг.)

На рис. 3 представлена пространственно-временная динамика селевых явлений на территории Шеки-Загатальского экономического района. Диаграмма отображает изменения количества селевых явлений по месяцам и административным районам, что позволяет провести комплексный анализ рисков и динамики селей на регионе. На исследуемой территории количество селей по месяцам визуализировано с использованием различных цветовых оттенков, что позволяет анализировать пространственно-временную динамику селей и выявить зоны с высокой частотой повторяемости.

В Шеки-Загаталинском экономическом районе риски, связанные с селевыми явлениями, и меры по их предотвращению были подробно оценены с использованием SWOT анализа (рис. 4).

В ходе анализа были выявлены сильные и слабые стороны, возможности, угрозы и риски, а также четко указаны возможности для их решения в данной области. Результаты, полученные в ходе исследования, были научно обоснованы и точно классифицированы.

Рис. 4. SWOT анализ рисков и факторов угроз, связанных с селевыми явлениями (составила С.О. Алекперова)

Выводы

Проведенное исследование подтвердило значимость применения современных географических методов и научных подходов при оценке риска селевой активности. Использование концепции оценки риска, разработанной в ряде фундаментальных исследований, позволило не только уточнить характер пространственно-временного распределения селевых процессов, но и определить ключевые факторы, влияющие на их активизацию.

Исследование подчеркивает значимость разработки комплексного и инновационного подхода к оценке риска, связанного с селевой активностью в Шеки-Загатальском экономическом районе. В рамках оценки риска селевых явлений была использована концепция комплексной оценки, включающая пространственное моделирование и математические методы анализа, что позволило точно определить факторы, влияющие на динамику и интенсивность селевых процессов. Статистические данные показывают, что в последние 10 лет количество разрушений, связанных с селями, увеличилось на 15%, что подтверждает необходимость разработки эффективных методов прогнозирования и управления рисками. Более 60–70% ущерба, причиняемого селями экономике в исследуемом регионе, относится к сельскохозяйственным предприятиям. Около 35,8% земель, пригодных для сельского хозяйства, постоянно подвержены угрозе селей.

Мероприятия по предотвращению, защите и борьбе с селевыми явлениями, предусмотренные в Государственных программах (2004–2008, 2009–2013, 2014–2018 и 2019–2023 гг.), реализуются своевременно, в полном объеме и с надлежащим качеством, что обеспечивает эффективное управление селевым риском, способствует устойчивому территориальному развитию и снижает геоэкологическую уязвимость селеопасных регионов. Проведение анализа уязвимости хозяйственных объектов, включая сельскохозяйственные угодья, туристические маршруты, транспортные пути и населенные пункты, позволит осуществить ранжирование территорий по уровню риска и определить приоритетность проведения защитных мероприятий, что имеет важное значение для повышения эффективности управления природными и техногенными рисками.

Список литературы

Алекперова С.О., Динамика селевых явлений в бассейне р. Курмухчай (Азербайджан) // ГеоРиск. – 2024. – Т. XVIII, № 1. – С. 40–49. – DOI: 10.25296/1997-8669-2024-18-1-40-49.

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

Алекперова С.О., Гасымова С.Г. Оценка природно-техногенного риска на автомобильных дорогах Газах-Товузского экономического района // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – Вып. 1. – С. 25–39.

Ализаде Э.К., Тарихазер С.А. Динамика изменения структуры опасных стихийно-бедственных явлений Азербайджанской части Большого Кавказа в условиях глобальных изменений // Избранные материалы VII Международной конференции «Устойчивое развитие горных территорий в условиях глобальных изменений». – Владикавказ, 2010. – № 3(5). – С. 49–57.

Бабаханов Н.А. Зонирование Азербайджана по интенсивности проявления стихийных бедствий // Материалы конференции «Человек и опасность». – Баку, 2009. – С. 39–43

Бабаханов Н.А. Стихийные бедствия: их проявления в Азербайджане, наносимые ущербы, меры защиты от них. – Баку, 2013. – 256 с.

Будагов Б.А. Новейшая тектоника Большого Кавказа // Рельеф Азербайджана. – Баку, 1993. С. 75–78.

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.

Мамиева С.А., Алекперова С.О. Влияние антропогенного фактора на предгорные и горные территории северо-восточного склона Малого Кавказа. // Матер. науч. конф. общественных географов «Человеческая география в Азербайджане и России: основные пути развития в XXI веке». – Баку, 2019. – С. 194–201.

Мамиева С.А., Алекперова С.О. Активизация селевых явлений в современных условиях и пути борьбы с ними на примере Малого Кавказа (в пределах Азербайджана) // Вектор ГеоНаук. 2025. – Т. 8, № 1. – С. 4–15.

Марданов Э.И. Геоморфологические условия развития селей на южном склоне Большого Кавказа (на территории Азербайджанской ССР). – Баку, 1978. – 77 с.

Мамедов С.Г., Тарихазер С.А. Применение количественных методов для оценки оползневой восприимчивости бассейна р. Гирдыманчай // Известия Тульского ГУ. Науки о Земле. – 2023. – Вып. 1. – С. 38–66

Медеу А. Р. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Основы управления. – Алматы, 2011. – Т. 1. 284 с.

Медеу А.Р., Есжанова А.С. Концепция обеспечения безопасности территорий, подверженных риску селевого воздействия // Новые подходы и методы в изучении природных и природно-хозяйственных систем: доклады к международной конференции. – Алматы, 2000. – С. 179–183.

Перепись населения Азербайджанской Республики в 2019 году. – Баку 2022. – 925 с.

Регионы Азербайджана – статистический сборник. – Баку 2024. – 779 с.

Рустамов С.Г. О состоянии изучения селей в Азербайджанской ССР и направление дальнейших исследований // Материалы Научно-технического совещания по вопросам методики изучения и прогноза селей, обвалов и оползней (тезисы докладов). – Душанбе, 1970. – С. 120–123.

Сафаров М.С., Фазылов А.Р. Дистанционное зондирование и мониторинг селеопасных районов горных территорий Таджикистана. – Душанбе, 2023. – 192 с.

Тарихазер С.А., Алекперова С.О. Динамика усиления селеопасности в горных регионах и их воздействие на природно-хозяйственную систему (на примере азербайджанской части Большого Кавказа) // Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия География. Геоэкология. – 2014. – № 1. – С. 28–38.

Tarikhazer S.A., Mammadov S.Q., 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. – No. 58. – P. 257–273. DOI: 10.26565,2410-7360-2023-58-20.

Twenty years' experience in flexible debris flow protection

A. Barinov, M. Denk, H. Lanter

Geobrugg AG, Romanshorn, Switzerland, info@geobrugg.com

Abstract. Flexible ring net barriers against debris flow have been installed worldwide during the last twenty years mainly for the purpose of retention and a few for erosion control in the way by reducing the inclination of the riverbed. An increasing number of projects (40 barriers within Switzerland, more than 100 worldwide by 2017) showed the economic and environmental benefit of this solution. Special applications to retain larger volumes with single barriers have been successfully installed in several countries across the globe. This contribution gives examples of different special applications like one big barrier providing large retention capacity, several barriers in line or filled-up barriers for erosion control. Advantages and challenges for the use of flexible ring net barriers are discussed on a technical and economic level and needs for maintenance and replacement works are addressed.

Key words: *debris flow, flexible protection, maintenance*

Cite this article: Barinov A., Denk M., Lanter H. Twenty years' experience in flexible debris flow protection. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 37–47.

Обзор двадцатилетнего опыта защиты от селевых потоков гибкими противоселевыми барьерами

А. Баринов, М. Денк, Г. Лантер

Геобругг АГ, Романсхорн, Швейцария, info@geobrugg.com

Аннотация. Гибкие барьеры для защиты от селевых потоков устанавливались в последние двадцать лет по всему миру для удержания селевой массы и иногда для контроля эрозии и уменьшения уклона русел. Растущее число проектов (40 барьеров в Швейцарии и более 100 по всему миру в 2017 г.) показало экономические и экологические преимущества этого решения. В некоторых странах были установлены специальные решения для удержания селей большого объёма. В публикации описаны несколько особенно примечательных решений, таких как один барьер с особо высокой удерживающей способностью, решение из нескольких барьеров и система заполненных барьеров для контроля эрозии. Обсуждаются преимущества и сложности использования барьеров с технической и экономической позиций, а также затронуты вопросы обслуживания и ремонта.

Ключевые слова: *селевой поток, гибкий противоселевой барьер, обслуживание*

Ссылка для цитирования: Баринов А., Денк М., Лантер Г. Обзор двадцатилетнего опыта защиты от селевых потоков гибкими противоселевыми барьерами. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 37–47.

Introduction

Since 2005, over 250 flexible debris flow barriers have been installed, in more than 25 countries. Between 2005 and 2008, full scale experiments at the test site Illgraben, in Switzerland, proved the feasibility of retaining debris flows.

The efficiency of some of the first reference projects, mostly installed in Switzerland, was analysed and a load design was then established together with the Forest, Snow and Landscape Federal Institute (WSL). Standard systems were then developed with the simulation software FARO. Data from real-scale testing were used to verify and calibrate the software outputs.

Following this development, the flexible ring nets became increasingly an alternative to classical debris flow protections in Europe, Asia, USA and South America. In large scale projects, where nets were installed in a row in the same channel, the efficiency of retaining large volumes and the feasibility of this type of installation in a row were proven as well.

Designers and engineers appreciate the nets as a practical and economical addition or alternative to existing classical debris flow protections.

Twenty years of experience with flexible ring net barriers signifies that their advantages have been recognized and their efficiency in the field has been established. The increasing knowledge of single barriers, barriers in a row and large-scale barriers has allowed us to understand the advantages but also the limits of such a netting system for debris flow retention. This acquired knowledge is presented in the following paper, accompanied by case studies.

Real-scale testing in Illgraben, development of standard barriers and CE marking

Real-scale testing in Illgraben

Between 2005 and 2008, real-scale testing was conducted in the Illgraben debris flow channel, in Wallis, Switzerland [*Wendeler, 2008*]. Prior testing, rockfall protection nets revealed that they were retaining some slides. Still, the dimensioning concept was missing to prove that flexible ring nets could retain larger debris flows in a channel without sustaining damage. In Illgraben, a middle to large debris flow is occurring at least once a year naturally and therefore, a flexible ring net could be tested yearly (see Fig. 1).

Two key characteristics were defined and analysed with testing. On one hand, a single barrier could, depending on the channel geometry, retain over 1000 m^3. On the other hand, over 10,000 m^3 were flowing over the barrier without damage. This led to planning and constructing a debris flow retention system with several nets in a row to successfully retain most of the material.

Fig. 1. Testing of debris flow retention system with ring net in the Illgraben channel, 2006. Retention volume approx. 1000 m^3

On the dimensioning side, the weight acting on a debris flow net during an event were better understood, thanks to an extensive measuring concept on and around the system [*Wendeler, 2006*], which lead to the final dimensioning concept [*Wendeler, 2008*].

Development of standardized barriers

The dimensioning concept as well as the distribution of the loading on the net were integrated in the finite element software FARO [*Volkwein, 2004*] and first projects, mostly in Switzerland, were dimensioned with it.

Following the first projects, standard barriers were designed with a given load capacity in kN/m^2. VX barriers are conceived for channels up to 15 m in width and a barrier height of up to 6 m, taking loads up to 160 kN/m^2. UX barriers find their application in larger channels, are installed with additional posts, a barrier height up to 6m and take up loads of 180 kN/m^2 [*Geobrugg, 2016*] (see Fig. 2).

The dimensioning concept for debris flows is now state of the art and freely accessible through the software DEBFLOW. After registration on the website, everybody can use this software and produce a first estimate for the dimensioning of a barrier.

Fig. 2. UX debris flow barrier, with posts for wider stream channels application. Example of the Trachtbach in Switzerland. Additional kolk protection, riprap and lean concrete were placed along the stream bed

CE marking

The real scale testing was also basis for certifying all standard barriers. Certification was achieved in 2017 (EAD document Nr. 340020-00-106[2]). The CE marking is based on a "European Assessment Document" which defines precisely the suitability, the type classification and yearly quality controls necessary to correspond to a certain standard. This states that the products with CE marking fulfil the European guidelines for product quality and field appropriateness (ETA 17/0268-17/0276 and ETA 17/0439).

Dimensioning

DEBFLOW makes it easy to predetermine the dimensioning of a standard barrier up to 6 m in height. Geobrugg or WSL with FARO simulation software can still dimension a more complicated scenario. Section 6 describes a few special cases regarding construction.

Special load case scenario such as snowslides and rockfall

In some instances, mostly very steep slopes (>35°) and at high altitude, snow slides, small avalanches or rockfall will be encountered, which could or will impact the debris flow nets.

An example is the multiple-barrier setup in Hasliberg in Switzerland. Some of the barriers are situated above 2000 m in elevation. Since flexible net barriers are also used to protect against avalanches and rockfall, a certain degree of combined loading can be guaranteed. The combined loading can be calculated, and a barrier can be dimensioned for every special case with the use of FARO simulation software [*Volkwein, 2004*]. Specific components of the debris flow barrier can be individually reinforced depending on the simulation results [*Wendeler, 2014*].

Fig. 3 illustrates the simulated load case for barrier number 2 in Hasliberg in a situation of a lateral avalanche impact, with an angle of 10° and a load of 120 kN/m^2. In this special case, the upslope guy wires are loaded up to 70% of their capacity. Fig. 4 shows the snow load on the barrier in winter.

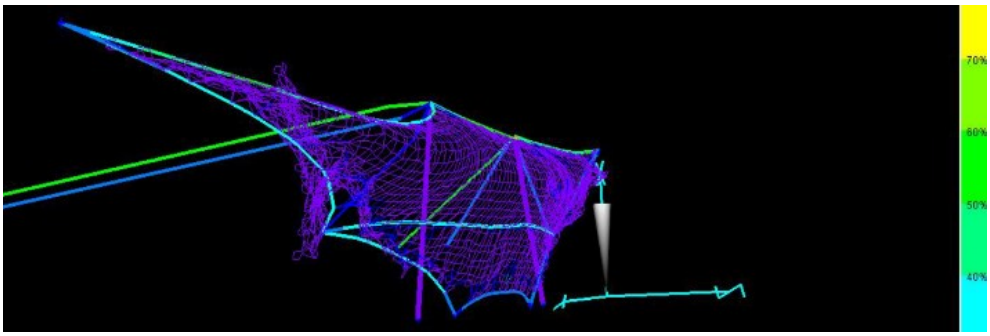


Fig. 3. FARO simulation software output when an avalanche in Hasliberg, Switzerland impacts barrier number 2

Fig. 4. same net than in Fig. 3, partially snowed in during winter. The snow load has to be taken into account when designing the barrier

Construction aspects

Subsurface and anchoring

While the netting itself is easy to model and to dimension, safe anchoring is more complicated.

Ideally, a detailed geological profile of the section to be protected is available as well as the geotechnical parameters of the subsurface. Another advantage is the possibility to perform pulling tests on the soil nails to assess the friction between the subsurface and the grout.

Debris flow deposits are heterogeneous in nature and deposited along the sides of the channel affecting the subsurface quality for anchoring. The dimensioning of anchor forces need to be determined by experts in those cases. It is as well recommended to use self-drilling anchors with a flexible anchor head. The barrier when loaded is largely deformed and the forces of the ropes on the anchors can change up to 30° in angle. This eccentricity without flexible anchor head is often not bearable for a normal threaded anchor since the pushing resistance is much smaller than the pulling component.

Reuse of the anchoring after a debris flow event

Without additional flank stabilisation, a certain degree of washing out can be observed along these stream banks, especially in loose soil (see Fig. 5).

When exchanging the net, the anchoring can technically be reused when the top of the anchor is cut off, a loading test is performed, and a new flexible anchor head is mounted. Assuming that the anchor length was drilled the first time with a safety factor and possesses a certain length in reserve. In the case of frequent filling of the net, it is recommended to design the anchors with sufficient length or to prevent the washing out of the banks with structural countermeasures.

Fig. 5. Washed out anchoring of the debris flow barrier number 25 in the Illgraben channel. Anchoring partially in loose material and partially in disused concrete debris flow barrier

Structural countermeasures: protection of the banks in stream bends

Especially in bends along the stream, the washing out of the outer bank and its erosion are prevalent when a debris flow occurs. The volume and the velocity of the flow dictate the amount of erosion. Depending on the project, a reinforcement of the outer bank should be considered (for example, additional flank stabilisation by netting with or without erosion control mats (see Fig. 6)).

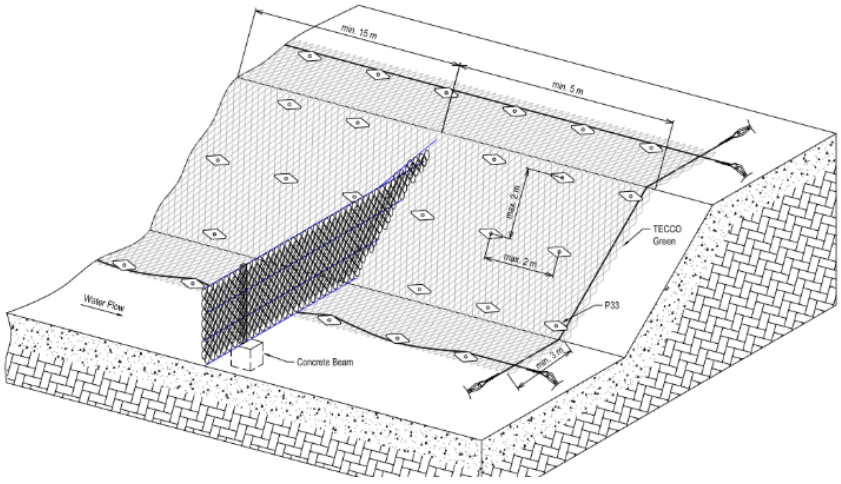


Fig. 6. Slope stabilisation with TECCO for flank stabilisation when installing a debris flow barrier in loose material

It is important to consider that the shearing forces of a debris flow are much higher than of water and this has to be incorporated in the design calculation for the protection measures.

Kolk protection

When barriers are filled or partially filled, the downstream material must be directed back into the original stream bed. This is especially important for barriers retaining a debris flow in an open field rather than in the stream bed.

When planning, it must be considered whether a field needs an artificial channel back to the stream. The necessity for a protection against kolk has to be established, for example with anchored rock blocks. When choosing this solution, the dimensioning of the lower nets should consider the possibility of these rock blocks getting torn away. The additional load being potentially fatal to the barrier.

Planning aspects

Often, debris flow barriers are installed close to the debris flow's source zone. At the same time, greater structural measures, such as a retaining basin or deviation measures, are constructed further down.

Net barriers and large steel and concrete construction can therefore be perfectly combined. The advantages of both methods can be specifically used together. An example of this combination is the streams Trachtbach in Brienz and Milibach in Hasliberg, both in Switzerland. In both projects, combining the nets upstream and the larger construction measures downstream allowed for increased retained mass upstream and diminished the erosion in the stream bed.

Therefore, the capacity of the concrete protection measures could be lowered and constructed at a smaller scale, and existing protection structures could be easily and cost-effectively renovated and added to the protection measures series.

Protection nets as an immediate solution

Protection nets installed in the source zones of debris flows slow them down, allowing for longer warning and evacuation times in endangered areas. This is especially important in small catchment zones where debris flows are rapid and travel along short distances only.

Therefore, easily installed protection nets are practical for an immediate protection solution. They increase the safety of the infrastructure downstream and even allow for the protection of the construction crew building a retaining basin, for example. These protection nets can also be equipped with a warning system (more details are given in section 7).

Visual and landscape protection aspects

Debris flow protection nets instead of concrete dams are increasingly being considered an alternative for landscape protection and visual aesthetics. The filigree design is almost invisible from far away, and this is a primary argument for construction of protection measures in landscape protection zones.

An example is the UNESCO World Cultural Heritage along the Rhine close to Koblenz (Fig. 7). At the back of the village, debris flow nets are installed, and even with one barrier partially filled in 2017, the nets are still barely visible but fulfilling their purpose (Fig. 8).

Fig. 7. Almost invisible debris flow barrier close to Koblenz along the Rhine above an UNESCO World Cultural Heritage protected village

Fig. 8. partially filled debris flow barrier above the German Railway close to Koblenz

Additionally, environmentally friendly buildings and sustainability are increasingly important arguments for construction. For example, a debris flow barrier (ten by 4 meters) is 30 times lighter than a concrete barrier of the same dimensions, making it the 'greener solution'. With less weight, less carbon dioxide is emitted during transport to the site [*Wendeler, 2008*].

Passage for small animals and greening

The relatively large openings of ring nets allow small animals, even fish, to pass when the barrier is not filled or immersed in water, in contrast to a concrete structure [*Wendeler, 2008*]. Ring nets are also appropriate for greening and blend perfectly into the landscape.

Different types of debris flow barriers

Single barriers

Most barriers installed are single barriers along roads, railway tracks, or above settlements (see Fig. 9).

Fig. 9. Debris flow barrier in Isenflue above a settlement. The outer bank of the stream was reinforced with a rock wall

Barriers in a row (multi-level barriers)

Debris flow nets can be installed in a row to increase the retained volume. The WSL installed the first multi-barriers in Merdenson, Switzerland, for observational purposes [*Denk et al., 2008*].

Subsequent laboratory tests to analyse the overflow behaviour, specifically the overflow velocity evolution during a flow, confirmed the developed load design for multi-level barriers [*Wendeler et al., 2010*].

Examples of this setup are the multi-level barriers in Hasliberg [*Wendeler et al., 2014*] in Switzerland, Portainé in Spain [*Luis et al., 2010*], and Ana Chosica in Peru.

Most multi-level barriers have already been successfully filled during events (see Fig. 10). Ana Chosica is the most recent example, from 2017, protecting several cities built downstream efficiently (see Fig. 11).

Fig. 10. Debris flow protection barriers, successfully filled in Hasliberg in 2011

Fig. 11. Filled debris flow barrier in 2017 in Peru, protecting successfully a large city downstream

Large debris flow retention with single barrier (special construction)

An adapted design higher than 10m and larger than 40 m can be constructed in special cases. A typical example is the debris flow barrier in Hüpach, next to Oberwil in the canton of Berne in Switzerland [*Berger et al., 2016*].

This barrier has a retaining capacity of more than 12’000 m^3. Such a construction necessitates strong abutments of steel-reinforced concrete and long anchors, and special ropes are needed for cable cars, which need precise adjustment (see Fig. 12). Special calculations for the netting and the ropes, adjustments to the anchoring and special foundation engineering in exposed terrain were necessary to complete the project. The decision to install a large retaining structure with netting was based on the topography, the difficulty of access and lack of alternatives to protect the village below. The debris flow barrier has not been filled yet.

Another special construction is situated in Sitäbach, Switzerland, along the stream Lenk. It is based on concrete slices with netting in between (see Fig. 13).

Fig. 12. Special construction of a debris flow barrier in Hüpach, in Switzerland, with a width of 40m and a netting height of 10 m

Fig. 13. Another special construction acting as a debris flow barrier in Sitäbach, consisting of concrete slices piled up and netting mounted in between

Maintenance and cleaning of barriers

As with any protection structure, debris flow barriers require maintenance from time to time. If no event (debris flow, slides, etc.) occurred during that time span, it is recommended to undertake regular, for example yearly, checks of the protection system. Working with a checklist and a maintenance scheme, as with any other protection structures, should facilitate regular controls.

After an event, the barrier needs emptying and the replacement of specific components. A filled barrier can, for example, be cleaned from behind with an excavator. When planning for the system, it is essential to consider what happens to the material of the debris flow and to organise a deposit area. Budget-wise, it has to be considered that parts have to be replaced after a filled barrier, whereas the anchoring can often be reused, as explained earlier.

A net can be emptied from the front when certain conditions are fulfilled. The debris flow material has to be dry and stable, the netting has to be stabilised upslope, and safety aspects for the working crew have to be respected.

Advantages and limits of flexible netting for debris flow protection

These systems' main advantages are their relatively low weight and rapid installation. Especially in steep and rugged terrain. The material can be transported with helicopters wherever construction machines cannot reach the site or are not economical.

Ring nets can be used for immediate protection in endangered zones to safeguard the construction of a permanent structure below. These practices are common, for example, in Japan. Ring nets can, therefore, be incorporated into an overall protection concept for an entire catchment area.

At the same time, it has been proven that ring net barriers are fully equivalent to large concrete structures when properly planned, with an erosion control concept and an established maintenance plan.

Obviously, in easy-access areas with a high frequency of debris flows, permanent concrete structures are to be favoured as they are more economical.

Conclusions

Since the publication of the load design of flexible protection nets and their appropriateness tests in the Illgraben in Switzerland, many projects have been successfully installed in the last 20 years.

Several construction details have been revised and improved. Considering the hydrological processes affecting the stability of the stream banks and planning for reinforcement, the flexible ring net systems can be considered equivalent to classical large concrete protection structures. The barriers' lighter conception makes them an unavoidable solution when easy handling, environmental requirements and landscape protection are key issues of a project.

The dimensioning concept developed at the WSL, which is in use worldwide, has been verified by several filling and successfully retaining events. More testing could further adapt and refine the concept.

References

Berger C., Wendeler C., Stieglitz L., Lauber G. (2016): Examples of debris retention basins combining concrete and net structures, Interpraevent Luzern, Switzerland.

Denk M., A. Roth, C. Wendeler und A. Volkwein (2008): 1:1 Feldversuche für flexible Schutznetze gegen Murgang – Versuche, Bemessung, Anwendung, Publikation für die Technische Akademie Esslingen, Deutschland.

Geobrugg (2016): Ringnetzbarrieren aus hochfestem Stahldraht: Die ökonomische Lösung gegen Murgänge, Schweiz.

Luis-Fonseca R., C. Raimat, J. Albalate and J. Fernandez (2010): Protecion contra Corrientes de derrubios en areas del Pirineo. Obras Urbanas, Julio/Agosto 2010 numero 22, Spain.

Speerli J., Hersperger R., Roth A., Wendeler C. (2010): Physical modeling of debris flow over flexible ring net barriers, Conference on Physical Modelings in Geotechnics ETHZ, Switzerland.

Volkwein A. (2004): Numerische Simulation von flexiblen Steinschlagschutzsystemen, Dissertation ETHZ, Schweiz.

Wendeler C., McArdell B.W., Rickenmann D., Volkwein A., Roth A., Denk M. (2006): Testing and numerical modeling of flexible debrs flow barriers. In Zhang, M. and H. Wang (eds.): Proc. of the sixth International Conference on Physical Modeling in Geotechnics, pp. 1573–1578. Balkema.

Wendeler C. (2008): Murgangrückhalt in Wildbächen – Grundlagen zu Planung und Berechnung von flexiblen Barrieren, Dissertation ETHZ, Schweiz.

Wendeler C., Glover J. (2014): Multiple load case on flexible shallow landslide barriers – mudslide and rockfall, IAEG Conference Turin, Italy.

Wendeler C., Volkwein A., Roth A., Nishimura N. (2014): Successful hazard prevention using flexible multi-level barriers, Interpraevent in Nara, Japan.

Инженерно-геологическая характеристика селевых отложений 2023 г. у подножия вулкана Шивелуч (Камчатка)

О.С. Барыкина[1], В.И. Фролов[2], Ю.В. Фролова[1], Э.Э. Сулейманова[1]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, barykinaos@my.msu.ru, ju_frolova@mail.ru

[2]Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация. Вулкан Шивелуч – один из наиболее активных на Камчатке. За последние 25 лет здесь случилось более десяти крупных извержений. Несмотря на удаленность от населенных пунктов, его высокая активность и регулярно происходящие селевые потоки представляет серьезную опасность для жизнедеятельности п. Ключи и г. Усть-Камчатск, в том числе, дорожной инфраструктуры региона, перекрывая единственную региональную трассу в промысловый г. Усть-Камчатск, а также ряд дорог местного значения. Для инженерно-геологической характеристики селевых отложений, сформировавшихся на склоне и у подножия Шивелуча в мае 2023 г., были отобраны образцы крупнообломочных валунно-галечных включений и рыхлого дисперсного заполнителя. Отложения были изучены на макро- и микроуровне, определены минеральный (с помощью рентгеноструктурного анализа и описания породы в шлифах) и гранулометрический составы, физические и физико-механические свойства. Показано, что и в дисперсной фазе, и в крупных обломках главными породообразующими минералами являются плагиоклазы, также присутствуют роговая обманка и вулканическое стекло; глинистые минералы отсутствуют. В составе дисперсного заполнителя преобладают частицы мелко- и тонкозернистой песчаной и крупнопылеватой фракций. По классификации Н.А. Качинского селевой матрикс можно классифицировать как супесь, с минеральной плотностью 2,70 г/см^3. Крупнообломочные включения представляют собой высокопористые андезиты, с минеральной плотностью 2,65–2,72 г/см^3, что соответствует андезитовому составу. Согласно инженерно-геологическим классификациям они относятся к грунтам средней и низкой плотности, высокой пористости, по прочности на одноосное сжатие классифицируются как полускальные грунты низкой прочности и скальные малопрочные грунты.

Ключевые слова: *селевые процессы, условия формирования, селевые отложения, дисперсный заполнитель, крупнообломочные валунно-галечные разности, минеральный состав, физические и физико-механические свойства*

Ссылка для цитирования: Барыкина О.С., Фролов В.И., Фролова Ю.В., Сулейманова Э.Э. Инженерно-геологическая характеристика селевых отложений 2023 г. у подножия вулкана Шивелуч (Камчатка). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 48–60.

Engineering-geological characteristic of the 2023 debris flow deposits of the Shiveluch volcano (Kamchatka)

O.S. Barykina[1], V.I. Frolov[2], J.V. Frolova[1], E.E. Suleymanova[1]

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, barykinaos@my.msu.ru, ju_frolova@mail.ru

[2]Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract. Shiveluch is one of the most active volcanoes in Kamchatka. Over the past 25 years, more than ten major eruptions have occurred here. Despite its remoteness from populated areas, its high activity and regularly occurring debris flows pose a serious threat to the livelihoods of Klyuchi and Ust-Kamchatsk, including the region's road infrastructure, blocking the only regional highway to the fishing town of Ust-Kamchatsk, as well as a number of local roads. To characterize the debris flow formations of the Shiveluch slope, samples of different dispersion were taken from their strata, which were formed in May 2023. The samples were divided into two fundamentally different groups: loose dispersed filler and coarse-grained boulder-pebble rounded inclusions. The soils were studied at the macro and micro levels, the mineral (using X-ray diffraction analysis and description of sample slots) and granulometric compositions, physical and mechanical properties were determined. It is shown that plagioclases are the main rock-forming minerals in both the dispersed phase and large fragments, hornblende and volcanic glass are also present; clay minerals are absent. The composition of the dispersed filler is dominated by particles of medium and fined sand and coarse-silt fractions. According to N.A. Kachinski's classification, the debris flow matrix can be classified as a sandy loam with a particle density of 2.70 g/cm^3. Coarse-grained inclusions are highly porous andesites with a particle density of 2.65–2.72 g/cm^3, which corresponds to the andesite composition. They belong to soils of medium and low density, high porosity; in terms of uniaxial compressive strength, they are classified as low-strength semi-basement soils and low-strength rock soils.

***Key words**: debris flow, conditions of formation, debris flow deposits, dispersed filler, coarse-grained boulder-pebble rounded inclusions, mineral composition, physical and mechanical properties*

Cite this article: Barykina O.S., Frolov V.I., Frolova J.V., Suleymanova E.E. Engineering-geological characteristic of the 2023 debris flow deposits of the Shiveluch volcano (Kamchatka). In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 48–60.

Введение

Сели, возникающие на вулканах Камчатки, являются опасными и зачастую разрушительными экзогенными процессами. Их развитие на склонах и у подножия вулкана Шивелуч обусловлено рядом факторов: во-первых, вулканической активностью региона, способствующей накоплению мощных толщ рыхлого пирокластического материала, который легко вовлекается в движение при интенсивных атмосферных осадках или при таянии снега и ледников; во-вторых, высокой влажностью камчатского региона, что играет большую роль в подготовке селевых процессов; в-третьих, наличием не менее пяти ледников на склонах вулкана [*Маневич, 2024*], при таянии которых происходит инфильтрация воды в рыхлые вулканические отложения, что снижает их прочность и ведёт к зарождению селя и в-четвертых, склоны Шивелуча имеют большой уклон, и, сложенные несцементированными пирокластическими отложениями, легко подвергаются размыву и транспортировке под действием воды [*Черноморец, Сейнова и др., 2010*].

Наравне с современными исследованиями, особое значение в изучении селевых процессов на Камчатке имеют исторические наблюдения. С XVIII в. отмечалась высокая активность селевых потоков, связанная с извержениями крупных вулканов региона. В настоящее время используются различные методы мониторинга, включая дистанционное зондирование, сейсмологические и гидрометеорологические наблюдения, позволяющие точнее прогнозировать возможные катастрофические события. Институт Вулканологии и сейсмологии ДВО РАН ведет постоянные исследования, направленные на изучение закономерностей формирования селевых потоков. Одной из важнейших прикладных задач является разработка мероприятий

инженерной защиты – селезащитных дамб, каналов и барьеров, предназначенных для ослабления разрушительного воздействия селевых потоков.

В целом, селевые процессы на вулканах Камчатки представляют собой сложное явление, обусловленное сочетанием эндогенных и экзогенных факторов. Активный вулканизм, особые геоморфологические условия, климатические особенности и наличие значительных запасов льда и снега делают регион крайне уязвимым к селевым процессам.

Сели, образующиеся на вулкане Шивелуч, беспрепятственно перекрывают единственную жизненно важную региональную трассу в промысловый г. Усть-Камчатск с населением около 5000 человек, а также ряд дорог местного значения, в том числе, на активно разрабатываемое Озерновское золоторудное месторождение и к объектам оборонной инфраструктуры.

Инженерно-геологические условия территории вулкана Шивелуч

Вулканический массив Шивелуч, занимающий не менее 1300 км² в северной части Центральной Камчатской депрессии, представляет собой уникальный объект, характеризующийся сложным взаимодействием геоморфологических, геологических, гидрогеологических и геокриологических факторов. Этот активный вулкан, расположенный на левом берегу реки Камчатки, находится в 50 км на ССВ от пос. Ключи и в 98 км на СЗ от г. Усть-Камчатска, а его возраст оценивается в 60–70 тыс. лет. В составе массива выделяются два главных структурных элемента: Старый Шивелуч (3283 м) и действующий в голоцене Молодой Шивелуч (2763 м, также называемый Четвёртая вершина), при этом высота активного эруптивного центра Молодого Шивелуча составляла около 2500 м до пароксизмального извержения 2023 г. [*Горбач, Портнягин, 2011; Сляднев, Литвинов, 1989*].

Рельеф вулкана отличается резким расчленением склонов эрозионными формами временных водотоков. Верхняя часть конуса покрыта небольшими ледниками и фирновыми полями. Климатическая обстановка характеризуется муссонным режимом, при этом среднегодовая температура в районе, согласно данным метеостанции в пос. Ключи, составляет –2,5°С, а максимальные осадки выпадают в июле и августе, достигая до 19,8 мм в сутки при среднем годовом значении 380,7 мм (необходимо отметить, что в последнее время современная климатическая обстановка несколько изменилась, особенно по периоду выпадения максимальных осадков – сейчас это конец мая – начало июля, а август – сентябрь, как правило, сухие). Снежный покров устанавливается в долинах рек уже в начале ноября, в горной части – к началу октября, а в высокогорной зоне – в середине сентября, однако на Шивелуче снег сохраняется круглый год [*Сляднев, Литвинов, 1989*].

Геологическое строение вулкана Шивелуч определяется его расположением на северо-восточном окончании Восточно-Камчатского вулканического пояса и выделяется как отдельная тектоническая структура. Постройка вулкана преимущественно сложена отложениями четвертичного возраста. Верхнее звено четвертичной системы представлено андезитами, туфами среднего состава и андезибазальтами, формирующими основу постройки Старого Шивелуча, который имеет крутосклонный конус, выхолаживающийся к основанию. Фундамент вулкана, предположительно, залегает в неогеновых породах (N_2tm), на которые наложены позднечетвертичные ледниковые отложения и эксплозивные вулканические материалы, мощностью около 3000 м [*Сляднев, Литвинов, 1989*]. Современное звено четвертичной системы включает нижнюю и среднюю части, где доминируют базальты, андезибазальты, андезиты и их туфы, отложения направленных взрывов, что особенно заметно в современной постройке Молодого Шивелуча. Потоки андезибазальтов располагаются на юго-западном склоне вулкана, при этом их мощность достигает 3–5 м, а в отдельных случаях – до 40 м. Эксплозивные отложения, включающие щебень, глыбы и вулканический песок с примесью пемзы, имеют мощность до 30–35 м и являются важной частью вулканической постройки.

Геоморфологические условия формирования селевых процессов на Шивелуче напрямую связаны с вулканической активностью, которая создает условия для накопления рыхлого материала, подверженного дальнейшему размыву и перемещению под воздействием водотоков. Рельеф сформирован в результате вулканической деятельности в плейстоцен-голоценовое время, а донная и боковая эрозия рек и временных водотоков существенно изменяет облик вулканической постройки. Склоны имеют разные уклоны – от крутых до пологих участков у основания. В южной части постройки сформировалась взрывная кальдера диаметром около 10 км, внутри которой расположен вулкан Молодой Шивелуч с действующим кратером диаметром около 2 км, что является важным фактором формирования селевых потоков.

Гидрогеологические и геокриологические условия оказывают существенное влияние на процессы селеформирования. Рыхлые четвертичные отложения, имеющие высокую водопроницаемость, способствуют быстрому инфильтрационному поступлению воды, что приводит к насыщению вулканических пород и последующему их размыву. При этом распределение осадков в регионе крайне неравномерно, а мощность снежного покрова в горных районах достигает 2–3 м, а на седловинах вулканов – до 10–15 м [*Горбач, Портнягин, 2011; Сляднев, Литвинов, 1989*].

Селевой поток после катастрофического извержения 2023 г.

Начало последнего эксплозивного извержения вулкана Шивелуч, одного из сильнейших за последние 60 лет, датируется 10 апреля 2023 г. [*Гирина, Лупян и др., 2023*]. При извержении вершинный экструзивный купол вулкана был практически разрушен и раскаленные обломки покрыли значительную область южного и юго-восточного подножия вулканического массива. По долине р. Кабеку сошел крупный пирокластический поток, отложения которого остаются нагретыми по настоящее время. Пепловая туча несколько раз меняла направление, в результате практически все склоны вулкана были покрыты слоем горячего пепла мощностью до 15 см. В результате всех этих событий сформировалось большое количество рыхлого материала. Следует особо отметить, что на момент извержения все склоны вулкана, за исключением эксплозивного кратера, находились под достаточно мощным снежным покровом.

Селевой поток, рассматриваемый в работе, согласно спутниковым снимкам миссии Sentinel-L2A, проявлял наибольшую активность в период с 15 по 27 мая 2023 г., и к концу мая достиг автомобильной трассы Ключи – Усть-Камчатск в 30 км на юго-запад от активного кратера вулкана (рис. 1). На спутниковых снимках отчетливо видны основные направления схода селевых потоков по каньонам сухих рек Байдарная и Каменская в юго-западном направлении от активного кратера вулкана Шивелуч, которые неоднократно происходили и ранее [*Сейнова, Черноморец, 2010*].

Из личных наблюдений В.И. Фролова: 15 мая наблюдалось много воды на дороге, что характеризует типичную обстановку в районе вулкана весной 2023 г. Были и более ранние потоки севернее по дороге ИП (например, 3 мая 2023 г.). При повторном наблюдении точки 22 мая 2023 г. дорога в области влияния селевого потока была перемыта: наблюдался мощный слой воды со взвесью, течение происходило в южном и юго-восточном направлении. Часть дороги выглядела сухой, но под поверхностным слоем, на котором можно было стоять и даже проезжала техника, очевидно, находилась водонасыщенная масса (рис. 2).

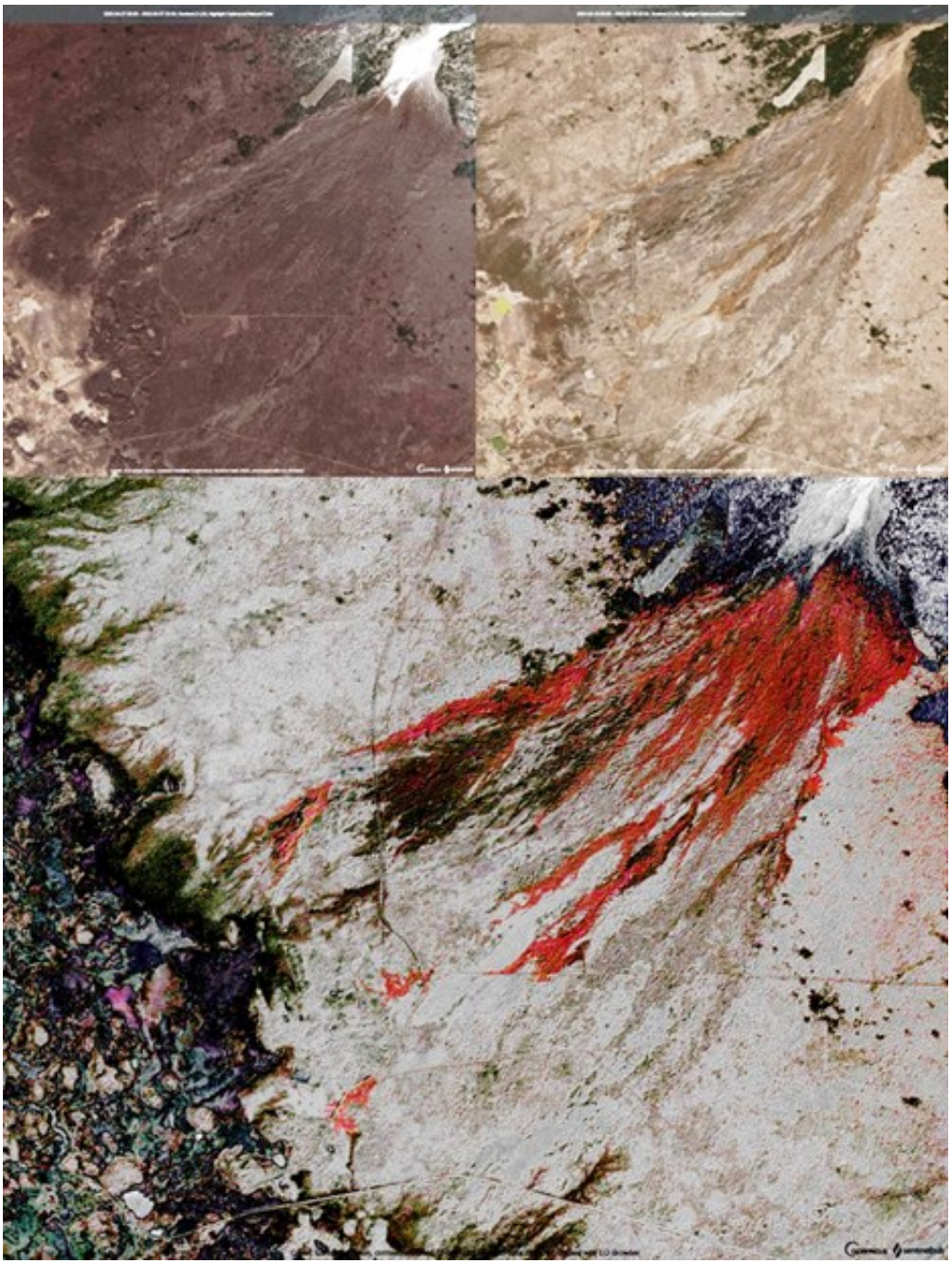


Рис. 1. Спутниковые снимки Sentinel L2A от 27 апреля (а) и 19 мая 2023 г. (б) и их разностный снимок (в), на котором красным цветом выделена видимая область покрытия территории селевыми массами. Даты снимков выбраны исходя из отсутствия облачности, движение селевых масс продолжалось после 19 мая 2023 г.

Точная дата возникновения потока неизвестна, однако согласно сейсмическим данным – 20 мая 2023 г. наиболее вероятная дата пика селевой активности. Согласно спутниковым данным, основное событие началось к 17 мая 2023 г., затем до 22 мая 2023 г. поток продолжал продвигаться в сторону трассы и дороги ИП. В момент наблюдений продолжалось достаточно сильное течение по дороге с дальнейшим поворотом потока на юго-восток к трассе Ключи – Усть-Камчатск (на трассе отложений потока не наблюдалось).

Рис. 2. Отложения селевого потока, наблюдаемые в точке отбора образцов. Фото В.И. Фролова от 15 мая 2023 г.

Точка отбора образцов находилась в 27 км от центра вулкана по прямой. Мощность отложений – до 1 метра и более. В точке наблюдения было зафиксировано большое количество отложений разной дисперсности, от мелкого песка до крупных окатанных включений (рис. 3).

Отобранные разности отложений селевого потока были разделены на две принципиально отличающиеся группы: рыхлый дисперсный заполнитель и крупнообломочные валунно-галечные включения.

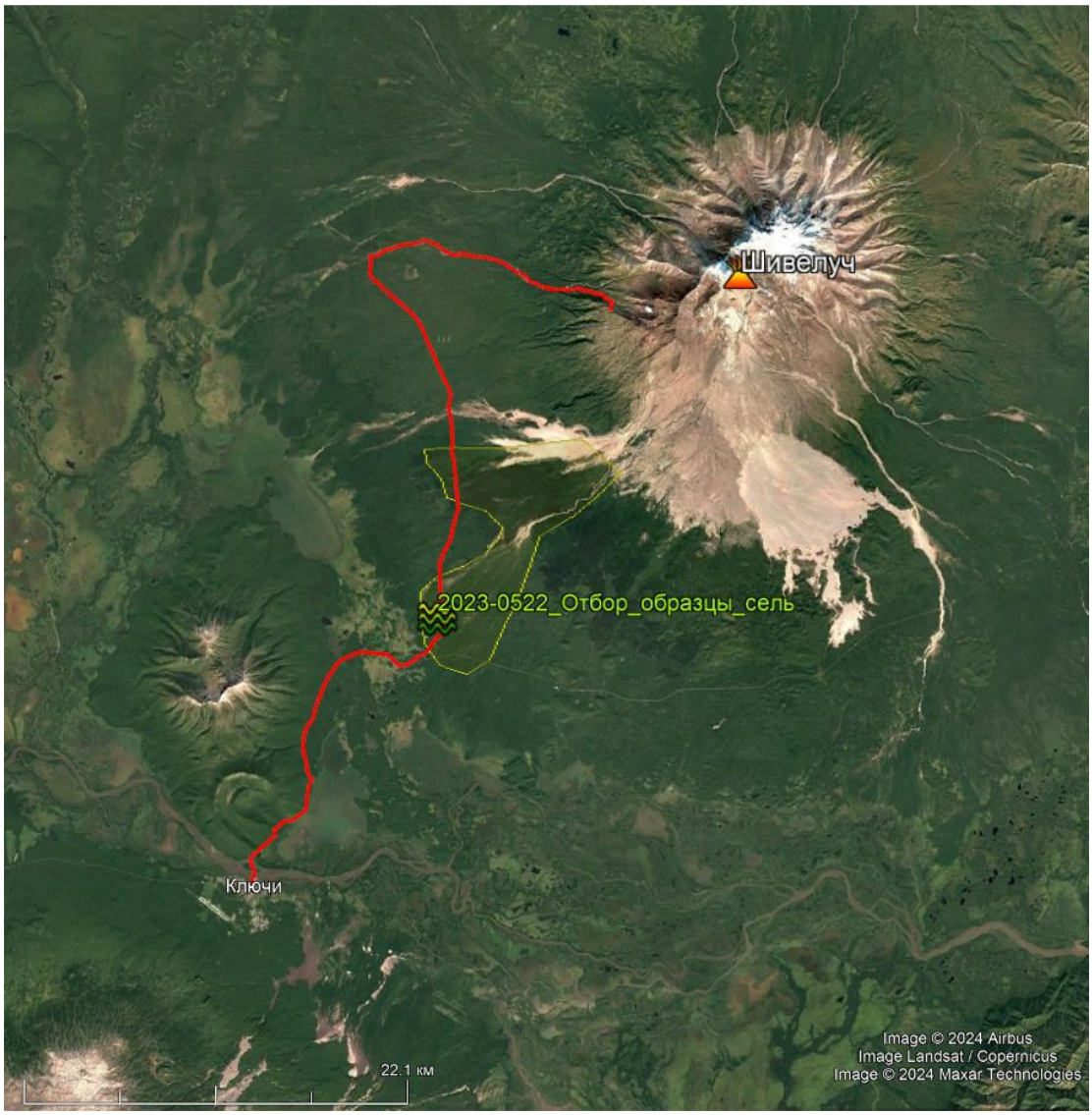


Рис. 3. Территория исследования. Желтая линия показывает предположительную границу отложений селевого потока, выделенную по спутниковым данным. Красной линией отмечено положение дороги (по материалам В.И. Фролова)

Дисперсный заполнитель представлен пылеватой супесью тёмно-серого цвета с включениями окатанных обломков эффузивных пород (предположительно андезитового-андезибазальтового состава) размером от 1 до 3,5 мм (рис. 4). Песчаные и пылеватые частицы имеют схожий минеральный состав: наблюдаются неокатанные кристаллы роговой обманки и слабо окатанные зерна плагиоклазов. Грунт находился в нарушенном сложении без сохранения естественной влажности, однако стоит отметить, что в пробе встречались достаточно крупные (до 10–12 мм) спрессованные агрегаты, крошащиеся в руках. По всей видимости, они образовались в результате сдавливания и потери влаги в процессе транспортировки.

Рис. 4. Дисперсная часть отложений селевого потока

Крупнообломочные валунно-галечные включения представлены округлыми хорошо окатанными обломками андезитов (рис. 5). Преобладают обломки размером от 2 до 7 см. Они имеют схожий внешний вид: цвет от светло-серого до серого, обладают небольшой плотностью и высокой пористостью. Структура пород порфировая. Вкрапленники плагиоклазов имеют призматическую форму, размер от 0,5 до 2 мм и визуально занимают около 15%. Темноцветные минералы представлены кристаллами удлиненной формы (до 3 мм) и визуально занимают около 10%.

Результаты исследований

Исследование минерального состава с помощью рентгеноструктурного анализа (аналитик – с.н.с. В.В. Крупская)

Крупнообломочные включения можно разделить на две группы: с преобладанием в составе плагиоклазов и преобладанием аморфного вещества (таблица 1). Амфиболов во всех четырёх образцах содержится примерно одинаковое количество (12–13%). Также во всех образцах в незначительных количествах содержится микроклин.

Минеральный состав дисперсной части в целом аналогичен составу крупнообломочных разностей, однако отличается большим количеством плагиоклазов (76%) и меньшим содержанием рентгеноаморфного вещества. Особо следует отметить, что в составе дисперсного заполнителя не было обнаружено глинистых минералов.

Таблица 1. Минеральный состав селевых отложений юго-западного склона влк. Шивелуч (аналитик – с.н.с. В.В. Крупская)

Образцы		Плагиоклазы (альбит)	КПШ (микроклин)	Амфиболы	Рентгеноаморфное вещество
Крупно-обломочные включения	Первая группа	70	3	9	18
		69	2	10	19
	Вторая группа	29	2	10	59
		34	5	11	50
Дисперсный заполнитель		76	6	5	13

Изучение образцов в шлифах позволило разделить крупнообломочные включения на две группы. Для первой группы (рис. 6) характерна порфировая структура и беспорядочное расположение вкрапленников. Присутствуют вкрапленники роговой обманки, идентифицированные по изометричной форме кристаллов, часто ромбической; по углу погасания 10–15°; при наличии двух направлений спайности угол составляет около 115°.

Рис. 5. Крупнообломочное валунно-галечное включение и выбуренные из него цилиндрические образцы

Светлые минералы представлены плагиоклазами с характерным двойникованием. Присутствуют как крупные вкрапленники размером до 3 мм, так и мелкие, вплоть до микролитов. Кроме того, в обоих образцах присутствует мелкие зерна рудных минералов, а также одиночные кристаллы оливина. Основная масса гиалопилитовая, представлена вулканическим стеклом с микролитами плагиоклазов.

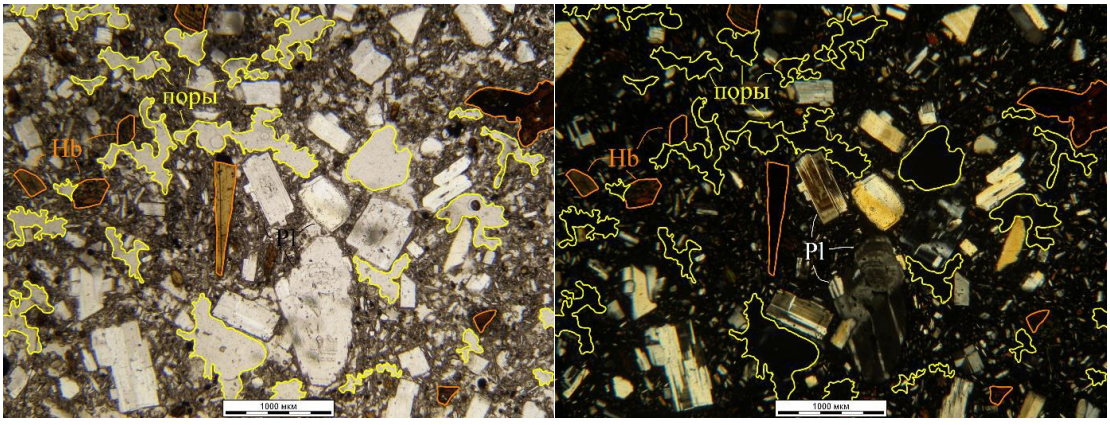


Рис. 6. Общий вид крупнообломочных включений первой группы в шлифе: при одном николе (слева) и в скрещенных николях (справа). Обозначения некоторых элементов: поры (жёлтым), роговая обманка Hb (оранжевым), плагиоклазы Pl (чёрным/ белым), оливин Ol (зелёным)

У образцов второй группы (рис. 7) аналогичная порфировая структура, текстура более беспорядочная. Содержание темноцветных минералов составляет 15–20%. В большем количестве, по сравнению с образцами первой группы, содержится вкрапленников рудных минералов. Основное отличие заключается в основной массе: у образцов данной группы она представлена пузыристым вулканическим стеклом, с явно прослеживающейся флюидальной текстурой.

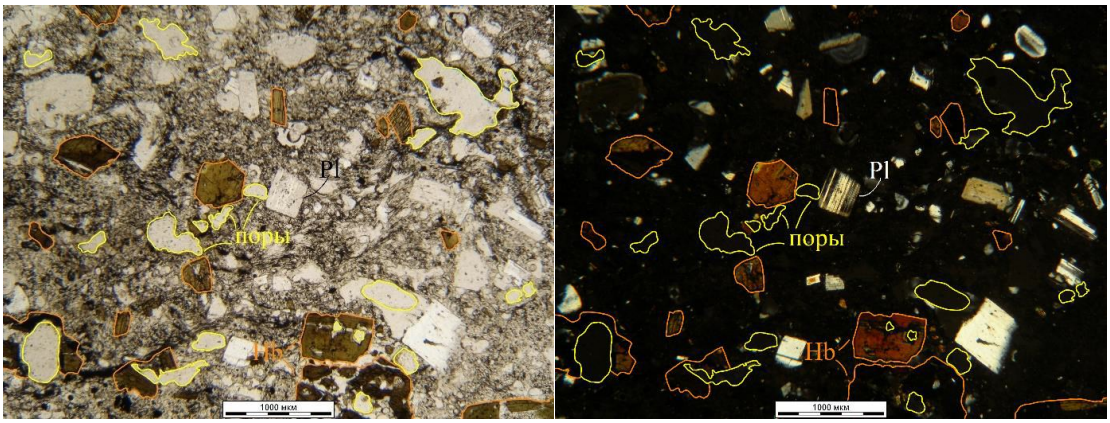


Рис. 7. Общий вид крупнообломочных включений второй группы в шлифе: в обычном свете (слева) и в скрещенных николях (справа). Обозначения некоторых элементов: поры (жёлтым), роговая обманка Hb (оранжевым), плагиоклазы Pl (чёрным/ белым), оливин Ol (зелёным)

Результаты исследования крупнообломочных включений с помощью рентгеновской компьютерной томографии (аналитик – инж. А.Б. Ермолинский)

Исследованы андезиты крупных обломков. Исследование проводилось на образцах двух размеров (рис. 8): диаметром 5 мм (для съёмки с разрешением 8 μ) и 15 мм (для съёмки с разрешением 30 μ). С увеличением детальности съёмки возрастает способность дифференцировать участки с разной плотностью более детально, но теряется представительность образца в связи с масштабным эффектом. Наименее плотные участки, окрашенные на модели в синий цвет, являются порами. Следует отметить, что на КТ видны только относительно крупные поры, мелкие же невозможно отличить от основной массы. Участки средней плотности, окрашенные на модели в серый цвет, соответствуют вкрапленникам плагиоклазов. Но стоит отметить, что видны лишь самые крупные вкрапленники, в то время как микролиты основной массы не идентифицируются. Участки средней и повышенной плотности были идентифицированы как плагиоклазы и роговая обманка на основе разности плотностей и конфигурации кристаллов. Самые плотные мелкие включения, окрашенные на модели в красный цвет, это рудные минералы, их содержание составляет 0,5–0,6% для всех образцов.

Микроагрегатный и гранулометрический составы дисперсного заполнителя

Анализ микроагрегатного и гранулометрического составов дисперсного заполнителя показал (рис. 9) преобладание частиц мелко- и тонкозернистой песчаной и крупнопылеватой фракций. По Н.А. Качинскому грунт был классифицирован как супесь (физическая глина — 12%; физический песок — 88%). Коэффициент неоднородности по данным гранулометрического анализа пипеточным методом составляет V = 10, ареометрическим — V = 17. По ГОСТ 25100-2020 такие грунты относят к неоднородным. Минеральная плотность дисперсного образца составляет 2,70 г/см^3.

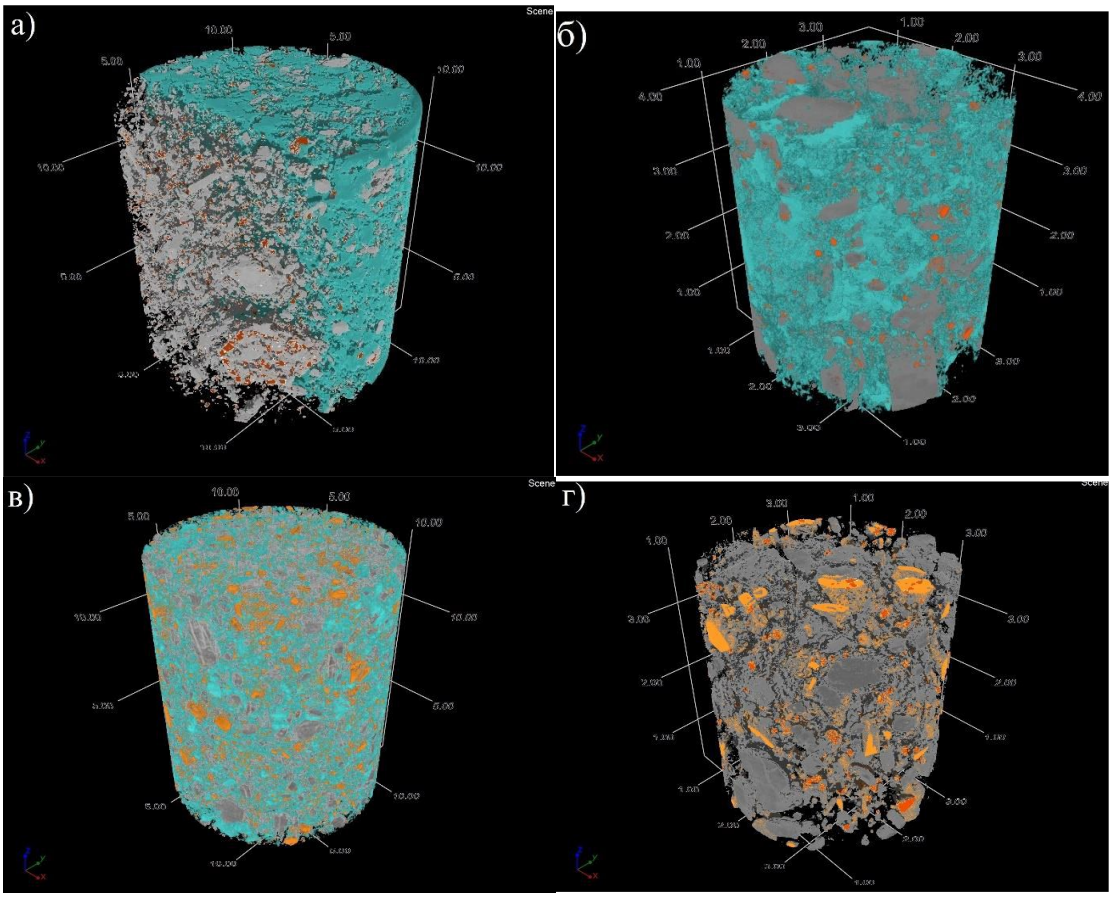


Рис. 8. 3D модель по данным КТ четырех крупнообломочных разностей. Обозначения: поровое пространство – синим, плагиоклазы – серым, роговая обманка – оранжевым, рудные минералы – красным

Физические и физико-механические свойства селевых отложений

Плотность крупнообломочных включений варьирует в широких пределах – от 0,79 до 1,78 г/см^3, что соответствует грунтам средней и низкой плотности (по ГОСТ 25100–2020). Минеральная плотность изменяется от 2,65 до 2,72 г/см^3, что соответствует плотности породообразующих минералов: преобладают плагиоклазы с плотностью 2,55-2,65 г/см^3. При этом, роговая обманка с плотностью 3,0–3,4 г/см^3 повышает общую плотность твёрдых частиц образца, а рентгеноаморфное вещество (по-видимому, вулканическое стекло), напротив, снижает. Пористость крупнообломочных разностей варьирует от 33–36% до 69–71%, что характеризует их как сильнопористые (n > 30%) (в соответствии с ГОСТ 25100–2020). Открытая пористость существенно ниже – колеблется в пределах 20–37%. Стоит отметить, что в трёх разностях в общую пористость больший вклад вносит открытая пористость, а в одном образце сообщающиеся поры составляют примерно 1/3 от общего объёма пор. Это связано с особенностями микростроения, которые хорошо видны в шлифе: большое количество микропор в общей массе вулканического стекла. Водопоглощение для различных разностей сильно отличается: от 11–12% до 45–47%, что связано с различным соотношением открытых (сообщающихся) и закрытых пор.

Оценка прочности на одноосное сжатие позволила отнести три крупнообломочных разности к полускальным грунтам низкой прочности (1,5–2,6 МПа), а один – к скальным малопрочным грунтам (7,5 МПа). Характер разрушения при проведении испытаний на одноосное сжатие образцов первой группы отличается от характера разрушения образцов второй группы. Первые разрушаются в основном по наклонной плоскости, наблюдаются неразвитые трещины по конусу. Вторые –

разрушаются по сложным наклонным плоскостям, образуется огромное количество микротрещин сложной ориентировки, образец крошится, что в большей степени соответствует хрупко-пластичному разрушению.

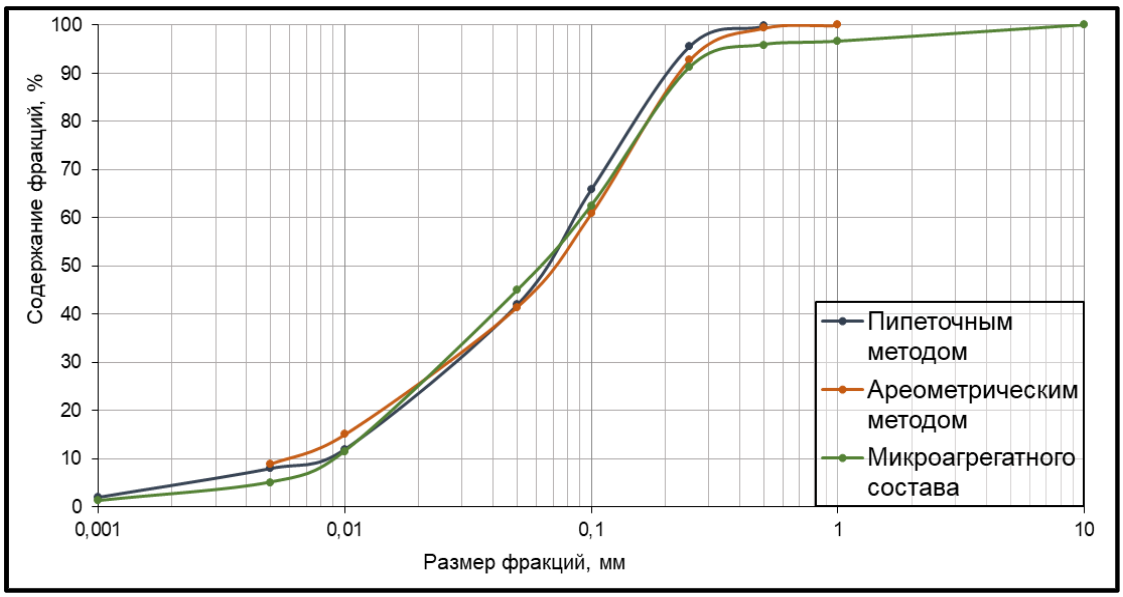


Рис. 9. Интегральные кривые гранулометрического состава дисперсного матрикса селевых отложений

Заключение

Изучение инженерно-геологических характеристик отложений селевых потоков проводилось на основе пробы, отобранной на юго-западном склоне влк. Шивелуч на Камчатке, которая включала дисперсный заполнитель и четыре образца крупнообломочных включений галечно-валунной размерности.

В минеральном составе дисперсного матрикса преобладают плагиоклазы (76%) и рентгеноаморфное вещество (13%), остальная часть представлена роговой обманкой (5%) и КПШ (6%). Особо следует отметить отсутствие глинистых минералов. По гранулометрическому составу дисперсный матрикс относится к супеси, в которой преобладают частицы мелко- и тонкозернистой песчаной и крупнопылеватой фракций. Минеральная плотность дисперсных отложений составляет 2,70 г/см^3, что соответствует андезитовому составу.

Главным породообразующим минералом крупнообломочных включений является плагиоклаз (29–70%), причем чем выше его содержание в породе, тем меньше в ней содержится рентгеноаморфного вещества (по-видимому, вулканического стекла), хотя его содержание высокое (18–59%). Помимо плагиоклаза в породе присутствуют роговая обманка (8–11%) и КПШ (1–5%). По минеральному составу крупнообломочные включения можно отнести к андезитам, что подтверждается их минеральной плотностью (2,65–2,72 г/см^3).

По данным КТ удалось наглядно представить микростроение образцов и выявить зоны с повышенной пористостью. Согласно инженерно-геологическим классификациям исследуемые включения относятся к грунтам средней и низкой плотности (плотность 0,79–1,78 г/см^3), высокой пористости (35–70%). По прочности на одноосное сжатие грунты относятся к полускальным грунтам низкой прочности (1,5–2,6 МПа) и скальным малопрочным грунтам (7,5 МПа).

Поскольку исследованные отложения одного селевого потока, отобранные в одной точке, имеют широкий разброс инженерно-геологических характеристик, можно говорить о большом разнообразии вовлечённого в селевой процесс дисперсного и крупнообломочного материала. По-видимому, основным источником материала

являются отложения пирокластических потоков. Для уточнения условий образования и механизма движения селевых потоков, решения прогнозных задач с целью рекомендации противоселевых мероприятий, требуются дополнительные исследования как селевых отложений в других локациях, так и селеобразующих отложений пирокластических потоков.

Список литературы

Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др. Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 283–291.

Горбач Н.В., Портнягин М.В. Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч (Камчатка) // Петрология. 2011. – Т. 19, № 2. – С. 140–172.

ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2020. – 41 с.

Маневич Т.М. Ледники вулкана Шивелуч // Материалы XXVII конференции, посвященной Дню вулканолога. – Петропавловск-Камчатский, 2024. – С. 303–305.

Сейнова И.Б., Черноморец С.С., Тутубалина О.В., Баринов А.Ю., Соколов И.А. Условия формирования селевых потоков в районах активного вулканизма (на примере вулканов Ключевской и Шивелуч, Камчатка). Часть 2 // Криосфера Земли. – 2010. – Т. XIV, № 3. – С. 29–36.

Сляднев Б.И., Литвинов А.Ф. Объяснительная записка к государственной геологической карте масштаба 1:200000. Серия Восточно-Камчатская, лист N-57-XXXVI. – М.: Мингео СССР, 1989. – 86 с.

Катастрофическое наводнение на реке Дебед в мае 2024 г. (Армения)

В.Р. Бойнагрян, А.С. Пилоян

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения, vboynagryan@ysu.am

Аннотация. Выявлены природные и антропогенные предпосылки возникновения наводнений и селей в бассейне реки Дебед, где 25–26 мая 2024 г. в результате выпадения обильных осадков (60% месячной нормы) произошло сильное наводнение со значительными разрушениями и даже с человеческими жертвами. Этими предпосылками являются наличие обнаженных и крутых склонов, большое количество оврагов, легко размываемых грунтов, ливневый характер осадков, нередко сопровождающихся крупным градом. Из антропогенных предпосылок наиболее существенными являются захламленность русел селеактивных рек и подмостовых пространств строительным и бытовым мусором, уменьшающих живое сечение русла. Использовано спутниковое изображение высокого разрешения PlanetScope, полученное 29 мая 2024 г. На его основе рассчитан нормализованный водный индекс (NDWI) для выделения водных масс и визуализации затопленных территорий. Метод NDWI позволил эффективно отличить области, покрытые водой, от суши даже при минимальной облачности. Полученные данные демонстрируют потенциал оперативных спутниковых снимков высокого разрешения для картирования последствий стихийных бедствий. Для предотвращения разрушения дорог предлагается укрепление капитальными бетонными стенками вогнутых участков берега на излучинах русла или наброской крупных бетонных блоков.

Ключевые слова: *космические снимки, наводнение, обильные осадки*

Ссылка для цитирования: Бойнагрян В.Р., Пилоян А.С. Катастрофическое наводнение на реке Дебед в мае 2024 г. (Армения). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 61–76.

Catastrophic flooding on the Debed river in May 2024 (Armenia)

V.R. Boynagryan, A.S. Piloyan

Yerevan State University, Yerevan, Armenia, vboynagryan@ysu.am

Abstract. The study identifies the natural and anthropogenic preconditions for the occurrence of floods and debris flows in the Debed River basin, where heavy rainfall (amounting to 60% of the monthly norm) on May 25–26, 2024, triggered a severe flood that caused significant destruction and human casualties. The natural factors include steep and exposed slopes, a high density of gullies, easily erodible soils, and intense precipitation often accompanied by large hail. Among anthropogenic factors, the most critical are the accumulation of construction and household waste in riverbeds and under bridges, which reduces the effective flow cross-section. A high-resolution PlanetScope satellite image acquired on May 29, 2024, was used to calculate the Normalized Difference Water Index (NDWI) for detecting surface water and visualizing flooded areas. The NDWI method effectively distinguished water-covered zones from land, even under minimal cloud cover. The results demonstrate the potential of high-resolution satellite imagery for rapid mapping of natural disaster impacts. To mitigate future road damage, the study recommends reinforcing the concave outer riverbanks at meanders using concrete retaining walls or by placing large concrete blocks.

Key words: *satellite images, flooding, heavy rainfall*

Cite this article: Boynagryan V.R., Piloyan A.S. Catastrophic flooding on the Debed river in May 2024 (Armenia). In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 61–76.

Введение

Наводнения и сели причиняют огромный ущерб населенным пунктам и транспортной инфраструктуре в местах своего действия, оказывают разрушающее воздействие на окружающую среду и относятся к одному из самых опасных природных процессов. В последние несколько лет повсеместно в мире наблюдаются значительные изменения климата, что проявляется в увеличении количества и частоты катастрофических наводнений и селей, связанных с выпадением нескольких месячных норм осадков за короткий промежуток времени и, соответственно, с резким подъемом уровня воды в реках [*Boynagryan et al., 2011; Coldewey et al., 2011; Douglas, 2011; Gaprindashvili et al., 2016; Kussul et al., 2010; Neumann et al., 2018*].

Сильные наводнения произошли: в Таиланде и КНДР (2016 г.); Нигерии, Индии, Японии, Кении (2018 г.); Индии, Индонезии (2019 г.); Китае, Индии, Бразилии, Германии (2020–2021 гг.) [*Бойнагрян, 2021; РИА Новости, 2021*]. Обильным на наводнения был и 2024 г.: Оман, ОАЭ, Иран, Йемен (в этих странах за один день выпало почти годовое количество осадков); Кения и Танзания, Центральная Европа, Испания; Афганистан и Пакистан (здесь сильные осадки выпали после необычно засушливой зимы, поэтому потоки воды не могли просочиться вглубь через высохшие поверхностные грунты и почти полностью влились в реки) [*Давыдова, 2024*].

Разрушительные селевые потоки причинили огромный ущерб в Колумбии (2017 г.), Кыргызстане (2016 г.), Таджикистане (2015 г.), Китае (2010 г.), Филиппинах (2006 г.), Афганистане (2013 г.) и др. [*Бойнагрян et al., 2014; Гращенков, 2017*]. В 2024 г. сели причинили значительный ущерб городскому хозяйству Сочи и другим населенным пунктам Краснодарского края, Сахалину, Кабардино-Балкарии, Приморью, Камчатке, Дагестану, Кыргызстану. В последнем за один этот год было более 300 случаев формирования селевых потоков, что составило их самое большое количество за последние 30 лет [*Все новости с тегом, 2024*].

Проблема селей и наводнений весьма актуальна и в Армении, что обусловлено не только горным характером рельефа республики, ливневыми дождями (нередко с градом), активным физическим выветриванием горных пород и накоплением на склонах неустойчивого рыхлого материала в качестве источника твердой составляющей для селей, но и изменением климата, как и повсюду в мире: нарушены летние и зимние температуры воздуха, сроки наступления очередных сезонов года, возросла интенсивность осадков (особенно в последние 5 лет) и частота экстремальных гидрометеорологических явлений и др. [*IPCC, 2021*].

В разные годы в Армении случались сели на рр. Гетар, Вохчи, Агстев, Дебед и др. (рис. 1–3), а также наводнения на рр. Раздан, Веди, Мецамор и др. (рис. 4).

В мае 2024 г. северные регионы Армении – Лори и Тавуш – подверглись мощному наводнению, вызванному проливными дождями, что привело к выходу из берегов рек Дебед, Агстев и Ташир. Согласно отчёту, Пост-катастрофической оценки потребностей (PDNA), подготовленному при участии Правительства Армении, ЕС и ООН, это стихийное бедствие стало крупнейшим за последние десятилетия [*PDNA, 2024*].

Наводнение затронуло девять укрупнённых общин, в том числе Алаверди, Ташир, Ноемберян, Иджеван, Степанаван и Дилижан. Были зафиксированы человеческие жертвы, эвакуации, массовые разрушения мостов, дорог, жилых и сельскохозяйственных объектов. Общий ущерб оценён в 82,43 млн долл. США, при этом более 32 млн пришлись на общину Алаверди [*PDNA, 2024*].

Одним из ключевых инструментов для оценки последствий стихийных бедствий и планирования восстановления является дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ). Использование спутниковых данных позволяет оперативно и объективно оценить

масштаб затопления, повреждённые территории и изменения в окружающей среде [*Refice et al., 2018*]. Целью данной работы является применение спутникового изображения PlanetScope, полученного 29 мая 2024 г., для анализа последствий наводнения на пострадавших территориях. Методология основана на расчёте нормализованного водного индекса (NDWI), визуальной интерпретации, а также сопоставлении данных.

Рис. 1. Сель на р. Гетар в пределах Еревана, 25 мая 1946 г. Фото из газеты «Голос Армении»

Рис. 2. Селевые выносы р. Бабаджан (юго-западный склон Севанского хребта).
Фото Л. Зограбяна

Рис. 3. Последствия грязекаменного селя, сформировавшегося после сильного ливня (за 50 мин выпало 53 мм осадков). Иджеван, 2 июня 1998 г. Фото В. Бойнагряна

Рис. 4. Последствия наводнения на р. Раздан в окрестностях Бжни весной 2004 г.
Фото В. Бойнагряна

Район исследования – бассейн р. Дебед, расположенный на севере Армении. Его границами являются: на западе – Джавахетский массив, на востоке – хребет Гугарац, на севере – хребет Вираайоц, на юге – Памбакский хребет. На СЗ бассейна расположена

Лорийская равнина (плато), дренируемая притоками р. Ташир. На ЮЗ Базумский хребет служит водоразделом рр. Памбак (верховье р. Дебед) и Дзорагет (рис. 5).

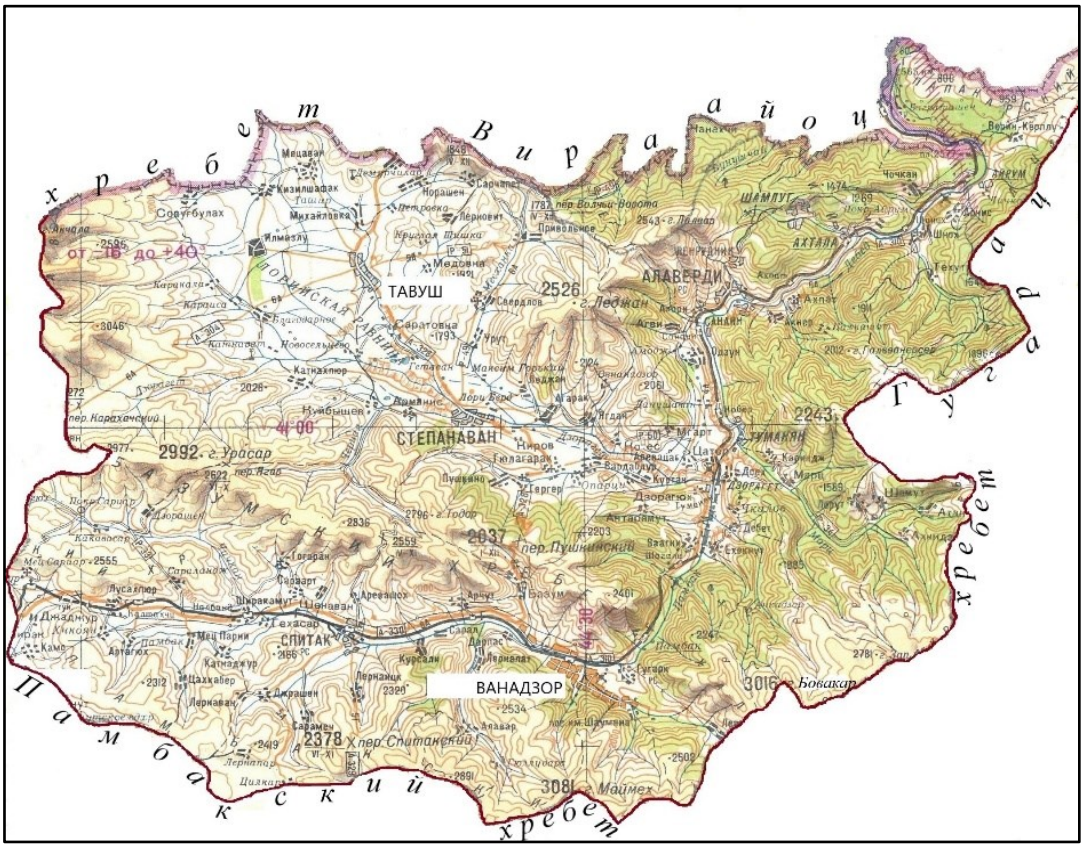


Рис. 5. Карта бассейна р. Дебед, масштаб 1:500 000 (уменьшено)

Рельеф бассейна горный, труднодоступный. Абсолютные высоты колеблются от 400–450 м у Айрума до 3081 м (г. Маймех). Относительные превышения вершин хребтов над седловинами составляют 50–500 м, над долинами – до 1300 м. Наибольшую высоту (более 2500 м) имеют Базумский и Памбакский хребты. Гребни хребтов узкие и скалистые. Склоны расчленены глубокими ущельями, нередки скалистые обрывы высотой 50–500 м. В привершинной части склонов много оврагов разной глубины и длины. Долины рек узкие (50–300 м). Межгорные котловины расположены на абсолютных высотах 1100–1800 м. Крупнейшая из них – Лорийская равнина с почти плоской поверхностью в центре.

Склоны залесены в основном на правобережье р. Дебед на участке от Мегрута до границы с Грузией, а также на левобережье р. Тандзут (правый приток р. Памбак) и в районе гор. Ванадзор. На левобережье склоны залесены лишь на участке сс. Шамлуг-Ахтала, выше сс. Акори, Агви, Ваагни и у гор. Степанаван. На остальной части бассейна склоны обнажены, поэтому здесь горные породы интенсивно выветриваются и становятся источником твердой составляющей для селей.

В пределах бассейна распространены породы верхнего плиоцена (N_2^2): долеритовые и оливиновые базальты, озерные и озерно-аллювиальные пески; среднего эоцена (Pg_2^2): вулканогенно-терригенный флиш (туфопесчаники, туфобрекчии, известняки, глины, потоки андезитов); верхнего эоцена (Pg_2^3): вулканические и вулканогенно-осадочные отложения (андезиты, андезито-базальты, трахиандезиты, их туфобрекчии, лавобрекчии, туфоконгломераты и др.); нижнего мела (K_1): морские осадочные породы (известняки, мергели, песчаники, туфопесчаники, алевролиты); нижней-средней юры (J_1–J_2b): морские осадочные отложения, вулканогенно-осадочные породы, андезиты, диабазы, андезито-дацитовые туфы; крупная интрузия

лейкократовых гранитов верхней юры-нижнего мела (J_3–K_1) у Техута (бассейн р. Шнох) [*Харазян, 2005*].

Климат умеренно-влажный, весна и осень дождливые, летом дожди выпадают в виде ливней (нередко с градом), снежный покров достигает 20–30 см, а в горах – 3–6 м.

Среднегодовое количество осадков за последние 45–50 лет составляет: в Ахтале – 412 мм, Алаверди – 488 мм, Одзуне – 590 мм [*Климатический справочник…, 2013*]. За период с 1963 по 2020 г. годовое количество осадков в целом по бассейну р. Дебед оценивается в 471–767 мм [*Маргарян, 2022*].

Питание рек смешанное – талые и дождевые воды, а также воды родников, выходящие из-под лав. Половодья отмечаются весной и осенью, но имеют непостоянный характер. Основной подъём уровня воды отмечается весной. Весенний расход превышает зимний более чем в 100 раз и вызывает катастрофические разрушения. Река Дебед является крупнейшей водной артерией области Лори (рис. 6).

Рис. 6. Река Дебед в пределах города Алаверди. Фото В. Бойнагряна

Она берет свое начало у Джаджурского перевала (если считать её началом исток р. Памбак), из родника на восточном склоне седловины. Длина реки в пределах Армении составляет 152 км (общая длина – 178 км), площадь водосборного бассейна в РА – 3790 км^2 (общая – 4080 км^2). Дебед считается самой многоводной горной рекой Армении и самой крупной горной рекой в бассейне р. Кура. Ширина русла составляет 20–25 м (местами – 10 м), глубина – 0,5–1,0 м, скорость течения – 0,7–1,0 м/сек. Местами в русле встречаются небольшие островки, сложенные галечником.

По морфологии и простиранию долина р. Дебед подразделяется на несколько участков [*Бойнагрян, 2009*].

Верхний участок реки (от истока до Гугарка) широтного простирания совпадает с западной частью протяженного Памбак-Севанского разлома и характеризуется широкой долиной с серией надпойменных террас. Расширения здесь чередуются с сужениями долины, которая приобретает вид узкого ущелья.

От Гугарка до с. Акори р. Дебед приобретает меридиональное простирание и характеризуется в целом узкой долиной, которая между с. Ваагни и гор. Алаверди по своей морфологии представляет собой каньон глубиной 250–350 м, врезанный в лавы и подстилающие их порфириты (а у устья р. Дзорагет – также в озерно-речные отложения).

На отрезке от гор. Алаверди до границы с Грузией долина реки постепенно расширяется. Склоны долины здесь крутые и скалистые, на них часты осыпи. Местами встречаются лавовые террасы, высота которых уменьшается от 300 м у Алаверди до 50 м и ниже севернее Айрума. Местами появляется пойма шириной до 50–100 м, на склонах долины прослеживаются террасы небольшой ширины. Их высота вниз по течению уменьшается от 10–15 м до 4–8 м.

Основными притоками р. Дебед (от истока р. Памбак) являются:

- правые: Цахкару, Ворднав, Спитак, Лернаджур, Тандзут, Чанахчи, Марц, Шнох;
- левые: Чичкан, Дзорагет с притоками Чёрная, Гергер, Каракала, Ташир, Месханка.

Методы исследований

Использованы результаты полевых и камеральных работ (анализ спутникового изображения высокого разрешения PlanetScope, полученного 29 мая 2024 г., а также речной сети по топографической карте масштаба 1:200 000, сбор данных по селеносности и селеактивности отдельных рек бассейна и др.).

Исходным материалом для анализа послужило спутниковое изображение PlanetScope, полученное 29 мая 2024 г. – через три дня после наводнения. Изображение имеет пространственное разрешение 3 м и включает четыре спектральных канала: синий, зелёный, красный и ближний инфракрасный (NIR). Оно прошло предварительную коррекцию и было предоставлено в составе университетской лицензии.

В качестве основного метода количественного анализа был применён нормализованный водный индекс (NDWI), предложенный McFeeters в 1996 г. [*McFeeters, 1996*] и широко используемый в оперативном картографировании затоплений [*Xu, 2006*]. Формула:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}, \quad (1)$$

где используются значения спектральных каналов: зелёного (Band 2) и ближнего ИК-диапазона (Band 4). Высокие значения NDWI (обычно > 0,1) соответствуют открытому водному зеркалу, тогда как отрицательные значения характерны для суши и плотной растительности.

Для визуализации результатов NDWI был использован многоступенчатый цветовой градиент в среде ArcGIS Pro. Цветовая шкала варьировалась от светло-жёлтого (низкие значения индекса, соответствующие сухим или слабовлажным участкам) до тёмно-синего (высокие значения, характерные для открытых водных поверхностей и затопленных территорий). Такой подход позволил более точно отразить градации влажности и степень насыщения водой на исследуемых участках. Градиентная символика обеспечила чёткое визуальное разделение между сухими, переувлажнёнными и затопленными зонами, особенно в прибрежных и равнинных участках вдоль русел рек. Были созданы маски NDWI > 0,1, соответствующие вероятному наличию воды. Эти маски были наложены на карту административных границ для последующего анализа по общинам.

Результаты и обсуждение

В бассейне р. Дебед, как и по всей Армении, наводнения и сели в основном образуются при ливневых дождях с количеством осадков 30 мм и более. Средняя интенсивность селеобразующих дождей составляет 0,05–0,78 мм/мин., а ливневой части – 0,16–1,46 мм/мин. Лишь в отдельных случаях сели и наводнения могут образоваться при интенсивном снеготаянии (резкое повышение температуры воздуха весной), сопровождаемое дождями, как это было в 2004 г. (тогда за несколько часов температура воздуха повысилась на 12°С). Результат такой аномалии – сильное наводнение на р. Раздан с поднятием уровня реки на 1,5 м (см. также рис. 4), в Ереване в пределах ущелья реки были затоплены первые этажи почти всех ресторанов.

Максимальное суточное количество осадков в Армении обычно составляет более 40–75 мм, но свыше 100 мм отмечается редко. В бассейне р. Дебед суточный максимум осадков (108 мм) был зафиксирован 14.06.1944 г. в бассейне р. Дзорагет [*Каталог*

селеопасных рек…, 1969]. После этого суточный максимум составлял: Ахтала – 72 мм (15.08.1970), Алаверди – 61 мм (15.08.1970), Одзун – 48 мм (24.06.1974) [*Климатический справочник…, 2013*].

В Армении сильные ливни выпадают чаще всего на небольшой территории, поэтому сели и наводнения больше формируются на притоках основных рек. Притоки имеют большое падение русла, небольшую водосборную площадь и могут быть одновременно охвачены интенсивными дождями.

В бассейне р. Дебед максимальная повторяемость ливней характерна для восточных склонов Джавахетского вулканического массива, дренируемого многочисленными правыми притоками р. Ташир (левый приток р. Дзорагет), а также для южных склонов хребта Вираайоц. Согласно данным МЧС Армении, за период с 1994 по 2011 гг. сели здесь сформировались 35 раз (наибольшее количество селей по сравнению с другими областями республики), при этом их максимум (13 раз) приходится на 2009 г.

Опасность затоплений населенных пунктов в бассейне р. Дебед при селях и наводнениях грозит селам Джрашен, Лернаван, Цахкабер, Лернанцк, Карадзор, Гергер, Привольное. Такая ситуация связана с тем, что территория бассейна характеризуется значительной эродированностью. Здесь большой процент обнаженных крутых склонов южной экспозиции, слабая водопроницаемость горных пород, слабая их устойчивость против выветривания, значительная крутизна склонов, максимальное количество селевых русел (278) по сравнению с другими областями Армении. Степень сильной и средней эродированности составляет 246 и 497 км^2 соответственно [*МЧС Армении*]. Эрозионные явления в бассейне усилились в последние 20–25 лет вследствие нерационального использования земель, вырубки лесов, перевыпаса скота.

Частота формирования селей в бассейне р. Дебед была наибольшей на его левобережье ещё в XX в. (таблица 1), и эта тенденция сохранилась и в наши дни. Здесь селевая активность относится к первой категории (повторяемость селей – 1–3 года), а селеносность составляет 15–35 м^3/км^2 за один сель [*Национальный атлас Армении, 2007*].

Таблица 1. Ряд параметров селеакивных притоков р. Дебед и повторяемость селей

Река	Куда впадает	Длина, км	Площадь бассейна, км^2	Высота истока, м	Высота устья, м	Падение русла, м/км	Количество селей и (период их формирования)
Чичкан	Памбак	26	189	2250	1610	24,6	9 (1940–1964)
Арчут	“	6,5	9	2449	1420	156,9	7 (1929–1958)
Лернаджур	“	23	126	2780	1380	60,9	19 (1930–1964)
Бзовдал	“	17	47,2	2680	1340	78,8	14 (1918–1963)
Месханка	Дзорагет	29	156	2100	1260	28,9	1 (1950)
Леджан	“	11	16,4	2440	1380	96,4	12 (1929–1963)
Лалвар (Алаверди)	Дебед	10	36	2100	700	140,0	6 (1941–1963)
Ерицванк (Ахтала)	“	14	48,4	1500	560	67,1	5 (1954–1963)
Марц	“	29	252	2600	860	60,0	1 (1958)
Шнох	“	13	114	1849	540	100,7	3 (1914–1958)

Составлена по данным [*Каталог селеопасных рек…, 1969*]

Из приведенных в таблице 1 притоков р. Дебед большинство относятся к левобережным, лишь Лернаджур, Марц и Шнох являются правобережными. Высокая селеактивность р. Лернаджур объясняется большой площадью её водосборного бассейна и значительной разветвленностью речной сети, что способствует притоку в неё ливневых осадков из разных притоков. Кроме того, почти весь её бассейн представлен крутыми и обнаженными склонами Памбакского хребта, расчлененными многочисленными

оврагами. Реки Марц и Шнох дренируют почти полностью залесенные склоны западной оконечности Иджеванского хребта и склоны западной экспозиции хребта Гугарац. Сели и наводнения по этим притокам р. Дебед редки и небольшой мощности.

Именно из-за интенсивных осадков (ливень с градом – градины имели величину с лесной орех) с максимумом вечером 25 мая и в ночь на 26 мая 2024 г. (40–55 см, или 40–60% от месячной нормы) в результате проникновения на территорию Армении активного циклона со Средиземного моря в бассейнах рек Дебед и Агстев произошло резкое поднятие уровня воды (более 2м по сравнению с предыдущим днем). Утром 26 мая 2024 г. водоотдача в пункте Дебед – Айрум составила 650 м^3/с (накануне вечером было 119 м^3/с), в Дзорагет – Гаргар – 350 м^3/с (накануне – 73 м^3/с), в Ташир – Саратовка – 75 м^3/с (накануне – 16,6 м^3/с). Такая высокая водоотдача в бассейне р. Дебед отмечалась и 19 мая 1959 г.: Дебед-Айрум – 759 м^3/с, Дзорагет – Гаргар – 395 м^3/с, Ташир-Саратовка – 112 м^3/с. Такое поднятие уровня воды в реке было максимальным за последние 65 лет и вторым за весь период наблюдений.

На утро 26 мая 2024 г. количество осадков на всей территории Армении превысило месячную норму и составило 180–230%. В р. Дебед уровень воды поднялся в целом примерно на 6 м, что привело к затоплению значительной части гор. Алаверди (рис. 7), станции Санаин (рис. 8).

Рис. 7. Последствия наводнения в Алаверди. Фото из сети «Интернет»

В результате наводнения были разрушены 17 (20) мостов, отдельные участки дороги М6 в районе Алаверди (рис. 9), дорога Шнох – Техут, небольшой участок железной дороги Ереван-Тбилиси, затоплены 9 городов и 30 сел, водопровод (поэтому было приостановлено водоснабжение в Алаверди, Ахтале, Айруме, и еще в 11 населенных пунктах), на станции Санаин ряд домов у реки были затоплены до второго этажа, повреждены оптические кабели и станции мобильной связи, с перебоями работали интернет и телефонная связь. На участке автодороги Айрум – Ахтала произошел сход оползня.

Рис. 8. Затопленные участки станции Санаин. Фото из сети «Интернет»

Рис. 9. Разрушенный участок дороги М6. Фото из сети «Интернет»

По космическому снимку было проведено визуальное сравнение с базовой картой Esri Imagery, где видно состояние района станции Санаин до наводнения. На изображении Planet Scope того же района можно отчётливо наблюдать разрушенный мост, тогда как на NDWI-слое чётко выделяется зона скопления воды, соответствующая подтопленному участку. Это наглядно иллюстрирует, как сочетание спектрального анализа и визуальной интерпретации позволяет достоверно фиксировать последствия наводнения (рис. 10).

Для обоснования полученных результатов были проанализированы статистические данные из отчёта PDNA, в котором указано, что именно район Алаверди понёс наибольшие потери — 32,47 млн долл. США. Эти данные были сопоставлены с пространственными результатами NDWI, где наблюдаются крупные зоны затопления

вдоль русла Дебеда, в том числе в районах мостов, железной дороги и жилой застройки [*PDNA, 2024*].

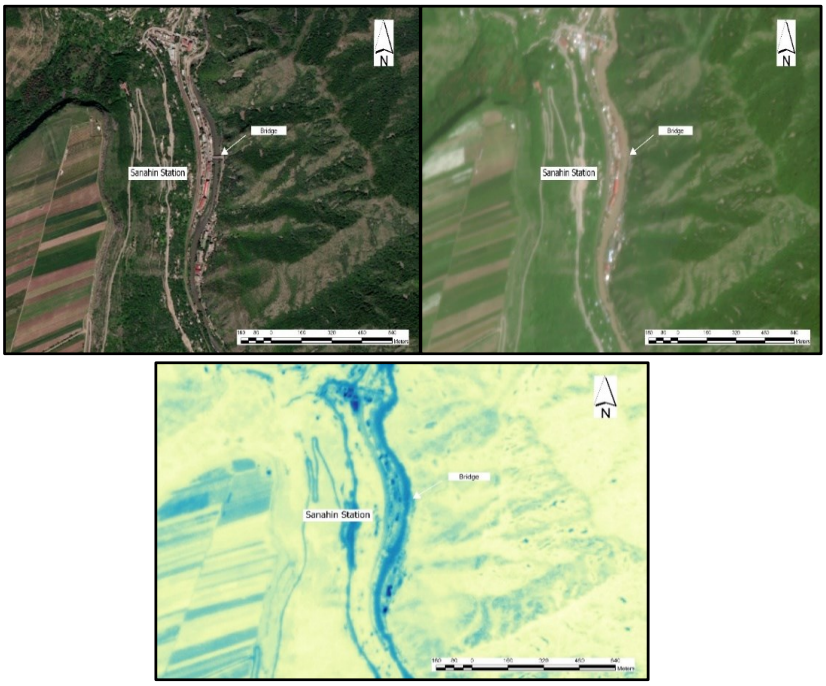


Рис. 10. Анализ наводнения в районе станции Санаин с использованием дистанционного зондирования: а – изображение Esri Imagery до наводнения; б – снимок Planet Scope от 29 мая 2024 г., на котором видны последствия наводнения; в – карта NDWI, рассчитанная на основе того же снимка, визуализирующая водные поверхности и затопленные участки

Результаты NDWI-анализа позволили идентифицировать несколько ключевых зон с высокой вероятностью затопления. Среди них:

- участки вдоль реки Дебед в общинах Алаверди и Туманян, где индекс превышал 0,3;
- зона разрушения мостов в районе станции Санаин и города Ахтала, подтверждённая как на RGB-изображении Planet Scope, так и на NDWI-карте;
- обширные скопления влаги на равнинных территориях в районе Ташира, что согласуется с наблюдаемыми паводками средней интенсивности [*PDNA, 2024*].

NDWI-маска общей площади подтопления (при пороге > 0,1) составляет приблизительно 3000 гектаров. Эти данные сопоставимы с оценками PDNA, где подчёркивается, что наибольший ущерб был нанесён общественной инфраструктуре, сельскому хозяйству и транспорту.

Также в результате анализа было обнаружено резкое изменение спектральных характеристик растительности вдоль русел рек, что указывает на возможное повреждение травяного покрова и деревьев. Это подтверждается разделом отчёта PDNA по окружающей среде, где зафиксированы эрозионные процессы и размыв берегов, определённые с использованием методов ДЗЗ *[PDNA, 2024; SERTIT, 2024*]. Согласно отчёту, с помощью дистанционного зондирования были получены следующие количественные оценки ущерба окружающей среде:

- объём эродированных берегов рек – 422 242 м³,
- количество выкорчеванных деревьев – 2 969 шт.,
- объём древесины – 594 м³,
- площадь отложений почвы, ила, древесины и металлических фрагментов – 133 га, в том числе: ил – 120,9 га, почва – 9,73 га, древесные фрагменты – 2,39 га, металл – 0,05 га.

Данные об изменении морфологии русел, а также о накоплении мусора и наносов, были подтверждены и при визуальной интерпретации Planet Scope-снимка - в ряде мест (например, южнее станции Санаин) видны смещения береговых линий, участки с ярко выраженным размывом, а также зоны плотных иловых скоплений.

В целом можно подчеркнуть, что даже при наличии лишь одного постфактум-изображения индекс NDWI позволяет выявить критически важные последствия наводнения. В идеале для получения более полной и достоверной картины требуется временной ряд снимков до и после события, что открывает возможности для проведения динамического анализа. Кроме того, при наличии данных с ближним и средним инфракрасным диапазоном (SWIR) целесообразно использование дополнительных водных индексов, таких как MNDWI или AWEI, которые обладают повышенной чувствительностью к различным формам поверхностной воды [*Feyisa et al., 2014*].

Наводнения и сели на р. Дебед с катастрофическими последствиями (выход реки из берегов, разрушение строений, железнодорожного полотна, автодорог и др.) случались неоднократно и раннее. Например, такие случаи были в 1941 и 1959 гг. в Алаверди и на станции Айрум. Сель 1959 г. разрушил много зданий в Алаверди и стенку, защищающую шоссейную дорогу от размыва [*Зограбян, 1962*].

В мае 2024 г. наиболее сильно пострадали дороги на вогнутых участках долины р. Дебед [*Бойнагрян, 2024*] (рис. 11), что вполне объяснимо с точки зрения закономерностей, присущих водному потоку, проходящему по извилинам (меандрам) долины. В таком водном потоке струя воды с наибольшей скоростью (стрежень) прижимается к вогнутому берегу и подмывает (размывает) его. На выпуклом берегу, наоборот, происходит накопление галечно-гравийного материала и формируется прирусловая отмель (побочень).

Рис. 11. Один из участков вогнутого берега, размытого водным потоком.
Фото из сети «Интернет»

Во время наводнения, когда уровень реки поднимается, увеличивается масса воды и скорость течения, что приводит к резкому возрастанию энергия потока (или его живой силы). На извилинах долины во время наводнения буйный поток с резко возросшей энергией просто не сможет следовать по извилине, а пойдет по прямой и всей своей массой обрушится на вогнутую часть берега, что и продемонстрировали события 25–26 мая 2024 г. (рис. 12).

Рис. 12. В верхней части снимка слева – затопленный участок при пике наводнения. Фото из сети «Интернет»

Смытый по пути следования бурного потока разнородный материал местами сформировал селевые конусы выноса (рис. 13).

Рис. 13. Один из селевых конусов выноса разнородного материала, сформировавшегося после спада наводнения в долине р. Дебед. Фото из сети «Интернет»

Причиной выхода р. Дебед из берегов может быть и банальная захламленность русла строительными и бытовыми отходами, которые создают временные запруды с последующими прорывами воды в виде высоких волн, затопляющих пространства по ходу движения водяного вала. Такая захламленность русла реки от верховьев вниз по течению неоднократно фиксировалась нами в процессе полевых работ (рис. 14–15).

Захламленность русел приводит к тому, что ливневые воды просто не умещаются в них, они выходят из берегов и затопляют прибрежные пространства.

Рис. 14. Остатки строительных конструкций в русле верховий р. Дебед. Фото В. Бойнагряна

Рис. 15. Обычная ситуация у подмостовых пролетов на притоках р. Дебед. Фото В. Бойнагряна

Выводы

Природные условия бассейна р. Дебед (см. выше) и в дальнейшем могут способствовать формированию селей и наводнений со всеми вытекающими из этого негативными последствиями (затопление населенных пунктов, разрушение дорог, снос мостов и т.п.). Природу области изменить невозможно, необходимо не дать речной воде выйти из берегов и свободно буйствовать в пределах речной долины. Поэтому первоочередной задачей должно быть уяснение того, что при подъёме уровня воды река не будет следовать по извилинам русла, а потечет прямо и обрушит всю силу огромного объёма воды при резко возросшей скорости на вогнутую часть берега. Следовательно, необходимо капитально укреплять вогнутые участки русла мощными бетонными

стенками или наброской крупных бетонных блоков. Необходимо также обратить внимание на состояние русел селеактивных рек – убрать из них весь строительный и бытовой мусор, вырубить разросшиеся кустарники и углубить русла хотя бы на 0,5–1,0 м, чтобы паводковые воды не выходили из берегов.

Хорошим подспорьем в выявлении «проблемных» участков, где могут произойти затопления и разрушения при селях и наводнениях, является анализ космических снимков, позволяющих получить весьма ценную и достаточно объективную информацию о возможных негативных последствиях.

Список литературы

Бойнагрян В.Р. Реки и речные долины Армянского нагорья. – Ереван: Изд-во ЕГУ, 2009. – 154 с.

Бойнагрян В.Р. Сели и транспортные коммуникации в Армении. Изученность распространения и развития опасных экзогенных процессов и явлений, и их воздействия на транспортные коммуникации горных стран. – Ереван: Изд-во «Гитутюн» НАН РА, 2021. – С. 36–41.

Бойнагрян В.Р. Природные предпосылки возникновения наводнений и селей в бассейне реки Дебед (Лорийская область, Армения) // Ученые записки ЕГУ. Геология и география. – 2024. № 58 (3). – С. 190–200.

Бойнагрян В.Р., Бойнагрян А.В., Манукян Н.В. Селевая активность в Армении // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: сборник трудов III Международной конференции. – Южно-Сахалинск, 2014. – С. 10–13.

Гращенков А. Самые разрушительные селевые потоки в мире в 2010–2017 годах // РИА Новости. – 2017. – https://ria.ru/spravka/2017040202.

Давыдова Ю. Ураганы, наводнения и пожары: крупнейшие климатические катаклизмы 2024 года. Устойчивое развитие // Forbes Life. 2024. – https://www.forbes.ru/sustainability/528062-uragany-navodnenia-i-pozary-krupnejsie-klimaticeskie-kataklizmy-2024-goda.

Зограбян Л.Н. Селевые потоки. Геология Армянской ССР. – Ереван: Изд-во АН АрмССР), 1962. – Т. 1. Геоморфология. – 374 с.

Известия. Все новости с тегом. Сель 2024. – https: iz.ru/tag/sel.

Каталог селеопасных рек на территориях Северного Кавказа и Закавказья / под ред. Г.Н. Хмаладзе. – Тбилиси, ГУГМС, 1969. – С. 233–340.

Климатический справочник. II часть. Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров. – Ереван: Изд-во «Лусабац», 2013. – 172 с.

Маргарян В.Г., Ольчев А.В. Пространственная и временная изменчивость температуры воздуха и осадков бассейна реки Дебед // Ученые записки ЕГУ. Геология и география. – 2022. – № 56 (1). – С. 1–13.

Национальный атлас Армении. – Ереван: Центр геодезии и картографии. ПОАК А, 2007. – 232 с. (на армянском)

РИА Новости. Крупные наводнения в мире в 2016–2021 годах. – 2021. – Ria.ru/20210729/navodneniya-1743437514.html.

Харазян Э.Д. Геологическая карта Республики Армения. 1:500 000. – Ереван, 2005.

Boynagryan V.R., Stepanyan V.E. Assessing hazards and risk from hydro-meteorological phenomena in the Republic of Armenia // Stimulus for human and societal dynamics in the prevention of catastrophes. Amsterdam. – IOS Press, 2011. – P. 189–193.

Coldewey W.G., Böcker Ch., Schuppelius J. Community initiative for reducing flood risks – a case study. Stimulus for human and societal dynamics in the prevention of catastrophes. – Amsterdam: IOS Press, 2011. – P. 29–41.

Douglas B., Toma O. Prevention and intervention in the case of catastrophes in the Moldova area of Romania. Stimulus for human and societal dynamics in the prevention of catastrophes. – Amsterdam: IOS Press, 2011. – P. 210–218.

Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. – 2014. Vol. 140. – P. 23–35. – DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.

Gaprindashvili G., Gaprindashvili M., Tsereteli E. Natural disaster in Tbilisi City (Riv. Vere basin) in the year 2015 // Journal of Geosciences. 2016. – Vol. 7. – P. 1074-1087.

iCUBE-Sertit. May 2024 flood event in Armenia // EU Recovery Observatory activation for recovery framework. – 2024. – https://seafile.unistra.fr/d/bd2d1d90d8b944b7b088/

IPCC. Sixth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. – 2021.

Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Zyelyk Y. Flood risk assessment based on geospatial data // New trends in information technologies. ITHEA. Sofia, 2010. – P. 92–101.

McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. – 1996. – Vol. 17, No. 7. – P. 1425–1432. – DOI: 10.1080/01431169608948714.

Neumann P., Bauer M., Haidn M., Keilig K., Menabde Z., Dumbadze D. Geological and geotechnical findings of the catastrophic debris flow near Tskneti, Georgia, June 2015 // Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 5th International Conference / ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili. – Tbilisi: Publishing House "Universal", 2018. – P. 158–165.

PDNA. Post-Disaster Needs Assessment: Armenia Floods, May 2024. – Government of Armenia, UNDP, EU, 2024.

Refice A., D'Addabbo A., Capolongo D. Methods, techniques and sensors for precision flood monitoring through remote sensing // Flood monitoring through remote sensing / ed. by A. Refice, A. D'Addabbo, D. Capolongo. – Springer Remote Sensing/Photogrammetry. – Springer, Cham, 2018. – DOI: 10.1007/978-3-319-63959-8_1.

Xu H. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. – Vol. 27, No. 14. – P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.

Математическое, информационно-вычислительное и экспериментальное моделирование этапов зарождения, схода и управления селевыми процессами на примере северного склона хребта Хамар-Дабан

И.В. Бычков

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия, bychkov@icc.ru

Аннотация. В публикации на основе междисциплинарного комплекса натурного, экспериментального и математического моделирования этапов зарождения и схода селевых потоков будут представлены подходы к методам управления селевыми процессами, направленные на снижение селевой активности, характеризующейся показателями повторяемости, и объема селевых выносов, на примере северного склона хребта Хамар-Дабан.

Ключевые слова: *селевой поток, управление, моделирование*

Ссылка для цитирования: Бычков И.В. Математическое, информационно-вычислительное и экспериментальное моделирование этапов зарождения, схода и управления селевыми процессами на примере северного склона хребта Хамар-Дабан. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 77–81.

Mathematical, information-computational and experimental modelling of the stages of debris flow initiation, descent and management on the example of the northern slope of the Khamar-Daban Ridge

I.V. Bychkov

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia, bychkov@icc.ru

Abstract. The paper will present approaches to methods of debris flow management based on an interdisciplinary complex of in-situ, experimental and mathematical modelling of the stages of debris flow initiation and descent, aimed at reducing debris flow activity, characterized by the indicators of recurrence and volume of debris flow discharge, on the example of the northern slope of the Khamar-Daban ridge.

Key words: *debris flow, control, modeling*

Cite this article: Bychkov I.V. Mathematical, information-computational and experimental modelling of the stages of debris flow initiation, descent and management on the example of the northern slope of the Khamar-Daban Ridge. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 77–81.

Введение

Главной целью представляемого исследования является разработка цифровой платформы комплексного исследования, моделирования, анализа и прогнозирования развития селевых процессов на основе детальных гидрологических, климатических, метеорологических, геологических и геоморфологических исследований, предложение сценариев управления искусственно вызванным селевым потоком в районе промплощадки ОАО «Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат» (БЦБК), методов моделирования и численного исследования зон селеобразования (питания селей водой и твердой составляющей), транзита (движение селевого потока) и разгрузки (массового отложения селевых выносов с определением оценки возможности достижения ими зоны размещения шламохранилищ).

Обзор проблемы

Объем отходов БЦБК оценивается в более чем 6 млн тонн загрязняющих веществ, в том числе около 5 млн тонн шлам-лигнина – желеобразной массы, образующейся в процессе производства целлюлозы. Загрязняющие вещества все активнее просачиваются через деградирующие фильтрационные барьеры. На фоне высокой сейсмичности в Байкальской рифтовой системе наблюдаются оползневые явления, а нестабильная метеорологическая обстановка с активизацией ливневых и паводковых проявлений провоцирует селевые потоки. Существует реальная угроза разрушения карт-накопителей отходов во время селевых потоков с попаданием их содержимого в озеро Байкал, что вызовет катастрофические последствия для экологии Байкала. Сегодня велик риск переполнения карт-накопителей паводковыми и ливневыми водами, что приведет к выносу высокотоксичных загрязняющих веществ в акваторию оз. Байкал, береговая линия которого находится менее чем в 400 метрах от ближайших хранилищ отходов.

Эта задача может быть решена только в рамках междисциплинарного подхода, объединяющего усилия специалистов в области информационных технологий, геологии, гидрологии, геоморфологии, математики, вычислительных технологий и физики. Планируется привлечение к решению этой задачи исследовательских групп Иркутска, Новосибирска и Москвы, а также имеющегося у них методического, алгоритмического и программного заделов, с целью создания научных основ для научного обеспечения и предотвращения экологической катастрофы с потенциально тяжелыми последствиями для озера Байкал.

Научный задел

У коллектива исполнителей имеется большой опыт в области обработки разноформатных данных (в том числе данных дистанционного зондирования Земли) и создания информационно-вычислительных систем в различных отраслях. В рамках гранта Минобрнауки России в Институте динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН разработана цифровая платформа экологического мониторинга Байкальской природной территории, обеспечивающая сбор (5 направлений мониторинга, интервал регистрации 1–5 с, ежедневно более 20 Гбайт разноформатных данных), хранение, обработку больших массивов гетерогенных пространственно-временных данных, а также инструментальные и инфраструктурные сервисы для разработки и выполнения прикладных программ для анализа и прогнозирования экологической обстановки на основе математических моделей, сервисов и методов машинного обучения.

Исследователями Института вычислительного моделирования и математической геофизики СО РАН созданы методы математического моделирования многочастичных систем с различными приложениями, методы суперкомпьютерного моделирования в гидродинамике, методы моделирования фильтрации жидкостей через различные

геологические среды, методы моделирования распространения взрывной волны в грунте, методы прогнозирования метеорологических и гидрологических характеристик, разработаны методы решения обратных задач для определения параметров моделей, создана ГИС-платформа ИТРИС для визуализации геофизических данных и результатов моделирования.

Учёными Лимнологического института СО РАН созданы цифровые модели рельефа подводного склона Байкала в районе ОАО «БЦБК» до 50 м, и в рамках этого проекта планируется дополнить их моделями для глубин 1–50 м. Проведены испытания дрифтерных станций и измерителей течений на глубинах 0, 3 и 10 м. Отработаны технологии измерения пульсаций скоростей течений допплеровскими акустическими профилографами в условиях подледного режима. Разработаны собственные технологии по автоматическому измерению уровня рек с передачей информации в онлайн режиме. Станции установлены на реках Селенга, Иркут, Баргузин, Слюдянка. Имеются ряды данных по составу зообентосных сообществ литорали Байкала как до строительства комбината, так и на современном этапе.

В рамках международного проекта РФФИ (конкурс «Россия – Киргизия») исследователями Института горного дела СО РАН разработаны и численно реализованы термо-гидро-геомеханические модели хвостохранилища и защитной дамбы высокогорного рудника «Кумтор» (Киргизская Республика). Посредством ретроспективного анализа проведена валидация модели; предложен метод локализации участка повреждения защитного покрытия дна хвостохранилища на основе решения обратных задач по данным измерения температуры и давления в наблюдательных скважинах. В рамках упругой модели разработан метод реконструкции напряженно-деформированного состояния породного массива по GPS данным, основанный на решении обратных граничных задач.

В Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН есть необходимое современное оборудование и разработаны методики для исследования начального этапа течения типа сель при разрушении модели дамбы из гранулированного материала. Получены данные о динамике процесса в различных областях течения, включая разрушающуюся дамбу и формирующийся поток. Учёные из Института земной коры СО РАН в течение десятков лет проводят геологические, инженерно-геологические и геофизические работы по исследованию бассейнов селеопасных рек Байкальской рифтовой системы. В результате этих работ закартированы районы формирования селей Прибайкалья и Забайкалья, построена карта селеактивности юга Прибайкалья; изучена история селевых проявлений по историческим данным и данным дендрохронологического анализа; описаны максимальные проявления влияния селевой деятельности на объекты инфраструктуры и социальные объекты; детально исследованы источники формирования и пути транзита селепроявлений последних лет, предложены новые подходы к мониторингу селевой опасности с помощью сейсмических станций; выявлены эффекты селепроявлений и проявлений паводковой активности в поле микросейсмических шумов, позволяющие организовать систему наблюдения и экстренного оповещения.

Участие учёных Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова позволит использовать опыт комплексного исследования селевых процессов, основанного на полевых маршрутных обследованиях, и картографирования селей различных генетических типов во многих географических регионах России и мира: Камчатка, Кавказ, Забайкалье, Центральная и Восточная Азия (Казахстан, Кыргызстан, Узбекистан, Таджикистан, Китай, Афганистан), горы Святого Ильи (Канада), Анды (Перу). Созданная в 1964 г. лаборатория снежных лавин и селей составила карты селевой опасности как в масштабе страны, так и для отдельных регионов и селевых бассейнов. Сотрудниками лаборатории разработаны методики оценки селевой опасности, включая действующий СП 479.1325800.2019 «Инженерные изыскания для строительства в районах развития селевых процессов. Общие требования», при этом применялась технология съёмки селевых бассейнов с беспилотных летательных аппаратов, включая обработку полученных данных в специализированных программных продуктах и

создания на её основе цифровых моделей рельефа; выполнялось моделирование селей с применением двумерных и трехмерных численных моделей гидродинамического типа и моделей, основанных на методе дискретных элементов. На основе предложенных методов были получены результаты моделирования селевых потоков в различных селеопасных районах мира с использованием моделей FLO-2D, RAMMS, Божинского – Назарова, DEBRIS. Разработаны методики зонирования и оценки потенциальной селевой опасности, основанные как на результатах моделирования селей, так и обработке данных полевых обследований и дистанционного зондирования Земли (аэрофото- и космоснимков, цифровых моделей рельефа).

Методы и задачи исследования

Проект предполагает проведение детальных геологических, геоморфологических, гидрологических, климатических, метеорологических исследований района размещения полигона отходов БЦБК, а также информационного, математического и численного моделирования зарождения, развития селевых потоков и методов управления потоками.

Для решения поставленной цели в рамках проекта выделяются следующие конкретные задачи:

1. Создание цифровой платформы комплексного исследования, моделирования, анализа и прогнозирования развития селевых процессов на основе детальных гидрологических, климатических, метеорологических, геологических и геоморфологических исследований района размещения полигона отходов БЦБК.
2. Проведение детального изучения геологических, геоморфологических, климатических условий формирования и повторяемости селевых паводков и катастрофических селей в селеактивных бассейнах хр. Хамар-Дабан в районе расположения карт-накопителей отходов БЦБК. Определение морфометрических параметров зон зарождения и питания твёрдой составляющей селевых потоков с оползневым и эрозионным механизмом. По результатам морфометрического анализа территории провести районирование и выделение селевых бассейнов, морфометрические параметры которых имеют потенциал к оползневому механизму.
3. Съемка зон зарождения, транзита и аккумуляции селевых потоков с использованием БПЛА, создание цифровых моделей рельефа и ортофотопланов.
4. Создание лабораторного стенда для физического моделирования селевого потока. Гидродинамическое моделирование селевых потоков в селевых бассейнах южного побережья озера Байкал с применением двумерных моделей и верификация результатов на основе данных полевых исследований.
5. Применительно к задачам диагностики состояния потенциальных очагов селеформирования создать термо-гидро-геомеханические модели породных и грунтовых массивов. Разработать методы валидации моделей по данным геодезических и температурных пьезометрических измерений, а также критерии оценки устойчивости селевых очагов.
6. Теоретическое и численное исследование «спускового механизма» разрушения дамбы и образования селя в рамках двухскоростного континуума, описывающего совместное движение поровой жидкости и гранулированной среды.
7. Экспериментально-теоретические исследования, направленные на обеспечение механической прочности обваловки прудов-накопителей шлам-лигнина. Создание цифровых двойников прудов, исследование оптимальных схем укрепления стенок, разработка методов мониторинга состояния стенок.
8. Экспериментальные лабораторные исследования течения неньютоновской жидкости при разрушении преграды (дамбы) из гранулированного материала. Исследование динамики разрушения неповрежденной преграды и преграды, ослабленной модельным воздействием взрывного типа, при достижении предельного значения напряжения сдвига в теле преграды. Оценка эффективности проведения взрывных работ в натурных условиях.

9. Разработка новых и адаптация существующих математических моделей и комплекса программных средств для сценарных расчётов с целью управления искусственно вызванным селевым потоком.

10. Выбор мест для экспериментальных полигонов, позволяющих реализовать комплексную защиту от селевых потоков, позволяющих использовать направленные взрывы, селенаправляющие и селезадерживающие конструкции, гибкие барьеры, и т.д.

Практическая применимость

Построенная в рамках реализации проекта цифровая модель рельефа для гидрологических приложений будет пригодна для картирования различных геофизических признаков и расчета важных морфометрических и гидрометеорологических характеристик с использованием уже существующих средств и функций современных ГИС. Выявленные закономерности формирования селевых потоков и полученный фактический материал о скорости, расходе и плотности селевого потока найдут применение при выделении селеопасных зон и разработке эффективных селезащитных сооружений в регионе, повышающих безопасность эксплуатации объектов экономики регионального и федерального значения. Разработанная цифровая платформа и комплекс реализованных в виде сервисов моделей обеспечат поддержку исследований состояния и развития селеопасных территорий и позволят проводить сценарные расчеты управления искусственно вызванным селевым потоком в районе промплощадки ОАО «Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат».

The study of monitoring and stability evaluation of rocky shore slope in reservoir area based on microseismicity: a case study of the Giant Landslide at Jiuxianping, Yunyang

Q. Chen, Q. Zhao, K. Yang, Y. Sun, L. Zhang, F. Wei

Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing, China

Abstract. Extensive distribution of rocky slopes in the Three Gorges Reservoir area poses risks of sudden landslides, yet traditional displacement and rainfall monitoring lack effective early-warning capacity. Addressing technical challenges including weak microseismic signals, noise interference, and low localization accuracy in rocky landslides, this study innovatively developed a multi-method joint denoising model and an artificial bee colony inversion localization model. Using Yunyang Jiuxianping mega-landslide as a case study, we decoded internal damage evolution through microseismic monitoring, revealed spatiotemporal correlations between microseismic events and slope stability, and explored a novel instability warning approach. Key findings include: 1) A denoising method integrating Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise (CEEMDAN) and Singular Spectrum Analysis (SSA) enhanced signal-to-noise ratio by 10.19 dB and reduced root mean square error by 74.24% compared to EMD and wavelet threshold methods. Simulation and field tests confirmed effective background noise suppression while preserving weak signal features. 2) The artificial bee colony inversion algorithm with layered velocity model and cosine similarity function achieved superior localization accuracy. Source distribution patterns from Jiuxianping landslide aligned with deformation features including left-boundary displacement, road cracks, and structural distortions in cemetery walls and crematorium facilities, validating method reliability. 3) Comprehensive analysis integrating microseismic data with rainfall and displacement revealed rainfall-triggered microseismic events with limited energy correlation. Spatial consistency between localized microseismic clusters and high-displacement zones supported the development of an unloading-response ratio warning method using amplitude-frequency variations, providing innovative insights for slope risk prediction.

Key words: *rock slope, stability, denoising, seismic source localization, microseismic monitoring*

Cite this article: Chen Q., Zhao Q., Yang K., Sun Y., Zhang L., Wei F. The study of monitoring and stability evaluation of rocky shore slope in reservoir area based on microseismicity: a case study of the Giant Landslide at Jiuxianping, Yunyang. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 82–88.

Мониторинг и оценка устойчивости скалистого берегового склона в районе водохранилища микросейсмическими методами (на примере гигантского оползня Цзюсяньпин в уезде Юньян)

Ц. Чэнь, Ц. Чжао, К. Ян, Я. Сунь, Л. Чжан, Ф. Вэй

Чунцинский институт зеленых и интеллектуальных технологий Китайской академии наук, Чунцин, Китай

Аннотация. Обширное распространение скалистых склонов в районе водохранилища Три ущелья создает риски внезапных оползней, однако традиционный мониторинг смещения и осадков не имеет эффективных возможностей раннего оповещения. Решая технические проблемы, включая слабые

микросейсмические сигналы, шумовые помехи и низкую точность локализации в скалистых оползнях, это исследование инновационно разработало многометодную модель совместного шумоподавления и модель локализации инверсии искусственной колонии пчел. Используя гигантский оползень Цзюсяньпин в уезде Юньян в качестве примера, мы расшифровали внутреннюю эволюцию повреждений с помощью микросейсмического мониторинга, выявили пространственно-временные корреляции между микросейсмическими событиями и устойчивостью склона и изучили новый подход к предупреждению нестабильности. Основные результаты включают: 1) Метод шумоподавления, интегрирующий полное ансамблевое эмпирическое модальное разложение с адаптивным шумом (CEEMDAN) и сингулярный спектральный анализ (SSA), улучшил отношение сигнал/шум на 10,19 дБ и снизил среднеквадратичную ошибку на 74,24% по сравнению с методами EMD и порогового вейвлета. Моделирование и полевые испытания подтвердили эффективное подавление фонового шума при сохранении слабых характеристик сигнала. 2) Алгоритм инверсии искусственной колонии пчел с многослойной моделью скорости и функцией косинусного подобия достиг превосходной точности локализации. Модели распределения источников от оползня Цзюсяньпин совпали с особенностями деформации, включая смещение левой границы, трещины на дороге и структурные искажения в стенах кладбища и крематориях, что подтвердило надежность метода. 3) Комплексный анализ, интегрирующий микросейсмические данные с осадками и смещениями, выявил микросейсмические события, вызванные осадками, с ограниченной энергетической корреляцией. Пространственная согласованность между локализованными микросейсмическими кластерами и зонами с высоким смещением способствовала разработке метода предупреждения о соотношении разгрузки и реакции с использованием амплитудно-частотных колебаний, что дало инновационные идеи для прогнозирования риска склонов.

Ключевые слова: *скальный склон, устойчивость, шумоподавление, локализация сейсмического источника, микросейсмический мониторинг*

Ссылка для цитирования: Чэнь Ц., Чжао Ц., Ян К., Сунь Я., Чжан Л., Вэй Ф. Мониторинг и оценка устойчивости скалистого берегового склона в районе водохранилища микросейсмическими методами (на примере гигантского оползня Цзюсяньпин в уезде Юньян). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 82–88.

Introduction

The Three Gorges Reservoir area is a key region for geological hazard prevention in China, characterized by complex geological conditions. Since the dam's completion, reservoir bank stability has been significantly affected, with widespread steep rocky slopes posing challenges for stability assessment [*Zhao et al., 2023*]. The 660 km reservoir undergoes periodic water level fluctuations, accelerating rock and soil deterioration in the fluctuation zone and increasing slope instability risks [*Tang et al., 2019*]. A notable example is the 2003 Qianjiangping landslide, which blocked the river channel and caused major economic losses [*Xiao et al., 2010*]. Annual losses in the reservoir area reach billions of yuan [*Chen et al., 2005*]. Following the 175 m impoundment, steep rocky slopes—due to their high elevation and substantial potential energy — exhibit significantly larger disaster impact ranges and surge effects compared to gentle areas [*Li et al., 2020; Zhang, 2020*]. Conventional monitoring methods (surface displacement [*Liao et al., 2021*], pore water pressure [*Zhao et al., 2024*], rainfall [*Wang et al., 2024*]) have limitations for rocky slopes.

Taking the Jiuxianping landslide in Yunyang as an example, this typical landslide exhibits continuous deformation influenced by rainfall [*Ai et al., 2017*] and water level fluctuations [*Liu et al., 2025; Zhang et al., 2020*], showing stepped displacement characteristics [*Liu et al., 2025; Dai et al., 2022*]. The essence of rocky slope failure lies in internal fracture propagation [*Yang et al., 2019*]. Microseismic monitoring captures rock fracture signals,

enabling the inversion of spatiotemporal parameters and geometric dimensions of fractures. This represents a breakthrough from traditional "point-line monitoring" to 3D spatiotemporal monitoring. While InSAR [*Zhang et al., 2020*] and UAV technologies have advanced deformation monitoring, they struggle to reveal internal rock fracture mechanisms. This study focuses on microseismic technology, researching seismic source parameter inversion methods, constructing a multi-factor comprehensive evaluation system, and establishing a microseismic-based slope early warning model. This provides new theoretical support for risk management of high-steep reservoir banks.

Methods

The Jiuxianping landslide spans a vast area, making it essential to choose the right sensor parameters and installation configurations. Rainfall in Jiuxianping landslide is predominantly from May to October, constituting 79% of the yearly precipitation, with the primary period of water-level variations occurring between May and November. Consequently, the main monitoring window will extend from May to December 2024, segmented into three phases for data collection and equipment replacement. The initial phase will take place from May to July 2024, the second phase from July to September 2024, and the final phase from September to December 2024.

Fig. 1. Equipment monitoring array

To address the limitations of traditional methods in early detection of internal rock damage for slope stability monitoring, this study constructs an early warning system based on microseismic monitoring technology, using the Jiuxianping landslide as a case study. The system employs a sensor network to capture subtle subsurface vibrations in real-time. It efficiently identifies microseismic events through the STA/LTA (Short-Term Average/Long-Term Average) algorithm, enhances the signal-to-noise ratio of weak signals using the CEEMDAN-SSA joint denoising model, accurately picks P-wave arrivals based on the Akaike Information Criterion (AIC), and optimizes the seismic source localization inversion process via the Artificial Bee Colony algorithm. This approach overcomes the hysteresis of traditional displacement monitoring, enabling early warnings for hidden fractures and landslide precursors. It achieves holistic technical integration spanning event screening, signal processing, and localization analysis.

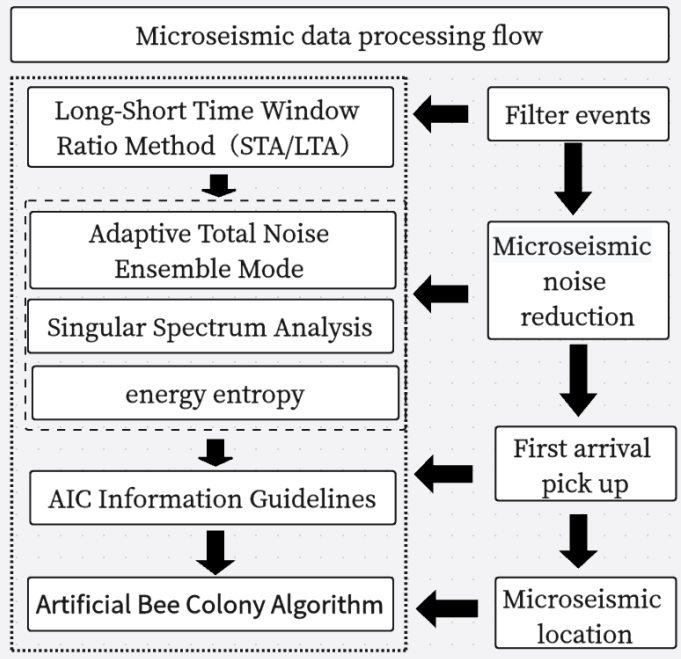


Fig. 2. Data processing flow and method

Results

1) The denoising results using the combined CEEMDAN-SSA method are shown in Figs. 3–5. After processing, random noise across different frequencies in the original signal demonstrates closer approximation to the original simulated signal in both low- and high-frequency bands. Compared with denoising effects achieved by EMD and EMD-wavelet threshold methods, the proposed approach increases the signal-to-noise ratio by 10.19 dB, reduces the root mean square error by 1.47, exhibits smaller deviation from the original signal, and achieves an energy ratio of 98%, confirming superior processing performance.

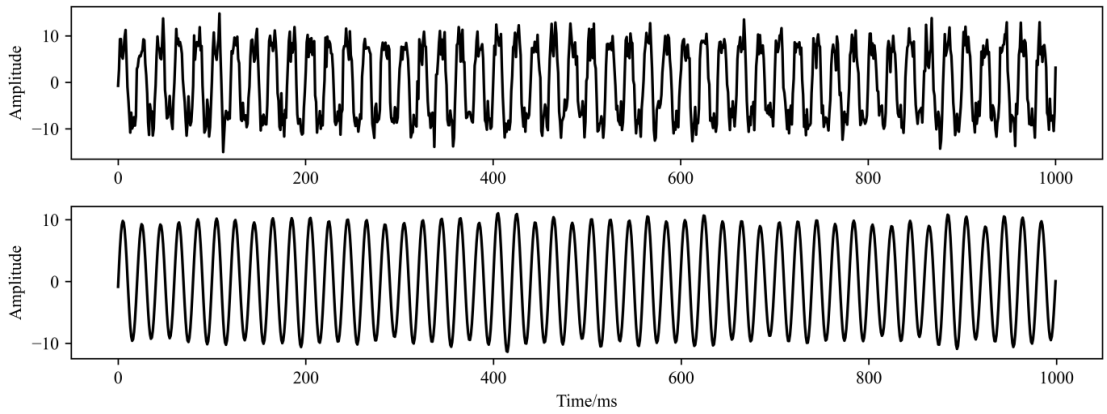


Fig. 3. CEEMDAN-SSA denoised signal

Table 1. Analysis of simulation signal noise reduction effect

Signal	SNR/dB	RMSE	E/%
Analog Signal	11.34	1.98	89
EMD	12.53	1.33	94
EMD-Wavelet Threshold	15.06	0.99	95
This article	21.53	0.51	98

2) The Artificial Bee Colony algorithm demonstrates significant advantages in seismic source localization inversion. Analysis of data from May 23 to December 10, 2024, locates typical microseismic events. The figure displays the distribution of microseismic sources within the Jiuxianping landslide area during this period. Source locations (marked by red dots) concentrate primarily in topographically elevated regions, showing particularly dense clustering in the central and upper-right sections. This distribution strongly correlates with elevation variations, indicating concentrated microseismic activity in steeper or less stable zones.

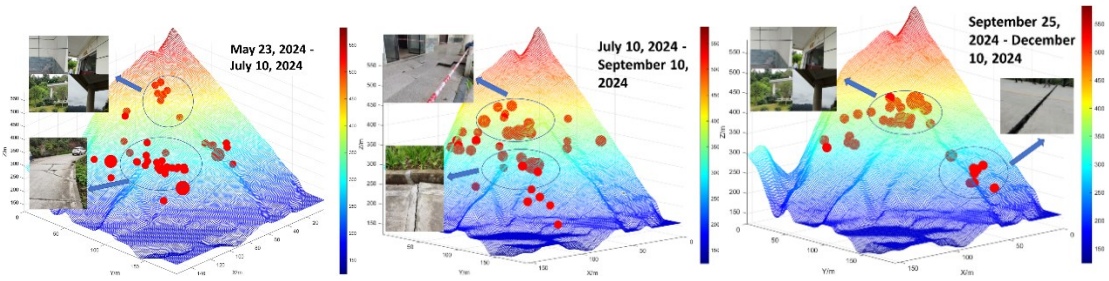


Fig. 4. Earthquake source location (May–December)

Microseismic monitoring at Jiuxianping landslide (May–December 2024) further reveals significant reservoir water-level influence on event distribution: during the water-level decline phase (May–July), 76 events clustered in the middle-rear section showing spatial coupling with road cracks; during rapid drawdown (July–September), 38 high-energy events triggered ground collapse in the central Lingyuan area, highlighting water saturation-unloading coupling effects; while the gradual water-level rise period (September–December) witnessed 42 events migrating toward the rear section, reflecting pore-water-pressure-dominated mechanisms. Crucially, the spatiotemporal evolution of seismic sources demonstrates strong consistency with landslide deformation fields, confirming microseismic technology's effectiveness in identifying failure mechanisms of reservoir bank landslides.

Discussion

Microseismic data faces multiple challenges in slope stability analysis: Firstly, characteristics like amplitude and frequency are significantly influenced by geological conditions, landslide types, and external interference, requiring complex interpretation with specialized expertise. Secondly, while microseismic monitoring can indirectly reflect rock mass damage, it cannot directly provide key mechanical parameters (e.g., shear strength, friction angle) for stability assessment, and localized damage poorly represents overall stability. Thirdly, landslide evolution is driven by external factors like water level changes and rainfall; microseismic data captures instantaneous micro-changes but struggles to quantify temporal dynamic effects and complex mechanical coupling processes. Therefore, sole reliance on microseismic signals is insufficient for accurate stability evaluation, necessitating comprehensive analysis with multi-source data including geological surveys and mechanical parameter testing.

Conclusion

Addressing the need for rock landslide prevention, this study utilized microseismic monitoring to investigate weak signal denoising, source location, and stability analysis. Key conclusions are:

1) Proposed a CEEMDAN-SSA denoising method based on energy entropy: CEEMDAN decomposes signals to remove low-frequency noise by optimizing IMF components, followed by SSA-based secondary filtering. Simulations show a 10.19 dB SNR improvement and 74.24% RMSE reduction. This method outperforms traditional EMD and wavelet thresholding

in high-frequency noise suppression while preserving signal features, enabling precise location of weak rupture events.

2) Developed an artificial bee colony (ABC) microseismic location model: Using a layered velocity model, elevation matrix, and cosine similarity objective function for source inversion. Simulation tests achieved < 1 m location error within 100 iterations, surpassing conventional linear inversion. Field validation at Jiuxianping landslide showed high consistency between located sources and actual deformation (left boundary displacement, road cracks, and cemetery subsidence).

3) Revealed the mechanism linking microseismicity to slope stability: Microseismic events are triggered by rainfall but show no significant energy correlation. High-energy events originate from deep rock fracturing. Displacement mutation zones spatially coincided with source locations, with abrupt displacement phases accompanied by large-scale microseismicity. An innovative LURR early-warning method using amplitude-frequency parameters was developed: Ratios > 1.0 indicate accelerating damage, while significantly higher values signal instability risk. This method identifies hazards earlier than traditional displacement tangent angle approaches.

Funding

This research was funded by Geological Disaster Patterns and Mitigation Strategies Under River–Reservoir Hydrodynamics in the Three Gorges Reservoir Fluctuation Zone (5000002024CC20004), Water Resources Bureau of Chongqing Municipal (CQS23C01036), Key Laboratory of Rock Mechanics and Geohazards of Zhejiang Province (no. ZJRMG-2019-01), Chongqing Natural Science Foundation General Project (CSTB2025NSCQ-GPX0557), Western Scholar of Chinese Academy of Sciences Category A（E2296201, Sichuan Province Regional Innovation Cooperation Project (2024YFHZ0098).

References

Zhou J., Chen M., Qu J., et al. Research and prospects on the disaster-causing mechanisms and prevention technologies of reservoir landslides [J]. Engineering Sciences and Technology, 2023, 55(01): 110–128.

Tang H., Wasowski J., Juang C.H. Geohazards in the Three Gorges Reservoir Area, China – Lessons learned from decades of research [J]. Engineering Geology, 2019, 261: 105267.

Xiao S., Liu D., Jiang F., et al. Geomechanical model test study on Qianjiangping landslide in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(05): 1023–1030.

Chen J., Yang Z., Li X. Relationship between landslide occurrence probability and precipitation conditions in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, (17): 3052–3056.

Li S., Xu Q., Tang M., et al. Spatial development patterns of landslides and their key influencing factors in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Earth Science, 2020, 45(01): 341–354.

Zhang W., Tang L., Li H., et al. Probabilistic stability analysis of Bazimen landslide with monitored rainfall data and water level fluctuations in Three Gorges Reservoir, China [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2020, 14: 1247–1261.

Liao K., Wu Y., Miao F., et al. Effect of weakening of sliding zone soils in hydro-fluctuation belt on long-term reliability of reservoir landslides [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 3801–3815.

Zhao Y., Li H., Huang C., et al. Discussion on landslide monitoring and early warning technologies for the Guizhou section of the China–Myanmar natural gas pipeline [J]. Shanxi Architecture, 2024, 50(16): 70–73+78.

Wang L., Ren S., Li J. Physical model test study on reactivation mechanisms of ancient landslides under rainfall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(05): 21–31.

Ai X., Zhang T., Deng T. Analysis of the formation characteristics and deformation mechanism of Jiuxianping landslide in Yunyang, Chongqing [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(03): 119–126.

Liu X., Yang B., Xia B. Deformation evolution characteristics and identification of dominant controlling factors of Jiuxianping landslide based on data mining [J/OL]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 1–9 [2025-04-03].

Zhang Y., Zhang Z., Xue S., et al. Stability analysis of a typical landslide mass in the Three Gorges Reservoir under varying reservoir water levels [J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79: 1–14.

Dai Z., Zhang Y., Zhang C., et al. Interpreting the influence of reservoir water level fluctuation on the seepage and stability of an ancient landslide in the Three Gorges Reservoir area: a case study of the Outang landslide [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(9): 4551–4561.

Yang Z., Lai Y., Liu S., et al. Dynamic stability and failure modes of soft rock slopes under frequent microseismicity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(12): 2297–2306.

Динамика селевых процессов в бассейне реки Черек Балкарский (Кабардино-Балкарская Республика)

Л.Б. Чигирова

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

Аннотация. На основе анализа результатов натурных маршрутных обследовании русла р. Черек Балкарский, выполненных в 2014–2024 гг., включающих морфометрические и гидрологические работы, приводятся данные о 12 оползне-эрозионно-селевых объектах, непосредственно воздействующих на федеральную автодорогу А-154 Урвань-Уштулу с полным перекрытием движения по ней, частичным перекрытием (завалом) и размывом края полотна дороги. Показана связь увеличения частоты схода селевых потоков в исследуемом бассейне р. Черек Балкарский с изменением климата и рекреационным освоением горных территорий.

Ключевые слова: *р. Черек Балкарский, селевые потоки, грунтово-каменный материал, оползне - осыпные процессы*

Ссылка для цитирования: Чигирова Л.Б. Динамика селевых процессов в бассейне реки Черек Балкарский (Кабардино-Балкарская республика). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 89–95.

Dynamics of debris flow processes in the Cherek Balkarsky River basin (Kabardino-Balkarian Republic)

L.B. Chigirova

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

Abstract. Based on the analysis of the results of in-kind route surveys of the Cherek Balkarsky riverbed, carried out in 2014–2024, including morphometric and hydrological work, data are provided on 12 landslide-erosion-debris flow objects directly affecting the federal highway A-154 Urvan-Ushtulu with a complete closure of traffic on it, partial closure (blockage) and erosion of the edge of the roadbed. The connection between the increase in the frequency of debris flows in the studied basin of the Cherek Balkarsky River and climate change and recreational development is shown.

Key words: *Cherek Balkarsky, debris flows, soil-stone material, landslide-scree processes*

Cite this article: Chigirova L.B. Dynamics of debris flow processes in the Cherek Balkarsky River basin (Kabardino-Balkarian Republic). In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 89–95.

Введение

В процессе выветривания скальных пород горных районах и руслах с большими уклонами (до 20º и более) накапливается большое количество рыхлообломочного материала. А для образования селевых потоков, как известно, необходимы 3 основных фактора – наличие грунтового материала, большие уклоны и достаточное количество воды [*Флейшман, 1978*]. Следовательно, при выпадении обильных ливневых осадков в

горных районах часто сходят селевые потоки разной мощности – от микроселей до катастрофических.

Наличие федеральной автодороги А-154 Урвань – Уштулу способствовало рекреационному освоению верховьев бассейна р. Черек Балкарский. Глобальное изменение климата и интенсивное рекреационное освоение горных территорий привело к увеличению (в несколько раз) экзогенных процессов, воздействующих на автодорогу с полным перекрытием движения по ней, частичным перекрытием (завалом) и размывом края полотна.

Бассейн р. Черек Балкарский расположен в высокогорной области северного склона Центрального Кавказа и лишь крайней северной частью выходит в область крупнохолмистых предгорий. Граничит он с бассейнами рек Псыгансу и Урух на востоке, р. Риони на юге и р. Черек Безенгийский на западе. Прорезая Скалистый хребет, р. Черек Балкарский течет в узком ущелье, выйдя из которого соединяется в нижней части с.п. Бабугент, с р. Черек Хуламский (Безенгийский), образуя единую р. Черек.

Средний уклон реки 35‰ при перепаде высот около 1880 м. Площадь водосбора р. Черек Балкарский составляет 695 км^2, длина реки 51 км, средняя высота водосбора 2590 м (данные КБ ЦГМС).

Водный режим р. Черек Балкарский фиксируется на гидрологическом посту первого разряда ГП-1 в с.п. Бабугент, где ежедневно 2 раза в день проводятся измерения уровня воды, температуры воды и воздуха, выпавших осадков, а также систематически проводятся измерения контрольных инструментальных расходов для уточнения стока.

Материалы и методы исследований

В данной работе исходными данными являются натурные обследования русла р. Черек Балкарский, выполненные в 2014–2024 гг., включающие морфометрические и гидрологические работы, информационным источником послужили архивные материалы ФГБУ «ВГИ» и КБ ЦГМС.

Результаты исследования

Район исследования – территория, расположенная выше с.п. Верхняя Балкария до источника нарзана в урочище Уштулу, куда проложена федеральная автодорога Урвань-Уштулу по правому прибрежному склону р. Черек Балкарский. Практически все притоки р. Черек Балкарский (13 левых и 10 правых) [*Кадастр, 2001; Кадастр, 2015*] расположены в верхней высокогорной части бассейна и являются селеносными.

В верховьях Черекского ущелья за весенне-летний период выпадают обильные ливневые осадки до 5 раз, которые обычно сопровождаются сходами селевых потоков по притокам р. Черек Балкарский, а также оползне - осыпными процессами. Мониторинг верховьев Черекского ущелья ведется с целью изучения динамики развития селевых процессов в горной части бассейна р. Черек Балкарский для защиты федеральной автодороги и инфраструктуры с.п. Верхняя Балкария [*Отчет, 2017*].

Отрезок федеральной автодороги выше с.п. Верхняя Балкария, протяженностью более 15 км, во время обильных осадков, периодически подвергается воздействию гидрологических (сели, оползни) и геологических (обвалы, камнепады) процессов, интенсивно протекающих на прилегающих крутых склонах уклонами до 30º–45º.

В результате обследования данного участка автодороги были выявлены 12 оползне-эрозионно-селевых объекта, непосредственно воздействующих на федеральную автодорогу Урвань – Уштулу. Было установлено, что полотно автодороги здесь подвергается завалу грунтово-каменным материалом на четырех участках с полным перекрытием движения по ней, и на четырех участках с частичным перекрытием (завалом) и размывом края полотна дороги.

Ниже приводятся водотоки, непосредственно воздействующие на автодорогу.

Ручей Гюльчису

Относительная высота на пересечении с автодорогой 1363 м н.у.м. По данному ручью, во время обильных осадков, сходят селевые потоки, которые частично заваливают полотно автодороги грунтово-каменными массами на 71,5 км автодороги Урвань – Уштулу. Периодичность схода селевых масс – 1 раз в 1–2 года.

Ручей Тарташлы

Относительная высота на пересечении с автодорогой 1436 м н.у.м. По ручью, во время обильных осадков, периодически сходят селевые потоки, которые полностью заваливают селевыми выносами полотно автодороги. Тип селя грунтово-каменный, с включениями валунов. Отдельные фракции валунов имеют размеры до 1,5 м (рис. 1). Периодичность схода – в год несколько раз.

Рис. 1. Грунтово-каменные отложения в районе автодороги, на конусе выноса ручья Тарташлы

2 мая 2025 г. зафиксирован сход селя по ручью Тарташлы с завалом полотна автодороги толщиной отложений до 4 м (рис. 2).

Рис. 2. Завал полотна автодороги Урвань – Уштулу селевыми выносами ручья Тарташлы, 2.05.2025 г.

Ручей Измялцысу

Относительная высота на пересечении с автодорогой 1490 м н.у.м. По ручью, во время обильных осадков, периодически сходят селевые потоки, которые частично или полностью заваливают селевыми выносами полотно автодороги. Тип селя грунтово-каменный, размеры камней до 0,4 м (рис. 3). Периодичность схода селя – 1 раз в 2–3 года.

Селевой поток значительной мощности по ручью Измялцысу (записан на дорожном знаке как Зеркли-суу) сошел 23 июля 2019 г. Грунтово-каменной массой было завалено полотно федеральной автодороги с полным перекрытием движения.

Рис. 3. Конус выноса ручья Измялцысу (записан на дорожном знаке как Зеркли-суу) на пересечении с автодорогой

На участке федеральной автодороги от ручья Гюльчису и до ручья Измялцысу для очистки полотна автодороги от селевых масс постоянно находится дежурный бульдозер.

Выше от ручья Измялцысу на федеральную автодорогу выходят 4 небольших безымянных ручья [*отчет, 2021*].

Ручей Безымянный 1

Относительная высота на пересечении с автодорогой 1561 м н.у.м. При обильных дождевых осадках по ручью сходят наносоводные потоки, которые размывают края полотна автодороги (рис. 4).

Рис. 4. Ручей Безымянный 1 на выходе к автодороге

Ручей Безымянный 2

Относительная высота на пересечении с автодорогой 1578 м н.у.м. Во время обильных осадков по ручью сходят селевые потоки, которые полностью или частично заваливают полотно автодороги. Тип селя грунтово-каменный, периодичность схода 1 раз в 1–2 года.

Ручей Безымянный 3

Относительная высота на пересечении с автодорогой 1586 м н.у.м. По ручью, во время обильных осадков, периодически сходят селевые потоки, которые частично заваливают выносами полотно автодороги. Тип селя грунтово-каменный, размеры камней до 0,3 м. Периодичность схода селя 1 раз в 1–2 года.

Ручей Безымянный 4

Относительная высота на пересечении с автодорогой 1622 м н.у.м. Во время обильных осадков по ручью сходят наносоводные потоки, которые размывают полотно грунтовой автодороги (рис. 5).

Рис. 5. Ручей Безымянный 4 на пересечении с автодорогой

Ручей Ортозюрек

Ручей Ортозюрек на дорожном знаке записан как Метиан-суу. Относительная высота на пересечении с автодорогой 1860 м н.у.м. По ручью, во время обильных осадков, периодически сходят селевые потоки, которые полностью заваливают селевыми выносами полотно автодороги. Тип селя грунтово-каменный. Размеры камней достигают до 2 м (рис. 6). Периодичность схода 1 раз в 4–5 лет.

Рис. 6. Выход селевых масс ручья Ортозюрек (на дорожном знаке записан как Метиан-суу) на автодорогу

Периодически федеральную автодорогу Урвань – Уштулу также заваливают грунтово-каменным материалом два суходола и два оползне-осыпных склона. Во время обильных осадков по суходолам сходят селевые массы грунтово-каменного материала, с включениями валунов, которые полностью заваливают полотно автодороги. Отдельные фракции валунов имеют размеры до 1 м (рис. 7).

Рис. 7. Суходол на выходе к автодороге

По основанию оползне – осыпного склона (по краю полотна автодороги) на протяжении около 650 м сооружена габионная защитная стенка, которая с верховой стороны полностью заполнена грунтово-каменным материалом. Грунтово-каменный материал (максимальные размеры камней 0,2–0,3 м) с оползне-осыпного склона периодически заваливает полотно автодороги на протяжении около 400 м (рис. 8).

Рис. 8. Габионная защитная стенка у подножия оползне-осыпного склона

Выводы

В последние годы наблюдается активизация склоновых процессов, которые сопровождаются сходами селевых потоков на горных и предгорных территориях. Это обусловлено, прежде всего, увеличением дождевых осадков ливневого характера. Если раньше по притокам бассейна р. Черек Балкарский селевые потоки сходили 1 раз в 2–10 лет и реже [*Кадастр, 2001; Кадастр, 2015*], то исходя из результатов исследования с 2014 г. по настоящее время, в верховьях Черекского ущелья селевые потоки сходят регулярно, а по некоторым водотокам – несколько раз в год. Это связано, прежде всего, с глобальным изменением климата и интенсивным рекреационным освоением горных территорий.

В связи с активным рекреационным развитием долины р. Черек-Балкарский и увеличением туристического потока необходим постоянный мониторинг для безопасного использования данной территории. Все более актуальным становится вопрос о необходимости установки метеостанции в верховьях Черекского ущелья для досконального изучения метеорологических явлений, таких как, осадки, град, ветер, а также своевременного предупреждения об опасности местное население и туристов.

На всех опасных участках в целях безопасности необходимо установить таблички с предупредительными знаками.

Список использованной литературы

Кадастр лавинно-селевой опасности Кабардино-Балкарской республики / под ред. М.Ч. Залиханова. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. – 64 с.

Кадастр селевой опасности Юга Европейской части России / Н.В. Кондратьева, А.Х. Аджиев, М.Ю. Беккиев и др. – М., Нальчик: Феория, 2015. – 148 с.

Отчет о НИР 1.1.6.1: «Усовершенствовать методы прогноза и расчета селевых потоков в условиях техногенного воздействия на горные и предгорные территории, на основе данных натурных маршрутных обследований и гидрометеорологических наблюдений с разработкой рекомендаций по противоселевой защите населенных пунктов и объектов экономики и расширением базы селевых бассейнов». – Нальчик: ВГИ, 2017. – 112 с.

Отчет о НИР 6.3.2.1: «Развитие методов мониторинга пространственно-временных систем селевых бассейнов с целью оценки селевой активности и опасности возможных селепроявлений. Данные о характеристиках селевых бассейнов на основе результатов мониторинга, метеорологической информации, расчёта параметров селей, аэрокосмической информации и ГИС-технологий на территории Центрального Кавказа». – Нальчик: ВГИ, 2021. – 126 с.

Флейшман С.М. Сели. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 312 с.

Новая методика для расчёта расходов турбулентного селевого потока

Р.В. Диаконидзе, Дж.Н. Панчулидзе, Л.Н. Цулукидзе, М.А. Мгебришвили, Л.К. Токликишвили, С.Дж. Модебадзе

Институт водного хозяйства им. Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Тбилиси, Грузия, robertdia@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу причин и механизмов формирования паводков и селевых потоков в условиях глобального изменения климата. Исследование охватывает период с 1980 по 2023 г., включающий измерения на 52 гидрологических участках 41 реки. Авторы предложили новые методики прогнозирования расходов селевых потоков на основе мощности водосборного бассейна. Выявлено, что мощность водосбора является ключевым фактором, влияющим на интенсивность селевых потоков. Результаты исследований показывают, что разработанные эмпирические модели могут быть использованы для прогнозирования селевых потоков не только в Грузии, но и в регионах с аналогичными географическими условиями. Разница между расчетными и натурными показателями расходов воды не превышает 20%, что является приемлемым результатом для гидрологических исследований.

Ключевые слова: *наводнение, эрозия, оползень, сель, река, речной бассейн*

Ссылка для цитирования: Диаконидзе Р.В., Панчулидзе Дж.Н., Цулукидзе Л.Н., Мгебришвили М.А., Токликишвили Л.К., Модебадзе С.Дж. Новая методика для расчёта расходов турбулентного селевого потока. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 96–100.

A new methodology for calculating turbulent debris flow discharges

R.V. Diakonidze, J.H. Fanchulidze, L.H. Tsulukidze, M.A. Mgebrishvili, L.K. Toklikishvili, S.J. Modebadze

Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, robertdia@mail.ru

Abstract. This article is dedicated to analyzing the causes and mechanisms of flood and debris flow formation under conditions of global climate change. The study covers the period from 1980 to 2023, including measurements at 52 hydrological sites across 41 rivers. The authors propose new methodologies for forecasting debris flow discharges based on the power of the watershed basin. It's revealed that watershed power is a key factor influencing the intensity of debris flows. The research results indicate that the developed empirical models can be used to forecast debris flows not only in Georgia but also in regions with similar geographical conditions. The difference between the calculated and observed debris flow discharge values doesn't exceed 20%, which is an acceptable result for hydrological studies.

Key words: *flood, erosion, landslide, debris flow, river, river basin*

Cite this article: Diakonidze R.V., Fanchulidze J.H., Tsulukidze L.H., Mgebrishvili M.A., Toklikishvili L.K., Modebadze S.J. A new methodology for calculating turbulent debris flow discharges. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 96–100.

Введение

Среди экологических угроз в последнее время на планете Земля значительно возросло количество природных катастрофических явлений. Грузия не является исключением. Среди природных катастрофических явлений (паводки, наводнения, ускоренное развитие эрозионных процессов, развитие оползневых процессов и другие) особо следует отметить участившиеся селевые явления. Сегодня сели наблюдаются в водосборных бассейнах рек, где раньше они не фиксировались. Одной из главных причин этого является изменение климата. Достаточно отметить, что иногда за короткий период времени (2–3 дня) выпадает месячная норма осадков, что, естественно, значительно ускоряет эрозионные процессы. Это, в свою очередь, является предпосылкой для формирования селевого потока, обладающего сильным разрушительным воздействием на природную среду.

Формирование осадков высокой интенсивности за короткий период времени провоцирует оползневые процессы, и сошедшее с откоса речной долины тело оползня может перекрыть русло реки и создать запруду, так называемую «природную плотину». В верхнем бьефе «природной плотины» происходит значительное увеличение объема водного стока, и когда масса запруженной воды достигает критической отметки, вода прорывает запруду, и смешанный с водной массой нанос образует селевой поток.

Оползневой процесс является одним из факторов возникновения селевого потока, что подлежит геологическим исследованиям. К сожалению, в Грузии при формировании природных угроз всех видов для их изучения и составления соответствующих выводов почему-то всегда направляют геологов. Хотя геологическая школа в Грузии сильна, у них самих достаточно геологических проблем, и для изучения наводнений, паводков и тем более селевых явлений необходимо участие и оценки специалистов-гидрологов. К сожалению, этого не происходит, и именно это является причиной того, что в исследованиях трагедии в Шови (3 августа 2023 г.) отсутствуют заключения специалистов-гидрологов. Между тем, насколько нам известно, изучение селевых явлений относится к сфере гидрологической науки.

Гидрологическая наука объединяет или тесно связана со следующими областями науки: метеорология и климатология, гидрогеология, геоморфология, геология и география. К сожалению, в Грузии специальность «гидрология» больше не преподается в высших учебных заведениях как самостоятельная дисциплина, что вызывает тревогу.

Результаты обследования

В области изучения селевых процессов существует множество исследований и методов, однако до недавнего времени отсутствовала прогностическая методика для расчета величины расхода селевого потока.

В Институте водного хозяйства Грузинского технического университета, в рамках выполнения программной темы, на основе накопленных знаний, соответствующих полевых исследований и собранных материалов, была разработана расчетная методика для прогнозирования величины расхода турбулентного селевого потока [*Diakonidze, 2022, 2023*]. Эта методика основана на потенциальной возможности (мощности) водосборного бассейна, которая является движущей силой селевого потока. Невозможно, чтобы транспортировка селевой массы произошла, если у нее нет соответствующей энергии. Например, на рис. 1 ясно видно, что без достаточной энергии реки такая объемная транспортировка камней была бы невозможна. Такая энергия, наряду с другими способствующими факторами (объемный вес потока, уклон водосборного бассейна), присуща только энергии водного потока.

Хотя формирование селевого потока может быть обусловлено и другими факторами, такими как сползание ледниковых морен, к которым добавляется твёрдый материал, обрушившийся со скал, а также эродированные твёрдые наносы со склонов русла реки, тем не менее, для транспортировки селевого потока этих факторов недостаточно без участия водного потока. Исходя из вышесказанного, мы провели

соответствующие исследования, использовали установленные в натурных условиях в вышеупомянутом институте на протяжении 30–35 лет величины расхода селевого потока для рек соответствующих водосборных бассейнов, и установили корреляционную связь между потенциальной мощностью бассейна и определёнными нами в натуре расходами. Была получена эмпирическая зависимость для расчёта прогностической величины селевого расхода (1) для двух случаев: когда мощность бассейна $N \leq 1000$ млн Вт и когда $N > 1000$ млн Вт.

Рис. 1. Валун, транспортированный селевым потоком

Общий вид зависимости следующий:

$$Q_{сел} = f(N, \alpha, \beta), \quad (1)$$

где $Q_{сел}$ – величина селевого расхода, м³/с; N – потенциальная мощность водосборного бассейна, млн Вт; α и β – безразмерные величины, изменяющиеся в соответствии с гидрологическими характеристиками бассейна.

Для расчёта мощности бассейна можно использовать модифицированную эмпирическую зависимость для расчёта мощности (2), где вместо уклона бассейна используется средняя высота бассейна. Зависимость имеет следующий вид:

$$N = \gamma QH \approx 1000 \text{ кгс·м/с} \approx 10000QH \text{ млн Вт}, \quad (2)$$

где N – потенциальная мощность бассейна, млн Вт; γ – объёмный вес воды, 1000 кг/м³; Q – расход воды соответствующей обеспеченности (повторяемости), м³/с; H – средняя высота бассейна, м.

Для расчёта максимального расхода воды в условиях Грузии может быть использована методика [*Ростомов, 1980*].

Расчёт других величин, входящих в расчётную зависимость мощности, возможен, если нам известна мощность бассейна. Для заданного периода можно будет рассчитать расход селевого потока с учётом мощности бассейна, используя эмпирические зависимости (3) и (4), которые имеют следующий вид:

$$\text{когда } N \leq 1000 \text{ млн Вт: } Qсел. = 0{,}006N + 2, \quad (3)$$

$$\text{когда } N > 1000 \text{млн Вт: } Qсел. = 0{,}08N + 45. \quad (4)$$

Надёжность эмпирических зависимостей была проверена методами, принятыми и апробированными в гидрологии, а также путём сравнения результатов, полученных по формулам (3) и (4), с величинами, установленными в натурных условиях. Проверка показала положительный результат [*Diakonidze, 2021*].

В формировании селевого потока участвует множество природных факторов, однако водный поток является основным средством его транспортировки. Исходя из этого, спорными являются все существующие заключения относительно природной катастрофы (селевого потока) в Шови, поскольку в них мы не видим критического анализа гидрологических процессов в связи с изменением климата. Официального заключения гидролога о произошедшей природной катастрофе не существует.

Выводы и рекомендации

Многочисленные исследования, проведенные как в природных условиях, так и в лабораториях, позволили нам представить соответствующие меры против паводков и селевых потоков, чтобы хоть как-нибудь избежать или смягчить возможные негативные последствия жестких стихийных бедствий, чтобы избежать человеческих жертв.

1. Используя полученные зависимости можно рассчитать прогностические значения расходов водного стока и селевых потоков для Грузии и регионов со схожими физико-географическими условиями.
2. На фоне глобального изменения климата необходимо расширить сеть гидрометеорологических наблюдений, выявить экологически уязвимые территории. Особое внимание следует уделить мониторингу осадков и процессов на ледниках в верховьях рек. Для этого необходимо использовать современные технические устройства: дистанционное зондирование, устройства дистанционного оповещения, а также широко используемые летательные аппараты «дрон» с соответствующим программным обеспечением.
3. На выявленных уязвимых участках должен осуществляться постоянный мониторинг, посредством установленых современных технических устройств предварительного оповещения.
4. В целях принятия практических мер для защиты от стихийных бедствий, особенно от селевых потоков, в уязвимых районах следует заранее установить противоселевые сооружения. Для этих целей мы рекомендуем эластичную противоселевую конструкцию швейцарского производства [*https://www.geobrugg.com/en*], поскольку считаем, что она полностью соответствует физико-географическим условиям нашей страны (Грузии). Хотя сегодня в Грузии производится множество типов конструкций для защиты от селей, мы считаем, что противоселевые конструкции, произведенные в Швейцарии, более рентабельны и дадут нам лучшие результаты. Тем более, что они связаны с меньшими экономическими затратами и являются многоразового использования.
5. Происходящие в природе процессы(появление трещин на ледниках и скопление в нем водной массы, раскалывание льда, обрушение и скольжение льда, обвал горных пород, накопление критического количества эродированного материала и т.п.) могут привести к запружению русла реки и созданию «естественной плотины», в результате чего стоки воды начнут скапливаться в верхнем бьефе плотины. Достигнув критической точки, вода прорвет плотину и образуется селевой поток колоссальной разрушительной энергии, к этому добавляется скопившиеся в русле реки эродированные твердые отложения, что еще больше увеличивает мощность селевогопотока. Поэтому постоянный мониторинг подобных уязвимых мест необходим для своевременного обнаружения и соответствующего незамедлительного реагирования. Первым делом максимально очищаем русло реки, чтобы поток мог беспрепятственно двигаться, и в параллельном режиме, если на этом участке нет какого-либо вида противоселевого сооружения, до прорыва плотины начинаем освобождать верхний бьеф от воды механическим путем. В безвыходной ситуации возможно также использование взрывчатки малой мощности для постепенного опорожнения природного резервуара.

6. Поскольку паводки и селевые потоки часто не ограничиваются географическими границами, глобальное сотрудничество в области анализа и предсказания этих явлений становится все более важным. Обмен информацией и опытом между странами и регионами позволяет эффективнее бороться с угрозами паводков и снижать их воздействие на население и экономику.

Список литературы

Ростомов Г.Д. Технические указания по расчету максимального стока рек в условиях Кавказа. – Тбилиси, 1980. – 71 с.

Diakonidze R., Gvishiani Z. Calculation methodology for solid sediment and debris flow discharge. – Tbilisi: Intellect, 2022. – 10 p.

Diakonidze R., Kereselidze D., Phanchulidze J., Tsulukidze L., Kvirkvelia I. The primary reasons for frequent natural disasters on Earth (using Georgia as an example) // Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences. – 2023. Vol. 17, No. 4. – P. 81–91.

Diakonidze R., Gvishiani, Z., Lochoshvili, T., Mchedlishvili, K. Ecological problems of environment debris flows and their prediction: experience of Georgia // International Journal of Science and Research (IJSR), Environmental Monitoring and Assessment. – 2021.

Система мониторинга и экстренного оповещения о сходе селевого потока

А.А. Добрынина[1,2,3], В.А. Саньков[1,2], С.А. Король[1], Н.В. Кичигина[4], А.А. Рыбченко[1,4]

[1]Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, dobrynina@crust.irk.ru

[2]Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия

[3]Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

[4]Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. На основе анализа сейсмических шумов, генерируемых потоком воды в русле реки Кынгарга (Тункинская долина, Восточный Саян) в межень и во время прохождения паводков и селевого потока 2014 г., предложена система мониторинга и экстренного оповещения о начале движения накопленного каменного материала. Разработанная система представляет собой комплекс измерительного оборудования, контролирующего селеформирующие климатические условия, а также уровень и концентрацию твердой составляющей в водном/селевом потоке. Эффективность разработанной системы предупреждения основана на разнице скоростей селевого потока (в среднем 5–10 м/с) и скорости распространения сейсмических волн (≈ 3,5 км/с).

Ключевые слова: *селевой поток, паводок, микросейсмические шумы, р. Кынгарга, Тункинская долина, система экстренного оповещения*

Ссылка для цитирования: Добрынина А.А., Саньков В.А., Король С.А., Кичигина Н.В., Рыбченко А.А. Система мониторинга и экстренного оповещения о сходе селевого потока. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 101–110.

Debris flow monitoring and emergency warning system

A.A. Dobrynina[1,2,3], V.A. Sankov[1,2], S.A. Korol[1], N.V. Kichigina[4], A.A. Rybchenko[1,4]

[1]Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia, dobrynina@crust.irk.ru

[2] Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

[3]Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Ulan-Ude, Russia

[4]V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Irkutsk, Russia

Abstract. Based on the analysis of seismic noise generated by a calm flow of water in the bed of the Kyngarga River (Tunka Valley, Eastern Sayan), as well as during the floods and debris flow of 2014, a system for monitoring and emergency warning of the beginning of the movement of accumulated rock material is proposed. The developed system is a set of measuring equipment that monitors debris flow forming climatic conditions, as well as the level and concentration of solid components in a water/debris flow. The effectiveness of the developed warning system is based on the differences in velocity of debris flow (on average 5–10 m/s) and seismic waves (≈ 3.5 km/s).

Key words: *debris flow, flood, ambient noise, Kyngarga river, Tunka Valley, emergency warning system*

Cite this article: Dobrynina A.A., Sankov V.A., Korol S.A., Kichigina N.V., Rybchenko A.A. Debris flow monitoring and emergency warning system. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 101–110.

Введение

Микросейсмические колебания, регистрируемые в земной коре, являются результатом взаимодействия геосфер (атмосфера, гидросфера и литосфера) и имеют различное происхождение – искусственное (антропогенный фактор) и природное (эндогенные и экзогенные процессы). Экзогенные источники микросейсмического шума очень разнообразны. В частности, сейсмическими станциями фиксируются такие экзогенные процессы, как смерчи, шквалы, грозы, торнадо, сход лавин, обвалы, оползни, сели и паводки [*Ярошевич и др., 2016; Чечельницкий и др., 2018; Burjánek et al., 2010; Guillemot et al., 2021; Del Gaudio et al., 2021; Dietze et al., 2022; Chmiel et al., 2022; Селезнев и др., 2024* и другие]. В последние годы с развитием цифровой сейсморегистрирующей аппаратуры и методов обработки все больше внимания уделяется мониторингу микросейсмических шумов в регионах с проявлениями опасных экзогенных процессов – лавины, горные обвалы, селевые потоки и паводки [*van Herwijnen, Schweizer, 2011; Mainsant et al., 2012; Hussain et al., 2019; Le Breton et al., 2021; Лисейкин и др., 2023 и др.*].

Селевые потоки, как правило, возникают в бассейнах небольших горных рек во время интенсивного таяния снега или продолжительных ливневых дождей и могут быть крайне разрушительны. При движении селевого потока по руслу вследствие турбулентности потоков и соударений камней и обломков горных пород о стенки и дно русла возникают упругие колебания, которые могут быть зарегистрированы расположенными поблизости сейсмическими станциями. Исследования селевых потоков сейсмическими методами проводятся достаточно давно, в настоящее время в селеопасных районах устанавливаются системы сейсмического мониторинга, позволяющие оценить энергию, длительность, объем селевого потока и другие его параметры [*Коваленко и др., 1978; Bessason et al., 2007; Arattano et al., 2016* и другие].

Тункинская долина в Байкальской рифтовой системе также относится к районам с высокой селевой и паводковой опасностью [*Perov et al., 2017*] – последний катастрофический сель здесь сошел в 2014 г. по реке Кынграга и южным склонам Тункинских гольцов и представлял собой водокаменный поток по руслу реки и несколько грязекаменных потоков [*Makarov et al., 2016; Чечельницкий и др., 2018*], каждый год во время прохождения обильных дождей здесь также наблюдаются паводки [*Makarov et.al., 2016*]. С целью выявления характеристик микросейсмических шумов во время прохождения селевых потоков и паводков, и выделения возможных критериев их начала в работе проведен анализ записей короткопериодной сейсмической станции Аршан, расположенной на расстоянии 250 м от русла р. Кынгарга.

Исследуемый регион

Долина реки Кынгарги расположена в Восточном Саяне в пределах горного хребта Тункинские Гольцы (рис. 1, а). Это ледниково-эрозионные горы с вертикальным расчленением от 600 до 1200 м, формирование которых связано с подъемом плеча Тункинского рифта Байкальской рифтовой системы. Общая длина горной части долины р. Кынгарга составляет 7,35 км. Бассейн реки Кынгарга имеет два основных рукава, которые берут начало в ледниковых карах на высоте около 2578 м над уровнем моря. В верховьях ее притоков наблюдаются следы ледниковой деятельности. С абсолютной

высоты 1480–1520 м все притоки р. Кынгарга имеют V – образные долины, не имеющие свидетельств ледникового моделирования. Широкая в средней части, за 2 км до выхода с гор на равнинную часть долина реки резко сужается, превращаясь в каньонообразное ущелье, что препятствует свободному выносу твердого материала и приводит к его аккумуляции. Такое строение долины реки при высоких паводках может привести к эффекту кумуляции селевого процесса [*Агафонов, 1996*]. Установленные закономерности формирования флювиальных процессов и рельефа [*Wilford et al., 2004*] показывают, что в таких условиях в водосборном бассейне преобладающее развитие будут иметь паводки и водокаменные сели [*Kadetova et al., 2016*].

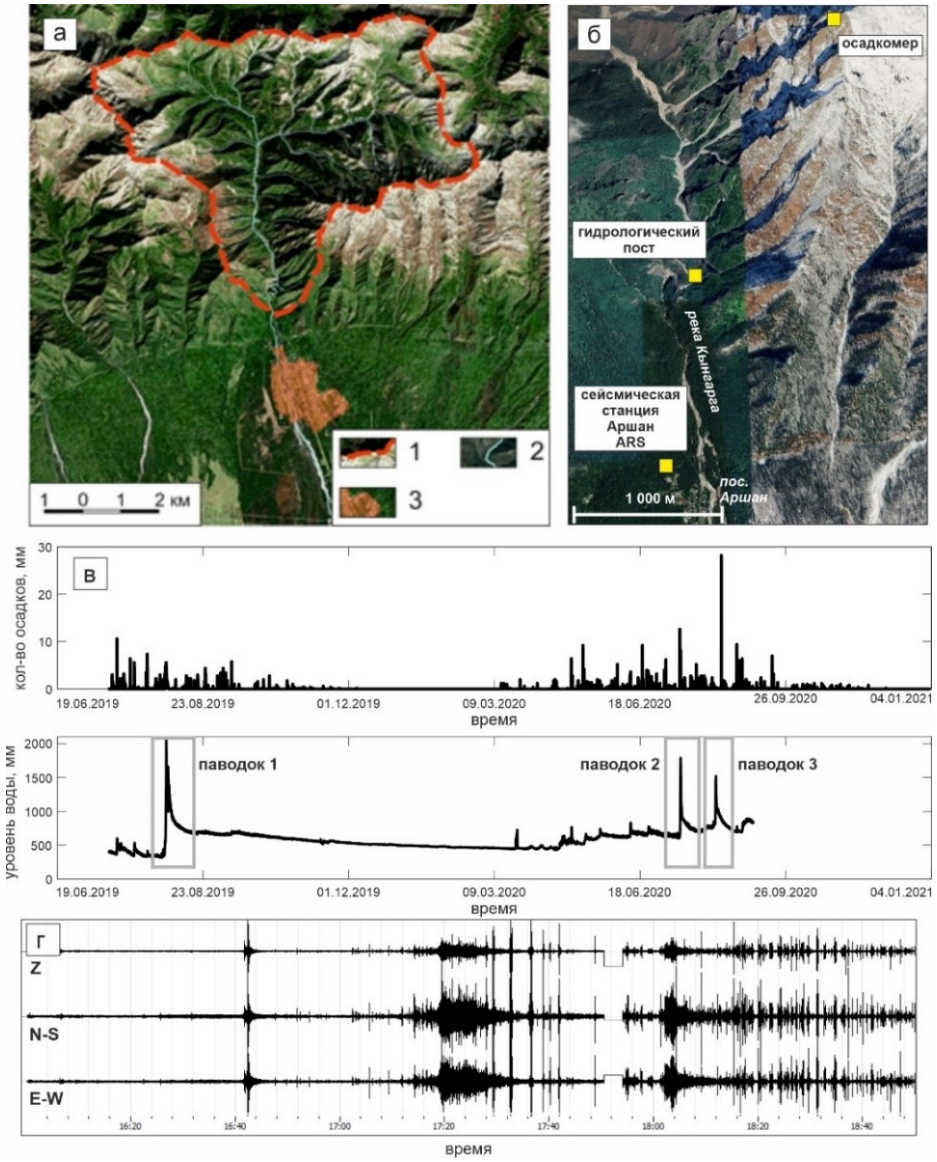


Рис. 1. Положение исследуемого района и схема водосборного бассейна (а) на космическом снимке Google Earth [*https://www.google.ru/intl/ru/earth/*] (1 – граница водосборного бассейна; 2 – водотоки; 3 – территория пос. Аршан); б – положение измерительных приборов; в – графики вариаций количества осадков (вверху) и уровня воды (внизу), серыми прямоугольниками выделены подъемы воды; г – запись селевого потока по р. Кынгарга в 2014 г. на станции ARS (Z – вертикальный канал, N-S, E-W – горизонтальные каналы)

Материалы и методы

В работе использовались данные непрерывной регистрации короткопериодной сейсмической станции «Аршан» (входит в состав региональной сети сейсмостанций

Байкальского филиала Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН», международный код станции ARS, международный код сети – BAGSR), расположенной на окраине поселка Аршан вблизи уступа Тункинских Гольцов на правом берегу р. Кынгарга (рис. 1, б). Расстояние от сейсмопавильона до русла реки составляет 250 м. Установленная на станции аппаратура имеет три короткопериодных сейсмометрических канала повышенной чувствительности N-S, E-W, Z, регистрирующие скорости колебаний (сейсмометры СМ-3). Рабочая полоса частот от 0,5 до 20 Гц. Также в работе использованы данные измерений уровня воды в р. Кынгарге и атмосферных осадков на Пике Любви, проводимых Институтом географии им. В.Б. Сочавы СО РАН с помощью современных систем мониторинга САМ-ГПР, САМ-ГО (разработаны Институтом мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск) (рис. 1, б). Расстояние от осадкомера на Пике Любви до гидропоста р. Кынгарга – пос. Аршан составляет 1,97 км. Гидрологический пост и метеопост расположены в горной части долины, тогда как сейсмостанция – в равнинной (Тункинская долина), поэтому дожди в долине не приводят к повышению количества осадков в пункте размещения осадкомера и уровня воды на посту, в отличие от дождей в горной области, что необходимо учитывать в дальнейшей работе.

На рис. 1, приведены вариации количества осадков на Пике Любви и уровня воды по данным гидрологического поста на реке Кынгарга за период с июня 2019 г. по январь 2021 г. На графике вариаций уровня воды хорошо видны 3 паводковых события – в июле 2019 г. (паводок 1) и в июле (паводок 2), и в августе (паводок 3) 2020 г. (рис. 1, в). Также отмечаются менее значимые подъемы уровня с конца марта 2020 г.

Нами проводился сравнительный анализ спектральных, спектрально-временных и поляризационных характеристик фонового микросейсмического шума и шума в период сильных паводков – паводки № 1–3 (рис. 1, в), а также записей сейсмических волн, сгенерированных селевыми потоками 2014 г. (рис. 1, г).

Результаты и обсуждение

По результатам спектрального анализа сейсмических шумов, зарегистрированных на станции ARS в зимний период, на всех трех компонентах выделяются четыре основных пика колебаний: широкий пик (№ 1) на низких частотах (0,5–1 Гц), относительно узкий пик (№ 2) с центральной частотой 2 Гц, широкий пик (№ 3) в частотном диапазоне от 4 до 10 Гц и узкий пик (№ 4) с центральной частотой 16 Гц (рис. 2). Низкочастотный пик связан с первичными и вторичными микросейсмами, генерируемыми волнением на озере Байкал (0,4–0,7 Гц и 0,7–1,5 Гц) [*Беседина и др., 2024*]. Пики № 2–4 в летний период сохраняются, при этом амплитуда пика № 3 значительно увеличивается (примерно в 2,6 раз и выше) и пики № 3 и 4 частично объединяются в один. Второй пик (центральная частота 2 Гц) может быть связан со строением верхней части разреза вблизи сейсмической станции (неоднородность, представляющая собой границу между двумя слоями разной плотности), в то время как третий пик (4–10 Гц) имеет явное сезонное происхождение. Анализ поляризационных диаграмм движения частиц в среде при прохождении сейсмических волн в частотном диапазоне 4–10 Гц (пик № 3) показывает, что движение в горизонтальных плоскостях не имеет единой выраженной ориентации колебаний в летний и в зимний периоды (рис. 2).

По результатам спектрального и поляризационного анализа можно заключить, что спектральный пик на частотах 4–10 Гц представляет собой излучение сейсмических волн в теплый период, генерируемых проходом водного потока по руслу реки Кынгарга. В зимний период при частичном замерзании реки этот пик становится значительно менее интенсивным. Таким образом, фоновые колебания микросейсмических шумов на станции Аршан в спокойном состоянии представляют собой наложение колебаний низких частот (до 1 Гц), связанных с микросейсмами оз. Байкал, постоянных колебаний с частотами 2 и 16 Гц, поляризованных в направлении восток-запад (пик № 2 с азимутами колебаний 50 ÷ 170° + π и пик № 4 с азимутами 80–130° + π), и колебаний в частотном диапазоне 4–10 Гц, связанных с течением воды по руслу р. Кынгарга.

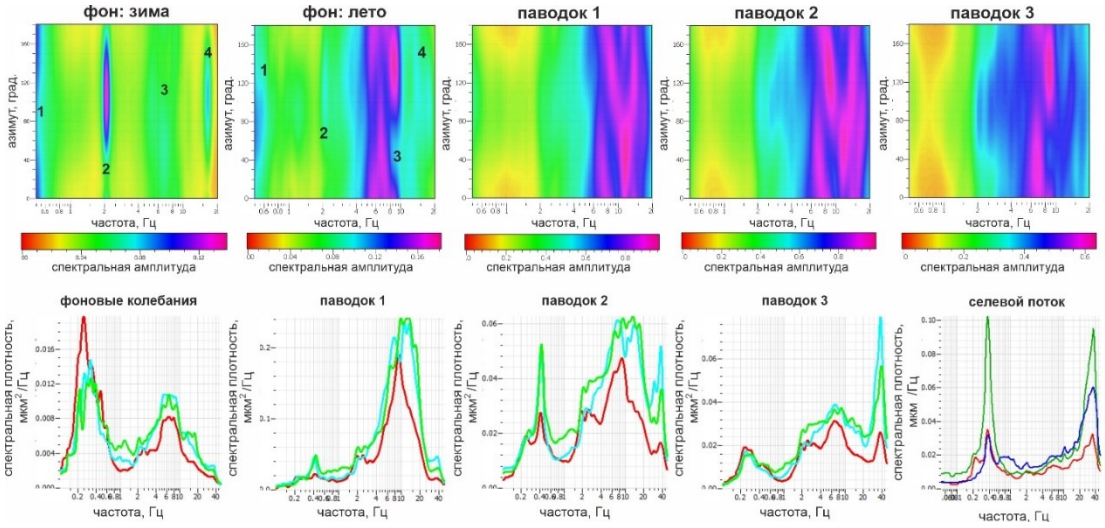


Рис. 2. Поляризационные диаграммы движения частиц в горизонтальной плоскости (вверху) и спектры (внизу), полученные на сейсмической станции Аршан в спокойном состоянии в зимний и летний периоды, при паводках и во время прохождения селевого потока

При прохождении большого объема воды (при паводках) высокочастотная составляющая микросейсмических волн значительно увеличивается (рис. 2). Пик на низких частотах (до 1 Гц) также сохраняется, но его амплитуда, хоть и увеличивается, но становится значительно меньше амплитуды высокочастотного пика (рис. 2). Для разных событий увеличение микросейсмических колебаний относительно фона значительно варьируется: для паводка № 1 максимальные амплитуды больше фона в 25 раз, для паводка № 2 – в 14 раз и для паводка № 3 – в 5 раз. Это связано с количеством водных масс, проходящих по руслу реки в единицу времени. Участок усиления колебаний при прохождении паводка представляет собой широкую полосу от 4 до 20 Гц с максимумом на горизонтальных компонентах. В отличие от фонового, излучения от водного потока, представляющего собой достаточно стабильные колебания в широком частотном диапазоне, при паводках наблюдаются временные вариации как амплитуд излучения, так и его частотного состава. Это связано с нестабильностью водного потока при прохождении паводка, а также включением помех различного происхождения. Максимум излучения для фоновых колебаний находится в области 4–10 Гц, в то время как для излучения в период поднятия воды он сдвигается в область высоких частот – до 20 Гц (рис. 2).

В результате прохождения селевого потока через пос. Аршан в 2014 г. была повреждена линия электропередач, поэтому сейсмическая станция «Аршан» работала с перебоями: с 18 ч 50 мин (27 июня) до 9 ч 45 мин (28 июня) и с 8 ч 47 мин (29 июня) по 7 ч 40 мин (30 июня). Здесь и далее приводится время UTC (местное время –8 ч). Хотя полностью весь ход селевого потока записать не удалось, на сейсмограммах присутствуют записи сейсмических событий, которые могут быть интепретированы как начало и окончание движение влекомых наносов (селевых масс) в водокаменном селе, ударов и пр. (рис. 1, г; 3).

На сейсмограммах за 27–29 июня 2014 г. зафиксировано три продолжительных сейсмических события длительностью 8–12 мин (участки I, II III на сейсмограмме, рис. 3), которые могут быть интерпретированы как движение влекомых наносов (каменных и грязекаменных масс) в селевом потоке. Спектр этих событий представлен высокочастотными колебаниями (22–48 Гц), также значительный вклад вносит низкочастотная составляющая – 0,35–0,45 Гц. Такое разделение спектра скоростей колебаний на две составляющие может быть объяснено наложением двух процессов – поток водных масс с образованием турбулентных потоков и удары твердой фракции селевого потока о дно и стенки русла. Поляризационный анализ сейсмических записей во время селевого потока показал преобладание северо-восточной или север-северо-

восточной ориентации колебаний при слабой выраженности колебаний в вертикальной плоскости (рис. 3). Это свидетельствует о том, что зарегистрированные сейсмические волны являются поверхностными волнами (преимущественно, это волны Лява, и, в меньшей степени, волны Рэлея и поверхностные волны типа рэлеевских). Так как в волнах Лява движение частиц перпендикулярно направлению распространения волны, то можно заключить, что источник возбуждения упругих колебаний находился на востоке – северо-востоке от сейсмической станции Аршан. Это направление соответствует пространственному положению изучаемых селевых потоков.

Интересно, что за приблизительно за 40 мин до прохождения селевых масс по руслу р. Кынгарга в пределах пос. Аршан на сейсмограмме наблюдается резкое импульсное увеличение амплитуды колебаний (рис. 3, фаза 1), за которым следует общее увеличение амплитуд сейсмического шума, сопровождающееся выраженной поляризацией колебаний в север-северо-восточном направлении (рис. 3, фаза 2). Фазу 1 логично связать с разрушением естественной плотины в русле реки, перекрывавшую накопленные селевые массы, вследствие размыва при выпадении большого количества атмосферных осадков, фазу 2 – с движением селевых масс в верховьях реки.

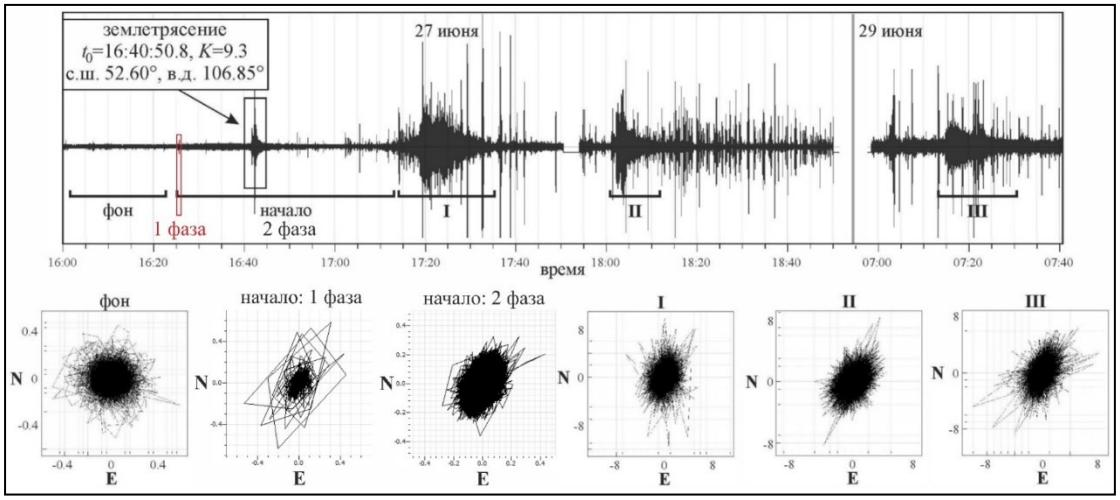


Рис. 3. Фрагменты сейсмограмм 27 и 29 июня 2014 г. Скобками показаны участки фоновых колебаний, начала селевой активности и записи движения селевых масс (I, II и III). Для отдельных участков внизу показаны диаграммы поляризации колебаний в горизонтальной плоскости. Прямоугольником выделено региональное землетрясение в районе Южного Байкала

Генерация сейсмических волн водным потоком происходит вследствие турбулентности, возникающей при течении потока по дну и вдоль бортов реки, а также при встрече потока с препятствиями (в случае русла реки Кынгарга – это валуны и крупные камни). В зимний период, когда р. Кынгарга покрыта толстым слоем льда, движение водных масс по руслу проходит в спокойном режиме с постоянной скоростью с минимальным образованием турбулентных потоков, и, соответственно, в спектре сейсмических волн исчезает пик в области высоких частот (рис. 2). В теплый период увеличивается уровень воды в русле за счет таяния снегов и выпадения атмосферных осадков, скорость течения увеличивается и возникают турбулентные волны, которые генерируют в спектре микросейсмических шумов усиление сейсмических волн в частотном диапазоне до 10 Гц (рис. 2). При прохождении больших объемов воды (паводки) также увеличиваются скорость потока и количество встречаемых потоком препятствий, что приводит к усилению турбулентности, вследствие чего происходит изменение амплитудно-частотного состава микросейсмических колебаний, выражающееся в появлении высокоамплитудного пика в области частот от 4 до 20 Гц (рис. 2). При прохождении селевых потоков на сейсмограммах наблюдается разделение спектра сейсмических колебаний на две составляющие, связанные с двумя процессами –

поток водных масс с образованием турбулентных потоков и удары твердой фракции селевого потока о дно и стенки русла (рис. 3).

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено следующее.

1. Микросейсмические колебания, зарегистрированные на станции Аршан, не стабильны во времени и имеют значительные вариации, связанные с сезоном. В теплые периоды при таянии ледового покрова и увеличении уровня воды в реке Кынгарга наблюдается усиление сейсмических колебаний в области частот от 4 до 10 Гц.
2. Выпадение обильных жидких атмосферных осадков и следующий за ним значительный подъем воды в реке Кынгарга приводят к изменению амплитудно-частотного состава микросейсмических шумов – усилению колебаний в частотном диапазоне от 4 до 20 Гц с максимумом излучения в области частот 6–10 Гц. Для разных событий это увеличение значительно варьируется и зависит от количества водных масс, проходящих по руслу реки в единицу времени.
3. Изменение амплитудно-частотного состава микросейсмических колебаний в летний период относительно зимнего, а также во время паводков относительно меженных уровней происходит в результате увеличения турбулентности потока при возрастании скорости течения, расходов воды и наносов.
4. Диаграммы движения частиц в среде в спокойном состоянии и при паводках не показывают какой-либо доминирующей ориентации колебаний, что связано с протяженностью источника колебаний, представляющего собой все русло реки.
5. При прохождении селевого потока на сейсмограммах наблюдается разделение спектра сейсмических колебаний на две составляющие, связанные с двумя процессами – поток водных масс с образованием турбулентных потоков и удары твердой фракции селевого потока о дно и стенки русла.
6. Диаграммы движения частиц в среде при прохождении селевого потока показывают резкую смену направления колебаний с доминирующей ориентацией, указывающей направление на источник возмущений.
7. Начало разрушения естественной плотины и движения селевых масс фиксируется на сейсмической записи за достаточно большой промежуток времени до прохода селевого потока через пункт регистрации, в нашем случае этот промежуток составил порядка 40 мин.

На основе полученных результатов нами предлагается система монитроинга и экстреного оповещения о сходе селевого потока. Система состоит из комплекса оборудования, позволяющего контролировать условия формирования селевого потока, уровень и концентрацию твердой составляющей в водном/селевом потоке, осуществлять передачу данных на вычислительную станцию и при достижении критических значений (фиксирующих формирование селевого потока) подавать сигналы предупреждения об угрозе схода селевого потока.

В комплекс системы должно входить следующее оборудование:

- метеостанция для измерения и контроля климатических селеформирующих условий (температура, осадки, влажность);
- сейсмические станции для определения начала повышения уровня воды и движения селевых масс;
- фотоловушки/видеокамеры для визуального контроля водного/селевого потока и русла селеопасной реки;
- уровнемер для контроля уровня водного/селевого потока;
- телеметрическая станция для сбора и передачи данных на вычислительную станцию;
- вычислительная станция для анализа контрольных параметров селеформирующих условий, характеристике водного/селевого потока и подачи сигнала о формировании селевого потока на систему оповещения;
- система оповещения для сигнализации органов местного самоуправления, органов ГО и ЧС, а так же населения о селевой ургрозе.

Принципиальная схема размещения элементов системы предупреждения представлена на рис. 4.

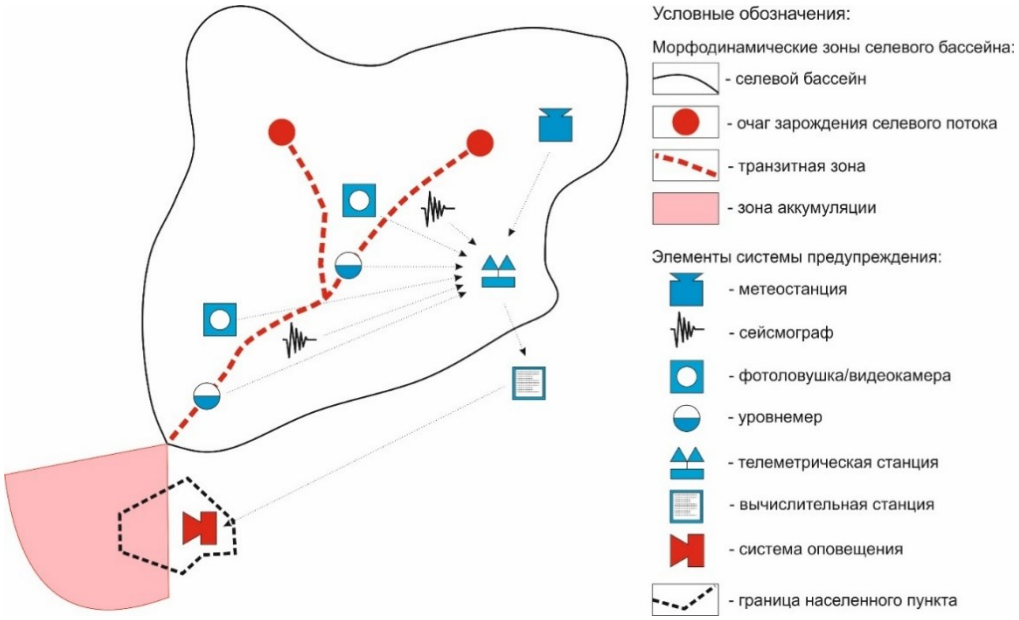


Рис. 4. Принципиальная схема размещения элементов системы предупреждения о селевой опасности

Техническая сущность системы предупреждения заключается в следующем: при отсутствии переменных локальных источников возбуждения сейсмических колебаний состав и уровень микросейсмического шума остаются постоянными, а поляризация колебаний в микросейсмической волне вследствие сложения сейсмических колебаний разной природы и пришедших из разных азимутов на сейсмическую станцию не имеет четко выраженной ориентации. При движении селевого потока по руслу из-за турбулентности потоков и соударений в горных породах возникают упругие колебания, которые регистрируются сейсмическими станциями и вызывают увеличение уровня и спектрального состава и поляризации микросейсмического шума.

По результатам анализа инструментально регистрируемых сейсмических параметров и последующей обработки полученных данных, в качестве прогнозного параметра выбраны вариации поляризации и изменение спектрального состава микросейсмических колебаний, являющиеся следствием возникновения упругих колебаний при прохождении селевого потока. Использование данного прогнозного параметра в значительной степени повышает достоверность определения приближения селевого потока, т.к. микросейсмические колебания регистрируются в каждой точке Земли и отражают текущее состояние геофизической системы и его изменения.

Следует отметить, что оборудование системы предупреждения не имеет прямого (механического) контакта с селевым потоком, это позволяет системе сохранять работоспособность при прохождении селевого потока.

Благодарности и финансирование

Исследование выполнено с использованием данных, полученных на УНУ СИЗК МАК (уникальная научная установка «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира»).

В работе использовался программный комплекс Geopsy, разработанный в ходе реализации общеевропейского проекта SESAME, направленного на разработку критериев, методов и инструментов анализа микросейсмических колебаний разной природы [*Wathelet et al., 2020*].

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

Список литературы

Агафонов Б.П. Кумулятивные сели в Прибайкалье // Геоморфология. – 1996. – № 2. – С. 27–36.

Беседина А.Н., Тубанов Ц.А., Предеин П.А., Санжиева Д.П., Иванченко Г.Н. Особенности микросейсм озера Байкал по данным сети сейсмических станций // Физика Земли. – 2024. – № 3. – С. 30–50.

Коваленко П.И., Красюков В.А., Новиков М.Я., Степанов Б.С. Результаты испытаний сейсмической системы оповещения о селевой опасности // Селевые потоки: сб. 3. – М.: Гидрометеоиздат, 1978. – С. 92–96.

Чечельницкий В.В., Макаров С.А., Добрынина А.А. Прохождение катастрофического водокаменного селя на реке Кынгарга (Республика Бурятия) 27–29 июня 2014 г. по сейсмическим данным // Доклады Академии наук. 2018. – Т. 481. – № 6. С. 675–679.

Ярошевич М.И., Ингель Л.Х., Лысенко Д.А. Сейсмические проявления атмосферных процессов // Научное обозрение. Технические науки. 2016. – № 5. – С. 103–115.

Arattano M., Coviello V., Abancó C., Hürlimann M., McArdell B.W. Methods of data processing for debris flow seismic warning // International Journal of Erosion Control Engineering. – 2016. – Vol. 9, No. 3. – P. 114–121.

Bessason B., Eiríksson G., Thórarinsson O., Thórarinsson A., Einarsson S. Automatic detection of avalanches and debris flows by seismic methods // Journal of Glaciology. – 2007. – Vol. 53, No. 182. – P. 461–472.

Burjánek J., Gassner-Stamm G., Poggi V., Moore J.R., Fäh D. Ambient vibration analysis of an unstable mountain slope // Geophysical Journal International. – 2010. – Vol. 180, No. 2. – P. 820–828.

Chmiel M., Godano M., Piantini M., Brigode P., Gimbert F., Bakker M., Courboulex F., Ampuero J.-P., Rivet D., Sladen A., Ambrois D., Chapuis M. Brief communication: Seismological analysis of flood dynamics and hydrologically triggered earthquake swarms associated with Storm Alex // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2022. – Vol. 22. – P. 1541–1558.

Del Gaudio V., Wasowski J., Hu W. Ambient noise and ERT data provide insights into the structure of co-seismic rock avalanche deposits in Sichuan (China) // Bull Eng Geol Environ. – 2021. – Vol. 80. – P. 7153–7170.

Dietze M., Hoffmann T., Bell R., Schrott L., Hovius N. A seismic approach to flood detection and characterization in upland catchments // Geophysical Research Letters. – 2022. – Vol. 49. – e2022GL100170.

Guillemot A., van Herwijnen A., Larose E., Mayer S., Baillet L. Effect of snowfall on changes in relative seismic velocity measured by ambient noise correlation // The Cryosphere. – 2021. – Vol. 15. – P. 5805–5817.

Hussain Y., Martinez-Carvajal H., Condori C., Uagoda R., Cárdenas-Soto M., Cavalcante A.L.B., Cunha L.S. da, Martino S. Ambient Seismic Noise: a continuous source for the dynamic monitoring of landslides // Terræ Didatica. – 2019. – Vol. 15, No. 1–5. – e01001.

Kadetova A.V., Rybchenko A.A., Kozyreva E.A., Tie Y., Ni H. Debris flow event of 2014 and its impact on the accumulation of the solid fraction in the Kyngarga river channel, Tunka valley, South-western Cisbaikalia, Russia // Geodynamics & Tectonophysics. – 2016. Vol. 7, No. 2. – P. 329–335. – DOI: 10.5800/GT-2016-7-2-0210.

Le Breton M., Bontemps N., Guillemot A., Baillet L., Larose E. Landslide monitoring using seismic ambient noise correlation: challenges and applications // Earth-Science Reviews. – 2021. – Vol. 216. – P. 103518.

Mainsant G., Larose E., Brönnimann C., Jongmans D., Michoud C., Jaboyedoff M. Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction // J. Geophys. Res. – 2021. – Vol. 117. – F01030.

Makarov S., Cherkashina A., Atutova Zh., Bardash A., Voropai N., Kichigina N., Mutin B., Osipova O., Ukhova N. Debris Flows of the Tunkinsky Goltsy Mountains (Tunkinsky District, Republic of Buryatia in Eastern Siberia) // International Journal of Geohazards and Environment. – 2016. – Vol. 2, No. 3. – P. 166–179.

Perov V., Chernomorets S., Budarina O., Savernyuk E., Leontyeva T. Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events // Natural Hazards. – 2017. – Vol. 88. – P. 199–235.

van Herwijnen A., Schweizer J. Monitoring avalanche activity using a seismic sensor // Cold Regions Science and Technology. – 2011. – Vol. 69, No. 2–3. – P. 165–176.

Wathelet M., Chatelain J.-L., Cornou C., Di Giulio G., Guillier B., Ohrnberger M., Savvaidis A. Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing // Seismological Research Letters. – 2020. – Vol. 91, No. 3. – P. 1878–1889.

Wilford D.J., Sakals M.E., Innes J.L., Sidle R.C., Bergerud W.A. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics // Landslides. – 2004. – Vol. 1, No. 1. – P. 61–66.

Подледниковые дренажные системы как зоны зарождения селей (бассейны рек Адылсу и Герхожансу, Центральный Кавказ)

М.Д. Докукин

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

Аннотация. Приводятся результаты анализа разновременных аэрофотоснимков 1957, 1960, 1965, 1973 гг., материалов видеосъёмок 1999 и 2000 гг., аэровизуальных и наземных обследований участков ледников Башкара и Каярты в долинах рек Адылсу и Герхожансу с проявлениями селевых процессов и данных публикаций. Показано, что прорывы озера Башкара в 1958 и 1959 гг. происходили по подледниковому каналу ледника Башкара, а прорыв 1960 г. – по поверхности ледника с блокировкой подледникового канала селевыми отложениями. Прорыв озера Башкара в 2017 г. был вызван ливнями, сток которых аккумулировался в полости массива мёртвого льда с дальнейшим её прорывом и прохождением селевой волны по озеру с размывом моренного вала в проране ниже озера. Селевые потоки 1960–1962 гг. по р. Герхожансу формировались в результате водных импульсов от прорыва подледникового озера в левом цирке ледника Каярты и развития подледникового канала стока талых вод. Селевые потоки 1999, 2000, 2011, 2017 и 2022 гг. были связаны с прорывами подледникового водоёма в верхнем цирке ледника Каярты по подледниковому каналу в левом языке ледника. Сделан вывод о возможном формировании паводка с ледника Большой Азау, на поверхности которого образовались воронки, в которые уходит поверхностный сток с ледника и проходит по подледниковому каналу.

Ключевые слова: *аэрофотоснимок, ледник, подледниковый канал, подледниковое озеро, водный импульс, селевой поток*

Ссылка для цитирования: Докукин М.Д. Подледниковые дренажные системы как зоны зарождения селей (бассейны рек Адылсу и Герхожансу, Центральный Кавказ). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 111–121.

Subglacial drainage systems as debris flow origination zones (basins of the Adylsu and Gerhozhansu rivers, Central Caucasus)

M.D. Dokukin

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

Abstract. The results of the analysis of various aerial photographs from 1957, 1960, 1965, 1973, video footage from 1999 and 2000, aerial and ground surveys of sections of the Bashkara and Kayarta glaciers in the valleys of the Adylsu and Gerhozhansu rivers with manifestations of debris flow processes and publication data are presented. It is shown that the Bashkara Lake outbursts in 1958 and 1959 occurred along the subglacial channel of the Bashkara glacier, and the outburst in 1960 occurred along the surface of the glacier with debris flow deposits blocking the subglacial channel. Bashkara Lake outburst in 2017 was caused by heavy rains, the runoff of which accumulated in the cavity of the dead ice massif with its further outburst and the passage of a debris flow wave through the lake with the erosion of the moraine shaft in the hole below the lake. The debris flows of 1960–1962 along the Gerhozhansu River were formed as a result of water impulses from the outburst of a subglacial lake in the left cirque of the Kayarta glacier and the development of a subglacial meltwater runoff channel. Debris flows in 1999, 2000, 2011, 2017, and 2022 were associated with outbursts of a subglacial reservoir in the upper cirque of the Kayarta glacier through a subglacial channel in the left tongue of the glacier. A conclusion is made

about the possible formation of a flood from the Bolshoy Azau glacier, on the surface of which funnels have formed, into which surface runoff from the glacier leaves and passes through a subglacial channel.

Key words: *aerial view, glacier, subglacial channel, subglacial lake, water impulse, debris flow*

Cite this article: Dokukin M.D. Subglacial drainage systems as debris flow origination zones (basins of the Adylsu and Gerhozhansu rivers, Central Caucasus). In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 111–121.

Введение

Из всех типов селей наиболее разрушительными являются гляциальные сели, водная составляющая которых образуется преимущественно за счёт талых ледниковых вод и формирование связано с нарушением устойчивости ледниково-моренных комплексов [*Гляциологический словарь, 1984*]. Селевые потоки у концов современных ледников зарождаются вследствие прорыва приледниковых озер и внутриледниковых емкостей или обрушения моренных и фирново-ледяных масс [*Перов, 2012*]. В пределах ледников талые воды стекают по дренажным системам в основном двух типов: канализированные (древовидные) или неканализированные (распределённые) системы. Быстрые дренажные системы образуют каналы стока, связанные с поверхностными водотоками, к медленным относятся подледниковые полости, плёнка воды на ложе, каналы, врезанные в ложе ледника, и вода в подледниковых отложениях. Подледниковые полости возникают там, где лёд отделяется от ложа. Образованию полости способствуют быстрое скольжение и шероховатость ложа [*Hubbard, 2011; Глазовский, Мачерет, 2014*].

Отличительной особенностью гляциальных паводков и селей является то, что они образуются вследствие существенно нелинейной реакции ледникового бассейна на гидрометеорологические условия или независимо от них, и по сравнению с многочисленными случаями прорывов ледниковых озёр весьма мало информации о прорывах ледниковых полостей в активном льду и в мёртвом льду [*Голубев, 1976; Виноградов, 1977*].

На Центральном Кавказе наиболее известны гляциальные сели в долине р. Герхожансу (1960, 1961, 1962, 1999, 2000, 2011, 2017, 2022 гг.) и в долине р. Адылсу (прорывы озёр 1958, 1959, 1960, 2017). Относительно причин и механизмов этих селей у исследователей существуют различные мнения. В настоящей статье автор попытался охарактеризовать особенности зон зарождения селей рр. Герхожансу и Адылсу.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены на основе дешифрирования аэрофотоснимков и космических снимков, анализа фотографий и видеороликов вертолётных облётов и маршрутных обследований. В работе использованы аэрофотоснимки 1957, 1960, 1965, 1973 гг., вертолётные снимки автора, а также материалы наземных обследований. С сайта https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/ получены космические снимки Sentinel-2 (разрешением 10 м). Очень важными для работы были видеоматериалы вертолётных съёмок Главного управления (далее ГУ) МЧС России по Кабардино-Балкарской Республике (далее КБР) 1999 и 2000 гг. Аэрофотоснимки сканировались и затем привязывались в программе ArcMap по опорным точкам к космоснимкам, которые были взаимоувязаны между собой в системе координат WGS84 в проекции UTM. Некоторые фотографии вертолётных облётов также ортотрансформировались (привязывались к космоснимкам), наземные фотографии привязывались друг к другу.

Результаты исследования

Особенности прорывов озера Башкара в долине р. Адылсу

В работе [*Сейнова, Золотарев, 2001*] приведены даты прорывов озера Башкара, образовавшегося в 40-х годах XX в. – 08.08.1958, 05.08.1959, октябрь 1960 г., сделано предположение, что прорывы могли происходить как поверхностным, так и подледным путём, объём водного импульса при прорыве оценивался 60 тыс. м^3. На рис. 1 на фрагментах аэрофотоснимков показаны границы озера Башкара в 1957, 1960 и 1965 гг.

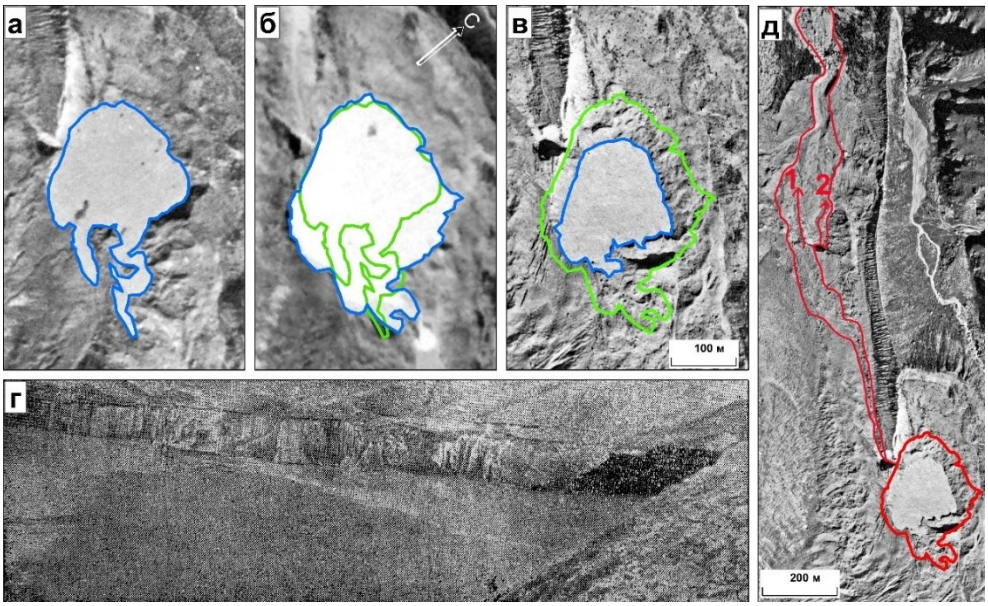


Рис. 1. Озеро Башкара в разные годы до и после прорывов: а – аэрофотоснимок 10.08.1957, б – аэрофотоснимок 05.09.1960, в – аэрофотоснимок август 1965 г., г – фото И. Черванева, август 1958 г. после прорыва озера [*Ковалев, 1961*], д – аэрофотоснимок август 1965 г. (уменьшенный масштаб). Салатные линии – контуры озера с предыдущего фрагмента. Красные линии – зона поражения селевым потоком от прорыва озера 1960 г. и контур озера до прорыва. Стрелками показаны: 1 – направление основного потока прорывного паводка, 2 – направление вторичного потока после прорыва блокировки подлёдного канала

В работе [*Докукин и др., 2020а*] сделан вывод, что уровень озера Башкара был практически одинаков в 1957 г. перед прорывами 1958 и 1959 гг. и после этих прорывов (см. рис. 1, а, б). Это можно объяснить тем, что каналы стока воды формировались в теле ледника Башкара (ледяной плотине озера, см. рис. 1, г [*Ковалев, 1961*]). Но после сброса воды из озера ещё не до конца сформировавшийся подледниковый канал закрывался из-за движения ледника, и уровень воды затем восстанавливался. За счёт интенсивного таяния мёртвого льда, ограничивавшего озеро с юго-востока, площадь озера с 1957 по 1960 гг. увеличилась с 38 тыс. м^2 до 60 тыс. м^2. Уровень озера упал после прорыва 1960 г. (на рис. 1, б показано озеро до прорыва) примерно на 10 м и площадь озера уменьшилась до 24 тыс. м^2 (рис. 1, в). Скорее всего, это было связано с размывом дна прорана в результате схода селевой волны по озеру вследствие сброса воды, накопившейся в массиве мёртвого льда выше озера. Прорыв озера в 1960 г. был масштабнее, чем в 1958 и 1959 гг. и было сброшено воды около 300 тыс. м^3. В результате ниже ледника Башкара были следы размывов и отложения селевого материала. На языке ледника также обнаружены следы селевого потока – сначала в ложбине между ледником и склоном морены и далее на поверхности ледника (см. рис. 1, д). Следовательно, прорывной паводок и селевой поток в 1960 г. проходил по поверхности ледника, как и в 2017 г. [*Черноморец и др., 2018].* Но при этом селевыми отложениями действующий подледниковый канал был заблокирован, и накопившаяся в нём вода прорвалась из-под

ледника с новой волной паводка и селевого потока (см. рис. 1, д – стрелка № 2) на участке правее основного истока реки, и граница ледника здесь стала особенно чёткой.

В период 1960–1990 гг. уровень озера был стабилен, как и подлёдный канал стока воды из озера, пока в середине 1990-х гг. не произошла подвижка ледника, и участок истока воды из озера Башкара заблокировался моренным валом [*Докукин и др., 2020а*]. Уровень озера Башкара испытывал ежегодные колебания из-за того, что вода из озера стекала по подземным фильтрационным каналам, которые зимой замерзали, и вода весной и ранним летом заполняла котловину в условиях отсутствия стока из неё. Прорывной селевой процесс произошёл 1 сентября 2017 г. в результате выпадения аномальных осадков. Первоначально механизм прорыва объяснялся сдвигом переувлажнённых масс моренной перемычки озера с последующей донной эрозией [*Черноморец и др., 2018*]. Но при детальном изучении материалов космосъёмок и аэровизуальных наблюдений был сделан вывод о том, что прорыв озера произошёл в результате размыва моренного вала селевой волной от прорыва накопившихся водных масс атмосферных осадков и талых ледниковых вод в пределах массива мёртвого льда [*Докукин и др., 2020а*].

На рис. 2 (фрагмент а) показаны участки образования водных и селевых потоков на поверхности ледника и поглощения их внутри массива мёртвых льдов (№ 1) и участок притока воды в озеро (№ 2; фрагменты б, в).

Как видно из рис. 2 вследствие выпадения аномальных ливневых осадков на склоне правой береговой морены и в верховьях цирка ледника Башкара образовались водные и селевые потоки, которые сконцентрировались в одно русло и далее ушли внутрь массива мёртвого льда протяжённостью около 230 м (см. рис. 2, а, участок № 1). Ниже изнутри массива мёртвого льда вышел селевой поток, который врезался на глубину 3-4 м в моренные отложения и в дельту притока воды в озеро (см. рис. 2, б, в) и образовал конус выноса (новую дельту). Это был прорывной селевой импульс, который вызвал селевую волну на озере. Эта волна вышла на участок прорана (моренной перемычки) в виде селевого потока и врезалась в него, что вызвало быстрый сброс воды из озера. и падение уровня на 16,5 м. Далее по леднику прошёл селевой поток с расходом порядка 500 м^3/с [*Черноморец и др., 2018*].

Особенности зоны зарождения селей р. Герхожансу (Каяартысу)

Селевой бассейн р. Герхожансу является одним из самых активных и разрушительных на Центральном Кавказе и ему посвящено большое количество публикаций: гляциальным селевым потокам 1960, 1961 и 1962 гг. [*Тушинский и др., 1966; Герасимов, 1967 и др.*], 1999 и 2000 гг. разделы в публикациях [*Сейнова, Золотарев, 2001; Запорожченко, 2002; Крыленко и др., 2004; Черноморец, 2005 и др.*]. Гляциальным селевым потокам 2011, 2017 и 2022 гг. посвящены работы [*Докукин и др., 2012; Докукин и др. 2018; Беккиев и др., 2023*]. Обобщение по механизмам формирования гляциальных селей сделано в работе [*Докукин и др., 2020б*], одним из основных выводов которой является представление о прорывах подледниковых озёр в цирке ледника Каярты (Каяартыбаши) как причинах водных импульсов селей 1960-х, 1999, 2000, 2011 и 2017 гг.

Были проанализированы видеоматериалы вертолётных облётов ГУ МЧС России по КБР 1999 и 2000 гг. и сделан вывод, что после селя 20.08.1999 и после первой волны селей 2000 г. происходила донная эрозия верхнего и нижнего моренных каньонов без обрушений и оползаний склонов. На рис. 3 представлены кадры видеосъёмок, где видно значительное углубление русла в верхнем моренном каньоне – склоновые оползания и обрушения прошли позже. Такое развитие селевого процесса свидетельствовало о первичном мощном водном импульсе.

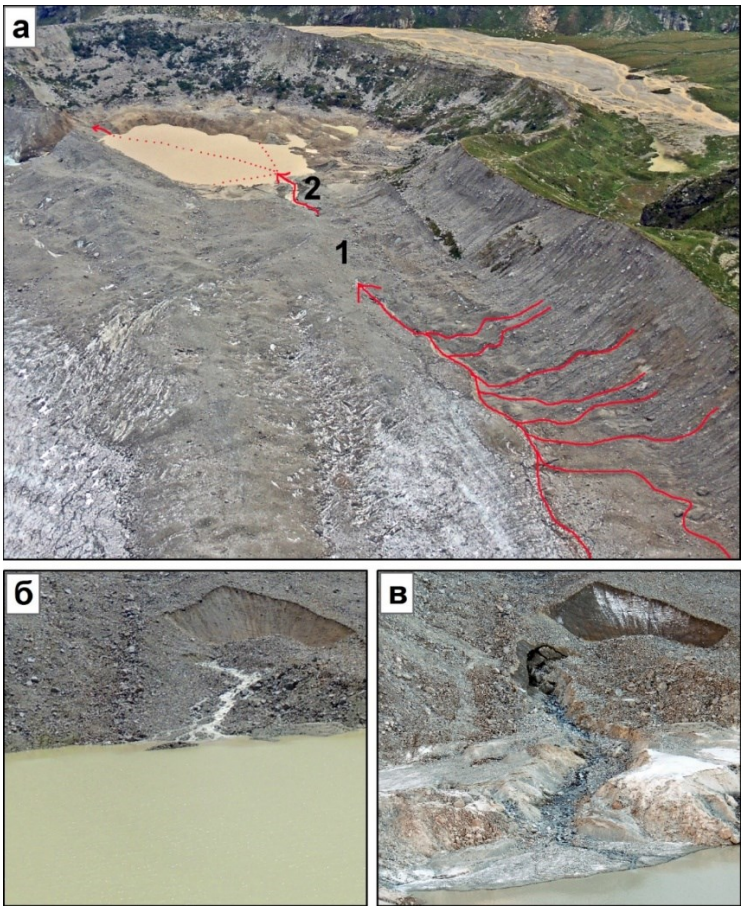


Рис. 2. Зона формирования селевого потока, вызвавшего селевую волну на озере Башкара 01.09.2027: а – вертолётный снимок 01.09.2017, б – наземный снимок 28.07.2017, в – наземный снимок 09.10.2017. 1 – участок накопления воды в массиве мёртвого льда, 2 – участок притока воды в озеро (см. фрагменты б, в). Фото М.Д. Докукина

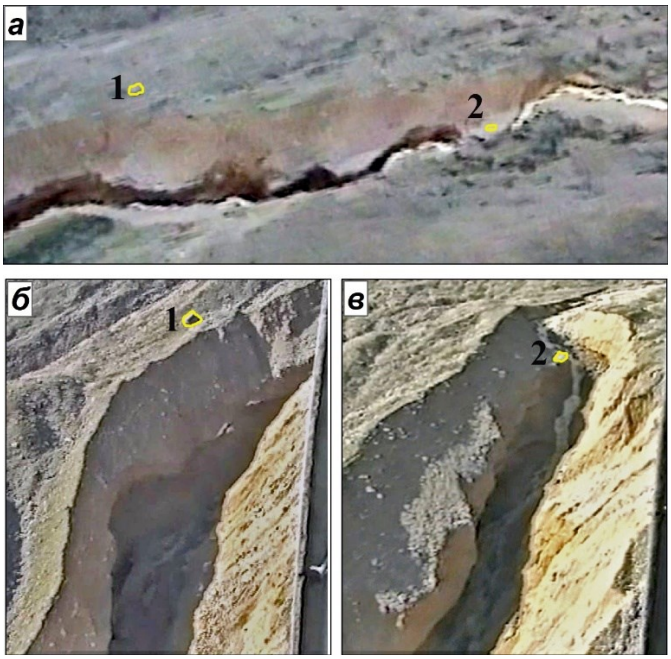


Рис. 3. Следы донной эрозии на участке верхнего моренного каньона р. Каяартысу после селя 1999 г. и после первой волны селей 2000 г.: а – кадр видеосъёмки 1999 г.; б, в – кадры видеосъёмки 19.07.2000 Точками 1 и 2 обозначены одни и те же участки моренного каньона на кадрах 1999 и 2000 гг.

В работе [*Запорожченко, 2002*] причина начального импульса селя 2000 г. охарактеризована как поступление на склоны конечной морены стадии Фернау концентрированных водных потоков, которые образовались прорывом или сосредоточенным свалом водных масс, накапливающихся в широких «ровных площадках» (зандрах, озёрных впадинах зандрового типа) в результате интенсивного таяния ледников.

В работах [*Сейнова, Золотарев, 2001; Крыленко и др., 2004; Черноморец, 2005*] причина схода селей 1999 и 2000 гг. обозначена как «сброс внутриледниковых вод», «резкая разгрузка внутриледниковых полостей». Объём полости оценивался в 10–30 тыс. м^3 [*Черноморец, 2005*].

Предположение о том, как накапливалась вода в леднике, и как прорывалась было сделано на примере выявленных следов водного импульса селя 03.08.2011 в работе [*Докукин и др., 2012*]. Поток талых ледниковых вод вырвался на поверхность ледника Каярты на участке между восточным и западным языками (рис. 4). Далее он разделился и продолжил движение под грядой боковой морены, по поверхности ледника и в подледниковом канале. Свод подледникового канала на нескольких участках был разбит трещинами, ориентированными диагонально относительно направления потока. Поток то выходил в местах обрушения свода на поверхность ледника, то снова нырял под лед. В конце подледникового канала был грот, как и в 2000 г., что отмечено в работе [*Черноморец и др., 2005*].

Рис. 4. Участок ледника Каярты между левым и правым языками, где на поверхность вырвался поток талых ледниковых вод. Фото М.Д. Докукина 15.08.2011 г. Красными линиями показаны пути движения талых ледниковых вод

Анализ селепроявлений 1999–2017 гг. позволил сделать вывод о том, что в верхнем цирке ледника Каярты периодически в периоды интенсивной абляции под ледником аккумулировались большие объёмы воды, сброс которых становился причиной схода катастрофических селей в 1999, 2000, 2011 и 2017 гг. Накоплению воды способствовала система подледниковых ригелей [*Докукин и др., 2020б*]. Участок аккумуляции талых ледниковых вод в верхнем цирке ледника Каярты на рис. 5 отмечен цифрой № 3. Его предполагаемая площадь – около 115 тыс. м^2.

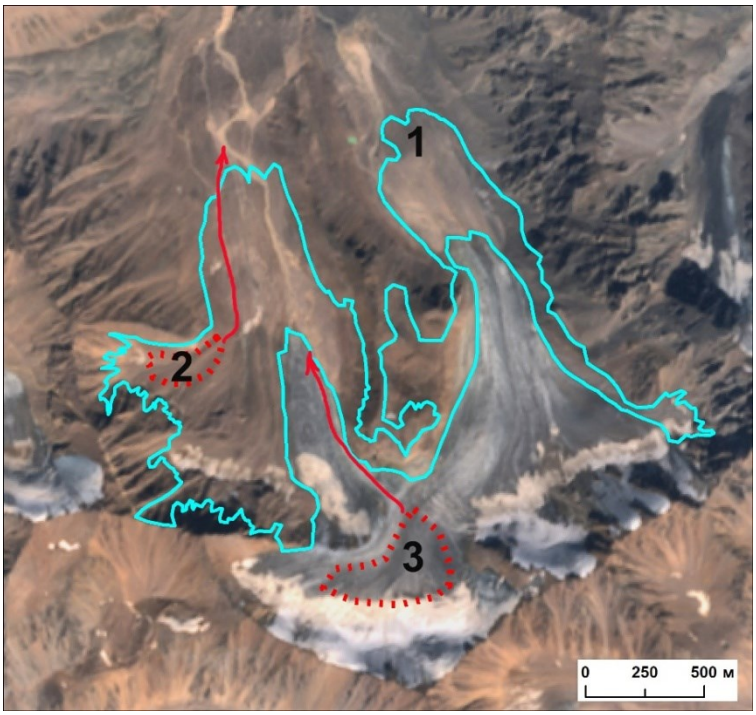


Рис. 5. Схема расположения участков водных импульсов гляциальных селей р. Каяартысу на космоснимке Sentinel-2 30.08.2023. 1 – граница ледника в 1957 г., 2 – участок водных импульсов селей 1960-1962 гг., 3 – участок водных импульсов селей 1999, 2000, 2011, 2017 и 2022 гг.

Так как накопление воды происходило на участке области аккумуляции ледника, то условия для формирования подледниковых озер складывались довольно редко, когда верхний цирк ледника освобождался от снежного покрова. Для сброса воды из подледниковых озёр необходимо формирование подлёдной дренажной системы из верхнего цирка ледника, которая существует не каждый год и формируется примерно за двухлетний период. Сель 2011 г. сошёл после периода максимальных температур в 2010 г. и сель 2017 г. – после максимальных температур в 2016 г.

В разные годы в подледниковых условиях накапливались различные объёмы воды. Но вследствие того, что подледниковые каналы стока имели примерно одинаковое сечение, расходы воды потоков, как показали сравнения фотографий на участке верхнего гранитного ущелья, были одинаковые [*Докукин и др., 2012; Докукин и др., 2018; Беккиев и др., 2023*]. Различалась продолжительность водных импульсов. От этого зависела активность склоновых процессов в моренных каньонах. При максимальном объёме начального водного импульса в 2000 г. общая продолжительность селевого процесса, связанного с глубоким врезанием в дно нижнего моренного каньона (до 30 и более м), составила неделю (18–25 июля).

По аналогии селевыми процессами, вызванными водными импульсами с верхнего цирка ледника Каярты в 1999–2022 гг., были рассмотрены условия формирования селей 1960–1962 гг. На рис. 5 показан участок предполагаемого формирования водных импульсов (обозначение 2).

Относительно причин селей 1960-х гг. были различные мнения: 1) сель 1960 г. произошёл в результате прорыва озера ниже правого (восточного) языка ледника Каярты [*Запорожченко, 2002*]; 2) селевые потоки были вызваны интенсивным таянием ледников и оплывинами на участках морен ниже левого (западного) языка ледника [*Герасимов, 1967*]; 3) в верховьях р. Каяартысу не было озёр и не было признаков прорывов подледниковых пустот, и причиной селей была аккумуляция и последующий спуск огромного количества воды в результате образования «кружевной» поверхности ледника [*Тушинский и др., 1966*]; 4) образование селей связано с индивидуальными

особенностями деградации моренно-ледниковой системы в верховьях бассейна р. Герхожансу [*Сейнова, Золотарев, 2001*].

Автором был проведён сравнительный анализ аэрофотоснимков 1957 и 1973 гг. и определён участок зарождения селей 1960-х гг. у конца левого (западного) языка ледника Каярты (рис. 6). Были выявлены селепроявления в виде русел и селевых отложений, начинающихся у конца левой части левого языка ледника, что соответствовало предполагаемому подлёдному каналу прорывов подледникового озера в левом цирке ледника Каярты (см. рис. 5, обозначение 2).

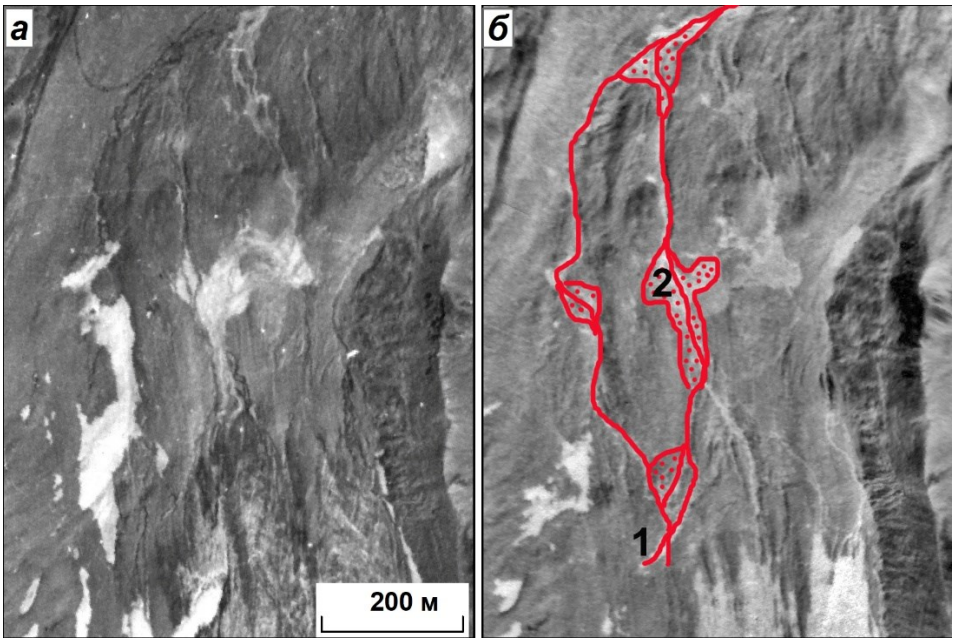


Рис. 6. Селепроявления 1960-х гг. в верховьях левого истока р. Каяартысу: а – аэрофотоснимок 1957 г., б – аэрофотоснимок 1973 г. 1 – селевые русла, 2 – селевые отложения

Кроме этого, перед правым языком ледника свежих селепроявлений не выявлено. На аэрофотоснимке 1957 г. обнаружены следы более старых оплывин с левой террасовидной береговой морены правого языка ледника, массы которых могли быть плотиной водному потоку с правого языка ледника и причиной формирования озера, которое, возможно, прорвалось в 1934 г. [*Докукин и др., 2020а*].

Обсуждение результатов и выводы

Дешифрирование и анализ разновременных аэрофотоснимков, материалов видеосъёмок, вертолётных и наземных фотографий участков ледников, приледниковых озёр, речных русел позволило оценить проявления сложных селевых процессов, выявить зоны их зарождения и характерные особенности. Полученные результаты дают основание пересмотреть ранее опубликованные материалы (в том числе обобщающие статьи [*Докукин и др., 2020а; Докукин и др., 2020б*] по особо значимым катастрофическим событиям (гляциальный сель 2000 г. по р. Герхожансу, прорыв озера Башкара в 2017 г.), связанным с процессами внутри ледников и массивов мёртвых льдов.

Выявлены различия в механизмах прорывов озера Башкара в 1958, 1959 и 1960 гг. Первые два прорыва происходили по подледниковому каналу, который закрывался после прорыва. Это, возможно, происходило из-за изменений в динамике ледника, связанных с тем, что правый поток ледника, ранее соприкасавшийся с основным левым потоком, отступил и уже не сдерживал левый поток, который несколько изменил вектор движения, и в это время трансформировались подледниковые русла потоков талых вод, куда устремлялись воды озера. Прорыв озера в 1960 г. резко отличался от двух предыдущих по величине падения уровня (10 и более м) и по сбросу воды по

поверхности ледника, что напоминало картину прорыва озера в 2017 г., когда ливневый сток, стекавший по поверхности ледника, аккумулировался в подледниковой полости в массиве мёртвого льда и затем вырвался в виде мощного селевого импульса в озеро с прохождением по нему селевой волны и размывом моренного вала в проране ниже озера. Вследствие того, что объём воды в озере в 2017 г. был значительно больше, чем в 1960 г. (вместе с со сбросом воды из озера Лапа превышал 1 млн м^3), последствия прорыва были катастрофическими и наблюдались ниже по долине р. Баксан.

Таким образом, на одном участке долины р. Адылсу селевые процессы были вызваны прорывом озера по подледниковому каналу в теле ледника ниже озера Башкара, а также сходом селевой волны по озеру из-за прорыва заполненной водой в результате ливней полости в массиве мёртвого льда выше озера. В 2024 г. подобный процесс повторился в меньших масштабах, но предположительно, вследствие изменения подледниковой дренажной системы ледника Башкара после схода каменной лавины в основном на правый поток ледника в 2019 г. и изменения соотношения динамики левого и правого потоков льда из-за прекращения таяния последнего под влиянием обломочного чехла.

На основе выявленных следов прорыва подледникового водоёма на участке верхнего цирка ледника Каярты в долине р. Каяартысу бассейна р. Герхожансу во время вертолётного облёта 2011 г., проявлений селевого процесса по данным видеосъёмок 1999 и 2000 гг., фотографий участка верхнего скального каньона после селей 2011, 2017 и 2022 гг. и кадра видеосъёмки 2000 г. был сделан вывод о подледниковой дренажной системе как зоне зарождения гляциальных селей 1999–2022 гг. в результате прорывов подледникового водоёма по подледниковому каналу левого (западного) языка ледника и в одном случае по его поверхности. Расходы потоков воды при прорывах были одинаковы, так как потоки проходили в основном по подледниковым каналам примерно одинакового сечения. Различия были в объёмах прорывных водных импульсов вследствие различного объёма накопившейся воды в подледниковом водоёме. Максимальным был объём накопившейся воды в 2000 г. Вода накапливалась в периоды длительных высоких температур, а прорывы происходили в тот момент, когда от подледникового водоёма формировался новый подледниковый канал и соединялся с существующим ниже каналом. Так как в области питания ледника, где накапливалась вода, подледниковый канал в обычный период нивелировался движением ледника, то не всегда сформировавшийся подледниковый водоём прорывался. Прорыв мог происходить на следующий год после года высоких температур, например, после высоких температур в 2010 г. прорыв был в 2011 г., и затем после высоких температур в 2016 г. прорыв был в 2017 г. При благоприятных условиях прорывы могли быть два или три года подряд (в 1999 и 2000 гг. в верхнем цирке ледника Каярты и в 1960, 1961 и 1962 гг. в левом нижнем цирке), или если высокие температуры продолжались несколько лет, прорывов уже не происходило, так как подлёдный канал в области питания ледника сохранялся, и вода не накапливалась (2023 и 2024 гг.).

Другим примером формирования подледникового канала и прохождения прорывного паводка является случай на севере Эльбруса в 2013 г., когда водный поток с ледника Бирджалычиран, двигаясь вдоль ледяной гряды, разделявшей ранее ледники Бирджалычиран и Чунгурчатчиран, в течение 2012–2013 гг. проникал под ледяную гряду шириной около 100 м и затем вырвался на поверхность ледника Чунгурчатчиран с прохождением паводка и формированием промоины в леднике глубиной 5–7 м и шириной 10–12 м [*Докукин, 2013*].

Детальное исследование подледникового рельефа на основе данных радиолокационного зондирования и моделирования позволяет выявлять подледниковые каналы и полости. К таким объектам относится часть ледника Большой Азау, где прогнозируется формирование озера объёмом около 9,3 млн м^3 [*Лаврентьев и др., 2020*]. В последние годы на поверхности ледника Большой Азау образовались глубокие воронки [*Беккиев и др., 2024б*], свидетельствующие о том, что талые воды с поверхности ледника уходят во внутриледниковый и подледниковый канал и возможно в подледниковую полость. В будущем при прохождении ливня, как в случае паводка с

ледника и прорыва супрагляциального озера на леднике Бонн-Пьер во французских Альпах 27 июня 2024 г. [*Беккиев и др., 2024б*], или при блокировании подледникового канала может произойти накопление воды в подледниковой дренажной системе и в воронках на поверхности ледника Большой Азау с последующим прорывом и прохождением паводка и селевого потока по долине р. Азау.

Заполнение подледниковых каналов водой может происходить в результате закупорки выходного грота с ледника селевыми или обвальными отложениями. Такой процесс наблюдался при прохождении селевого потока по леднику Мижирги 13.08.2022 в бассейне р. Черек-Безенгийский, когда грязекаменными массами толщиной 8 м был перекрыт выходной грот подледникового канала стока талых вод с ледника, а также при сходе обвальной массы по леднику Буба в долине р. Бубисцкали 04.08.2023 [*Беккиев и др. 2023*].

В условиях потепления климата происходят изменения в динамике ледников, а также увеличивается число случаев сходов каменных лавин на ледники, что может приводить к появлению массивов мёртвых льдов, новых супрагляциальных и парагляциальных озёр, к изменениям в подледниковых дренажных системах и накоплению воды в них с последующими прорывами. При этом возникают угрозы схода селей и паводков в местах, где они раньше не были зафиксированы, и могут повторяться там, где они были раньше.

Для своевременного выявления признаков готовящихся катастрофических процессов и снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций необходим непрерывный мониторинг гляциально-перигляциальной зоны на основе анализа разновременных космоснимков, проведения вертолётных облётов и аэрофотосъёмок с применением беспилотных авиационных систем, радиолокационного зондирования как наземного, так и вертолётного, маршрутных обследований и оперативного анализа полученных материалов и моделирования.

Список литературы

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Акаев А.Р., Анаев М.А. Особенности селевого потока 5 августа 2022 г. на р. Герхожансу // «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа» (ГЕОКАВКАЗ-2023): материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – М.: Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, 2023. – С. 445–454.

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Акаев А.Р. Необычные селевые потоки на Кавказе в 2022–2023 годах // 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», 2024а. С. 50–59.

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Шагин С.И., Акаев А.Р. Механизмы прорывов озёр Эльбруса // Вестник Владикавказского научного центра. – 2024б. – Т. 24, № 3. С. 73–84. DOI: 10.46698/VNC.2024.85.56.001.

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

Герасимов В.А. Селевые потоки в районе г. Тырныауза 1/VIII 1960 г., 14/VIII 1961 г. и 31/VII 1962 г. // Труды ВГИ. – 1967. – Вып. 6. – С. 198–205.

Гляциологический словарь / под ред. В.М. Котлякова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 527 с.

Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. Формирование и развитие дренажных систем в ледниках // Лёд и Снег. – 2011. – Т. 115, № 3. – С. 23–40.

Голубев Г.Н. Гидрология ледников. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 248 с.

Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Богаченко Е.М., Иванов Г.И. Сель 3 августа 2011 года в бассейне реки Герхожан-Су: причины, динамика и возможные последствия // ГеоРиск. – 2012. № 2. – С. 48–57.

Докукин М.Д. Современная динамика (2011–2013 гг.) озерно-ледникового комплекса северо-восточного подножия Эльбруса (результаты аэрокосмического мониторинга) // Развитие регионов в XXI веке. Материалы I Международной научной конференции. – Владикавказ: Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, 2013. – С. 190–195.

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.

Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Условия и механизмы прорывов Башкаринских озёр в долине р. Адыл-су (Центральный Кавказ) // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа: коллективная монография по материалам X Всероссийской научно-технической конференции в двух частях. – Грозный: ООО «Формат», 2020а. – Т. X. Часть 2. – С. 369–375.

Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С., Богаченко Е.М. Гляциогеоморфологические условия формирования селей р. Герхожан-су (Центральный Кавказ) // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции / отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020б. – Т. 1. – С. 388–404.

Запорожченко Э.В. Сели бассейна р. Герхожан-Су: история проявления, условия формирования, энергетические характеристики // Сборник научных трудов Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства ОАО «Севкавгипроводхоз». – Пятигорск, 2002. – Вып. 15. – С. 80–148.

Ковалёв П.В. Современное оледенение бассейна реки Баксан // Материалы Кавказской экспедиции (по программе Международного геофизического года). – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1961. – Т. 2. – С. 3–106.

Крыленко И.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Журавлева П.Г. Динамика селевого бассейна р. Герхожансу (Кабардино-Балкария) после катастрофы в июле 2000 г. // Материалы гляциологических исследований. – 2004. Вып. 96. – С. 159–166.

Лаврентьев И.И., Петраков Д.А., Кутузов С.С., Коваленко Н.В., Смирнов А.М. Оценка потенциала развития ледниковых озёр на Центральном Кавказе // Лёд и Снег. – 2020. – Т. 60, № 3. – С. 343–360. – DOI: 10.31857/S2076673420030044.

Перов В. Ф. Селеведение. – М.: Географический факультет МГУ, 2012. – 271 с.

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

Тушинский Г.К., Попов А.И., Голубев Г.Н., Мудров Ю.В., Тумель Н.В. Опыт изучения гляциальных селей Большого Кавказа (на примере реки Герхожансу бассейна реки Баксана) // Информационный сборник о работах по Международному геофизическому году. № 13. Вопросы гляциологии. Гляциальные сели. – М., 1966. – С. 5–106.

Черноморец С.С. Селевые очаги до и после катастроф. – М.: Научный мир, 2005. – 184 с.

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. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80).

Hubbard B. Subglacial drainage system // Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Encyclopedia of Earth Sciences Series / ed. by V.P. Singh, P. Singh, U.K. Haritashya. – Dordrecht: Springer, 2011. – DOI: 10.1007/978-90-481-2642-2_545.

A four-pillar strategy for natural hazard risk management in remote mountain regions: Insights from the Mestiachala HPP, Georgia

S. Fuchs[1,2], M. Haidn[1,3], K. Keilig[1,4], S. Resinger[3], Z. Menabde[1], F. Draesner[3], P. Echtler[2], C. Libisch-Lehner[5], B. Wipplinger[5], P. Neumann[4], J. Singer[6]

[1]*Caucasus Science and Engineering LLC, Tbilisi, Georgia*

[2]*BOKU University, Vienna, Austria, sven.fuchs@boku.ac.at*

[3]*Trumer Schutzbauten GmbH, Oberndorf, Austria*

[4]*Baugeologisches Büro Bauer GmbH, Munich, Germany*

[5]*AFRY Austria GmbH, Vienna, Austria*

[6]*AlpGeotech GmbH, Munich, Germany*

Abstract. Effective natural hazard risk management in remote mountain regions requires a multidisciplinary approach based on four interrelated pillars: 1) data-driven hazard mapping using geomorphological analysis and process-based simulation, 2) targeted protective engineering where technically viable and cost-effective, 3) integrated monitoring and alert systems combining remote sensing with in-situ catchment data, and 4) ongoing high-resolution surveillance via local and drone-based remote surveys. Together, these pillars enable effective risk management and early warning to protect critical infrastructure from debris flows and other hazards. The foundation of this approach is field-based hazard assessment, which provides critical insight into the geomorphological, hydrological and geological factors that drive debris flow events. Process simulation, based on models that replicate and predict dynamic natural hazard processes, enables scenario testing and risk quantification. The second pillar focuses on designing engineering mitigation measures. Based on simulation results and hazard zoning, structural measures such as barriers, retention basins, and diversion channels are optimised for site-specific conditions, balancing safety, cost, and environmental impact. The third pillar introduces an approach to monitoring and early warning systems that integrate remotely sensed and ground-based information. These systems provide real-time data on precursors to hazardous events, such as weather forecasts for the catchment area. This improves the responsiveness of emergency protocols. The fourth pillar involves continuous and repeated local drone surveys to detect and document any catchment dynamics. Together, these pillars provide a scalable, adaptive methodology for managing natural hazards, such as debris flows, in remote mountain regions.

Key words: *risk assessment, technical protection, UAV monitoring, early warning, alert system*

Cite this article: Fuchs S., Haidn M., Keilig K., Resinger S., Menabde Z., Draesner F., Echtler P., Libisch-Lehner C., Wipplinger B., Neumann P., Singer J. A four-pillar strategy for natural hazard risk management in remote mountain regions: Insights from the Mestiachala HPP, Georgia. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 122–135.

Четырехкомпонентная стратегия управления рисками стихийных бедствий в отдаленных горных регионах: выводы из опыта Местиачальской ГЭС, Грузия

С. Фукс[1,2], М. Хайдн[1,3], К. Кайлиг[1,4], С. Резингер[3], З. Менабде[1], Ф. Дреснер[3], П. Эхтлер[2], К. Либиш-Лехнер[5], Б. Випплингер[5], П. Нойманн[4], Дж. Зингер[6]

[1]*Caucasus Science and Engineering LLC, Тбилиси, Грузия*

[2]*Университет природных ресурсов и наук о жизни, Вена, Австрия, sven.fuchs@boku.ac.at*

[3]*Trumer Schutzbauten GmbH, Oberndorf, Austria*

[4]*Baugeologisches Büro Bauer GmbH, Munich, Germany*

[5]*AFRY Austria GmbH, Vienna, Austria*

[6]*AlpGeotech GmbH, Munich, Germany*

Аннотация. Эффективное управление рисками стихийных бедствий в отдаленных горных регионах требует междисциплинарного подхода, основанного на четырех взаимосвязанных основаниях: 1) картирование опасностей на основе данных с использованием геоморфологического анализа и моделирования на основе процессов, 2) целевая защитная инженерия, где это технически осуществимо и экономически эффективно, 3) интегрированные системы мониторинга и оповещения, объединяющие дистанционное зондирование с данными о водосборе на месте, и 4) постоянное наблюдение с высоким разрешением с помощью локальных и беспилотных дистанционных обследований. Вместе эти основания обеспечивают эффективное управление рисками и раннее предупреждение для защиты критической инфраструктуры от селевых потоков и других опасностей. Основой этого подхода является полевая оценка опасностей, которая дает критическое представление о геоморфологических, гидрологических и геологических факторах, которые вызывают селевые потоки. Моделирование процессов, основанное на моделях, которые воспроизводят и предсказывают динамические процессы стихийных бедствий, позволяет проводить тестирование сценариев и количественную оценку рисков. Второе направление фокусируется на разработке инженерных мер по смягчению последствий. На основе результатов моделирования и зонирования опасностей структурные меры, такие как барьеры, удерживающие бассейны и отводные каналы, оптимизируются для условий конкретного участка, обеспечивая баланс между безопасностью, стоимостью и воздействием на окружающую среду. Третий путь представляет подход к системам мониторинга и раннего оповещения, которые интегрируют дистанционно зондируемую и наземную информацию. Эти системы предоставляют данные в реальном времени о предвестниках опасных событий, таких как прогнозы погоды для водосборной площади. Это повышает оперативность реагирования протоколов чрезвычайных ситуаций. Четвертое направление включает в себя непрерывные и повторяющиеся локальные обследования с помощью беспилотников для обнаружения и документирования любой динамики водосбора. Вместе эти столпы обеспечивают масштабируемую, адаптивную методологию для управления природными опасностями, такими как селевые потоки, в отдаленных горных регионах.

Ключевые слова: *оценка риска, техническая защита, мониторинг БПЛА, раннее оповещение, система оповещения*

Ссылка для цитирования: Фукс С., Хайдн М., Кайлиг К., Резингер С., Менабде З., Дреснер Ф., Эхтлер П., Либиш-Лехнер К., Випплингер Б., Нойманн П., Зингер Дж. Четырехкомпонентная стратегия управления рисками стихийных бедствий в отдаленных горных регионах: выводы из опыта Местиачальской ГЭС, Грузия. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 122–135.

Introduction

Georgia is a country that is frequently affected by gravitational mass movements. According to *Gaprindashvili et al.* [*2021*], large parts of the country are classified as zones of medium to high susceptibility to debris flows and similar processes. From 1995 to 2023, more

than 16,200 landslides (both reactivated and newly occurring) and almost 4,100 debris flows were recorded. These resulted in 54 and 128 fatalities respectively, as well as causing damage to numerous buildings and settlements [*Todradze and Apkhaidze, 2024*]. These processes are primarily triggered by the underlying geology [*Tielidze, 2019*], but are also often initiated by intense precipitation combined with warm temperatures in the high mountain regions of the Caucasus, leading to snowmelt and glacier retreat. In addition to hydrometeorological triggers, these mass movements may also be initiated by earthquakes [*Gaprindashvili and van Westen, 2016*]. Research has focused particularly on debris flow disasters in the Greater Caucasus [*Chernomorets and Gavardashvili, 2018*], where altitudes of over 5,000 metres are reached and deglaciation and other glacial hazards significantly contribute to mass movement occurrence. Extraordinary events such as the 2019 Mestiachala event [*Fuchs et al., 2020*] and the 2023 Shovi event [*Petley, 2023*] repeatedly result in considerable loss and highlight the major challenges associated with natural hazard risk management in remote, data-scarce, high-mountain regions. In the following sections, we present a four-pillar approach to mountain hazard risk management that is specifically targeted at such extraordinary events. This approach consists of four interrelated pillars.

1. Data-driven hazard mapping using geomorphological analysis and process-based simulation.
2. Targeted protective engineering where technically viable and cost-effective.
3. Integrated monitoring and alert systems combining remote sensing with in-situ catchment data.
4. Ongoing high-resolution surveillance via local and drone-based remote surveys.

The integrated four-pillar approach enables robust natural hazard risk management and early warning, aimed at safeguarding critical infrastructure and livelihoods from debris flows and related mountain hazards. By combining hazard mapping, vulnerability analysis, and site-specific mitigation planning, the approach enhances the precision and effectiveness of risk reduction measures while minimizing socioeconomic impacts. This framework contributes to improved resilience at the local scale and supports evidence-based decision-making. The Mestiachala HPP in Georgia is presented as a case study demonstrating its practical application. The Mestiachala event in late July 2019 was a compound hazard event triggered by multiple rock avalanches in the upper part of the Murkvami valley feeding at inlet 1 of the Mestiachala Hydropower Plant (HPP) in the Mestiachala river. The rock avalanches incorporated glacier ice from the upper catchment area, travelling downstream as multiple debris flows and destroying inlet 1. The debris flows continued downstream along the Mestiachala river, damaging inlet 2 and the HPP powerhouse. This event forced both Mestiachala hydropower units – Mestiachala 1 (30 MW) and Mestiachala 2 (20 MW) – offline.

Methods

Data-driven hazard mapping using geomorphological analysis and process-based simulation

Geomorphological mapping is a long-established tool in applied geosciences and engineering geomorphology for representing landforms and their dynamics [*Smith and Pain, 2011; Griffiths, 2004; Downs and Booth, 2011*]. These maps provide essential insights into landforms, near-surface materials, and geomorphic processes, supporting hazard assessment and landscape interpretation [*Dramis et al., 2011*]. In mountainous, data-scarce regions, they are critical for visualising hazards and guiding land management [*Bollati et al., 2017; Zangana et al. 2023*]. Traditionally reliant on expert-led fieldwork [*Seijmonsbergen, 2013*], mapping is increasingly supported by digital tools such as DEMs, orthophotos, and remote sensing technologies [*Garova et al., 2025*]. While remote methods offer advantages in inaccessible terrain [*Otto and Dikau, 2004; Beckenbach et al., 2014*], hybrid approaches combining field and desktop techniques are widely recommended [*Seijmonsbergen, 2013*]. Despite advances in digital mapping [*Krichen et al., 2024*], field validation remains essential for hazard accuracy [*Kienholz et al., 2004; Cirella et al., 2014*]. UAVs and satellites now provide high-resolution,

cost-effective data for generating detailed DEMs, orthophotos, and 3D models [*Schlögl et al., 2022*], enabling efficient monitoring of hazard-prone environments. Integrating multiple data sources enhances reliability, especially in transdisciplinary and data-limited contexts [*Cui et al., 2021; Sandoval et al., 2023; Malgwi et al., 2020*]. Field-based geomorphological mapping remains essential for identifying hazard initiation, transit, and deposition zones, particularly for slope movements. It leverages geomorphic indicators [*Aulitzky, 1992*] to infer process types, magnitudes, and frequencies, providing a basis for targeted hazard mapping and risk assessment [*Fuchs et al., 2017*].

Modelling approaches are widely used to simulate future geomorphological processes, providing insights into mass-wasting magnitude, run-out behaviour, and energy distribution across hazard components. Models range from physically based formulations relying on complex mathematical equations to empirical or statistical models derived from observational data and simpler mathematical relationships. Physical models may be causal, deterministic, or incorporate probabilistic elements, while statistical models address observable probabilities [*Briggs, 2016*]. For simulating complex, cascading mass movements, multi-phase models such as r.avaflow are increasingly applied. R.avaflow is an open-source, GIS-integrated tool designed to simulate up to three-phase mass flows over arbitrary topography *[Mergili and Pudasaini 2014–2024*]. It employs the NOC-TVD numerical scheme [*Wang et al., 2004*], a Voellmy-type friction model, and a simplified version of the Pudasaini multi-phase flow model [*Pudasaini and Mergili, 2019*]. For slower flows, it can alternatively apply an equilibrium-of-motion approach. Key features include the modelling of entrainment, deformation, fragmentation, dispersion, and phase transitions. Inputs can be defined via raster maps and/or hydrographs, and the tool supports multi-core processing and batch simulations for sensitivity analysis and optimisation. Outputs include maps, diagrams, and 3D or immersive visualisations [*Mergili et al., 2018; Mergili et al., 2020*]. These simulations are best interpreted in conjunction with field observations derived from geomorphological mapping, enhancing model calibration and hazard understanding.

Targeted protective engineering where technically viable and cost-effective

Engineering geological assessments and rockfall process simulations are essential components of a comprehensive geohazard analysis. In this study, rockfall trajectories were modelled using *GeoRock 2D*, a deterministic simulation tool which calculates the motion of individual blocks along two-dimensional slope profiles. The input parameters were derived from detailed field investigations and geological mapping, incorporating topographic cross-sections, lithological data and rock mass properties. These inputs were then used to construct representative slope geometries and identify potential detachment zones. The model simulates the various phases of block motion (free fall, bouncing, rolling and sliding) while incorporating key mechanical parameters, such as restitution coefficients, friction angles and surface roughness, to accurately characterise block-slope interactions.

The input data for the rockfall modelling were derived from detailed geological and geomorphological field observations. This included a statistical evaluation of the volumes and shapes of rock blocks obtained via in situ measurements and photogrammetric analyses. High-resolution digital elevation models (DEMs) were used to extract slope geometries, and detachment zones were identified through structural mapping of discontinuities and zones of weakness. Material-specific parameters, such as normal and tangential restitution coefficients and rolling friction, were estimated empirically and calibrated against observed deposition patterns using values from the literature. *GeoRock 2D* computes rockfall trajectories and associated kinematic outputs, including translational velocity, impact energy and bounce height, for a statistically representative number of simulated blocks. These outputs are essential for delineating hazard zones and assessing the risk to exposed infrastructure, such as galleries, penstocks and intake structures. The simulation results are classified by energy levels and bounce heights in accordance with the Austrian ONR 24810 guideline [*Austrian Standards Institute, 2017*] to inform the design and placement of protective measures, such as flexible rockfall barriers.

Integrated monitoring and alert systems combining remote sensing with in-situ catchment data

Developing an integrated concept for monitoring, early warning, and alerting in large, remote catchments with multiple hazards poses significant challenges. For the Mestiachala HPP, a multi-stage, prioritised approach was adopted based on the identification of high-magnitude hazard hot spots. In the first stage, critical zones – primarily compound events and debris flows ≥ 5,000 m³ identified through prior hazard assessments [*Fuchs et al. 2020*] – were evaluated weekly using the AFRY Hydro DSS, a web-based decision support system. This platform integrates freely available hydro-meteorological and earth observation data, including satellite-based precipitation (GPM), global weather forecasts (GFS), Sentinel imagery, and weather radar, to support real-time natural hazard monitoring.

In the second stage, ground-based monitoring stations were deployed to detect hazardous processes that occur independently of precipitation and temperature, enabling reliable event identification and automated alarming. These include glacier lake outburst floods (e.g., from Lekhziri and Chalaati glaciers), high-magnitude debris flows, complex events such as the 2019 Murkvami valley incident, and major rockfalls. The monitoring network comprises systems for open channel flow and discharge measurement, debris flow and rockfall detection, rock mass deformation monitoring, and LoRa®-enabled data transmission. Installation sites were selected based on criteria such as maximised lead time, safe sensor placement, LoRa® signal coverage, solar exposure, and sensor-specific optimisation to ensure high data quality and operational reliability.

Three discharge monitoring stations were installed in the Mestiachala HPP catchment at Chalaati, Lekhziri, and Murkvami valleys. Each station includes a radar sensor for flow velocity and water level, and a geophone to distinguish flood from debris flow events. Systems are powered by 120 Wp solar panels and dual 100 Ah LiPO4 batteries, with data transmitted via a LoRa® network.

To monitor rockfall activity in the upper Murkvami valley – source of the July 2019 compound hazard – two geophone stations were installed. These enable real-time detection of major events and track slope destabilisation through increased rockfall frequency. Two stations are required to differentiate local from regional events. Each system consists of two insulated aluminum enclosures (geophone, and power/data) mounted on a pole with antennas and a solar panel. Powered by a 120 Wp solar panel and two 100 Ah LiFePO4 batteries, the system can operate for up to 40 days without sunlight. Geophones are securely anchored to bedrock, large boulders, or concrete foundations to ensure accurate vibration detection.

In the third stage, satellite data, numerical weather forecasts, and ground-based monitoring outputs are integrated into an Early Warning and Alarm System (EWAS). The key distinction is that the alert system detects active hazards and initiates automatic responses, whereas the early warning system forecasts potential hazards with longer lead times, enabling proactive risk mitigation through expert assessment.

Ongoing high-resolution surveillance via local and drone-based remote surveys

The fourth pillar is an Unmanned Aerial Vehicle (UAV), which enables automated weekly visual inspections of hazard zones within its operational range. The primary UAV is a DJI Matrice 30, which is housed in a DJI DOCK and operates autonomously with environmental controls to ensure reliability in adverse weather conditions. The system has a range of 5 km, a flight time of 40 minutes, and a recharge time of 25 minutes. It is equipped with a 12 MP wide-angle camera, 200× hybrid zoom and RTK GPS, providing high-precision imaging and navigation. Deployment is feasible with stable internet (> 20 MB/s), a reliable 230 V power supply, security measures, lightning protection, compliance with Georgian airspace regulations, insurance and emergency landing protocols in place.

Results

The eastern tributary of the Mestiachala River, ranging from 1,940 to 3,838 m asl and covering ~ 1.2 ha, features steep mountainous terrain with glaciers – Murkvami (NE) and Banguriani (S) – separated by a ridge from Mount Banguriani (3,838 m asl). Current moraines resemble those from the end of the Little Ice Age in the 1850s [*Khazaradze et al., 2018*]. Since then, glaciers have been retreating at rates of tens of meters per year [*Tielidze and Wheate, 2018*]. Glacier slope influences area loss, with steeper glaciers experiencing greater retreat. Regional variability depends on factors such as orientation, altitude, mass balance, geometry, and bedrock topography. The valley floor contains glacial ground moraines and deposits resulting from gravitational processes such as rockfalls and landslides, resulting in diverse rock types and grain sizes. These materials are mobilised by glacier tongue discharge and precipitation-driven flows, including debris flows with abundant unconsolidated debris (moraines, colluvium, and sediments). Debris flows are common in mountainous regions due to steep slopes, thermal sensitivity, summer convective storms, and abundant unconsolidated debris (moraine, colluvium, and stream sediments) that facilitate initial mobilization and downstream entrainment. Non-outburst glacial debris flows typically originate in steep proglacial and periglacial zones affected by recent glacier retreat, involving material from ice-cored moraines and adjacent stream channels. These flows are often triggered by elevated summer temperatures and/or intense rainfall, which enhance thermally driven runoff; however, precipitation data for the valley were unavailable to confirm specific triggers.

Fig. 1. Overview on the eastern tributary of Mestiachala valley with the traces of the 2019 event, in the foreground the location of the former inlet 1. Photo: Sebastian Resinger, 01 Oct 2023

Initial failure volumes are often enlarged by entrainment along flow paths, producing large deposits [*Lukas, 2011*]. The 25 July 2019 event was a classic cascading mass movement in the Murkvami catchment (see Fig. 1). The release zones of the July 2019 event are situated in the northeastern Murkvami catchment, particularly along the ridge from Mt. Banguriani to the central moraine. The two main detachments were estimated at ~ 1.3 million m³ and ~ 300,000 m³. Post-event drone imagery revealed steepening of the southern wall and the

formation of fresh vertical cracks and probable shear fractures, indicating ongoing instability. The exposed rock mass is highly susceptible to weathering processes, such as freeze-thaw cycles, precipitation, and glacial meltwater infiltration, reducing shear strength along discontinuities.

Data-driven hazard mapping using geomorphological analysis and process-based simulation

The hazard assessment was based on detailed geomorphological mapping to spatially delineate release, transit, and deposition zones, with emphasis on slope movements and other mass wasting indicators. The aim was to identify controlling conditions and characterise hazard sources, mechanisms, magnitudes, and frequencies. The fast-moving debris flow likely entrained unconsolidated glacial sediments from the valley floor, moraine material (grey schist) from the left-lateral mid-valley moraine, and debris-covered ice from the lower Murkvami glacier tongue. The flow overtopped the moraine separating the two sub-catchments. Dimensions of the initial deposition in the Mestiachala valley were measured using a TruPulse with an area of approximately 350 m x 260 m and a thickness of 6–8 m, terrain analysis resulted in at least two distinguishable waves. Terrain analysis revealed at least two distinct waves, with an estimated total volume of 540,000–730,000 m³ (~ 270,000–365,000 m³ per wave). Given the estimated volume and assuming a water content of up to 75%, consistent with the rapid flow indicated by the deposition pattern, a liquid discharge of approximately 90,000–120,000 m³ is inferred following equation (1) as

$$C_V = \frac{V_{Debris}}{V_{Debris}+V_{Liquid}} \quad (1)$$

with $C_V = 0.75$, V_{Debris} being the volume of the solid and V_{Liquid} the volume of the liquid part of the debris flow. Aside from minor ponding, no field evidence indicates prolonged blockage of the Mestiachala River; a rapid breaching immediately after the event is likely. Downstream sediment deposition at HPP1 primarily resulted from channel erosion below Intake 1, with incision depths of approximately 2–3 m. The final hazard map (Fig. 2) formed the basis for documentation in accordance with relevant Austrian Standards (e.g., ONR; Fig. 3).

Using r.avaflow, flow velocities, heights, and impact pressures were back-calculated. Simulations were based on DEM-derived topography, with initial conditions and model parameters adapted from literature and prior r.avaflow applications [*Mergili et al., 2020*]. Parameter calibration aimed to optimise agreement with observed impact areas and deposited volumes. Fig. 4 (left) illustrates deposition heights along the full track of the 2019 compound event. Significant deposition occurred below the middle moraine – separating the Murkvami and Banguriani valleys – due to reduced slope gradient. Similar deposition areas were also mapped along the transit path of the rock-ice avalanche in the Murkvami tributary. Modelled deposit heights of up to 10 m align with field measurements. Overtopping of the medial moraine produced deposits up to 2.2 m. The highest accumulation occurred at the Mestiachala confluence, where deposition reached 18–20 m (including pore space), consistent with geoelectric and in situ surveys. The initial rock-avalanche rapidly increased in speed after their release and moved downslope with frontal velocities exceeding 27.5 m/s (Fig. 4 right). When reaching the glacier tongue velocities between 20.7 and 27.5 m/s were observed, as well as an entrainment of ice in the flow. Speed decreased in gentler terrain but increased again near the valley junction due to slope steepening. The mass movement reached an average velocity of 15 m/s (54 km/h), implying a travel time of around 240 seconds (4 minutes) from release to deposition. The hazard assessment conducted for Murkvami Valley was extended to the entire area, resulting in recommendations for technical mitigation, monitoring, and early warning measures.

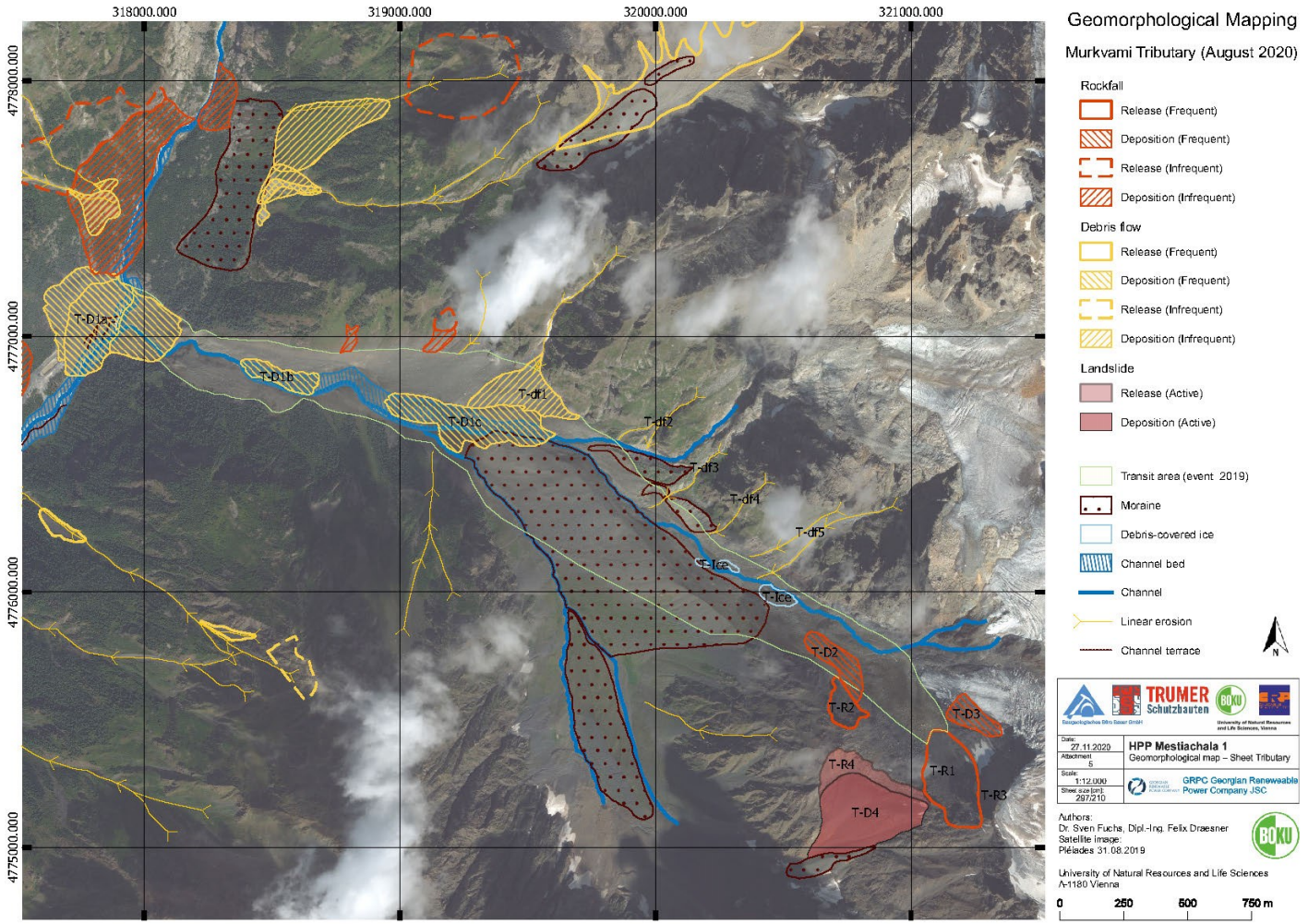


Fig. 2. Geomorphological map of the Murkvami valley, showing rockfall (red) and debris flow (yellow) processes as well as the overall landslide susceptibility as well as other morphological and hydrological features. Source: [*Fuchs et al. 2020*]

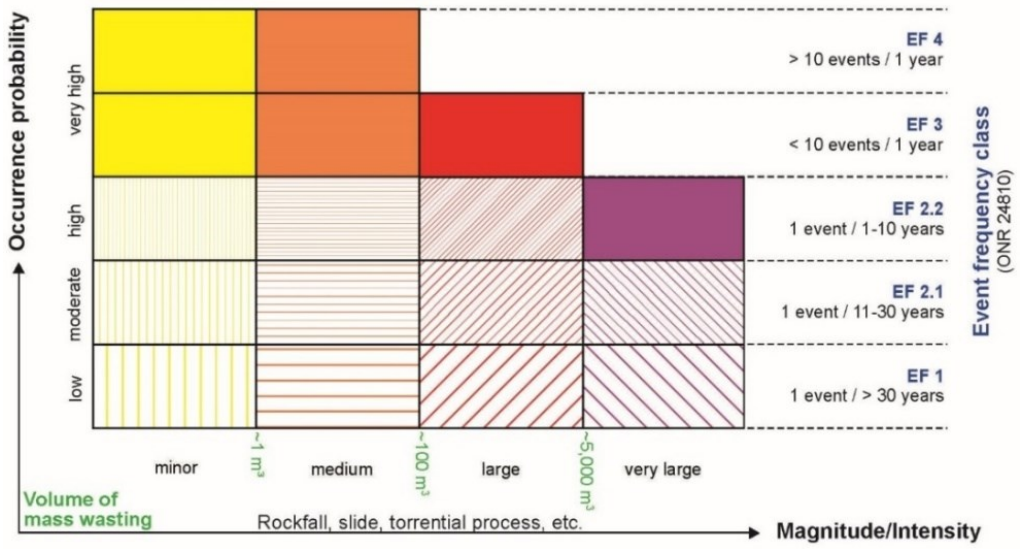


Fig. 3. Geohazard matrix for mass wasting processes differentiating volume (intensity) and frequency of rockfall, sliding processes and torrential processes. Classification based on the Austrian Standard ONR 24810:2020 01 with minor adjustments [*Austrian Standards Institute, 2017*]

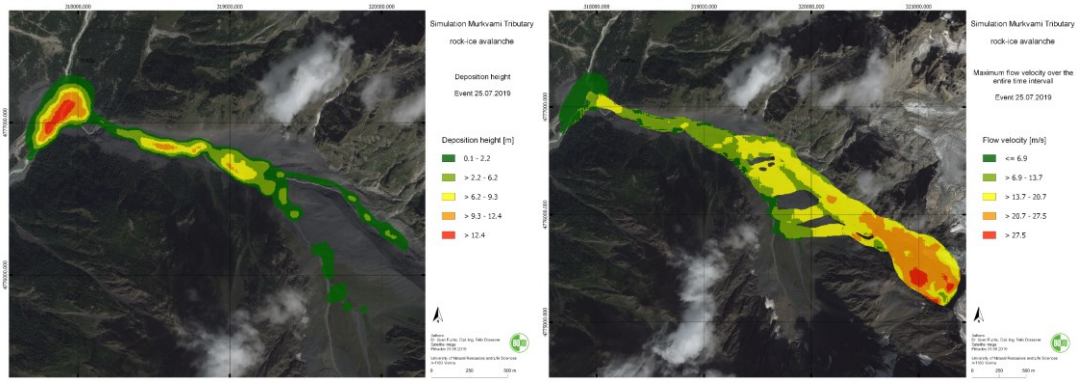


Fig. 4. Simulation of the 2019 event in the Murkvami valley; deposition height (left) and velocity (right). Source: [*Fuchs et al., 2020*]

Targeted protective engineering where technically viable and cost-effective

Technical rockfall protection measures were installed in high-risk areas with vulnerable infrastructure, particularly the newly relocated intake structure of the Mestiachala HPP. This structure was moved following the 2019 event to avoid zones prone to large compound hazards. In addition to rockfall events, the future location of the rockfall barrier was also identified as an active avalanche path, requiring consideration of an additional load scenario (avalanche impact) during the design and verification process. Simulations indicated rockfall energies of up to 1,050 kJ and bounce heights of up to 3 m at the barrier site. These values informed the design parameters – energy absorption, height, length and anchorage – according to ONR 24810. Due to the 'high economic consequences', the barrier was classified as consequence class CC3, necessitating a safety factor of 1.15 for both load and resistance. To prove the concept with CC3, a safety factor of 1.15 must be applied to both the load and the resistance. In accordance with this concept, a Trumer Schutzbauten rockfall barrier with 2,000 kJ of resistance (TSV-2000 ZD H4), which has been tested and certified in accordance with ETAG 27 and the European Technical Assessment ETA-14/0357, has been installed.

Fig. 5. A Trumer Schutzbauten TSV-2000-ZD H4 hinged rockfall barrier with 8 m post spacing has been installed to protect the new intake building of the Mestiachala HPP

Integrated monitoring and alert systems combining remote sensing with in-situ catchment data

For the monitoring and alarm system to be effective, the information and alarms issued must be reliable, provide sufficient information for sound decision-making, and be timely enough to allow appropriate action to be taken. In this context, the main design parameters of the sensor system are therefore: 1) the magnitude(s) of critical events that the system must be able to reliably detect; and 2) there must be sufficient lead time between event detection and alarm dissemination, and the event's impact on the endangered structure. The necessary lead time for alerts is mainly determined by the time required to evacuate people from the affected areas. According to the provided flood response measures plan [*Mestiachala Energy, 2023*] up to six minutes are needed to evacuate people from the powerhouse building to a safe location. Ideally, therefore, the monitoring system should deliver an alarm regarding a critical event six minutes before it affects the powerhouse.

For processes such as debris flows in main channels, critical event magnitudes are derived from 100- and 500-year flood design discharges upstream of the intakes. For the new intake 1, for example, numbers are 124.7 m^3/s and 178.18 m^3/s for the 100-year and 500-year event, respectively [*Hydroconsult, 2019*]. Additionally, the system can differentiate between flows with low and high sediment content, enabling a more accurate assessment of the event's impact on the structure, including the potential blockage of the flushing gate channel. A debris flow event with a 100-year discharge poses a much higher threat than a low sediment discharge of the same magnitude and should therefore be dealt with differently in terms of the required actions. Based on modelling results for extreme debris flow events in the Mestiachala valley, flow velocities of 8–13 m/s can be expected [*Fuchs et al., 2020*]. Fig. 6 shows the respective available lead time for a monitoring station positioned upstream of the powerhouse, depending on its position along the valley. In order to provide the required lead time of six minutes, plus one minute for data processing and alarm dissemination, a monitoring station needs to be positioned within the areas shown in green (seven minutes or more).

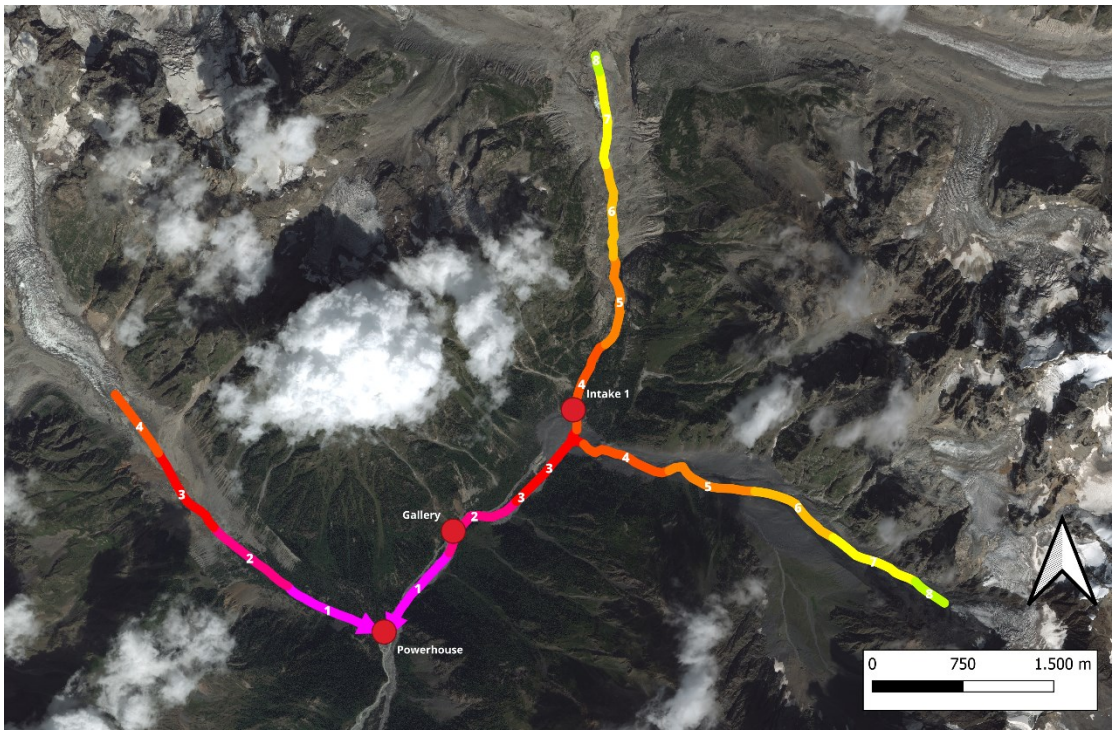


Fig. 6. Available lead time for large flow-type events with an average velocity of 13 m/s for a monitoring station position upstream of the powerhouse, depending on the location along the valley

The AFRY Hydro DSS system acts as the central data platform for the geohazard early warning system. Data collected by the ground-based monitoring system through the LoRa® network is automatically forwarded to a local computer system for analysis and alarm generation. Alarms and automatic notifications are sent to relevant stakeholders in a timely and accurate manner via email and SMS, and an acoustic alarm system has been installed at the powerhouse.

An early warning system that can predict potential hazards with longer lead times is currently under development. This system will require longer observation times and data analysis from the installed monitoring stations and weather station, as well as the correlation of the measured data with the Global Precipitation Monitoring (GPM) and Global Forecasting System (GFS). Over the next few years, warning levels based on thresholds for different hazardous processes can be defined using a data post-processor.

Ongoing high-resolution surveillance via local and drone-based remote surveys

In the inaugural year of its operation, the aircraft completed over 250 autonomous flights, accumulating a total distance of 1,041 kilometres. As a consequence of the drone survey, 1,512 locations have been identified for further investigation, and a dataset comprising almost 2,100 high-resolution images has been compiled. The images are analysed on a weekly basis by experts to interpret changes visible in the terrain, such as rockfall events, gully erosion, cracks and new joints in the rock cliff from the 2019 event, and the formation of new glacial lakes or the damming of such. The weekly drone reports and images are also integrated into the AFRY Hydro DSS web-based platform. This allows the operator to review and analyse all relevant data, images and reports in one place.

In four cases, the drone was deployed to undertake an emergency mission. The objective of this mission was to ascertain the cause of a sudden change in the discharge of the Mestiachala river or a sudden change in the water's colour. Such changes can be indicative of a damming event. It is evident that such emergency starts and clarifications must still be performed manually. These are operated remotely by UAV pilots located in Austria, and this is accomplished within a short time.

In summary, it can be posited that the utilisation of unmanned aerial vehicles (UAVs) for the surveillance of the catchment area offers a substantial added value in conjunction with stationary monitoring systems. In instances where ground-based monitoring stations are unable to provide adequate oversight, or in areas that are inaccessible by ground-based stations, visual assessments can be conducted by airborne surveillance. This facilitates the timely identification of morphological alterations or significant gravitational phenomena. Moreover, from an economic standpoint, drone flights exhibit a marked superiority in efficiency when compared with conventional helicopter flights or the development and manual inspection of these areas within the catchment area.

Fig. 7. DJI drone dock 2 taking off from the intake building of Mestiachala HPP

Discussion

The integrated framework presented here signifies a substantial advancement in natural hazard assessment and risk management, particularly in remote mountainous regions. The approach is characterised by a concerted integration of field-based hazard assessment, process simulation, engineering design, real-time monitoring, and UAV-based local-scale surveying. This multidisciplinary strategy utilises the complementary strengths of remote sensing, spatial analysis and geospatial visualisation to enhance understanding and prediction of debris flow hazards.

Field investigations remain fundamental, providing a foundation for assessments that are grounded in geomorphological, hydrological, and geological evidence. This evidence informs the development of realistic risk profiles. Process simulations extend this understanding by replicating complex dynamic events, such as debris flows, rockfalls and floods. This allows for scenario testing that quantifies hazard magnitude and potential impacts. This aspect is instrumental in informing the engineering design pillar, thereby enabling the implementation of site-specific, cost-effective mitigation measures that address both safety and environmental concerns. The integration of contemporary monitoring technologies, encompassing satellite data, ground-based sensors, and drone surveys, facilitates the acquisition of real-time situational awareness and the provision of early warning capabilities, both of which are pivotal for the timely implementation of emergency responses. Continuous UAV monitoring provides a

detailed and up-to-date perspective on catchment changes, thus supplementing traditional data sources and supporting adaptive management.

Nevertheless, challenges persist in the refinement of these methodologies to enhance their accuracy, efficiency, and accessibility. The enhancement of predictive capabilities and the facilitation of sustainable hazard management in vulnerable mountain communities will be significantly impacted by advancements in sensor technology, data integration, and modelling fidelity.

The collaborative endeavour undertaken by Caucasus Science and Engineering LLC (CSE) and its partners serves as a prime exemplar of the efficacy of multidisciplinary and multi-institutional cooperation, thereby unifying expertise, resources, and innovation to develop and implement this holistic approach. Their work establishes a novel benchmark for natural hazard risk management, proffering scalable solutions that demonstrate adaptability to diverse mountainous settings on a global scale.

References

Aulitzky H. Die Sprache der “Stummen Zeugen“. // In: Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent (ed.) Internationales Symposion Interpraevent, Bern, 29. Juni – 03. Juli 1992, Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt, 1992, p. 139–174.

Austrian Standards Institute. Technischer Steinschlagschutz – Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung, ONR 24810. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2017.

Beckenbach E., Müller T., Seyfried H., Simon T. Potential of a high-resolution DTM with large spatial coverage for visualization, identification and interpretation of young (Würmian) glacial geomorphology. E&G Quaternary Science Journal, 2014, 63 (2):107–129. doi:10.3285/eg.63.2.01.

Bollati I., Crosa Lenz B., Zanoletti E., Pelfini M. Geomorphological mapping for the valorization of the alpine environment. A methodological proposal tested in the Loana Valley (Sesia Val Grande Geopark, Western Italian Alps). Journal of Mountain Science, 2017, 14 (6): 1023–1038. doi:10.1007/s11629-017-4427-7.

Briggs W. (2016) Statistical and physical models. In: Briggs W. (ed) Uncertainty. Springer, Cham, pp 153–202. doi:10.1007/978-3-319-39756-6_9.

Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V. (eds) Debris flows: Disasters, risk, forecast, protection. Proceedings of the 5th International Conference. Tbilisi, Georgia, 01-05 October 2018. Tbilisi, Publishing House "Universal", 2018, 671 p.

Cirella G.T., Semenzin E., Critto A., Marcomini A. Natural hazard risk assessment and management methodologies review: Europe. // In: Linkov I. (ed) Sustainable cities and military installations. NATO Science for Peace and Security Series – C: Environmental Security. Springer, Dordrecht, 2014, p. 329–358.

Cui P., Peng J., Shi P., Tang H., Ouyang C., Zou Q., Liu L., Li C., Lei Y. Scientific challenges of research on natural hazards and disaster risk. Geography and Sustainability, 2021, 2 (3): 216–223. doi: 10.1016/j.geosus.2021.09.001.

Downs P.W., Booth D.B. Geomorphology in environmental mangement. In: Gregory K., Goudi A. (eds) The SAGE handbook of geomorphology. London, Sage Publications Ltd., 2011, p 78–104. doi:10.4135/9781446201053.

Dramis F., Guida D., Cestari A. Nature and aims of geomorphological mapping. In: Smith M.J., Paron P., Griffiths J.S. (eds) Geomorphological mapping. Methods and applications. Elsevier, Amsterdam, 201, p. 39–73. doi:10.1016/B978-0-444-53446-0.00003-3.

Fuchs S., Haidn M., Neumann P. HPP Mestiachala priority projects, Final report on field research and geohazard assessment 2020. Baugeologisches Büro Bauer GmbH, Munich, 2020.

Fuchs S., Karagiorgos K., Kitikidou K., Maris F., Paparrizos S., Thaler T. Flood risk perception and adaptation capacity: a contribution to the socio-hydrology debate. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21 (6): 3183–3198. doi:10.5194/hess-21-3183-2017.

Gaprindashvili G., van Westen C. Generation of a national landslide hazard and risk map for the country of Georgia. Natural Hazards, 2016, 80 (1): 69–101. doi:10.1007/s11069-015-1958-5.

Gaprindashvili M.V., Tsereteli E.D., Gaprindashvili G., Kurtsikidze O. Landslide and debris flow hazard assessment in Georgia. // In: Bonali F.L., Pasquaré Mariotto F., Tsereteli N. (eds) Building knowledge for geohazard assessment and management in the Caucasus and other orogenic regions. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht, 2021, p. 265-279. doi:10.1007/978-94-024-2046-3_14.

Garova E., Chadromtsev B., Pedanov A., Grebennikov P., Iltuganov I., Lobanov P., Ponomarjovs P., Draesner F., Fuchs S. A general methodological framework for hazard assessment in remote mountain areas combining geomorphological mapping with UAV survey. // Journal of Mountain Science, 2025, 22 (3):763–775. doi:10.1007/s11629-024-9096-8.

Griffiths J.S. Geomorphological mapping. // In: Goudie A. (ed) Encyclopedia of geomorphology. Routledge, London, 2004, p. 427–428.

Hydroconsult. HPP-Mestiachala 1/2, Debris flow simulation, 2d-hydraulic modelling, design event simulation. Hydroconsult GmbH, Graz, 2019.

Khazaradze R., Kharadze K., Tsikarishvili K., Chartolani G. Ancient glaciation of the Caucasus. // Open Journal of Geology, 2018, 8 (1):56-64. doi:10.4236/ojg.2018.81004.

Kienholz H., Krummenacher B., Kipfer A., Perret S. Aspects of integral risk management in practice – considerations with respect to mountain hazards in Switzerland. // Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 2004, 56 (3–4): 43–50.

Krichen M., Abdalzaher M.S., Elwekeil M., Fouda M.M. Managing natural disasters: An analysis of technological advancements, opportunities, and challenges. // Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 2024, 4:99-109. doi: 10.1016/j.iotcps.2023.09.002.

Lukas S. Ice-cored moraines. In: Singh V.P., Singh P., Haritashya U.K. (eds) Encyclopedia of snow, ice and glaciers. Springer, Dordrecht, 2011, p. 616–619. doi:10.1007/978-90-481-2642-2.

Malgwi M.B., Fuchs S., Keiler M. A generic physical vulnerability model for floods: review and concept for data-scarce regions. // Natural Hazards and Earth System Sciences, 2020, 20 (7): 2067–2090. doi:10.5194/nhess-20-2067-2020.

Mergili M., Frank B., Fischer J-T., Huggel C., Pudasaini S.P. Computational experiments on the 1962 and 1970 landslide events at Huascarán (Peru) with r.avaflow: Lessons learned for predictive mass flow simulations. // Geomorphology, 2018, 322:15-28. doi: 10.1016/j.geomorph.2018.08.032.

Mergili M., Jaboyedoff M., Pullarello J., Pudasaini S.P. Back-calculation of the 2017 Piz Cengalo-Bondo landslide cascade with r.avaflow. // Natural Hazards and Earth System Sciences, 2020, 20 (2):505-520. doi:10.5194/nhess-20-505-2020.

Mergili M., Pudasaini S.P. r.avaflow – The mass flow simulation tool. 2014–2024. https://www.avaflow.org.

Mestiachala Energy. Detailed description of flood response measures. Mestiachala Energy LLC, Unpublihsed internal document. 2023.

Otto J-C., Dikau R. Geomorphologic system analysis of a high mountain valley in the Swiss Alps. Zeitschrift für Geomorphologie, 2004, 48 (3): 323–341. doi:10.1127/zfg/48/2004/323.

Petley D. The 4 August 2023 debris flow at Shovi in Georgia. EOS, 2023. https://eos.org/thelandslideblog/the-4-august-2023-debris-flow-at-shovi-in-georgia (assessed 06 June 2025).

Pudasaini S.P., Mergili M. A multi-phase mass flow model. // JGR Earth Surface, 2019, 124 (12):2920-2942. doi:10.1029/2019JF005204.

Sandoval V., Voss M., Flörchinger V., Lorenz S., Jafari P. Integrated Disaster Risk Management (IDRM): Elements to advance its study and assessment. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023, 14:343-356. doi:10.1007/s13753-023-00490-1.

Schlögl M., Gutjahr K., Fuchs S. The challenge to use multi-temporal InSAR for landslide early warning. // Natural Hazards, 2022, 112 (3):2913-2919. doi:10.1007/s11069-022-05289-9.

Seijmonsbergen A.C. The modern geomorphological map. // In: Switzer A.D., Kennedy D.M. (eds) Methods in geomorphology. Elsevier, Amsterdam, 2013, p. 35–52. doi:10.1016/B978-0-12-374739-6.00371-7.

Smith M.J., Pain C.F. Geomorphological mapping. // In: Gregory K., Goudie A. (eds) The SAGE handbook of geomorphology. Sage, London, 2011, p. 142–153.

Tielidze L. (ed) Geomorphology of Georgia. Springer, Cham, 2019.

Tielidze L.G., Wheate R.G. The Greater Caucasus glacier inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan). // The Cryosphere, 2018, 12 (1): 81–94. doi:10.5194/tc-12-81-2018.

Todradze G., Apkhaidze I. (eds) Natural Resources of Georgia and Environmental Protection 2023, Statistical Publication. National Statistics Office of Georgia, Tbilisi, 2024.

Wang Y., Hutter K., Pudasaini S.P. The Savage-Hutter theory: A system of partial differential equations for avalanche flows of snow, debris, and mud. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 2004, 84 (8):5 07–527. doi:10.1002/zamm.200310123.

Zangana I., Otto J-C., Mäusbacher R., Schrott L. Efficient geomorphological mapping based on geographic information systems and remote sensing data: an example from Jena, Germany. // Journal of Maps, 2023, 19 (1):2172468. doi:10.1080/17445647.2023.2172468.

Инновационные методы использования природно-техногенных петроструктур для уменьшения рисков аварийных последствий селевых потоков

Ф.Г. Габибов, А.Г. Ахмедова

Азербайджанский университет архитектуры и строительства, Баку, Азербайджан, aytan.ahmadova@azmiu.az

Аннотация. Существует большое количество инженерных и управленческих методов защиты различных населенных пунктов, инженерно-хозяйственных объектов, людей и животных от крупных селевых потоков. Известные селезащитные конструкции в основном возводятся из железобетона, металла и местного грунта (защитные дамбы). Достаточно эффективны селезащитные конструкции, отдельные части которых выполнены из утилизированных отходов (утилизированные металлические буровые трубы, автопокрышки и железобетонные железнодорожные шпалы). Природные структуры в виде впадин и оврагов используются при проектировании селезащитных инженерных мероприятий. В горных регионах распространено наличие крупных валунов, которые являются продуктами деятельности ледников, а также последствиями горных обвалов. В конце прошлого столетия в России группой авторов было предложено использовать крупные валуны в конструкции селезащитного устройства, которые крепились к руслу и между собой сложной тросо-якорной системой. Оригинальность этой инженерной идеи терялась из-за использования слабой системы крепления валунов. Авторами предложено при использовании валунов в составе селезащитной конструкции, в качестве крепежных и фиксирующих конструктивных элементов использовать металлические сваи в виде труб или стандартного металлического проката. Эти сваи пропущены через сквозные вертикальные отверстия, просверленные по осям, проходящим через центры тяжести каждого валуна и заглубленные в русло на необходимую глубину. При анализе рисков аварийных и катастрофических последствий от селевых потоков выявлено, что использование в качестве основных элементов в конструкциях селезащитных сооружений крупных естественных валунов с надежной конструкцией крепления резко повышается надежность этих сооружений при относительно минимальных затратах. При этом сохраняется геоэкологическая ландшафтная привлекательность горных территорий с предложенными устойчивыми селезащитными конструкциями.

Ключевые слова: *селевой поток, конструкция, петроструктура, риск, свая, катастрофа, речное русло*

Ссылка для цитирования: Габибов Ф.Г., Ахмедова А.Г. Инновационные методы использования природно-техногенных петроструктур для уменьшения рисков аварийных последствий селевых потоков. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 136–141.

Innovative methods of using natural and technogenic petrostructures to reduce the risks of emergency consequences of debris flows

F.G. Gabibov, A.G. Akhmedova

Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan, aytan.ahmadova@azmiu.az

Abstract. There are many engineering and management methods for protecting various settlements, engineering and economic facilities, people and animals from large debris flows. Known debris flow protection structures are mainly constructed from reinforced concrete, metal and local soil (protective dams). Debris flow protection structures, individual parts of which are made from recycled waste (recycled metal drill pipes, tires and reinforced concrete railway sleepers), are quite effective. Natural structures in the form of depressions and ravines are used in the design of debris flow protection engineering measures. In mountainous regions, the presence of large boulders is common, which are the products of glacier activity, as well as the consequences of rock falls. At the end of the last century in Russia, a group of authors proposed using large boulders in the design of a debris flow protection device, which were attached to the riverbed and to each other with a complex cable-anchor system. The originality of this engineering idea was lost due to the use of a weak boulder fastening system. The authors proposed using metal piles in the form of pipes or standard rolled metal as fastening and fixing structural elements when using boulders in a debris flow protection structure. These piles are passed through vertical holes drilled along the axes passing through the centers of gravity of each boulder and buried in the riverbed to the required depth. When analyzing the risks of emergency and catastrophic consequences from debris flows, it was found that the use of large natural boulders with a reliable fastening structure as the main elements in the structures of debris flow protection structures sharply increases the reliability of these structures at relatively minimal costs. At the same time, the geoecological landscape attractiveness of mountainous areas with the proposed stable debris flow protection structures is preserved.

Key words: *debris flow, structure, petrostructure, risk, pile, disaster, river bed*

Cite this article: Gabibov F.G., Akhmedova A.G. Innovative methods of using natural and technogenic petrostructures to reduce the risks of emergency consequences of debris flows. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 136–141.

Введение

Селевые потоки распространены практически повсеместно в горах и в отдельных районах возвышенных равнин. Сход селей в освоенных районах приводит к человеческим жертвам и значительному материальному ущербу. От селевых потоков страдают города и населенные пункты, железные и шоссейные дороги, линии электропередач и связи, нефтепроводы, каналы, сельскохозяйственные угодья и центры рекреации. Методам защиты от селевых потоков посвящены исследования С.М. Флейшмана [*Флейшман, 1978*], М.С. Гагошидзе [*Гагошидзе, 1970*], И.И. Херхеулидзе [*Херхеулидзе, 1967*], А.Н. Олиферова [*Олиферов, 1963*], Ж.Б. Байнатова [*Байнатов, 1991*], С.Г. Рустамова и др. [*Рустамов и др., 1971*], Ф.К. Кочерги [*Кочерга, 1968*], А.Ф. Баринова [*Баринов, 2003*], В.Ф. Петрова [*Петров, 2012*], Б.С. Степанова и Р.К. Яфязовой [*Степанов, Яфязова, 2014*], Ф.Г. Габибова и др. [*Габибов и др., 2013*] и других.

При выборе мероприятий по защите от селевых потоков, следует заметить, что шаблона в этом быть не должно. В каждом конкретном случае должен быть индивидуальный подход.

В комплекс мероприятий по защите от селевых потоков входят, согласно Н.А. Алексееву [*Алексеев, 1988*], организационно-хозяйственные, агротехнические, лесомелиоративные и гидротехнические. Первые три направлены на предупреждение селей в самих очагах и их образования, гидротехнические же направлены на борьбу с уже сформировавшимися селями. Следует отметить, что каждое мероприятие является одинаково важным, и работы по их проведению должны начинаться либо одновременно, либо с небольшим разрывом и вестись до полного завершения.

Известные селезащитные конструкции в основном возводятся из железобетона, металла и местного грунта (защитные дамбы). Достаточно эффективны селезащитные

конструкции, отдельные части которых выполнены из утилизированных отходов (утилизированные металлические буровые трубы, автопокрышки и железобетонные железнодорожные шпалы).

Природные структуры в виде впадин и оврагов используются при проектировании селезащитных инженерных мероприятий. Геоматериал в виде местного грунта используется для возведения противоселевых дамб.

Использование местных петроструктур для конструирования селезащитных сооружений

Анализ многочисленных селезащитных конструкций показал потенциальную возможность создания новых конструкций на основе использования местных природных георесурсов в виде распространенных петроструктур. В селезащитном устройстве, выполняющей роль сквозной запруды с развитым в плане расположением в селеносном русле, разработанной специалистами Гидропроекта (Россия) активно используются местные валуны (крупные окатанные обломки горной породы, размером от 0,5 до 9,0 метров).

В этой сквозной запруде [*Авдеев и др., 1989*] отдельные валуны 1 (см. рис. 1), лежащие на дне русла 2 селевого потока, связанные между собой хаотично гибкими тросами 3 и с анкерами 4, закрепленными по берегам и в дне русла 2. Тросы 3 связаны с анкерами 4 дополнительными вертикальными тросами 5.

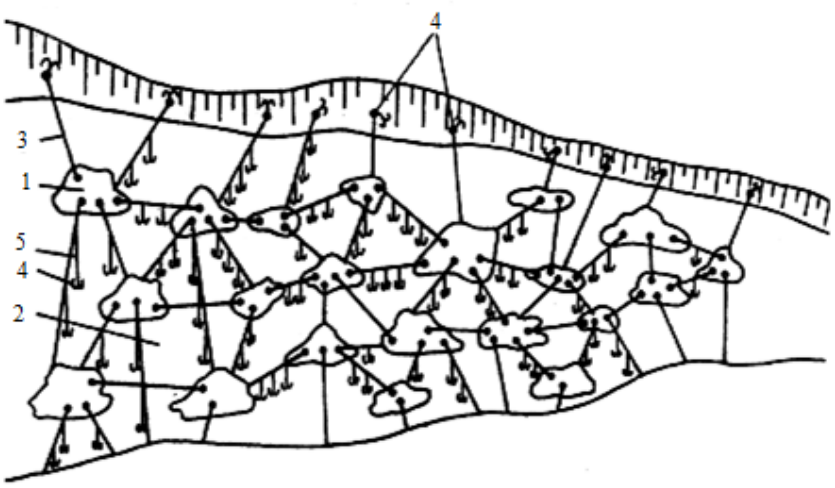


Рис. 1. Селезащитная сквозная запруда

Данная сквозная селезащитная запруда работает следующим образом. Образовавшийся селевой поток, встречая на пути преграду в виде пространственной решетки из связанных между собой валунов 1 и хаотично закрепленных тросов 3 и 5 с анкерами 4, задерживается и теряет свою силу.

Информации о внедрении указанного сооружения в практику не обнаружено. При всей привлекательности указанного технического решения, оно имеет заметные недостатки. Надежно прикреплять тросы к самим валунам практически очень трудно, здесь создается опасность разрыва этих связей. Кроме этого, для реализации данного сооружения на практике требуется осуществление многочисленных анкерных связей, что резко удорожает строительные работы.

Разработка инновационных конструкций селезащитных сооружений из местных петроструктур, резко уменьшающий риск потери их устойчивости

Авторами разработана новые конструкции сквозных селезащитных запруд с использованием местных крупных валунов.

В первом варианте новой конструкции [*Габибов, Ахмедова, 2024*], в установленных хаотичных местах селеносного русла 1 (см. рис. 2) бурят скважины на определенную расчетную глубину, в которые устанавливают сваи-стойки 2. В качествен свай–стоек 2 можно использовать отслужившие свой срок утилизированные буровые трубы (распиленные пополам они имеют длину около 5,5 м), утилизированные железнодорожные рельсы, а также стандартный металлопрокат в виде двутавров, труб и т.д. После установки на селеносном русле 1 свай-стоек 2 на отобранных крупных валунах 3 по их средней оси бурят сквозные отверстия диаметром, немного превышающим диаметр (или максимальную ширину поперечного сечения) сваи-стойки 2. После этого при помощи подъемного крана поднимают валун 3 и насаживают через полученное отверстие на сваю-стойку 2. Сверху валуны 3 фиксируют (укрепляют) на свое-стойке 2 болтовыми (для труб) и другими фиксаторами 4.

Предлагаемая сквозная селезащитная запруда работает следующим образом. Образовавшийся селевой поток, встречая на пути преграду в виде хаотично расположенных зафиксированных и закрепленных к определенным местам русла при помощи свай-стоек 2 и фиксаторов 4, крупных валунов 3 задерживается и теряет свою силу. Часть твердой составляющей селя откладывается в пределах запруды, остальная часть ослабленного селя продолжает свое течение до следующего защитного сооружения или откладывает свое твердое содержание в зоне конуса выноса.

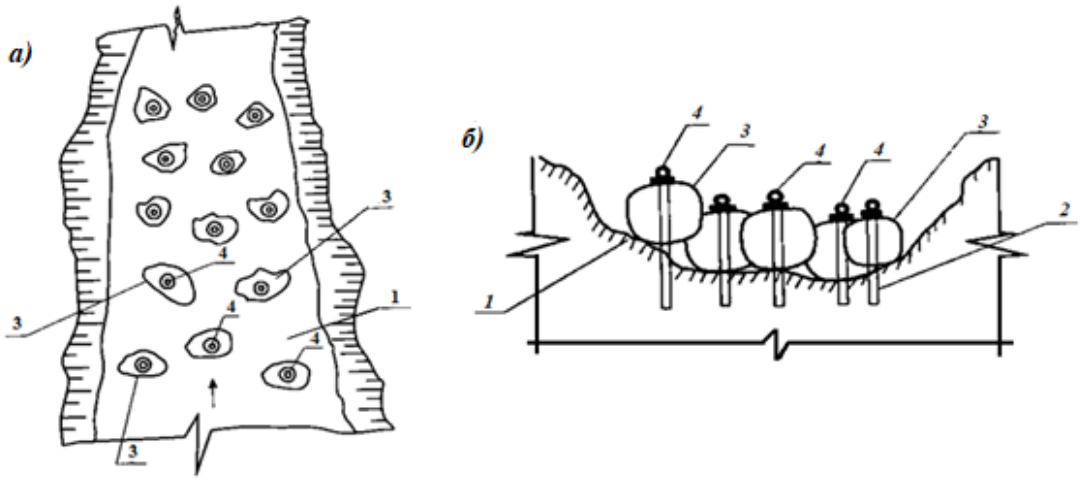


Рис. 2. Селезащитная запруда из одиночных валунов, нанизанных с сваи-стойки: а) вид в плане; б) вид с фронта

Во втором варианте [*Габибов и др., 2024*] предлагаемого селезащитного сооружения (рис. 3), в установленных местах русла 1 селевого потока в шахматном порядке бурят скважины на определенную расчетную глубину, в которые устанавливают сваи-стойки 2 (например, из распиленных пополам отработавших свой срок буровых труб). Скважины для свай-стоек 2 бурят на расчетную глубину, превышавшую глубину размыва.

После установки свай-стоек 2 в скважины заливается жидкий бетон. После набора прочности бетона сваи-стойки 2 готовы для дальнейшего монтажа селезащитного сооружения. После этого на отобранных крупных валунах 3 разного размера по осям, проходящим через центры тяжести каждого валуна, сверлят (или бурят) сквозные отверстия диаметром немного превышающим диаметр свай-стоек 2. Затем при помощи подъемного крана поднимают каждый валун 3 и по просверленному отверстию насаживают на сваи-стойки 2. Насаживание валунов 3 на сваи-стойки 2 производят в следующем порядке: вначале насаживают самый крупный валун 3, отобранный для конкретной сваи-стойки 2, затем сверху большого валуна 3 на конкретную сваю-стойку 2 насаживают валун 3 меньшего диаметра. В сваях-стойках 2, на которые нанизываются три валуна 3 разного размера, вначале на сваю-стойку 2 нанизывается валун 3 большого

размера, затем валун 3 среднего размера, а в конце валун 3 меньшего размера. Сверху валуны 3 фиксируют (укрепляют) на сваях-стойках 2 фиксаторами 4 (например, нанесенных на головках свай 2 резьбах шайбами и шаровыми гайками).

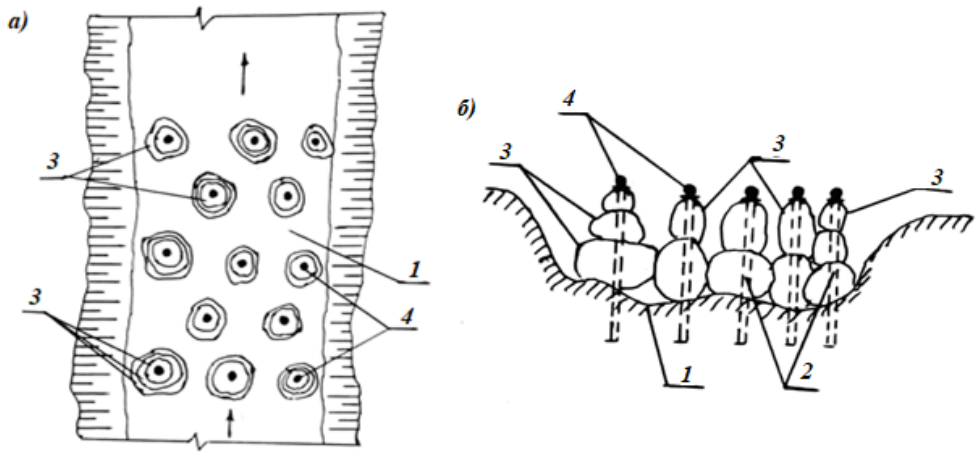


Рис. 3. Селезащитная запруда из нескольких валунов, нанизанных с сваи-стойки: а) вид в плане; б) вид с фронта

Селезащитное сооружение работает следующим образом: при образовании селевого потока, несущийся по руслу поток встречает на пути преграду в виде стопок крупных валунов 3, насаженных на сваи-стойки 2, задерживается ею и относительно теряет свою силу (энергию). Часть твердой составляющей селя откладывается в пределах селезащитного сооружения, остальная часть ослабленного селевого потока продолжает свое течение до следующего защитного сооружения или откладывает твердое содержание в зоне конуса выноса.

Техника – экономическая эффективность предложенного новых конструкций заключается в том, что повышается надежность и устойчивость селезащитного сооружения, а также достигается удешевление строительства сооружения из-за применения более простого крепления крупных валунов к руслу селевого потока.

Заключение

1. Природные структуры в виде впадин и оврагов используются при проектировании селезащитных инженерных мероприятий. Геоматериал в виде местного грунта используется для возведения противоселевых дамб;
2. Анализ многочисленных селезащитных конструкций показал потенциальную возможность создания новых конструкций на основе использования местных природных георесурсов в виде распространенных петроструктур в виде местных валунов (крупные окатанные обломки горной породы, размером от 0,5 до 9,0 м);
3. Ранее в России разработана конструкция селезащитной сквозной запруды. При всей привлекательности указанного технического решения, оно имеет заметные недостатки, т.к. надежно прикреплять тросы к самим валунам практически очень трудно, здесь создается опасность разрыва этих связей. Кроме этого, для реализации данного сооружения на практике требуется осуществление многочисленных анкерных связей, что резко удорожает строительные работы;
4. Авторами разработаны новые конструкции селезащитных сооружений с использованием природных петроструктур (крупных валунов). Здесь для укрепления валунов в селеносном русле реки используются свай-стойки, заглубленные на дне русла, на которые сверху через сквозные отверстия, просверленные по оси, проходящие через центр тяжести, нанизываются валуны. Таким образом достигается надежная устойчивость сооружения на негативное воздействие селевого потока.

Список литературы

Авдеев А.Г., Пашков А.А., Маркова С.Ф., Ерохина Е.В. Селезащитное устройство. Авторское свидетельство СССР на изобретение № 1484855. – 1989.

Алексеев Н.А. Стихийные явления в природе. – М.: Мысль, 1988. – 254 с.

Байнатов Ж.Б. Конструкции селезащитных сооружений и методы их расчета. – Алма-Ата: КазНИИНТИ, 1991. – 159 с.

Баринов А.В. Чрезвычайные ситуации природного характера и защита от них. – М.: ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. – 496 с.

Габибов Ф.Г., Алиев В.А., Кафаров Э.К. Селезащитное сооружение. Евразийский патент на изобретение № 048510. – 2024.

Габибов Ф.Г., Ахмедова А.Г. Селезащитное устройство. Евразийский патент на изобретение № 048522. – 2024.

Габибов Ф.Г., Оджагов Г.О., Габибова Л.Ф., Сафарова Н.А., Мамедли Р.А. Селезащитные сооружения из утилизированных автомобильных покрышек. // Геориск. 2013. – № 4. С. 30–35.

Гагошидзе М.С. Селевые явления и борьба с ними. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1970. – 385 с.

Кочерга Ф.К. Селевые потоки и борьба с ними. – Ташкент, 1968. – 48 с.

Олиферов А.Н. Борьба с эрозией и селевыми паводками в Крыму. – Симферополь: Крымиздат, 1963. – 92 с.

Перов В.Ф. Селеведение. – М.: Географический факультет МГУ, 2012. – 272 с.

Рустамов С.Г., Мадатзаде А.А., Будагов Б.А., Назирова Б.Т. Селевые потоки бассейна реки Курмухчай. – Баку: Элм, 1971. – 226 с.

Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Селевые процессы и селетехнические сооружения // Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: в 4-х томах. – Алматы: Институт географии, 2014. – Т. 3. – 434 с.

Флейшман С.М. Сели. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 312 с.

Херхеулидзе И.И. Сквозные защитные и регулирующие сооружения из сборного железобетона на горных реках. – М.: Московское отделение Гидрометеоиздата, 1967. – 132 с.

The safety of city Telavi from the destructive effects of debris flow

G.V. Gavardashvili

Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, givi_gava@yahoo.com

Abstract. In order to improve the safety of the population of the city of Telavi in the catchment area of the Telavis khevi River, scientific research was carried out to assess the risks of flooding of the territories of the city from anticipated floods and mudflows. In order to protect the population of Telavi from natural disasters caused by floods and mudflows formed in the Telavis khevi River bed and to assess the risks of flooded areas, scientific field and theoretical studies have been carried out, by means of which the erosion coefficient of mountain slopes, taking into account its main determinants, the volume of masses collapsed or dumped from mountain slopes in corresponding GPS coordinates are established and using mathematical modeling of the flow wave, the risk zones of flood and landslide inundated areas formed in the river channel in case of collapse of the natural barrier of 10 m height was established.

Key words: *the city of Telavi, population, natural disasters, safety, risk*

Cite of this article: Gavardashvili G.V. The safety of city Telavi from the destructive effects of debris flow. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 142–151.

Обеспечение безопасности города Телави от разрушительного воздействия селевого потока

Г.В. Гавардашвили

Институт водного хозяйства им. Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Тбилиси, Грузия, givi_gava@yahoo.com

Аннотация. В целях повышения безопасности населения города Телави, расположенного на водосборной территории реки Телавис-хеви, проведены научные исследования по оценке рисков затопления территорий города ожидаемыми наводнениями и селями. В целях защиты населения города Телави от стихийных бедствий, вызванных наводнениями и селями, образующимися в русле реки Телавис-хеви, и оценки рисков затопления территорий проведены научные полевые и теоретические исследования, в результате которых установлен коэффициент эрозии горных склонов с учетом его основных детерминант, объем масс, обрушившихся или сброшенных с горных склонов в соответствующих GPS-координатах, а также с помощью математического моделирования волнового потока установлены зоны риска затопления территорий паводками и оползнями, образующимися в русле реки при обрушении естественного барьера высотой 10 м.

Ключевые слова: *город Телави, население, стихийные бедствия, безопасность, риск*

Ссылка для цитирования: Гавардашвили Г.В. Обеспечение безопасности города Телави от разрушительного воздействия селевого потока. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 142–151.

Introduction

The territory of Telavi Municipality and Telavi itself geographically includes the river Alazani right bank and the northern slope of the watershed of Tsiv-Gombori Ridge (Fig. 1).

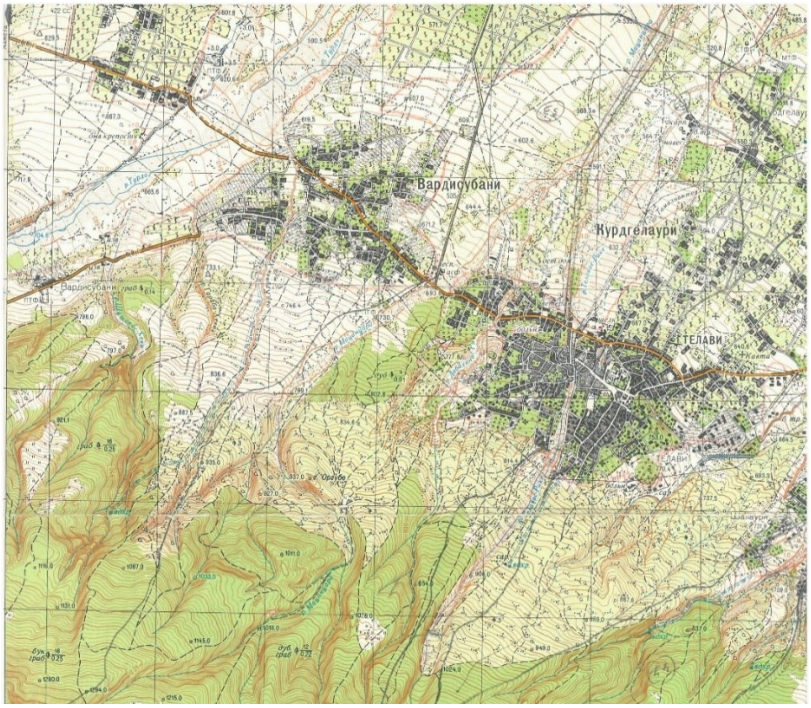


Fig. 1. Map of the River Telaviskhevi catch basin

From a geological point of view, the sloping depression of Alazani Valley is a very peculiar tectonic sinking structure, representing the remnant of a subsided foothill zone composed of Upper Jurassic and Cretaceous carbonate flysch, adjoining from the north to the Alazani Plain until the middle Pliocene and separated from the South Caucasus tectonic Block by a clearly shaped tectonic fault plane.

The general morphology of the Tsiv-Gombori Ridge is dominated by mesorelief created by water erosion, represented by deeply dissected narrow valleys, old peneplenised and typical kainotype flattened surfaces exposed by palaeotypic erosive-denudation processes and badland relief formed by erosion gullies is developed in the molasses deposits of the Ridge crest-side zone, as the hearths of mudflow processes formation and relief forms developed by landslide processes, which are an inexhaustible source of landslide formation and often lead to catastrophic landslides.

The northern slope of the Tsiv-Gombori Ridge, which borders the territory of Telavi from the south and is part of its area, creates a unique natural landscape that shapes the appearance of the city. The landscape and morphological peculiarity of this unique Ridge is due to its geographical location, complex geotectonic pattern of development and geological structure, the set of which has given the landscape morphology of the Ridge a special spectacular and cognitive aspect with its diverse paleo- and kainotypical relief morphological forms. The mid- and lower-mountain Tsiv-Gombori Ridge, on the other hand, is a watershed of the Alazani and Iori Rivers, which at the same time divides the Alazani Plain from the Iori Plateau.

According to the climatic zoning of Georgia (G. Chirakadze), the city of Telavi and its surroundings are located in the 6th climatic zone and occupy the Alazani Valley and foothills. The zone as a whole is characterized by moderate humidity, relatively warm winters and hot summers. The annual precipitation in the region varies between 700–900 mm. The average annual temperature is 11–14°C, the average temperature of January is close to 0°C, and the average temperature of July is 23–24°C.

In terms of resort climatology, Telavi and its surroundings belong to the moderately humid resort subzone of the plain and low-mountain zone of Eastern Georgia, which is characterized by mild snowless winters and very warm moderately humid summers. According to the Fedorov-Chubukov complex classification of climate, sunny and moderately humid weather prevails here throughout the year.

The following main types of weather prevail by seasons:

In the winter period, cloudy weather prevails, with almost 45% recurrence. About half of them are characterized by low cloudiness. Frosty weather is not uncommon, with a recurrence of about 30–35%. There is about 5–10% recurrence of cloudy, rainy and sunny, moderately humid and wet weather.

Frosty weather is not uncommon in early spring, with maximum 10–15% reoccurrence. In March, the occurrence of cloudy weather increases to 40%, and the occurrence of sunny, moderately humid and wet weather increases. Sunny, dry weather is common, and its frequency of occurrence reaches 20% in late spring.

In summer, the frequency of very hot and dry weather increases to 30% in June, 40% in July and 50% in August. So, the weather is very hot and very dry, with more than 10% recurrence in August. The incidence of rainy weather is up to 10%.

Table 1 shows the average monthly and annual numbers of days with intense and abundant precipitations in the city of Telavi.

Table 1. Days with intense and abundant precipitations in the city of Telavi

Post, number of days with precipitations	Month												Number of days in a year
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Intense	0.1	0.2	0.3	0.7	1.8	1.8	1.2	0.8	0.7	0.9	0.4	0.2	9
Abundant	0.04	0.04	0.1	0.3	0.5	0.9	0.6	0.4	0.3	0.4	0.1	0.1	4

Results of field scientific research conducted in 2020–2024 in the catchment area of the Telaviskhevi river basin

In order to assess the current ecological processes in the catchment area of the Telaviskhevi River, the field reconnaissance research was carried out in two phases: 1–10 June, 2020 (first phase) and 15–20 June, 2024 (second phase).

The field scientific studies were conducted in the Telaviskhevi River bed in several directions, in particular, using GPS, GIS maps and a complex digital distance meter, the locations of subsidence and collapse of soils in the river bed, their coordinates and absolute above-sea levels were determined. At these locations, the slope angles of the riverbed and the collapsed soil were measured, and at the next stage, the volumes of dumped mass were determined. Longitudinal soil and ground profiles were constructed based on the recorded material and the corresponding geometric dimensions were plotted on them.

During the field survey, the current condition of the 3 anti-mudflow barrages in the River Telaviskhevi bed was recorded, taking into account the failed assemblies. The condition of both head- and tailraces of the structures was also assessed.

In the course of the investigations, sections of the riverbed eroded and accumulated under the influence of floods, as well as traces of mudflows, were recorded as confirmed by the relevant photographic materials.

In the River Telaviskhevi catchment basin, 3 eroded banks with alluvial processes were assessed. In the course of field studies we observed solid fractions transported by the alluvial mass in the riverbed, as well as forest fragments stuck in the river bed, forming a natural barrier, which further intensifies alluvial processes.

We observed traces of mudflow passage in the riverbed, which gives an idea of the intensification of erosion and flooding processes in the Telaviskhevi catchment.

Fig. 2 shows a map with the results of the field survey, which is about the collapse of the mountain slope in the catchment basin of the Telaviskhevi River and the geographical location of 3 anti-mudflow barrages, with the corresponding coordinates and Fig. 3 shows a general view of the erosive gully of the Telaviskhevi River.

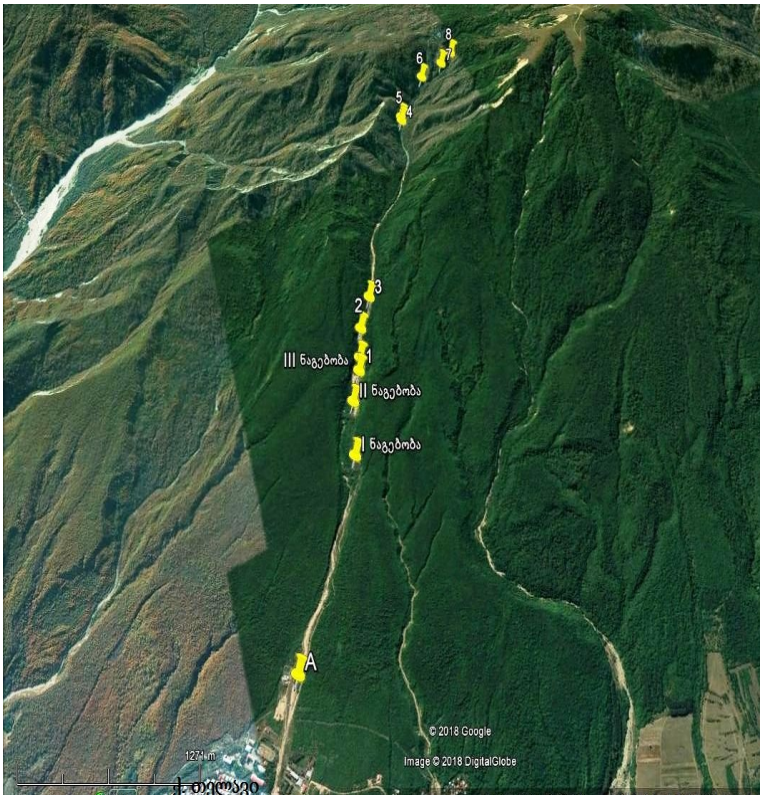


Fig. 2. Collapses of the soil and ground in the water catchment basin of the River Telaviskhevi

Fig. 3. General view of the erosive gully of the Telaviskhevi River

Mathematical modelling of floods and mudflows formed in the Telaviskhevi River bed

In addition to erosion processes, landslides on mountain slopes in the catchment area of the river or, in the case of mountain slopes, the crossing of the river channel and the destruction

of the natural barrier created there by the volume of water mass accumulated in layers above play a major role in the occurrence of mudflows.

Based on the analysis of scientific research conducted in June 2018 in the sensitive areas of the right bank of the Telaviskhevi River, it can be concluded that in the case of surface landslides or mountain slopes, taking into account climatic factors and engineering and geological conditions, the Telaviskhevi River bed can be blocked with 10-meter-high ground mass, which in the case of a tectoseismogenic landslide is possible to increase to 15 m.

Fig. 4 shows different cases of eroded mass collapsed in Telaviskhevi bed in GPS coordinates.

Taking into account the field investigations and desk work, the main parameters of the subsidence soil were determined, the main quantitative data of which are shown in Table 2.

Table 2. Main parameters of the collapsed ground

No.	GPS-coordinates of the collapsed ground		Masl, H (m)	Length of the collapsed mass, L (m)	Mountain slope angle (degree)	Volume of the collapsed mass, W (m^3)
	X	Y				
1	0537453	4637753	1058	233,8	70^0	14909
2	0537382	4637535	1090	126,9	60^0	7394
3	0537228	4637304	1108	122,7	46^0	1652
4	0536370	4635756	1313	37,60	52^0	332
5	0536365	4635719	1322	55,4	60^0	907
6	0536001	4635363	1381	16,0	54^0	110
7	0535747	4635304	1418	30,0	45^0	789
8	0535613	4635249	1445	12,0	45^0	26

We have divided the raw data into two parts: the first is constant values and the second is variable values; The constant values include the parameters that do not depend on any conditions; As for the variable values, they depend on flooding, the degree of barrier collapse, etc [*Armanini etc., 2011; Gavardashvili etc., 2009; Gavardashvili, 2013, 2011, 2022; Mirtskhoulava, 1993*].

The volume of water (W0) accumulated in the upper basins created by the barrier was determined by the following relation [*Shoigu, 1998; Shterenlikht, 1984; Morgan etc., 2001*]:

$$W = \frac{H_B S_B}{3}, \text{(mln m}^3\text{)} \quad (1)$$

where H_B is the water depth at the maximum flood level of the ground barrier (m); S_B is the area of so-called reservoir water surface formed by the ground barrier (mln m^3);

The width of the river is taken from digital topographic maps, and the number of points should not exceed 3 points on one side of the river axis, 6 points in total, and should include the whole catchment area in the design section.

The number of design cross-sections to determine the flooded area from the land boundary in the tailrace direction should not exceed 8 (Fig. 3), the distance between which should be marked in advance on the digital topographic map.

When a natural barrier collapses, the velocity of the flood (mudflow) wave (V) in the barrier tailrace shall be calculated using the following formula [*Natural hazards…, 2011; Natishvili etc., 2019, 2015; Chernomorets, 2005*]:

$$V = V_0(H_1/H_0)^{2/3}, \text{ (m/s)} \quad (2)$$

where V_0 is the velocity of water in the river in the tailrace of the structure (m/s); H_1 is the height of water in the river in the barrier tailrace (m); H_0 is the height of water in the river during the flood (m).

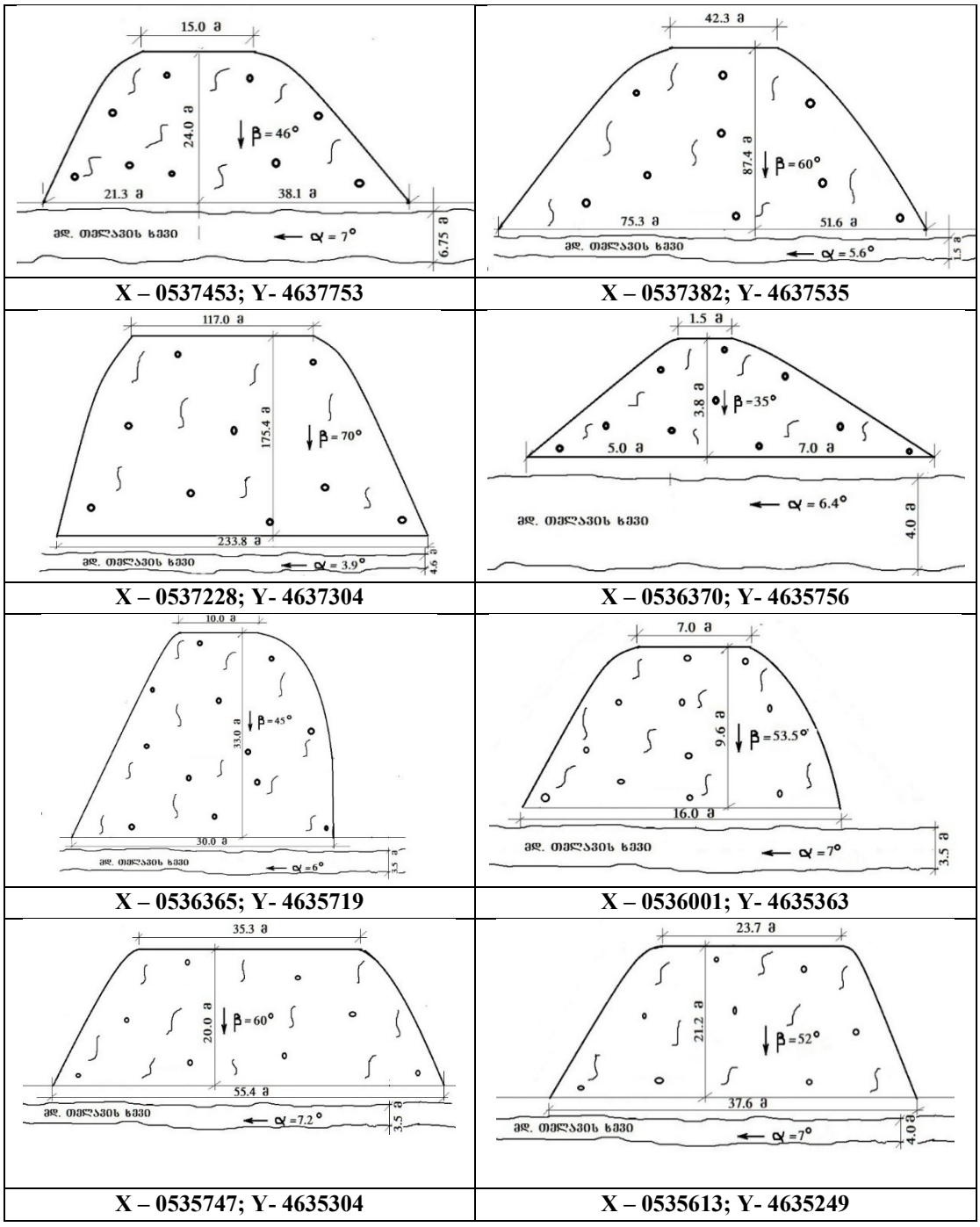


Fig. 4. Longitudinal profiles of collapsed inert mass

The degree of destruction of the ground barrier (E_P) is determined by the following relation:

$$E_p = \frac{F_B}{F_0}, \tag{3}$$

where F_B is the area of bank failure (m^2); F_0 is the surface area (m^2).

In addition to the above, the algorithm gives the following values: the height of the river bank edge (m), the number of crossings along the river, the distance between crossings (km), the width of the river bed (m), the current velocity in the riverbed (m/s), the riverbed levels(m), etc. [*Chernomorets, 2005; Lin etc., 2009*].

Fig. 3. Design sections recorded in the Telaviskhevi River bed

Using special computer software VOLNA-4 and algorithm written by us, we established the geometric dimensions of hydrological, hydraulic and flooded areas in case of destruction of 10-metre barrier in the Telaviskhevi riverbed, with their quantitative values included in Tables 3–5.

Table 3. Work report. Name: Breakage report of the 10-meter barrier in the Telaviskhevi riverbed

No.	Baseline data	Unit of measurement	Qty
1	Volume of flooded water in the barrier headrace	mln. m^3	0.026
2	Water depth near the barrier	m	10
3	Water surface area	mln. m^2	0.0106
4	Barrier width	m	50
5	River depth in the barrier tailrace	m	0.21
6	River width in the barrier tailrace	m	4.4
7	River velocity in the barrier tailrace	m/s	1
8	Water depth at the moment of the barrier failure	m	10
9	Degree of barrier failure	-	1
10	Maximum flood level	m	0
11	Height of the riverbed bank failure line	m	1350
12	Number of transverse profiles in the riverbed	pcs.	8

Table 4. Data of calculation

Description of cross sections	Unit of measurement	Section No.							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Distance of *i*-th section from the barrier	km	2.83	3.07	3.49	5.4	6.36	6.66	6.98	7.54
Specific current									
Water level	m	1048	1023	984	811	728	703	674	629
Depth	m	0.15	0.12	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Width	m	1.5	1.6	1.5	7.5	7.5	8.3	8.3	7.8
Current velocity	m/s	1.5	1.5	1.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Left bank									
Height of the riverbed bank failure line	m	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Width of the former riverbed	m	0.75	0.8	0.75	3.85	3.85	4.15	4.15	3.9
№ 1 horizontal level	m	1050	1024	986	814	731	707	678	633
Distance from the river axis to horizontal #1	m	53.7	30	31.76	20	26	24.8	8.5	8.4
№ 2 horizontal level	m	1053	1028	988	814.5	731.5	706.5	677.5	633.5
Distance from the river axis to horizontal № 2	m	67.1	65.3	49.9	36.5	98	38	41	15
№ 3 horizontal level	m	1058	1029	991	815	732	706	677	634
Distance from the river axis to horizontal № 3	m	86.1	70.5	68.1	55.3	170	50.1	77	24.5
Right bank									
Height of the riverbed bank failure line	m	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Width of the former riverbed	m	0.75	0.8	0.75	3.85	3.85	4.15	4.15	3.9
№ 1 horizontal level	m	1050	1025	985	814	731	707	678	633
Distance from the river axis to horizontal № 1	m	6.2	18.6	23.2	54	19.3	31	13.8	24.2
№ 2 horizontal level	m	1054	1030	987	814.5	731.5	708	678.5	632.5
Distance from the river axis to horizontal № 2	m	14.3	40.8	38.4	85	86.7	62	28.6	34.6
№ 3 horizontal level	m	1058	1035	991	815	732	709	679	632
Distance from the river axis to horizontal № 3	m	25.8	61.6	63.2	139	154	94	43.5	45.2

Principal conclusions and recommendations

Based on the processing and analysis of field scientific and theoretical studies conducted on the Telaviskhevi River in 2020–2024, the following main conclusions and recommendations can be made.

1. On the basis of field reconnaissance studies in the catchment area of the Telaviskhevi River, 8 areas of subsidence and collapse of the ground in the riverbed on the right slope of the mountain, partially blocking the riverbed, are identified. Their coordinates were determined using GPS and marked on a digital map using GIS-technologies.

2. The longitudinal profile of 8 ground collapse sites was constructed, geometric dimensions of the subsidence sites were determined and their volumes were calculated, the value of which varies within W = 25,65–14909,00 m^3.

3. As a result of field studies in the Telaviskhevi river bed two locations with coordinates A (X – 0535561; Y – 4635118) and B (X – 0536242; Y – 4635611), where flooding caused by the river occurred, were recorded. According to our calculation, the volume of their

mudflow mass is between 262.53 – 5062,50 m^3, and the volume of water accumulated in the headrace is 13 000 m^3 in the first case and 26,000 m^3 in the second.

Table 5. Calculation data of hydraulic parameters

Barrier failure parameters	Unit of measurement	Section No.								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
Distance of the section to the barrier	km	0	2.83	3.07	3.49	5.4	6.36	6.66	6.98	7.54
Water peak discharge in the cross section	thous. m^3/s	1.06	0.05	0.05	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Time of:										
Wave front start	s	0	13.81	16.54	21.53	43.72	53.04	55.93	59.04	64.43
Wave reduction	s	0	7.74	8.37	9.54	25.37	34.02	36.88	40	45.57
Wave tail reduction	s	0.53	31.98	34.64	39.31	92.37	119.0	127.4	136.3	151.8
Flooding	s	0.53	18.17	18.1	17.78	48.64	66	71.43	77.22	87.38
Peak current velocity	m/s	6.01	2.19	2.01	2.01	2.55	2.55	2.52	2.55	2.52
Wave height	m	5.79	0.92	0.79	0.82	0.78	0.73	0.69	0.68	0.66
Maximum flooding depth	m	6	1.07	0.91	0.97	0.88	0.83	0.79	0.78	0.76
Maximum flooding level	m	1346	1049	1024	984.8	811.8	728.7	703.7	6747	629.7
Maximum flooding width:										
On the left bank of the river	m	18.13	16.17	17.8	7.91	8.99	9.27	9.17	8.31	7.83
On the right bank of the river	m	18.13	2.82	4.83	15.29	12.81	8.66	9.5	8.58	8.54

4. By means of field and theoretical studies the erosion coefficient for three eroded slopes was determined (E = 0.031 – 0.114), the quantitative level of which corresponds to erosion class 3, i.e. the annual intensity of erosion is up to 5–10 tonnes per hectare considered to be quite high.

5. 8 sites of land subsidence and collapse of the mountain slope on the right slope in the Telaviskhevi River bed may pose a threat to the inhabitants of the city of Telavi, as the riverbed is narrowed by inert mass and the sites of collapse mentioned above work as runoff-guiding dams and in case of catastrophic floods or landslides it is quite possible that the runoff will rise on the left bank of the river and pose a threat to the local population, as well as to buildings of various purposes located on the left bank of the river.

6. The left bank of the Telaviskhevi River is very sensitive compared to the right bank and it is recommended to carry out appropriate engineering measures in some risky sections, as depending on the wandering type of the riverbed, even with normal water discharge, it is possible for the water flow to enter the carriageway and then onto the residential houses of Telavi residents.

7. In the 1980s 3 so-called flood control dams, so called "Shrekeulidze building" were built to regulate floods and mudflows formed in the Telaviskhevi River. During field investigations it was found that some parts of the building have failed and it is recommended to rehabilitate them immediately. Otherwise in case of a natural disaster the buildings may fail and the risk of impact of natural disasters to Telavi and its population may increase significantly.

8. The tailraces of all three structures are gullied under the impact of from water flows, and in some places the process has reached down the foundation of the structure. Also the energy dumping reinforced concrete blocks are overturned and are out of order. It is recommended that the head- and tailraces be rehabilitated immediately to allow the buildings to function properly.

9. In case of destruction of the channel configuration of the Telaviskhevi River and the 10-meter-high natural barrier in its bed, the main hydrological and hydraulic parameters

of the flood wave (mudflow) movement in 8 sections of the river are determined by using the computer software 'Volna-2', taking into account the time factor, as well as flooded areas in the Telaviskhevi riverbed, left and right from the river axis.

10. By means of mathematical calculations it has been established that floods and mudflows, which can occur in the riverbed in case of 10 m barrier destruction as a result of collapse of the landslide mass or mountain slope, the concrete-lined bed of the Telaviskhevi River passes this natural disaster with the calculated parameters provided the spaces at the bridge crossings are not filled with dry bushes and woody material in the riverbed transported by the mudflow.

References

Armanini A., Larcher M & Odorizzi M. 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, 2011, p. 1041–1049.

Gavardashvili G.V., Ayyub B. M., Sobota J., Bournaski E., Arabidze V. Simulation of Flood and Mud Flow Scenarios in Case of Failure of the Zhinvali Earth Dam International Symposium (With the support of UNESCO) on Floods and Modern Methods of Control Measures. 23–28 September 2009. Tbilisi, Georgia, 2009, p.148–163.

Gavardashvili G.V. Prediction of Flooded Territories In Case of Possible Breakdown of the Sioni Earth Dam. // International Conference on VAIONT – 1963-2013, Thoughts and analyses after 50 years since the catastrophic landslide. Padua, Italy, 8–10 October, 2013, p. 417–423.

Gavardashvili G. Measures for the Safety of Mountain Landscapes During Natural and Tehnogenic Disasters. Tbilisi, Universal, 2011, 273 p. (In Georgian).

Gavardashvili G.V. Predicting Erosive and Debris Flow Processes and the Innovative Measures to Control Them. Cambridge, UK: Cambridge Scholars Publishing House, 2022, p. 245. ISBN: 1-5275-8482-8; ISBN13: 978-1-5275-8482-2.

https://www.cambridgescholars.com/product/978-1-5275-8482-2

Mirtskhoulava, Ts.E. Ecological breakdowns (prediction of risk of breakdown, measures for lowering the hazard), Tbilisi, 1993, 432 p.

Shoigu, S.K. (ed.) Operative prediction of the engineering situation in emergency situations. (Book 2), Moscow, 1998, 176 p.

Shterenlikht D.V. Hydraulic. Energoatomizdat, Moscow, 1984, 494 p.

Morgan R.P.C., Hann M.J. Shah Deniz Gas Export Project: erosion risk assessment. Crafield University, UK, Silsoe, 2001, p. 25.

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. 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, 2019, p. 210–214.

Natishvili O.G., Gavardashvili G.V. 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, 2015, p. 138–143.

Natishvili O., Kruashvili I., Gavardashvili G., Inashvili I. Methodic Recommendations to design anti-debris flow structures (hydraulic calculations). Georgian National Academy of Science, Tbilisi, 2016, p. 48.

Chernomorets S.S. Debris flow loci before and after catastrophes. Moscow: Nauchnyi Mir, 2005, p. 200.

Lin M. Wang K., Chen T., Lin S. 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, 2009, 14.

Цифровые методы анализа развития русловых деформаций повышенной опасности

З.Ж. Гергокова

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, zayna.gerg@mail.ru

Аннотация. Задача осуществления контроля за изменениями различных участков поверхности, в силу постоянно ускоряющихся процессов природного и техногенного характера на предгорных и высокогорных территориях, представляющих возможную угрозу в плане селевой или оползневой опасности для объектов жизнедеятельности, набирает актуальность. Цель настоящего исследования – совершенствование технологии мониторинга опасных природных процессов в руслах горных и предгорных рек. В работе рассматривается вариант применения современных технических средств и специализированного программного обеспечения для количественной оценки пространственно-временных изменений вследствие опасных русловых и склоновых процессов. В ходе получения первичных данных использовался квадрокоптер DJI Mavic Air 2, результаты съемки с которого обрабатывались в профильных программах Agisoft Metashape Professional и Arc GIS 10. Были построены ортофотопланы и цифровые модели исследуемых участков ландшафта. По результатам работы получены количественные значения объема как унесенного селем грунта, так и отложений селя на определенных участках русла реки. Подобная информационная основа необходима в решении задач обеспечения безопасности населенных пунктов и объектов экономики от негативного воздействия процессов природного и техногенного характера.

Ключевые слова: *ландшафт, русло, поток, беспилотный летальный аппарат, сель, ортофотоплан, объем наносов*

Ссылка для цитирования: Гергокова З.Ж. Цифровые методы анализа развития русловых деформаций повышенной опасности. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 152–157.

Digital methods for analyzing the development of high-risk riverbed deformations

Z.Zh. Gergokova

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, zayna.gerg@mail.ru

Abstract. The task of monitoring changes in various areas of the surface, due to the constantly accelerating processes of a natural and man-made nature in foothill and high-altitude areas, which pose a possible threat in terms of debris flow or landslide hazards to vital objects, is gaining relevance. The purpose of this study is to improve the technology for monitoring dangerous natural processes in mountain and foothill riverbeds. The paper considers the use of modern technical means and specialized software for the quantitative assessment of spatiotemporal changes due to dangerous riverbed and slope processes. In the course of obtaining the primary data, a DJI Mavic Air 2 quadcopter was used, the survey results from which were processed in the specialized Agisoft Metashape Professional and Arc GIS 10 programs. Orthophotoplans and digital models of the studied landscape sections were built. Based on the results of the work, quantitative values of the volume of both the debris flow-swept soil and debris flow deposits in certain sections of the riverbed were obtained. Such an information base is necessary in solving the tasks of ensuring the safety of settlements and economic facilities from the negative effects of natural and man-made processes.

Key words: *landscape, riverbed, stream, unmanned aerial vehicle, debris flow, orthophotoplan, sediment volume*

Cite this article: Gergokova Z.Zh. Digital methods for analyzing the development of high-risk riverbed deformations. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 152–157.

Введение

Мониторинг источников потенциальной угрозы в горах зачастую чрезвычайно затруднен, поскольку они, как правило, расположены на значительных высотах и бывают крайне труднодоступны. К тому же проведение наземного обследования зачастую не может раскрыть полной картины протекающих процессов. Наиболее информативными, ранее, являлись обследования с привлечением авиационной техники, что в свою очередь требовало существенных материальных затрат, а в последние десятилетия стало практически невозможным. В некоторой мере решение данного вопроса было облегчено появлением в широком доступе космоснимков земной поверхности с высоким разрешением [*Воскресенский, 2018*]. Однако, даже снимки необходимого разрешения и периодичности, получить которые становится всё сложнее, не позволяют с приемлемой точностью оценить количественные изменения морфометрических параметров наблюдаемых явлений. Поэтому, наряду с анализом разновременных космоснимков, аэрофотосъёмка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [*Атутова, 2018; Балтакова, 2018; Бляхарский, 2019; Докукин, 2020*], в настоящий момент, представляется наиболее перспективным направлением мониторинга локальных природных процессов в горах.

Данные периодических обследований, полученные аппаратной съемкой рельефа исследуемого участка поверхности, с высоким разрешением и с точной привязкой объектов в заданной системе координат, в дальнейшем, при соответствующей программной обработке, позволяют строить цифровые модели ландшафта с уровнем детализации достаточным для проведения сопоставительного анализа и достоверной оценки пространственно-временных изменений объекта. На основе результатов обработки цифровых фото исследуемой местности, в специализированном программном обеспечении Agisoft Metashape Professional строятся разновременные геопривязанные ортофотопланы намеченного участка, которые практически лишены искажений и с высокой точностью отражают морфометрические параметры объекта наблюдений в каждом случае [*Докукин, 2021; Ерофеев, 2018; Коновалова, 2010*].

Краткий обзор проблемы

С помощью современного оборудования и специализированного программного обеспечения, в данной работе, приводится пример определения количественных изменений морфометрических параметров некоторых участков русла реки Нальчик, после прохождения по нему наносоводного селевого потока. Для наглядности расчеты проводились для двух полярных явлений: в первом случае определялось количество наносов в секторе русла, вплотную примыкающем к автодорожному мосту выше по течению; а во втором – объем вынесенного потоком грунта в месте разрушения селем автодороги.

Методы

Обследования проводились до и непосредственно после прохождения наносоводного селевого потока [*Виноградов, 2008*]. Съемка проводилась с применением БПЛА DJI Mavic Air 2, стартовавшего из одной и той же точки, при ясной погоде, в

одинаковое время суток, при схожем уровне воды в реке с разницей в двое суток по времени. Тактико-технические данные использовавшегося квадрокоптера приведены в таблице 1.

Таблица 1. Тактико-технические данные БПЛА DJI Mavic Air 2

Взлетная масса, г.	Максимальная относительная высота полета над уровнем моря, м.	Максимальное расстояние полета, м.	Используемые спутниковые системы	Программное обеспечение управления дроном и съемкой	Максимальное разрешение фото, Мп.
570	5000	18500*	GPS, ГЛОНАСС	DJI Fly 1.9.4	48 8000x6000

*В связи с угрозой потери устойчивой связи с дроном, в условиях высокогорья, дальность его применения пришлось ограничить 4000 м.

Обработка и анализ данных, полученных в результате проведенных обследований, а также с целью построения цифровых моделей рельефа (ЦМР), ортофотопланов и пр. по материалам натурных съемок, применялась специализированная компьютерная программа Agisoft Metashape Professional. Данные проведенных обследований загружаются на компьютер с целью их дальнейшей обработки в данной программе. [*Докукин, 2019; Кондратьева, 2015*].

Затем в программе, по исследуемым участкам, было создано по два проекта – до и после прохождения по нему наносоводного селевого потока. Каждый из проектов включает в себя готовые ЦМР местности и ортофотоплан участка.

Для получения приемлемой точности результата использовались опорные GPS координаты и перекрытие кадров съемки в продольном и поперечном направлении – более 50%. Производится выравнивание камер – координатное, пространственное позиционирование аэрофотоснимков и строятся связующие точки (для данных проектов около 234 000), которые объединяют значительный объем фотоматериала в цельное изображение исследуемой территории (до, и после события). Здесь же происходит сведение аэрофотоснимков путем отождествления соответствующих точек с использованием результатов фототриангуляции и полуглобального метода отождествления. В нашем случае плотное облако из, более чем, 104 млн точек. Такая обработка позволяет достаточно точно позиционировать объект съемки географически и, с минимальными погрешностями определять количественные характеристики морфометрических параметров русла для каждого случая. Полученные, таким образом, материалы, в зависимости от специфики поставленной задачи, могут использоваться в различных специализированных программах и картографических сервисах.

Данные

Контрольными точками на обоих ортофотопланах русла были определены места, наиболее подверженные рискам, в том числе потенциальным, возникновения чрезвычайных ситуаций, а именно: участок русла на входе в створ автодорожного моста и отрезок грунтовой автодороги, проходящей вплотную к реке, примерно в 600-х метрах выше по течению (рис. 1).

По намеченным участкам были построены базовые, аппроксимирующие плоскости, которые, с целью расчета программой объема пространства ниже заданной плоскости до поверхности, совмещались по точкам рельефа, расположенным выше уровня воздействия потока.

Далее приведены результаты расчетов. При заданных параметрах плоскости – периметре и площади, разница в определении объема выше неё незначительна и укладывается в границы погрешности обусловленной наличием растительности и теней, которые при оцифровке могут быть приняты программой за рельеф (это объясняется относительным несовершенством применяемого оборудования и программного

обеспечения). Разница же значений, рассчитываемых ниже плоскости, показывает объемы – отложенных наносов в первом случае, и унесенного грунта во втором.

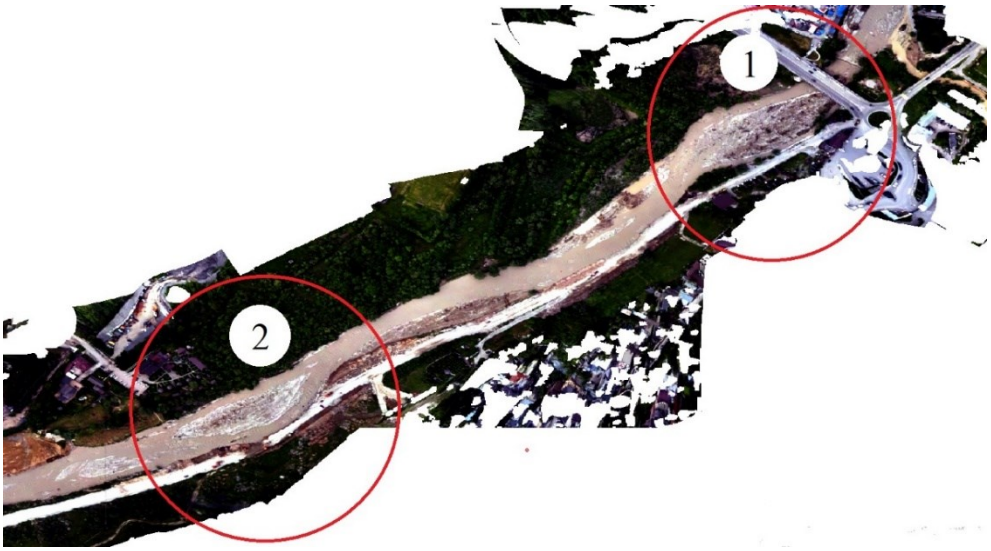


Рис. 1. Участки русла на ортофотоплане, по которым проводились расчеты объема: 1 – наносов, оставленных потоком; 2 – вынесенного потоком грунта

Анализ

В первом случае, в зоне, прилегающей к створу проема моста ниже по течению (участок 1, рис. 1), рассчитанные значения объема ниже базовой плоскости составляют: 11 665,3 м^3 до прохождения потока и 7042 м^3 после. Разница этих показателей – 4623,3 м^3, показывает объем материала, отложенного наносоводным селевым потоком, выше текущего уровня воды, на обследуемом участке.

Во втором случае, в месте разрушения наносоводным селевым потоком автодороги, проходящей вплотную к руслу реки (участок 2, см. рис. 1), рассчитанные значения объема ниже базовой плоскости составляют: 17 807,7 м^3 до прохождения потока и 22 184,1 м^3 после. Разница этих показателей – 4376,4 м^3, показывает объем грунта, унесенного наносоводным селевым потоком, что привело к частичному обрушению автодороги на обследуемом участке.

Полученные в работе результаты, показывают очевидные достоинства использования БПЛА (возможность оперативного получения актуальных данных, высокая точность съемки, позиционирование в глобальной системе координат и пр.) и соответствующего программного обеспечения для определения количественных значений пространственно-временных изменений наблюдаемых природных объектов.

Стоит так же упомянуть, что применение данного оборудования связано с некоторыми сложностями обусловленными, в основном, несовершенством техники или программного обеспечения. К примеру, штатная цифровая камера применявшегося БПЛА DJI Mavic Air 2 характеризуется сильной дисторсией (геометрическое искажение / искривление объектов съёмки), что выражается в искажении получаемых кадров, т. е. только небольшая центральная часть снимка оказывается пригодной для формирования стереопары. К тому же, в обработке материалов съемки с БПЛА, одной из проблем является такая помеха, как растительность и тени, которые при оцифровке могут приниматься программой за рельеф, что также может вносить некоторую погрешность в расчеты [*Докукин, 1993; Докукин, 2016*].

Выводы

Анализ результатов обработки материалов разновременных съемок БПЛА на относительно небольших участках горных территорий с протекающими в них опасными

русловыми и склоновыми процессами позволяет в оперативном режиме и с высокой точностью отслеживать динамику различных геоморфологических и гидрологических явлений. На основе данных, полученных с применением представленного оборудования и обработанных в профильных программных приложениях, возможно создание ортотрансформированных изображений и цифровых моделей рельефа местности, для расчета параметров позволяющих количественно оценить динамику пространственно-временных изменений. Например, таких как, объёмам наносов в русле, оползневого тела или вынесенного в результате эрозионных или селевых процессов, грунта.

Достоверные сведения о количественных значениях морфометрических параметров природных объектов, несущих потенциальную угрозу жизнедеятельности в горах, существенно повышают эффективность разработки адекватных оперативных мероприятий, проектирования защитных сооружений и др., в целях предотвращения или минимизации негативного воздействия опасных природных процессов на селитебных территориях.

Материалы аэрофотосъёмки локальных участков горных территорий, подверженных опасным склоновым и русловым процессам, в соответствующей программной проработке, способны составить актуальную информационную основу при решении многих задач на разных направлениях геоэкологических, гидрологических, геоморфологических исследований, а также ландшафтоведения и картографии.

Список литературы

Атутова Ж.В. Опыт применения дистанционных данных при изучении восстановительной динамики геосистем // Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. – Иркутск: изд-во Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2018. – 135 с.

Балтакова А., Николова В., Кендерова Р., Христова Н. Применение ГИС и данных дистанционного зондирования для анализа селевых потоков на примере изучения западных предгорий Пирина (Болгария) // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 5-й Международной конференции / отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили. – Тбилиси: Универсал, 2018. – С. 22–33.

Бляхарский Д.П., Волгушева Н.Э., Казаков Э.Э. Мониторинг ледников в сезон абляции с использованием беспилотных аэрофотосъемочных систем на примере ледников Потанина и Александры (массив Табын-Богдо-ола, Монголия) // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. Т. 63, № 2. – С. 168–179.

Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 170 с.

Воскресенский И.С., Сучилин А.А., Ушакова Л.А., Шафоростов В.М., Энтин А.Л. Применение БПЛА для мониторинга оползневых и эрозийных процессов (на примере центра русской равнины) // Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск, 2018. – С. 42–47.

Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Черноморец С.С., Савернюк Е.А. Активизация обвалов на Центральном Кавказе и их влияние на динамику ледников и селевые процессы // Лёд и снег. – 2020. – Т. 60, №. 3. – С. 361–378.

Докукин М.Д. Типы моренного рельефа и селевая опасность (на примере северного склона Центрального Кавказа). Автореферат диссертации кандидата географических наук. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 1993. – 22 с.

Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А. Моренные пьедесталы – очаги формирования катастрофических гляциальных селей // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Материалы IV Международной конференции. – Иркутск, 2016. – С. 67–71.

Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Признаки подготовки катастрофических сходов ледников (анализ разновременной космической информации) // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Коллективная монография / под редакцией А.В. Николаева, В.Б. Заалишвили. – Владикавказ, 2019. – С. 522–528.

Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Мониторинг обвалов, оползней и других разрушительных процессов в высокогорной зоне на основе анализа

разновременных космоснимков // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях (Материалы Общероссийской научно-практической конференции). – М.: ООО «Геомаркетинг», 2021. – С. 59–68.

Ерофеев А.А., Ябаркин А.Ю., Еремеев В.Ф. Первые результаты аэрофотосъемки горно-ледникового бассейна Актру с использованием БПЛА // Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск, 2018. – С. 68–70.

Коновалова Т.И. Геосистемное картографирование. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. – 186 с.

Кадастр селевой опасности Юга Европейской части России // Отв. ред. 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. – М.: ООО «Феория»; Нальчик: Печатный двор, 2015. – 90 с.

Мониторинг развития селей на склонах бассейна р. Мзымты в районе горного кластера Олимпийской деревни

В.Н. Голосов[1,2], С.В. Харченко[1,2], М.И. Успенский[1,2], В.Е. Шатохина[1]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, gollossov@gmail.com

[2]Институт географии РАН, Москва, Россия

Аннотация. Черноморское побережье Кавказа – один из наиболее селеопасных районов России, что обуславливается эпизодическими мощными ливнями, значительными объемами рыхлых отложений на склонах гор, а также высокой антропогенной нагрузкой. Масштабы селевых событий меняются от очень мелких до грандиозных. Одни и те же очаги становятся селеносными с высокой частотой во времени, что лимитируется только частотой событий мощного стока воды и скоростью обновления обломочного материала на склоновых водосборах. Один из подобных очагов, расположенный на левом борту долины р. Мзымты непосредственно ниже Олимпийской деревни комплекса Роза-Хутор, изучается нами с 2019 г., ведутся повторные ежегодные аэрофотосъемки с БПЛА, создаются разновременные ЦМР. Неконтролируемый сток с частично заасфальтированных и застроенных водосборов 4 селевых лотков приводит к их постоянной активизации и закладке новых (за период наблюдений видоизменяется рельеф 2 центральных, наиболее крупных лотков, но еще большую активность проявляют более молодые 2 периферийные). При их сравнительно небольшой длине (не более 500 м) и очень высокой крутизне склона (25–35°, местами выше) долины р. Мзымты, прорезаемого ими, из года в год можно проследить пульсационный транспорт материала с верхних частей лотка в средние и нижние, где его движение останавливается до следующего селевого события. Таким образом, доставка селевого материала здесь не всегда осуществляется в днище долины за 1 годичный цикл. Сравнение ЦМР с разницей в 5 лет (2019–2024 гг.) показало, что объемы отрицательных изменений высот составили 37 600 м^3, а положительных – 9100 м^3. То есть за несколько лет безвозвратно с водосбора было вынесено 75% накопленного объема рыхлообломочного материала. Осредненная на оголенные от растительности участки величина селевой денудации составляет 90–100 см за 5 лет.

Ключевые слова: *эрозия, аккумуляция, экстремальные ливни, доставка наносов*

Ссылка для цитирования: Голосов В.Н., Харченко С.В., Успенский М.И., Шатохина В.Е. Мониторинг развития селей на склонах бассейна р. Мзымты в районе горного кластера Олимпийской деревни. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 158–167.

Monitoring of debris flow development on the slopes of the Mzymta river basin in the area of the Olympic Village Mountain cluster

V.N. Golosov[1,2], S.V. Kharchenko[1,2], M.I. Uspenskii[1,2], V.E. Shatokhina[1]

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, gollossov@gmail.com

[2]Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The Black Sea coast of the Caucasus is one of the most debris-prone areas of Russia, which is caused by episodic heavy rainfalls, significant volumes of loose sediments on mountain slopes, and high anthropogenic load. The scale of debris flow events varies from very small to grandiose. The same sources become debris-prone with a high

frequency in time, which is limited only by the frequency of events of powerful water runoff and the rate of renewal of debris on slope catchments. One of such sources, located on the left side of the Mzymta River valley directly below the Olympic Village of the Rosa Khutor complex, has been studied by us since 2019, repeated annual aerial surveys are conducted from UAVs, and multi-temporal DEMs are created. Uncontrolled runoff from the partially paved and built-up catchments of 4 debris flow chutes leads to their constant activation and the formation of new ones (during the observation period, the relief of the 2 central, largest chutes changes, but the younger 2 peripheral ones are even more active). It is curious that, given their relatively short length (no more than 500 m) and the very steep slope (25–35°, higher in places) of the Mzymta valley cut by them, it is possible to trace the pulsating transport of material from the upper parts of the chute to the middle and lower ones from year to year, where its movement stops until the next debris flow event. Thus, the delivery of debris flow material here is not always carried out to the bottom of the valley in 1 annual cycle. Comparison of the DEM with a difference of 5 years (2019–2024) showed that the volumes of negative elevation changes amounted to 37,600 m^3, and positive ones – 9,100 m^3. That is, over several years, 75% of the volume of loose debris was irretrievably removed from the catchment area. The average debris flow denudation value for areas exposed to vegetation is 90–100 cm over 5 years.

Key words: *erosion, accumulation, extreme rainfall, sediment delivery*

Cite of this article: Golosov V.N., Kharchenko S.V., Uspenskii M.I., Shatokhina V.E. Monitoring of debris flow development on the slopes of the Mzymta river basin in the area of the Olympic Village Mountain cluster. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 158–167.

Введение

Черноморское побережье Кавказа в границах РФ и примыкающий к нему низкогорно-среднегорный пояс относятся к регионам с высокой повторяемостью внезапных паводков [*Kuksina et al., 2025*] и селей [*Ефремов и др., 2020*]. Основными факторами, способствующими их формированию, являются значительный слой дождевых осадков, литологический состав пород, слагающих склоны и всё возрастающая антропогенная освоенность территории [*Шеко, 1980*]. Внезапные паводки преимущественно формируются в пределах малых водотоков и рек, дренирующих предгорно-низкогорный пояс [*Куксина и др., 2020*], тогда как образование селей отмечено на водосборах ручьёв и временных водотоков, прорезающих склоны среднегорно-высокогорного пояса, для которых характерны достаточно большие уклоны русла, что существенно повышает транспортирующие способности потоков.

В пределах бассейна р. Мзымты рост селевой активности был обусловлен строительством горного кластера Олимпиады 2014, который располагается в верхней части бассейна выше по течению от п. Красная Поляна [*Казаков и др., 2013, Шварёв и др., 2020*]. Основными причинами усиления селевой активности послужили сведение растительного покрова, неправильное складирование строительных грунтов в истоках временных и постоянных водотоков и искусственное увеличение площадей водосборов отдельных водотоков при планировке склонов. Несмотря на то, что с момента завершения основных строительных работ по сооружению объектов горного кластера прошло более 11 лет, площади склонов с высокой активностью экзогенных процессов, поставляющих материал для формирования селей, продолжает расти [*Derkacheva et al., 2024*]. Только отчасти это связано с сооружением новых горнолыжных трасс. На большинстве нарушенных участках склонов активность выветривания коренных пород и последующего перемещения рыхлообломочного материала процессами оползания, осыпания, отседания продолжается. В результате происходит активная подготовка материала, который служит основной для периодически формирующихся селей разной мощности.

Причинами формирования селей в данном регионе являются либо сход оползней, тело которых перегораживает водоток и приводит к образованию временных водоёмов, прорыв которых приводит к формированию селей, либо выпадение ливней с большим слоем осадков [*Казаков и др., 2013*]. В отдельных случаях сели формируются при наложении дождевых осадков на активное снеготаяние. Однако далеко не каждый случай выпадения осадков даже со слоем свыше 100 мм в сутки приводит к формированию селей и, напротив, в отдельных случаях мощные сели образуются при практически ежегодно выпадающих в районе Красной Поляны осадках в 60–80 мм [*Шварёв и др., 2020*]. Это можно связать с рядом факторов. Во-первых, данные о слое осадков базируются на точечных наблюдениях за метеопараметрами на метеостанциях и в этой связи важно иметь представление о том, на какой площади выпали осадки с данным слоем. Во-вторых, для формирования селя необходим достаточный объём рыхлообломочного материала, который может быть вовлечён в перемещение. В этой связи представляется важной задачей проведение детальных наблюдений за отдельными водосборами селевого происхождения с целью оценки соотношения, формирующегося внутри них за счёт процессов выветривания рыхлообломочного материала и объёма вещества, перемещаемого различными процессами денудации как внутри водосбора, так и за его пределы. Подобные наблюдения были организованы в 2019 г. и проводятся до настоящего времени на четырёх небольших селевых водосборах, расположенных на левом борту долины р. Мзымты северо-восточной экспозиции ниже по течению от впадения в неё р. Пслух. В данной статье анализируются результаты мониторинговых наблюдений на данном объекте за период 2019–2024 гг.

Объект исследования

Участок исследования – крутой левый борт долины р. Мзымты с уклонами 15–35°, протягивающийся вдоль реки на участке выше по течению от впадения в неё руч. Сулимовский и ниже впадения р. Пслух (рис. 1). Борт долины на всём протяжении имеет длину порядка 500 м. С запада и юго-запада он граничит с водосбором руч. Сулимовский, а с востока и юго-востока – водосбором руч. Колценко. Несколько малых временных водотоков прорезают борт в основном в его центральной части. Данные водосборы имеют линейно вытянутые форму, и только верхние части их водосборов выходят на слабонаклонную ступень рельефа междуречий, в пределах которой и построена большая часть горного кластера Олимпийской деревни. Борт сложен туфами, туффитами основного состава, аргиллитами с прослоями алевролитов и песчаника ачишхинской свиты [*Государственная…, 2002*]. До начала работ по строительству горного кластера борт долины был в основном залесён, но на одном из участков сохранился частично заросший участок со следами формирования селя, возникшего, очевидно в связи со сходом небольшого оползня, перекрывшего сток на одном из временных водотоков, и последующего размыва тела оползня селевым потоком (рис. 1А).

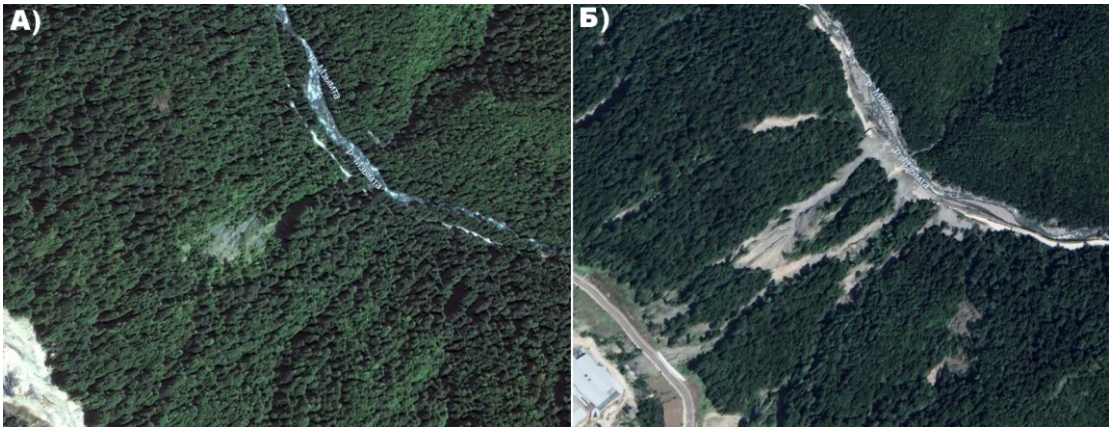


Рис. 1. Участок исследования: А – лето 2010 г.; Б – лето 2024 г.

Для участка, расположенного в пределах высот 630–1300 м над ур. моря, среднегодовое количество осадков составляет 1300–2000 мм судя по данным наблюдений по трем ближайшим гидрометеостанциям: Красная Поляна ($Н_{абс}$ = 567 м), Кордон Лаура ($Н_{абс}$ = 576 м) и Аибга ($Н_{абс}$ = 2226 м). Наибольшее ежемесячное количество осадков характерно для зимнего периода. Интенсивность осадков теплого времени года постепенно снижается к середине лета и вновь увеличивается осенью. Повторяемость сильных (свыше 60 мм) дождей значительно варьирует по годам при отсутствии какого-либо выраженного тренда. Более 100 мм за сутки выпадает сравнительно редко, но часто встречаются периоды, когда за несколько дней может выпасть до 200 мм осадков.

Обилие осадков в сочетании с высоким температурном фоном в теплое время года способствует очень быстрому росту растительности, в том числе на участках, подверженных воздействию селей. Это отчасти сдерживает активность рельефообразующих процессов. На исследуемом участке растут буковые, грабовые и пихтовые леса.

Материалы и методы

Мониторинг динамики рельефа селевых лотков осуществлялся с помощью подхода Structure from Motion (структура из движения) [*Westoby et al., 2012*]. За период наблюдений осуществлялись повторные аэрофотосъемки участка с использованием БПЛА DJI Mavic Pro (2019, 2022, 2023), DJI Phantom 4 Pro v.2 (2021) и DJI Mini 4 Pro (2024). В 2020 г. по техническим причинам съемка данного участка не удалась. Из серий аэрофотоснимков в Agisoft Metashape восстанавливались цифровые модели местности и ортофотопланы по стандартной процедуре [*Lastilla et al., 2021*]. В силу сложности обеспечения геодезического планового-высотного обоснования для взаимной привязки в данной местности разновременных данных использовались методы корегистрации цифровых моделей высот. Первичное грубое совмещение осуществлялось в CODEM [*NCALM-UH/CODEM, 2023*], затем точное совмещение проводилось с использованием ILEM [*Харченко, 2024*]. В основе первого из них лежит комбинация методов RANSAC (RANdom SAmple Consensus) и ICP (iterative closest point), создается матрица аффинной трансформации (сдвиг по трем осям, поворот по трем осям, масштабирование), которая затем применяется ко всей регистрируемой модели разом. Оптимальные параметры трансформации подбираются с учетом минимизации среднего квадрата ошибки (расстояния между референсной и регистрируемой ЦММ). Данный метод не позволяет учитывать локальные вариации ошибок, разных по величине и направлению, в пределах участка, для которого выполняется стереореконструкция поверхности. К привязанной в первом приближении регистрируемой ЦММ применяется второй алгоритм – ILEM, нацеленный на определение параметров трансформации за счет поиска стабильных, не изменившихся площадок за выбранный период времени. В качестве референсной модели, с которой совмещались все остальные, использовалась модель рельефа 2024 г., как наиболее детальная, а также с расчетом на будущие съемки (совмещать будущие ЦМ меняющегося рельефа проще с более поздней моделью, с меньшим накопленным объемом изменений, чем с более ранними). Остаточная ошибка регистрации определяется на каждой стадии (и после применения CODEM – по 3 осям отдельно и общая, и после применения ILEM – по высоте). Для CODEM ошибка характеризует неопределенность привязки каждой из ЦММ, а, следовательно, может использоваться для вычисления слоя неопределенности изменений высот по стандартной формуле:

$$UL = \pm 2 \times (Z1^2 + Z2^2)^{0.5}, \quad (1)$$

где *UL* – слой неопределенности (uncertainty layer), диапазон изменений высот из разновременных ЦММ/ЦМР, находящий в пределах погрешности их взаимной привязки с вероятностью 95% (±2σ), м ; *Z1* – ошибка регистрации первой сравниваемой модели по высоте, м; *Z2* – ошибка регистрации второй сравниваемой модели по высоте, м

ILEM в ходе процедуры корегистрации в качестве одного из результатов выдает среднеквадратическое отклонение разности высот Zerr для стабильных площадок (то есть, в реальности эта разность должна быть равна 0). Значение ±2 × Zerr является слоем неопределенности. При этом нет возможности получить оценку ошибки привязки каждой конкретной модели в отдельности, только их разницы. На рис. 2 показан фрагмент профилей за 2024 и 2019 гг. для поверхности стабильного техногенного склона (кровли и скатов противоселевой галереи), расположенной в основании исследуемого склона долины Мзымты и защищающей от селей автодорогу. Очевидно, что оба профиля имеют крайне высокую степень сходства. Среднеквадратическое отклонение высот достигает 5,4 см, ширина слоя неопределенности (в рамках этого микросклона, а не всего участка) – 10,8 см.

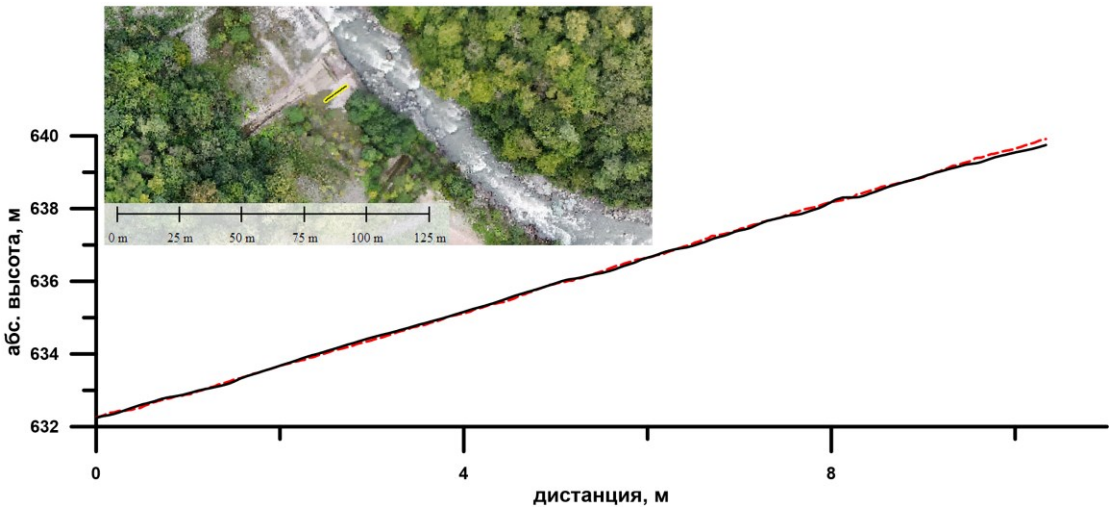


Рис. 2. Гипсометрические профили стабильного склона (бетонная крыша туннеля). Черная сплошная линия – 2024 г. (референсная ЦММ), красная пунктирная линия – 2019 г. (регистрируемая ЦММ). Жёлтая линия на снимке – расположение бетонный водослив в нижней части склона на участке мониторинга

Попарное совмещение разновременных моделей возможно двумя путями: 1) для оценки кумулятивного изменения рельефа сравниваются хронологически первая модель со второй, третьей и так далее, 2) для оценки изменений рельефа за отдельные временные срезы – сравниваются первая модель со второй, вторая с третьей и т.д. Нами для показа разных аспектов динамики селевых лотков использована комбинация обоих подходов. В случае нулевых ошибок географической привязки интервальные оценки легко и математически строго конвертируются в кумулятивные, и наоборот. Однако, разные по величине ошибки географический привязки данных за разные временные срезы и их пары делают такие переходы невозможными, поэтому оба подхода используются независимо.

Вычитание из более поздней ЦММ более ранней – позволяет получить цифровую модель разности высот (т.н. DEM of Difference, DoD), из которой затем вырезаются участки с величиной изменений в пределах погрешности (слой неопределенности). Остальные изменения высот с вероятностью 95%, после удаления артефактов, считаются полезным сигналом. На рис. 3 продемонстрированы этапы получения DoD для периода 2019–2024 гг. По полученной итоговой DoD рассчитываются площади и объемы отрицательных (денудация) и положительных (аккумуляция) изменений рельефа, анализируется доля материала, выносимого за пределы участка (в реку) за один цикл наблюдений, а также объем переотложенного в пределах участка материала. Разновременные ортофотопланы облегчают проведение геоморфологической интерпретации оцененных изменений высот. Кроме того, по ортофотоплану на 2024 г. были оконтурены залесённые участки. Изменения высот на залесённых участках не

брались в расчет. Следует отметить, что ошибка по высоте при использовании алгоритма корегистрации ILEM повышает точность оценок перемещённого материала в 2–3 раза.

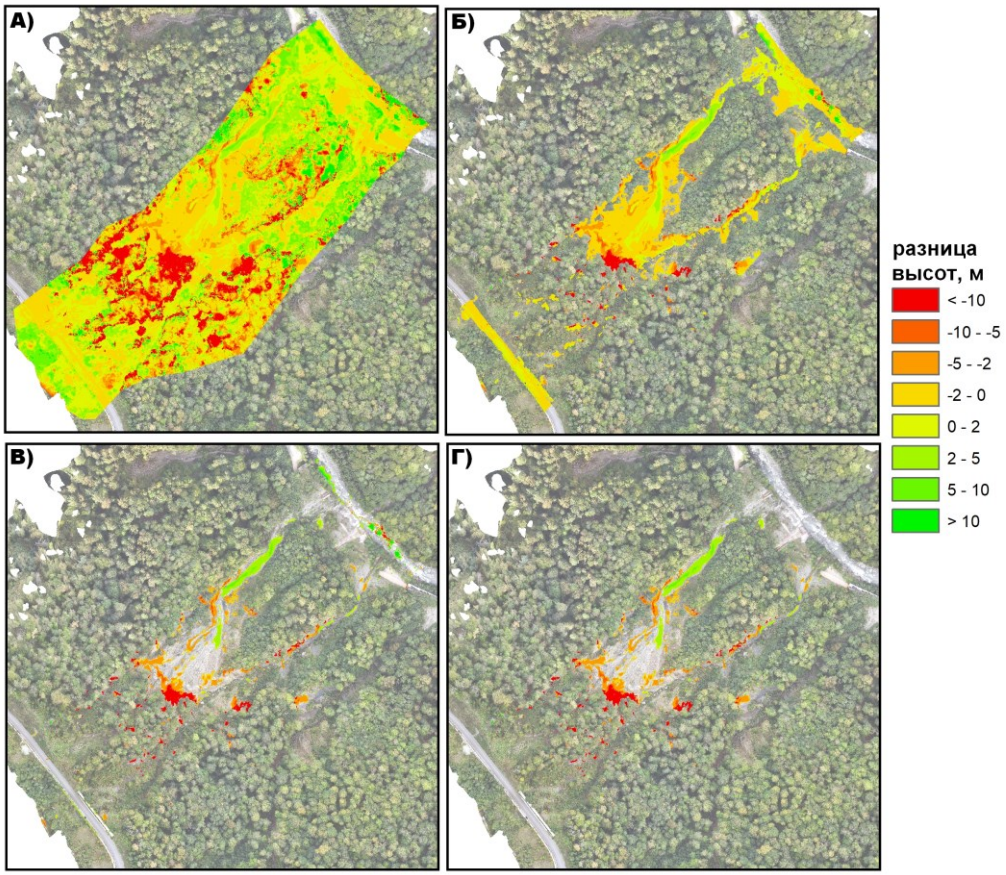


Рис. 3. Этапы получения данных о разнице высот на исследуемом участке за период 2019–2024 гг.: А) после корегистрации с помощью CODEM, Б) после маскирования растительности, В) после маскирования слоя неопределенности (±2*0,786 м), Г) после удаления артефактов в русле Мзымты и вдоль автодороги

Результаты

Сопоставление ЦМР, построенных по результатам проведения съёмок участка мониторинга с БПЛА, позволило оценить площади и объёмы перемещённого рыхлообломочного материала в целом за весь срок наблюдений и за отдельные периоды (таблица 1).

Следует отметить, что съёмка во все годы проводилась в последних числах сентября-первых октября, что позволяет объективно сравнивать различия между отдельными годами. Обращает на себя внимание достаточно большие различия между оценками объёмов выноса между двумя методами корегистрации цифровых моделей высот (CODEM и CODEM+ILEM). Вариант расчётов на основе CODEM+ILEM представляется более точным, хотя и он не лишён недостатков. Во-первых, при используемой технологии съёмки не учитывается перемещение материалы под кронами деревьев. Во-вторых, большая точность могла бы быть достигнута при наличии ряда опорных точек внутри селевых водосборов. Но последнее неосуществимо в связи с высокой динамикой рельефа за счёт процессов выветривания и денудации. Тем не менее, можно констатировать, что наиболее значимый вынос произошёл в период 2023–2024 гг., тогда как локальное перераспределение рыхлообломочного материала было более существенным в период 2019–2021 гг. Несмотря на то, что в данном случае оценки даны за два года можно предположить, что перемещение произошло за счёт формирования обвала или оползня, при практически одновременном дальнейшем

смещении материала в нижнюю часть склона селевым потоком. На это указывает распределение зон эрозии и переотложения (рис. 4А). В остальные годы перемещение материала носило пульсационный характер, с постепенным смещением материала вниз по склону (рис. 4 Б–Г). Суммарный вынос наносов за пределы водосбора составил 28,5–34,5 тыс. м^3, а слой денудации на всю площадь пересечения съемок 2019 и 2024 гг. – 20–27 см / 5 лет. При этом если учитывать только безлесную площадь (37 тыс. м^2) – показатели составляют уже 90–100 см за 5 лет. Следует учитывать, что нижние части склона, на которых расположены конуса выноса двух юго-восточных селевых лотков находятся за пределами участка съёмки. Поэтому доля материала, вынесенного за пределы собственно склона долины р. Мзымты, скорее завышена.

Таблица 1. Результаты оценок площадей зон сноса и аккумуляции и объёмов перемещённого, переотложившегося и вынесенного за пределы участка мониторинга материала

Период	CODEM (площадь / объем изменений)*			CODEM+ILEM (площадь / объем изменений)*		
	Вынос за пределы участка в р. Мзымта	Эрозия	Аккуму-ляция	Вынос за пределы участка в р. Мзымта	Эрозия	Аккуму-ляция
Суммарные значения за период 2019–2024 гг.						
2019-2024	**7,2 / -34,5**	**5,2 / -41,1**	**1,9 / 6,6**	**12,9 / -28,5**	**8,2 / -37,6**	**4,8 / 9,1**
Изменения за годичные интервалы						
2019-2021	4,4 / -16,9	2,1 / -27	2,2 / 10,1	10,9 / -14,6	5,4 / -28	5,6 / 13,4
2021-2022	2,8 / -1,6	1,6 / -8,8	1,2 / 7,2	9,6 / -5,9	6,8 / -13,7	2,8 / 7,8
2022-2023	2,3 / -0,9	1,3 / -8,8	0,9 / 7,9	8 / 1,4	4,1 / -8,1	3,9 / 9,5
2023-2024	4,6 / -11	3,3 / -24	1,3 / 13	12,6 / -10	8,1 / -23,9	4,5 / 13,9

* Числитель – площадь, тыс. м^2, знаменатель – объем, тыс. м^3.

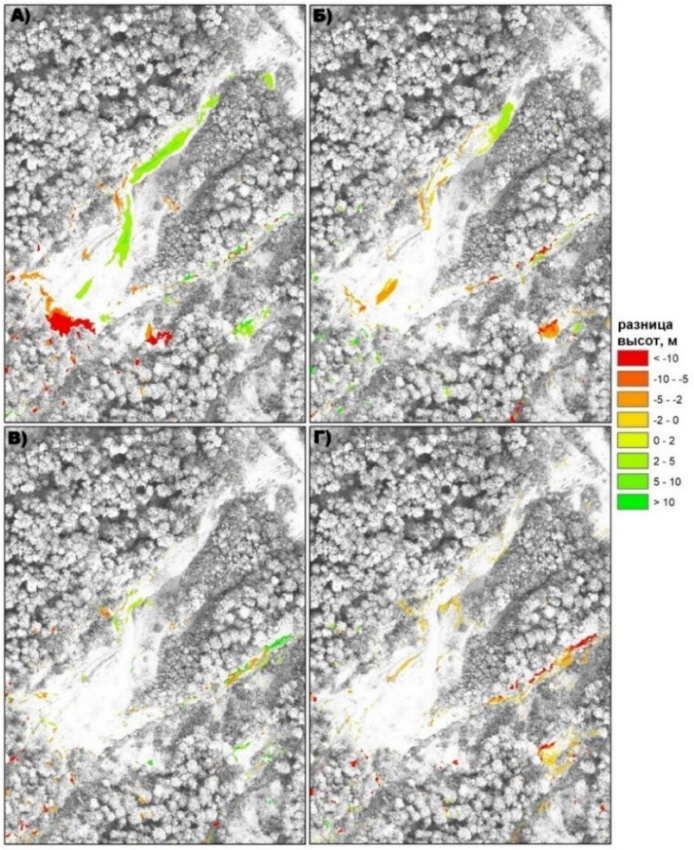


Рис. 4. Динамика изменений земной поверхности на участке мониторинга по периодам: А) 2019–2021 гг., Б) 2021–2022 гг., В) 2022–2023 гг., Г) 2023–2024 гг.

Обсуждение

Левый борт долины р. Мзымты на участке исследования в период до начала строительства горного кластера объектов Олимпиады 2014 г. был практически полностью залесён. Но в его центральной части примерно на середине склона существовал относительно открытый участок с молодой порослью леса, что позволяет предположить, что сравнительно недавно в этом месте был сплыв, образовавшийся вдоль периодически пересыхающего ручья, истоки которого располагаются на террасовидной поверхности, расположенной над данным крутым склоном. Известно [*Казаков и др., 2013*], что все ныне существующие селевые лотки и селевые конуса и шлейфы, находящиеся у подножья склона, либо выходящие непосредственно в днище долины р. Мзымта сформировались в период проведения строительных работ до 2014 г. Их формирование обусловлено катастрофическим размывом складированного на террасовидной площадке грунта [*Казаков и др., 2013*]. В результате два селевых лотка образовали обширный участок с максимальной степенью оголения поверхности склона от древесной растительности. Ряд других селевых лотков сформировались справа и слева от этих центральных лотков. Они на всём или на большем своём протяжении являются достаточно узкими врезами в склоновый чехол под лесом. Поэтому кроны деревьев в основном закрывают их, и на космических снимках фрагментарно прослеживается направление основного вреза, фрагментарно видимого. Тем не менее, наличие конусов выноса у подножья склона позволяют чётко их идентифицировать. В тоже время в центральных лотках наиболее активно идут процессы выветривания коренных пород из-за большей контрастности дневных и ночных температур на открытых участках склона, незащищенных кронами деревьев. За период наблюдений с 2019 г. зафиксировано, по меньшей мере, два случая формирования достаточно крупных склоновых селей, один из которых сошёл в селевом лотке, расположенном слева от центральных селевых лотков. Селевым материалом в очередной раз была перегорожена автодорога, которая на этом участке не защищена противоселевыми сооружениями. Во втором случае скорее всего собственно сель сформировался только в нижней трети склона за счёт размыва борта русла, ранее прорезавшего селевой конус выноса (рис. 5 А, Б).

Особенностью проявления селевых процессов на участке проведения мониторинга является формирование небольших селей. Из-за их небольших размеров и мощности существенная часть селевого материала переоткладывается ближе к подножию склона, где уклоны ниже (рис. 5В). Об этом свидетельствует как выявленное в процессе наших мониторинговых наблюдений перераспределение и частичный вынос рыхлообломочного материала (рис. 4), так и отсутствие зарастания лотка. В отсутствие регулярного размыва зарастание рыхлообломочных толщ в данных климатических условиях происходит исключительно быстро. Примером может служить зарастание борта селевого лотка, расположенного справа от центральных селевых лотков, на которых проводится мониторинг (рис. 5Б).

Процессы формирования склоновых селей на левом борту долины р. Мзымта стимулируются за счёт того, что на значительной части верхние части их водосборов, расположенные выше автодороги, заасфальтированы или застроены, то есть коэффициент стока с этой части водосбора близок к 1. В результате при выпадении сильных ливней формируется мощный поверхностный сток, который в концентрированном виде стекает на крутую часть склона после прохождения дюкеров.

Помимо трёх метеостанций гидрометеослужбы, которые расположены на довольно большом удалении от участка мониторинга, на горнолыжном курорте существует сеть автоматических метеостанций, которые находятся на разных высотах (1400–2200 м), но при этом в секторе курорта, достаточно близком к участку наших наблюдений. Имеющиеся суточные данные наблюдений за слоем осадков за период 2013–2022 гг. свидетельствует о том, что ливни со слоем свыше 60 мм выпадают практически ежегодно и слой осадков на метеостанциях, расположенных на разных высотах, при их выпадении достаточно близок. Это позволяет предположить, что слой выпавших осадков практически такой же вплоть до днища долины р. Мзымта. Так как

на настоящий момент мы не располагаем данными о суточных осадках на автоматических метеостанциях за 2023 и 2024 гг., преждевременно проводить анализ влияния повторяемости сильных ливней на формирование селевых паводков разной мощности по отдельным годом и за весь период наблюдений, но предварительно следует отметить, что в период 2019–2022 гг. были зафиксированы осадки свыше 100 мм за сутки и свыше 200 мм за четыре дня. Можно предположить, что при этих дождях с высокой долей вероятностью формировался достаточно мощный поверхностный сток.

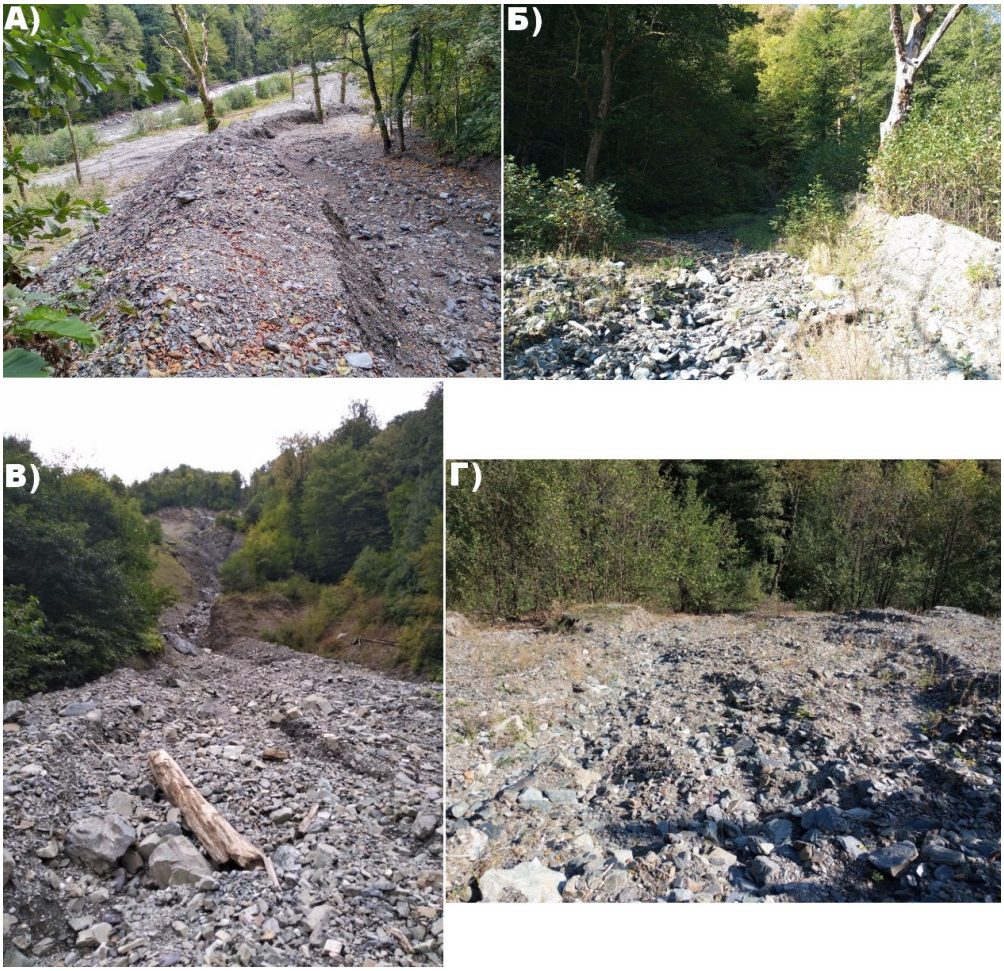


Рис. 5. Приустьевая часть селевого лотка, расположенного справа от центрального селевого лотка: А – в сентябре 2019 г.; Б – в сентябре 2023 г. Вид снизу вверх, засохшее дерево в левой части снимка, то же самое, что на рис. 5А в центре снимка. В – вид одного из селевых лотков на левом борту долины р. Мзымты; Г – прорезанный свежим врезом участок конуса выноса одного из селевых лотков

Заключение

Строительство горного кластера объектов Олимпиады 2014 г. в Большом Сочи стимулировало активизацию экзогенных процессов на склонах бассейнах р. Мзымты. Скорости различных экзогенных процессов определяют мощность селей, формирующихся как на водотоках, являющихся притоками р. Мзымты, так и склонах. Склоновые сели в отличие от селей, формирующихся в постоянных водотоках, слабо исследованы, хотя в отдельных случаях при их формировании перемещаются значительные объёмы рыхлообломочного материала.

Результаты пятилетнего мониторинга развития селевого водосбора, расположенного на крутом левом борту долины р. Мзымта на участке ниже по течению от впадения р. Пслух, позволили оценить объёмы перемещаемого внутри склона и

вынесенного за его пределы рыхлообломного материала, которые составили 37,6–41,1 тыс. м^3 и 28,5–34,5 тыс. м^3 соответственно. Максимальные годовые объёмы выноса, составившие 10–11 тыс. м^3 наблюдались в период с октября 2023 г. по конец сентября 2024 г. Суммарный слой денудации с безлесной части водосборов селевых лотков за пять лет оценивается в 90–100 см.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект 25-17-00143 (обработка и анализ данных съёмок с использованием БПЛА) и мегагранта Правительства Российской Федерации, реализуемого в рамках Соглашения № 075-15-2025-008 от 27.02 2025 (сбор и обработка гидрометеорологических данных, обсуждение результатов).

Список литературы

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Геологическая карта дочетвертичных образований. Кавказская серия. Масштаб 1:200 000. Лист K-37-V / под ред. Н.И. Пруцкого. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2002. – 1 л.

Ефремов Ю.В., Чернявский А.С., Николайчук А.В., Шуляков Д.Ю. Селевые процессы на Западном и Северо-Западном Кавказе // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды Международной конференции. – Пятигорск: Институт «Севкавгипроводхоз», 2008. – С. 147–150.

Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В., Казакова Е.Н., Морозов Г.Л. Селевые процессы в бассейне р. Мзымта (Красная Поляна) и их влияние на территорию строительства объектов Олимпийского комплекса // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2013. – № 6. – С. 516–529.

Куксина Л.В., Голосов В.Н., Промахова Е.В. Причины возникновения и география внезапных ливневых паводков // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2020. – № 1. – С. 11–22.

Харченко С.В. Новый алгоритм корегистрации цифровых моделей высот (ILEM) // Геоморфология и палеогеография. – 2024. – Т. 55, № 4. – С. 192–204.

Шварев С.В., Харченко С.В., Голосов В.Н., Успенский М.И. Количественная оценка факторов активизации селей в 2006–2019 гг. на склоне хребта Аигба (Западный Кавказ) // География и природные ресурсы. – 2021. – Т. 42, № 2. – С. 41–50.

Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. – М.: Недра, 1980. – 296 с.

Derkacheva A., Golosov V., Shvarev S. Hazardous exogenous geological processes in the mountains under the pressure of human activity: 15-year observations from a natural landscape to a large ski resort // Nat Hazards. – 2024. – Vol. 120. – P. 2847–2868.

Kuksina L., Belyakova P., Golosov V. et al. Flash floods on the northern coast of the black sea: Formation and characteristics // International Journal of Sediment Research. – 2025. – Vol. 40, No. 1. – P. 192–207.

Lastilla L., Belloni V., Ravanelli R., Crespi M. DSM generation from single and cross-sensor multi-view satellite images using the new Agisoft Metashape: The case studies of Trento and Matera (Italy) // Remote Sensing. – 2021. Vol. 13, No. 4. – 593.

Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications // Geomorphology. – 2012. – Vol. 179. – P. 300–314.

NCALM-UH/CODEM [Electronic data]. Access way: https://github.com/NCALM-UH/CODEM/tree/main (access date: 09.09.2023).

Пространственная взаимосвязь крупных оползней и селевых процессов в бассейне р. Унсатлен (Восточный Кавказ)

И.А. Идрисов[1], А.Л. Стром[2], Д.Д. Шубина[2]

[1]Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Россия, idris_gun@mail.ru

[2]Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

Аннотация. Восточный Кавказ относится к регионам с большим количеством крупных оползней. Наиболее крупные из которых сформированы в области развития массивных известняков мелового возраста образующих субвертикальные обрывы (хребты) высотой во многие сотни метров. Формирование оползней существенно трансформирует экзогенные процессы в обширном регионе. Одним из ярких эффектов является активизация селевых процессов по долинам рек ниже участков расположения оползня. В контрастном виде эта взаимосвязь проявилась в бассейне реки Унсатлен, крупного левого притока реки Андийское Койсу. Здесь выделяется крупный оползень Гортколу площадью более 20 км^2. Оползневой массив прорезан рекой Унсатлен и ее притоками. Вдоль бортов этих врезов происходят вторичные оползни с образованием небольших подпрудных озер и периодическим развитием селевых потоков. Эта территория является ярким примером «цепочечного парагенеза» опасных экзогенных процессов.

Ключевые слова: *Восточный Кавказ, оползень, сель, известняк*

Ссылка для цитирования: Идрисов И.А., Стром А.Л., Шубина Д.Д. Пространственная взаимосвязь крупных оползней и селевых процессов в бассейне р. Унсатлен (Восточный Кавказ). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 168–173.

Spatial relationship of large landslides and debris flow processes in the Unsatlen River basin (Eastern Caucasus)

I.A. Idrisov[1], A.L. Strom[2], D.D. Shubina[2]

[1]Institute of Geology, Daghestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia, idris_gun@mail.ru

[2]Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

Abstract. The Eastern Caucasus is one of the regions with many large landslides. The largest of which are formed around development of massive limestones of the Cretaceous age forming subvertical cliffs (ridges) many hundreds of meters high. Formation of landslides significantly transforms exogenous processes in a vast region. One of the striking effects is the activation of debris flow processes along river valleys below the landslide locations. In contrast, this relationship manifested itself in the basin of the Unsatlen River, a large left tributary of the Andiyskoye Koysu River. Here, the large Gortkolu landslide stands out with an area of more than 20 km^2. The landslide massif is cut by the Unsatlen River and its tributaries. Along the sides of these cuts, secondary landslides occur with the formation of small, dammed lakes and periodic development of debris flows. This territory is a striking example of a "chain paragenesis" of dangerous exogenous processes.

Key words: *Eastern Caucasus, landslide, debris flow, limestone*

Cite of this article: Idrisov I.A., Strom A.L., Shubina D.D. Spatial relationship of large landslides and debris flow processes in the Unsatlen River basin (Eastern Caucasus). In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 168–173.

Введение

Восточный Кавказ протягивается на 300 км с северо-запада на юго-восток в форме дуги, выгнутой к северу, шириной до 150 км. Северо-восточная часть в области его максимального расширения представлена многочисленными крупными прекрасно выраженными складками, описанные в многочисленных публикациях. Здесь широко развиты известняки, которые формируют два кластера: верхний мел и нижний мел-верхняя юра. В зависимости от локальных условий эти породы формируют поверхности хребтов и плато, их вертикальные обрывы или каньоны. Амплитуда рельефа здесь достигает 2,0–2,5 км. Область также известна как Внутригорный или Известняковый Дагестан.

Материалы

Территория относится к бассейну крупной реки Сулак, которая формируется из четырех крупных притоков (Койсу). Самым западным из которых является Андийское Койсу, истоки которой начинаются в Грузии. Район работ расположен в пределах ее крупного левого притока Унсатлен в нижней части бассейна.

Бассейн реки Унсатлен протягивается с севера на юг и пересекает ряд участков. Северный верхняя часть бассейна приурочена к южному крылу антиклинального Андийского хребта, здесь высота 2200–2400 м. Поверхность хребта бронируется плотными массивными серо-коричневыми известняками барремского яруса нижнего мела (рис. 1).

Рис. 1. Бассейн реки Унсатлен. Вид с севера

Южнее протягивается ось синклинали. Вдоль ее северного и южного крыла развиты аргиллиты альбского яруса, а также песчаники аптского яруса нижнего мела. Эти терригенные породы сильно размыты и формируют поверхность котловин. Мощность терригенных пород до 400 м. К западу и к востоку от бассейна реки вдоль оси синклинали протягиваются синклинальные плато Макажойское к западу и Цилитльское к востоку. В пределах Макажойского плато расположено крупнейшее подпрудное озеро Кавказа – Казенойам (Алхар) [*Идрисов, 2014*]. Плато имеют наклоны в стороны от реки, обрываются субвертикальными обрывами. Южный обрыв Цилитльского плато представлен хребтом Буцрах, современная высота гребня которого 2700–2806 м. Плато

сложены известняками верхнего мела мощностью до 700 м. Известняки белые и светло-серые, тонкослоистые и трещиноватые, тонкозернистые, с большим количеством тонких глинистых прослоев.

Вдоль бортов на поверхности плато (выраженного в рельефе в виде хребта Буцрах) развиты системы трещин бортового отпора разной степени выраженности. Здесь образовался крупный оползень Гортколу [*Идрисов и др., 2014*] размером 4×7 км. Вероятно, оползень формируется вдоль трещин в разное время и представляет собой несколько генераций.

Южнее протягивается еще одна антиклиналь. Но она пущена относительно лежащей к северу от плато и сильно размыта на ряд фрагментов. С юга к ней примыкает зоны из узких сжатых антиклинали и синклинали. Здесь развиты массивные известняки нижнего мела бронирующие круто падающие крылья складок. В этой части бассейн реки резко сужается до череды узких каньонов. При выходе к долине главной реки региона Андийского Койсу формируется крупный селевой конус выноса, на котором расположено село Муни (рис. 2). Ширина современного активного селевого русла здесь одна из максимальных для Восточного Кавказа, и составляет 120–130 м.

Рис. 2. Селевой конус реки Унсатлен

Выход селевых отложений приводит к отклонению русла реки Андийское Койсу вправо и прижатию ее к коренным известнякам (рис. 3). Эти отложения смешиваются с аллювием реки, представленным плотными песчаниками средней-нижней юры.

Рис. 3. Отклонение русла реки Андийское Койсу отложениями конуса выноса

Результаты

Полевые исследования в бассейне реки и окрестностях позволили выявить следующие основные особенности геоморфологии региона (рис. 4).

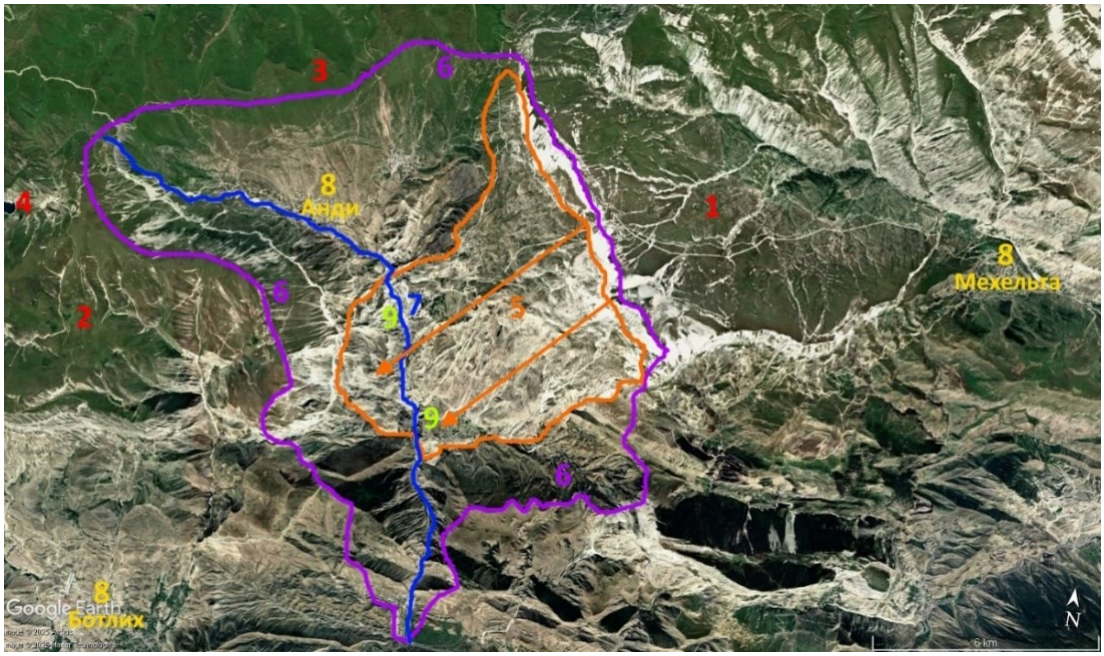


Рис. 4. Космоснимок района оползня. 1, 2 – синклинальные плато (Цилитльское и Макажойское); 3 – антиклинальный Андийский хребет; 4 – озеро Казенойам (Алхар); 5 – оползень Горткolу; 6 – бассейн р. Унсатлен: 7 – русло р. Унсатлен; 8 – крупные населенные пункты; 9 – активные селевые очаги

Оползень Горткolу сформирован из разно размерных обломков известняков верхнего мела, которые контрастно обособляются от темно-серых глин и серо-желтых песчаников нижнего мела. Оползень сошел на сильно эродированную поверхность, соответственно мощность отложений сильно варьирует, визуально до 400 м. Амплитуда оползня от 2800 до 950 м. Оползень сошел с левого борта долины, но за счет значительной амплитуды частично перешел и на правую часть долины реки. В дальнейшем оползень был прорезан рекой и ее притоками. Высота входа реки в оползневой массив 1350 м, протяженность вреза около 6 км, уклон 6,5%. Глубина расчленения оползня достигает первых сотен метров (рис. 1). В пределах оползня сохранились замкнутые котловины, в одной из них расположено озеро Горткolу (370 х 70 м) на высоте 1720 м на севере центральной части оползня. В пределах нескольких десятков квадратных километров оползневого массива характер поверхности сильно отличается. В целом можно найти широкий спектр от относительно стабильных участков, до участков быстрого развития оползневых процессов. Последние даже могут быть зафиксированы на космоснимках (рис. 5 и 6). Участки с максимальной скоростью изменений поверхности примыкают к крупным руслам на участках прорезывания с максимальной мощностью оползневых отложений. Сход оползней с бортов врезов приводит к перекрытию русел и образованию временных водоемов размеров первые гектары. Вероятно формирование оползней резко неоднородно во времени и приурочено к периодам интенсивных осадков. Для района работ среднее количество осадков можно оценить по метеостанции Ботлих. В год выпадает 390 мм, большая часть в теплое время. Например, в мае – 54 мм, в июне – 70 мм, в июле – 69 мм, августе – 56 мм. Типичными являются сильные ливни с выпадением 20–50 мм осадков за сутки. Бассейн реки отличается слабым развитием древесной растительности (рис. 1) и выпадающие осадки быстро стекают по рельефу.

Рис. 5. Активный очаг 1. Формирования подпрудных озер вдоль левого притока реки Унсатлен

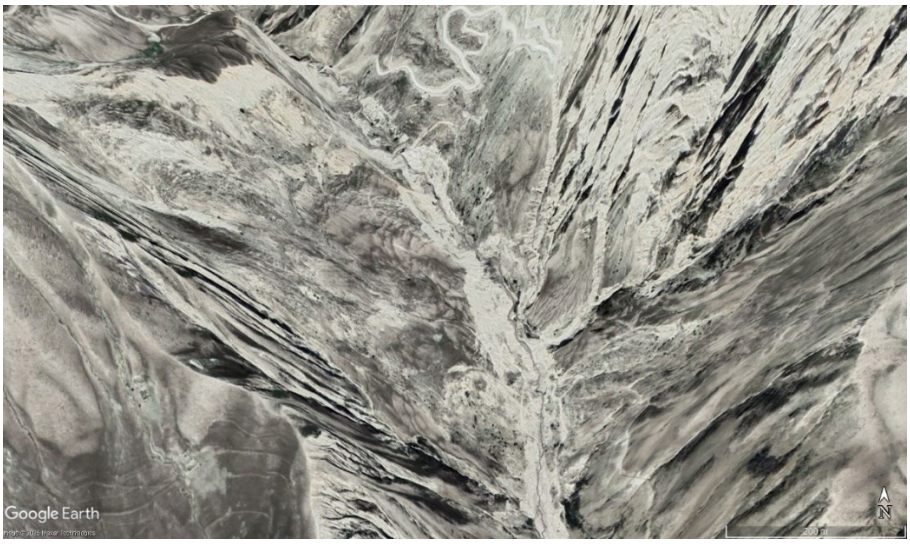


Рис. 6. Активный очаг 2. Многочисленные активные оползни вдоль русла реки Унсатлен

Выводы

Территория в целом является ярким примером «цепочечного парагенеза» опасных экзогенных процессов [*Анаев, 2024*]. Особенности строения показывают, что в русло реки и ее притоков сходят многочисленные оползни. В оползание вовлекается материал древнего оползня Гортколу, возраст которого оценить сложно. Объем обломочных отложений оползня достигает нескольких миллиардов кубометров, также имеется большой потенциал схода аналогичных оползней с хребта Буцрах. Последовательность протекающих в бассейне реки процессов можно реконструировать следующим образом. Крупный оползень сгенерировал большой объем рыхлого материала. Который в свою очередь участвует в формировании большого числе небольших оползней, которые перекрывают русла малых рек (Унсатлен и ее притоков) с образованием временных озер, которые прорываются и сходят селевыми потоками, что приводит к периодическому перекрытию русла реки Андийское Койсу с развитием подтопления и паводков ниже по руслу.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 25-47-00020.

Список литературы

Анаев М.А. Геоэкологический мониторинг склоновых процессов на территории Кабардино-Балкарской республики. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. – Грозный, 2024. – 154 с.

Идрисов И.А., Черкашин В.И., Мамаев С.А., Юсупов А.Р., Исаева Н.А. Особенности распространения крупных оползней на Восточном Кавказе // Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа. – Владикавказ, 2014. – С. 190–196.

Идрисов И.А. Запрудные (оползневые) озера Восточного Кавказа // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2014. – № 2 (27). – С. 96–101.

Assessing the impact of debris flows on fish using a simulation-based decision support model

M. Isaac, R.K. Isaac

Sam Higginbottom University of Agriculture Technology and Sciences, Prayagraj, India, rajendra.isaac@gmail.com

Abstract. Fish are sensitive to river flow turbulence, water quality and other adverse environmental conditions, especially when there is sudden entry of lot of debris in rivers due to landslides. Debris flows are destructive natural processes that impact riverine ecosystems, particularly aquatic habitats and fish populations. This study presents a simulation-based model to assess the severity of debris flows on sensitive fish species across a river continuum. Ten fish species having extreme, high, medium and low sensitivity for environmental conditions were selected and analyzed for adverse environmental conditions. The model integrates hydrological parameters and biological sensitivity indices to evaluate potential ecological disruptions. Implemented in Python using an interactive interface, the tool provides severity assessments and visual analytics to support river management and biodiversity conservation. The model serves as a tool for early warning, ecological impact prediction, and conservation planning.

Key words: *Debris Flow Index, Water Stress Index, fish species sensitivity, Eco-Impact*

Cite of this article: Isaac M., Isaac R.K. Assessing the impact of debris flows on fish using a simulation-based decision support model. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 174–185.

Оценка воздействия селевых потоков на рыбу с использованием модели поддержки принятия решений на основе имитационного моделирования

М. Айзек, Р.К. Айзек

Университет сельского хозяйства, технологий и наук имени Сэма Хиггинботтома, Праяградж, Индия, rajendra.isaac@gmail.com

Аннотация. Рыбы чувствительны к турбулентности речного потока, качеству воды и другим неблагоприятным условиям окружающей среды, особенно когда в реки внезапно попадает много обломочного материала из-за оползней. Сели являются разрушительными естественными процессами, которые влияют на речные экосистемы, в частности на водные местообитания и популяции рыб. В этом исследовании представлена модель, основанная на имитации, для оценки серьезности селевых потоков для чувствительных видов рыб по всему речному континууму. Было отобрано и проанализировано десять видов рыб с экстремальной, высокой, средней и низкой чувствительностью к условиям окружающей среды на предмет неблагоприятных условий окружающей среды. Модель объединяет гидрологические параметры и индексы биологической чувствительности для оценки потенциальных экологических нарушений. Реализованный в Python с использованием интерактивного интерфейса, инструмент обеспечивает оценку и визуальную аналитику для поддержки управления реками и сохранения биоразнообразия. Модель служит инструментом раннего предупреждения, прогнозирования экологического воздействия и планирования природоохранной деятельности.

Ключевые слова: *индекс селевого потока, индекс водного стресса, чувствительность видов рыб, экологическое воздействие*

Ссылка для цитирования: Айзек М., Айзек Р.К. Оценка воздействия селевых потоков на рыбу с использованием модели поддержки принятия решений на основе имитационного моделирования. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 174–185.

Introduction

Fish species, being the most sensitive and economically valuable food, are increasingly threatened by environmental calamities and natural hazards such as landslides, floods, and debris flows. river water quality changes. High sediment load carried away by debris flow events can significantly change river channel morphology, impact water quality, Temperature, dissolved oxygen, vegetation and dust and sediment ratio, causing severe impact on river ecosystem and inhabitants. This impact is more on some fish species, and few can survive easily in these rigorous conditions. In debris flow events the sudden change in fluvial environment takes place, causing unidirectional dispersal events and the fish and other inhabitants are carried or swept away by floods currents to the downstream by passive drift [*Byers and Pringle, 2006*]. The sediment which also includes organisms mixed up with flowing river water and transported downstream. Dispersal events in fluvial environment play a crucial role in shaping the distribution and diversity of species and influence the river ecosystem dynamics and evolution. If upstream colonization is to be achieved, then active dispersal is important, especially if obstacles are to be overcome that can impede movement [*Vitule et al. 2012*].

Debris flows carry a high sediment load and can significantly alter channel morphology, impact water quality, and cause habitat destruction. Sensitive aquatic species, especially fish, are vulnerable to such disturbances. in many small-bodied alien fishes colonization rates are primarily due to natural dispersal alone [*Davies et al., 2013; Davies and Britton, 2016*]. Kumar et al. [*2025*], reported the habitat quality loss along the river, influenced by the influx of sediments, debris and displacement of rocks during physical habitat assessment conducted during pre- and post-flash flood in Teesta River of Himalaya.

This study aims to develop and validate a computational model that simulates debris flow behavior across multiple stations along Mandakini River, Uttrakhand State, India, and evaluates the impact on diverse fish species based on their ecological sensitivity. The model serves as a tool for early warning, ecological impact prediction, and conservation planning.

Materials and methods

Study area

The Himalayan mountains are sensitive to multiple hazards [*Gardner, 1996*]. Climate change and altitudinal variations make it susceptible to frequent disasters [*Shrestha et al., 2007*] and rapid glacier melt that has escalated the risk of glacial lake outburst and flash floods [*Bajracharya et al., 2007; Chandel and Brar, 2011; Chandel and Brar, 2011; Kahlon et al., 2014; Nie et al., 2018*]. River Mandakini originates from glaciers north of Kedarnath; having major tributaries as Vasuki Ganga, Sina Gad, Kali Ganga, Markanda Ganga, Kyar Gad, Mandani Ganga and Madhyamaheshwar Ganga. Upper Mandakini basin of the Garhwal Himalayas of Uttarakhand has a rugged topography with elevation ranges from 948 to 7000 meters above mean sea level and the latitude of 30°12′ 58.132–30°48′ 27.642N and longitude of 79°2′ 58.649–79°2′ 0.952E

Study Framework and Model Inputs

The simulation was implemented in Python, using real-time adjustable inputs to represent hydrological and environmental conditions at five selected stations (A–E) on the Mandakini River. Each station corresponds to a downstream progression with increasing travel distance and decreasing soil saturation. User-defined input for each station is mentioned in Table 1.

Table 1. Debris flow model input for five stations

Stations	A	B	C	D	E
Precipitation, mm	300	300	216.1	205.7	200
Velocity, Cumec	200	151.1	138.6	119	101.3
Slope, %	80.3	40.9	41.4	30	15.6
Vegetation, %	20	30.5	60.1	71	81.1
Debris Discharge, Cum	3900	2500	2000	1500	1000
Temperature, C	15.9	17	19.1	19.8	22.7
Dissolved Oxygen, mg/L	1.6	2.3	3.6	4.4	6.2
WQI	15.7	30.3	51.1	61.5	71.2
Dust Ratio	0.1	0.3	0.4	0.6	0.8

Soil saturation is automatically assigned in decreasing order from 90% at station A to 50% at station E, simulating reduced upstream water retention. Travel distance starts at 0.5 km at station A and increases linearly downstream to 2.5 km.

Fish Sensitivity Dataset

A curated list of 12 freshwater fish species was used, categorized into four sensitivity classes based on literature [*Ruben van et al., 2020*]. Each station is evaluated for the impact on all 12 species. Table 2 shows score range of sensitive fish species opted for the model. The flow chart in Fig. 1 fully explains the model algorithm.

Table 2. Example score range of sensitive fish species

Class	Score Range	Species
Extreme	≥ 0.9	*Barbus barbus*
High	0.8	*Salmo salar*
Moderate	0.5–0.7	*Cyprinus carpio*
Low	≤ 0.4	*Ponticola syrman*

Model Logic

Debris Flow Index

A normalized debris flow index (0–10 scale) is computed for each fish-station combination using:

$$DFI=10\times(0.25P+0.15Q+0.15S+0.15SS-0.10V+0.20DV)DFI = 10 \times \left(0.25P + 0.15Q + 0.15S + 0.15SS - 0.10V + 0.20DV\right)DFI=10\times(0.25P+0.15Q+0.15S+0.15SS-0.10V+0.20DV),$$

where:

- PPP: Precipitation (normalized);
- QQQ: Flow rate;
- SSS: Slope;
- SSSSSS: Soil saturation;
- VVV: Vegetation cover;

- DVDVDV: Debris volume.

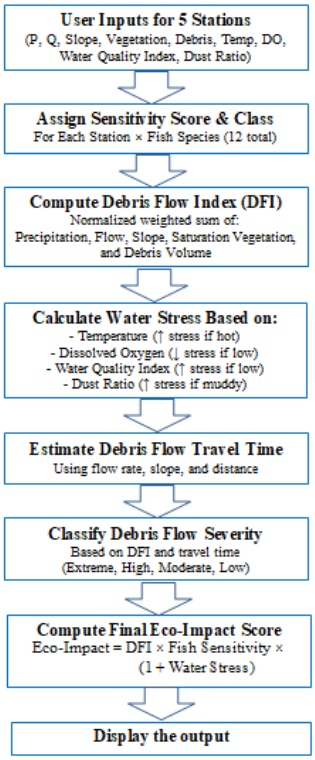


Fig. 1. Flow diagram presenting modeling procedure

Travel Time Estimation

Travel time is calculated using flow hydraulics:

$$\text{Velocity} = \frac{Q}{A} \cdot \sin(\theta) \cdot (1 - f) \quad \text{Velocity} = \frac{Q}{A} \cdot \sin(\theta) \cdot (1 - f) \quad T = \frac{D}{\text{Velocity}} \quad T = \frac{D}{\text{Velocity}},$$

where:

- $A = 10 \times 2$ (assumed width × depth);
- θ: slope in radians;
- f: friction coefficient (0.05);
- D: travel distance (km).

Severity Classification

Severity was defined as:

- **Extreme**: Index ≥ 8.5 and travel time < 10 min
- **High**: Index ≥ 6.5
- **Moderate**: Index ≥ 4
- **Low**: Otherwise

Results and discussion

Table 3 summarizes simulation results of Debris Flow Impact (DFI) and Eco-Impact scores for different fish species across five stations (A–E) on the Mandakini River. Each row represents a fish species, while columns detail model outputs—DFI, Water Stress, Travel Time, and final Eco-Impact score. DFI trend was found to be highest at Stations A and B (8.65, 10.61) and remains consistently high across all stations. This reflects steep slopes and increased debris

load near glacial and midstream zones. Station C shows a dip (6.46), indicating possible vegetation recovery or reduced debris volume. Stations A and B were found to be in critical risk zones based on debris flow hazard level alone.

Water Stress values, range from 0.67 to 0.89, were found to be high enough to severely compound ecological impacts. The highest Water Stress (0.89) was observed at Station A, driven by low DO, high temperature, and poor water quality near the glacier melt zone. Stress slightly declines downstream (Station E: 0.75), likely due to dilution or minor self-recovery in water quality. Water quality degradation, particularly near Stations A and B, significantly amplifies Eco-Impact. Travel time decreases as the station index decreases (from 5.32 min at Station E to 3.55 min at Station B). This suggests faster debris propagation in upstream reaches due to steep topography and reduced frictional losses.Less lead time for early warning in high-elevation zones like Kedarnath valley.

Eco-impact variability by species

Highest Eco-Impact was found at Station A (13.65). The score declines with distance but remains critically high until Station D. *Abramis brama*, *Cyprinus carpio* species showed moderate sensitivity Scores ranging from 7.58 (Station A) to 3.09 (Station E) followed by low sensitivity species (*Ponticola syrman*), impact scores remain below 6 across all stations. The Species sensitivity scoring (0.3–0.9) effectively modulates Eco-Impact, helping differentiate actual biological vulnerability across hazard zones.

The hazard decreases downstream, possibly due to lower slope, higher vegetation, or reduced debris load, but biological risk persists. In the moderate and low sensitivity class the relative proportion of rheophilic and lithophilic species decreases while the proportion of limnophils, phytophils and most importantly, eurytops increases.

Barbus barbus eith extreme eco impact, is not a native fish in India, but can be used as a bio-indicator of water quality due to its sensitivity to various pollutants. (Extreme-sensitive). Species in the lower sensitivity classes mostly express a trait combination of small size and short life expectation, rapid growth, early maturation and high mortality rates, which results in high population turnover and occasionally very high recruitment facilitating fast recovery [*Lande, 1993; Roff, 1993; Hutchings, 2000; Lytle and Poff, 2004*].

Many physico-chemical pressures like eutrophication or depleted water quality appear as press or ramp disturbance, i.e. they just increase and stagnate in amplitude and may remain in that state for an extended period, during which recovery cannot occur [*Lake, 2006*].

Low DO levels can stress fish, and *B. barbus* is sensitive to this. *Barbus barbus* is also known to accumulate heavy metals, and studies have shown this can impact their health and reproductive success [*Karolina et al., 2012*]. Significantly accumulated concentrations of heavy metals in the muscle, gills, liver, and kidney Moreover, gills and muscles proved to be the next target organs for heavy metal toxicity in Fish *Bagarius sp*. Seemingly, the liver and gills were unable to excrete these heavy metals fully because they might have bound with the macromolecules and enzymes [*Mahamood et al., 2023*].

EEA, 2018, also stated that higher sensitivity scores also have a higher relative proportion of lithophilic species. This agrees very well with recent assessments of the mostly moderate and poorer ecological quality of European rivers. The high sensitivity class also includes the highest relative proportion of rheophilic species and this, too, matches observations of declines of specialist guilds [*Aarts et al., 2004*].

High-risk zones (Stations A & B) are marked by high DFI, maximum water stress, and short travel times, an Immediate risk mitigation and early-warning systems are essential and urgently needed in these zones. Barbus barbus, Salmo salar, fish species with higher sensitivity scores, consistently registers higher Eco-Impact, validating the model's biological sensitivity integration. Water quality degradation was found to be significantly increases Eco-Impact, especially in upstream and midstream zones. The model successfully differentiates both spatial (station-wise) and species-level vulnerability, making it a strong decision-support tool for eco-hazard zoning and conservation planning.

Table 3. Simulation-based assessment of debris flow hazard (DFI), water stress, travel time, and resultant Eco-Impact on selected fish species across five stations in the Mandakini River basin

Fish Species	Station A		Station B		Station C		Station D		Station E	
	Index	Eco-impact	Index	Eco-impact	Index	Eco-impact	Index	Eco-impact	Index	Eco-impact
Barbus barbus (Cyprinidae)	DFI = 8.65	13.65	DFI = 7.93	11.93	DFI = 6.46	9.29	DFI = 8.65	7.39	DFI = 8.65	5.56
Acipenser gueldenstaedtii (Acip.)		12.13		10.61		8.26		6.57		4.94
Salmo salar (Salmonidae)	Water Stress = 0.75	12.13	Water Stress = 0.67	10.61	Water Stress = 0.75	8.26	Water Stress = 0.75	6.57	Water Stress = 0.75	4.94
Luciobarbus sclateri (Cyprinidae)		12.13		10.61		8.26		6.57		4.94
Salmo trutta (Salmonidae)		10.62		9.28		7.23		5.75		4.32
Salmo obtusirostris (Salmonidae)	Travel Time, (min) = 0.89	10.62	Travel Time, (min) = 3.55	9.28	Travel Time, (min) = 0.89	7.23	Travel Time, (min) = 0.89	5.75	Travel Time, (min) = 0.89	4.32
Abramis brama (Leuciscidae)		9.10		7.96		6.19		4.93		3.71
Salmo labrax (Salmonidae)		7.58		6.63		5.16		4.11		3.09
Cyprinus carpio (Cyprinidae)		7.58		6.63		5.16		4.11		3.09
Ponticola syrman (Gobiidae)	Severity = Extreme	6.07	Severity = High	5.30	Severity = Moderate	4.13	Severity = Moderate	3.29	Severity = Moderate	2.47
Squalius carolitertii (Leuciscidae)		6.07		5.30		4.13		3.29		2.47
Barbus meridionalis (Cyprinidae)		4.55		3.98		3.10		2.46		1.85

Fig. 2: account for debris flow severity, fish biological sensitivity, and environmental stressors such as temperature, oxygen, and dust ratio. Extreme-sensitive fish consistently show higher risk, and Eco-Impact increases downstream from A to E. Figure shows the Eco-Impact Scores experienced by fish species of different sensitivity classes (Extreme, High, Moderate, Low) at five stations (A to E). The Eco-Impact Score combines Debris Flow Index (DFI), Water Quality Stress (temperature, DO, turbidity, WQI) and Fish Sensitivity Score. Higher scores indicate a greater ecological threat to a fish species due to stronger debris flows, Poorer water quality, Higher fish sensitivity.

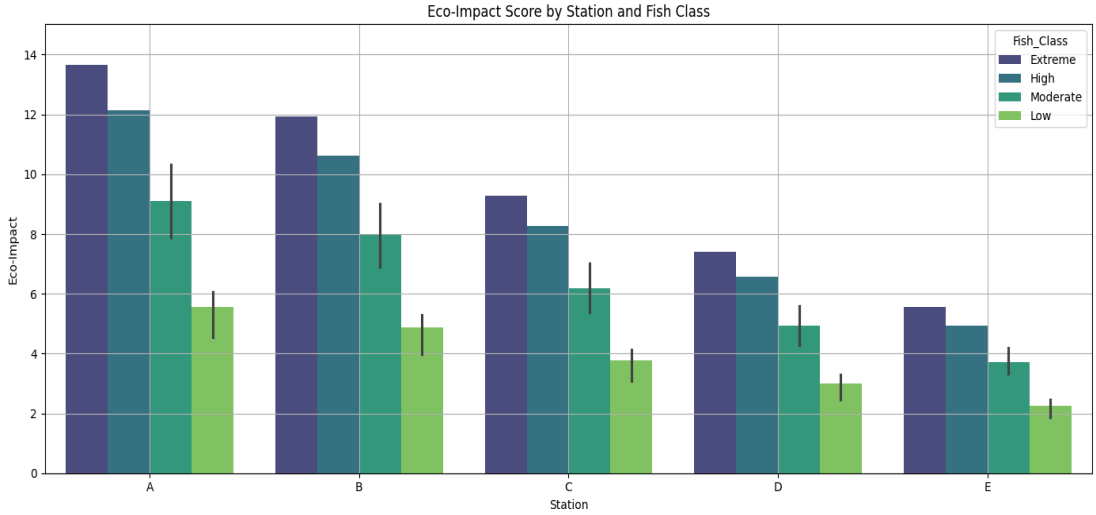


Fig. 2. Eco-Impact scores by fish sensitivity class across five stations (A–E)

It was observed that Eco-Impact increases from Station A to E, is likely due to increasing debris volume, slope, or decreasing water quality along downstream direction; Extreme-sensitive fish always have highest impact. High and Moderate fish classes also show significant impact Indicates the widespread risk from physical and water-related stressors. Low-sensitive fish show lowest impact but still affected Shows that even tolerant species may be stressed under debris-heavy or polluted conditions. Error bars (small black lines) Indicate variability (e.g., due to water quality or slope fluctuations); they're relatively small, suggesting consistent model output.

The progressive increase in Eco-Impact from Station A to Station E reflects cumulative stress due to increasing slope, debris load, and declining water quality. This trend suggests that mid- to lower-reach stations face more compounded ecological risks. Extreme-sensitive species such as *Barbus barbus* and *Salmo salar* consistently showed the highest Eco-Impact scores, reinforcing their vulnerability in mixed stress environments. Even low-sensitivity species exceeded Eco-Impact scores of 2.0 at all stations, indicating that debris flow events pose ecosystem-wide risks regardless of species' resilience. The narrow range of error bars across classes and stations supports the model's stability and suggests low uncertainty in predicting relative fish stress responses.

The dominance of Moderate and High categories reflects the ecosystem's moderate resilience but high susceptibility to hydrometeorological and sedimentation hazards. Extreme-sensitive species, although fewer, require focused monitoring and protection (Fig. 3).

The horizontal bar chart presents the frequency of fish species for the Extreme, High, Moderate, and Low sensitivity class within the Mandakini River basin. The model showed that nine fish species are under moderate sensitivity class, most common category, followed by high sensitivity class, which is significantly vulnerable, low sensitivity class (Relatively tolerant) and extreme sensitivity class (Least frequent, highly sensitive).

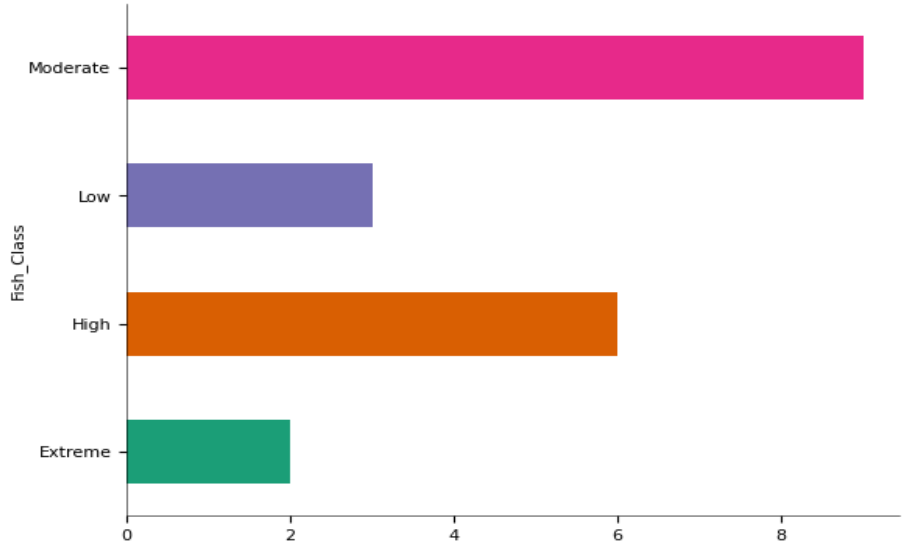


Fig. 3. Distribution of fish species across sensitivity classes in the Mandakini River basin

The majority of instances cluster in the 9–13 range, indicating widespread ecological vulnerability driven by debris flow hazards and compounded water stress. Very few low-risk scenarios are recorded, reflecting overall poor resilience under current environmental conditions (Fig. 4). The most frequent Eco-Impact scores are between 10 and 12.5, with the mode bin (peak) at 10–11 range. Figure suggests many fish species–station combinations are experiencing substantial ecological stress due to debris flows and associated water quality degradation. Few observations fall in the < 6 range, indicating that only a small portion of the ecosystem is unaffected or resilient under current debris flow conditions. High Eco-Impact scores are likely concentrated at upstream stations (A–C) for highly sensitive species (e.g., *Barbus barbus*, *Salmo salar*).

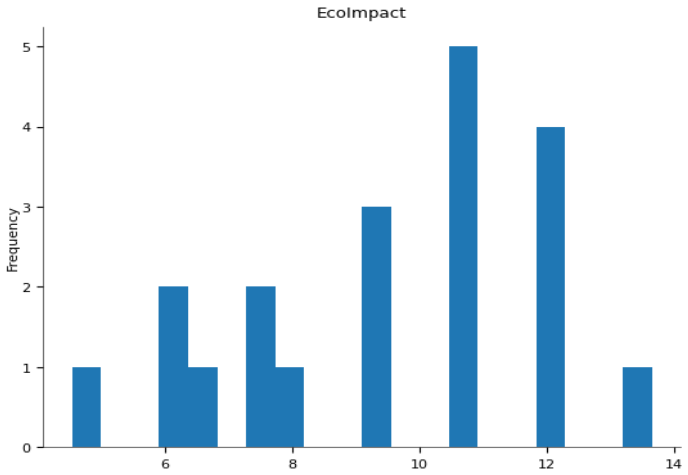


Fig. 4. Distribution of Eco-Impact scores across all stations and species combinations

The highest concentration is seen in the Moderate sensitivity class at Station A, suggesting greater ecological exposure in that zone. Absence of data for low-sensitivity species at Station B may indicate reduced diversity or localized flow/habitat constraints, Fig. 5.

Debris flow severity is a key driver of ecological risk, but species response is non-linear and class-specific. Focus should be on protecting moderate-sensitive species, which represent a keystone group experiencing the greatest cumulative stress. white cells show the absence of data highlights the need for expanded biodiversity monitoring, especially for low-sensitive species under high hazard conditions.

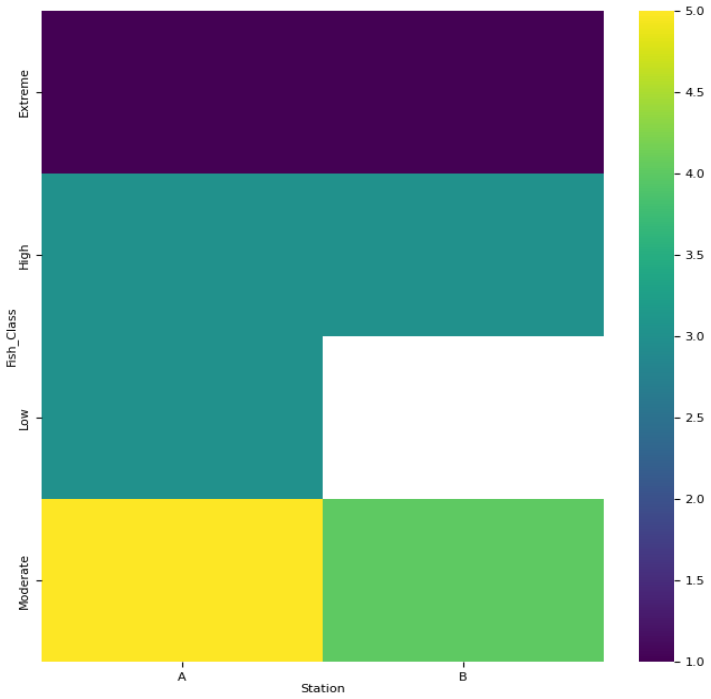


Fig. 5. Heat map showing the distribution or eco-impact scores of fish species by sensitivity class across Stations A and B

Ecological risk distribution

Fig. 6 shows that the majority of station-fish combinations are exposed to debris flows with DFI values between 6.5 and 8.0, falling into the 'High' severity category. The results show that debris flow impacts remain continuously high across the modeled stations, even if environmental inputs change. Concentration scenario in the high impact zone shows tha sensitivity scores or environmental conditions are responsible for absence of “Moderate” or “Extreme” categories. This may especially affect moderately sensitive species like *Cyprinus carpio* or *Salmo labrax*. The clustering around a DFI of ~7 suggests that debris-generating conditions (e.g., moderate slope, moderate precipitation, and moderate debris volume) are consistently contributing to high ecological stress.”

The model reflects realistic behavior at high precipitation at which flow lead to greater debris impact. *Barbus barbus* and *Salmo salar* are found to be most affected Species and the sensitivity strongly influences their vulnerability. Initial debris mobilization was governed by

Severe upstream soil saturation impacts. Model enables links physical hydrology and ecological sensitivity and quantifies it for multi-factorial analysis.

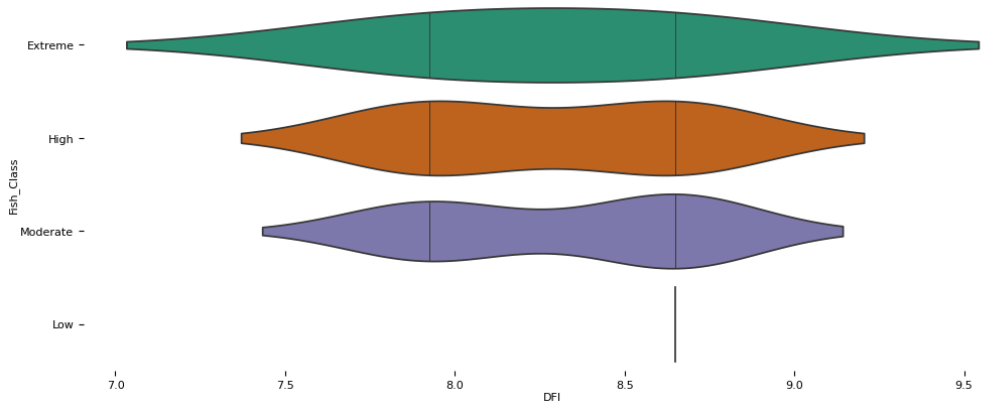


Fig. 6. Distribution of Debris Flow Index (DFI) values across fish sensitivity classes

Fig. 7 shows the distribution of Debris Flow Index (DFI) values across fish sensitivity classes. Extreme- and high-sensitive species show a wider DFI spread, indicating higher exposure to debris flow hazards. The narrow width of the low-sensitive class suggests sparse data or localized occupancy. The results highlight disproportionate ecological risk to highly sensitive species and also impacts all severity classes. Distribution of DFI values (7.0 to 9.5) is widest for extreme sensitivity classes. An average value of 8.2, indicates Extreme sensitivity fish species is prone to higher debris flow hazard. Figure suggests that these species are widely exposed to debris-prone zones or tend to occupy more hazardous upstream habitats. High vulnerability may be due to high overlap between sensitive habitats and hazard zones.

The shape is multi-peaked for high sensitivity class showing presence in both moderately and highly impacted zones, indicates diversity of habitat range across hazard gradients. High-sensitive species experience consistently elevated debris flow risks. A tolerant species exposed to high hazard at moderate class but surviving, The Extreme and High classes confirm the ecological stress gradient is uneven and species-dependent.

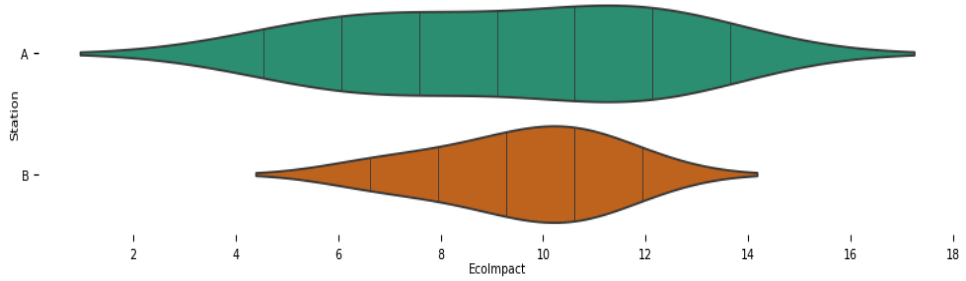


Fig. 7. Violin plot showing the distribution of Eco-Impact scores at Stations A and B. Station

Implications for environment assessment

Fig. 7 shows a broader range of impact at station A and B, indicating ecological heterogeneity and exposer of high sensitive species under varying debris flow conditions. Station B shows a consistent moderate exposure to high impact, which may be observed uniform but significantly prone to environmental stresses. Station A, displays a wide and relatively uniform distribution of Eco-Impact scores, ranging from ~3 to ~17 and likely spans varied microhabitats and includes species from all sensitivity classes, causing the wide Eco-Impact spread. Station B shows a narrower, more concentrated distribution, mostly between ~6 and ~13. The distribution is centered, indicating consistent high-moderate impact, with fewer outliers. Station B has less ecological variability but consistently elevated stress levels. Station B may have more stable hydrology or fewer sensitive species but still experiences significant hazard exposure.

Trend of eco-impact

Fig. 8 displays the variation of Eco-Impact values across a sequential series of observations The early decline suggests movement from high-risk zones or sensitive species toward more resilient combinations or less hazardous stations. The spike at index 12 is likely a local hotspot, possibly an extreme-sensitive species at a high-severity station. The alternating nature of peaks and troughs indicates varying debris flow index and sensitivity profiles per entry, possibly different stations and fish classes, each uniquely impacted. This pattern reinforces the non-uniform nature of eco-hazard exposure in the Mandakini River system. The variability shown here is typical of riverine systems with complex hydrology and biodiversity. The descending trend followed by a sharp spike indicates the spatial and biological variability of ecological impact across the Mandakini River. The sharp rise of line at index 12 may reflect a sharp concentration of debris at local hazard hotspot, recommends need for localized risk management strategies.

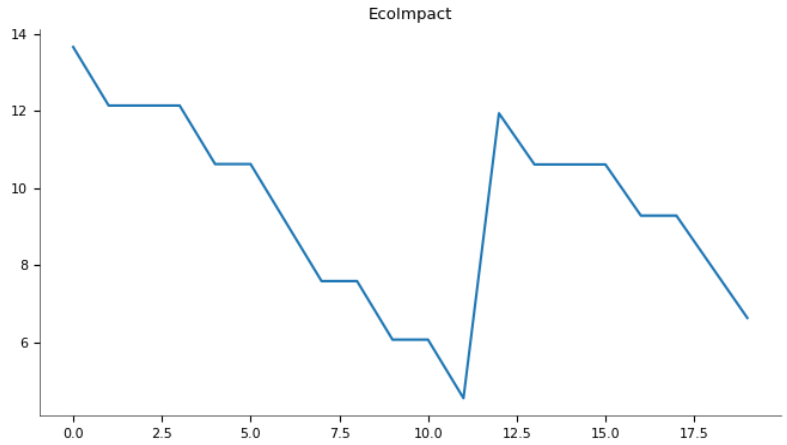


Fig. 8. Eco-Impact score trends across fish-station combinations

Conclusion

1. Simulation-Based Decision Support Model predicts across all the observing stations and to species and calls for adoption of early warning system for restoration of all the modeled zones.
2. Water quality parameters (like DO and WQI), amplifies Eco impact and their monitoring with DFI assessment parameters is essential.
3. Simulation-Based Decision Support Model is a practical tool to assess the ecological and environmental risk to river ecosystem. Integration of environmental and hydrologic variable and fish species sensitivity data, a riverine ecosystem protection and restoration risk mitigation plan may be prepared for Himalayan Rivers.
4. The Decision Support model can be applied for real-time monitoring, habitat restoration targeting, and regional biodiversity mapping.

References

Aarts B.G.W., Van Den Brink F.W.B., Nienhuis P.H. Habitat loss as the main cause of the slow recovery of fish faunas of regulated large rivers in Europe: the transversal floodplain gradient. // River Res. Appl., 2004, 20 (1): 3–23. doi: 10.1002/rra.720.

Bajracharya S.R., Mool P.K., Shrestha B.R. Impact of Climate Change on Himalayan Glaciers and Glacial Lakes: Case Studies on GLOF and Associated Hazards in Nepal and Bhutan. Kathmandu: ICIMOD, 2007.

Byers J.E., Pringle J.M. Going against the flow: retention, range limits and invasions in advective environments. // Mar. Ecol. Prog. Ser., 2006, 313: 27–41. doi: 10.3354/meps313027.

Chandel V.B.S., Brar K.K. Climatic Extremes and Changing Climate in Western Himalayas: A Study of Cloudburst Incidences in Himachal Pradesh. // Punjab Geographer, 2010, 6: 29–40.

Chandel V.B.S., Brar K.K. Multi-Disaster Risk and Vulnerability in Western Himalayan State of Himachal Pradesh. // Punjab Geographer, 2011, 7: 9–19.

Davies G.D., Britton J.R. (2016) Assessment of non-native fish dispersal from a freshwater aquaculture site. // Fish Manag. Ecol., 2016, 23:428–430. doi: 10.1111/fme.12176.

Davies G.D., Gozlan R.E., Britton R.J. Can accidental introductions of non-native species be prevented by fish stocking audits? // Aquat. Conserv., 2013, 23:366–373. doi: 10.1002/aqc.2341.

EEA. European Waters. Assessment of Status and Pressures, Luxembourg, 2018.

Gardner J.S. Tourism and risk from natural disasters, Manali, Himachal Pradesh, India. // In Disasters, Environment and Development, ed. R.B. Singh. New Delhi: Oxford and IBH Publication, 1996, p. 107–120.

Hutchings J.A. Collapse and recovery of marine fishes. // Nature, 2000, 406 (6798), 882.

Kahlon S., Chandel V.B.S., Brar K.K. Landslides in Himalayan Mountains: A study of Himachal Pradesh, India. // International Journal of IT, Engineering and Applied Sciences Research. 2014, 3 (9): 28–34.

Kumar V., Chandran R., Kantharajan G., Tyagi L.K., Bisht A.S., Singh R.K., Sarkar U.K. Assessing the Impact of Flash Flood on Aquatic Habitat and Fishery Ecosystem Services of the Transboundary River Teesta in India Using GIS and Remote Sensing Tools. // Ecohydrology, 2025, Vol. 18, Issue 4, e70059 doi: 10.1002/eco.70059.

Lake P.S. Disturbance, patchiness, and diversity in streams. // J.N. Am. Benthol. Soc., 2006, 19 (4): 573–592. doi: 10.2307/1468118.

Lande R. Risks of population extinction from demographic and environmental stochasticity and random catastrophes. // Am. Nat., 1993, 142 (6): 911–927.

Lytle D.A., Poff N.L. Adaptation to natural flow regimes. Trends Ecol. Evol., 2004, 19(2): 94–100.

Mahamood M., Khan F.R., Zahir F. Bagarius bagarius, and Eichhornia crassipes are suitable bioindicators of heavy metal pollution, toxicity, and risk assessment. // Sci. Rep. 13, 2023, 1824. doi: 10.1038/s41598-023-28313-9.

Nie Y., Liu Q., Wang J., Zhang Y., Sheng Y., Liu S. An inventory of historical glacial lake outburst floods in the Himalayas based on remote sensing observations and geomorphological analysis. // Geomorphology, 2018, 308: 91–106.

Roff D. Evolution of life histories: theory and analysis. Springer Science & Business Media, 1993.

Shrestha B., Mool P.K., Bajracharya S.R. Impact of Climate Change on Himalayan Glaciers and Glacial Lakes: Case Studies on GLOF and Associated Hazards in Nepal and Bhutan. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD); United Nations Environment Programme (UNEP), Kathmandu, Nepal, 2007.

Sunjog K., Gačić Z., Kolarević S., Višnjić-Jeftić Ž., Jarić I., Knežević-Vukčević J., Vuković-Gačić B., Lenhardt M. Heavy metal accumulation and the genotoxicity in barbel (Barbus barbus) as indicators of the Danube river pollution. // Scientific World Journal 2012; 2012: 351074. doi: 10.1100/2012/351074.

van Treeck R., Van Wichelen J., Wolter C. Fish species sensitivity classification for environmental impact assessment, conservation and restoration planning. // Science of the Total Environment, 2020, 708: 135173.

Vitule J.R.S., Skóra F, Abilhoa V. Homogenization of freshwater fish faunas after the elimination of a natural barrier by a dam in Neotropics. // Divers Distrib, 2012, 18: 111–120. doi: 10.1111/j.1472-4642.2011.00821.x.

Vitule J.R.S., Freire C.A., Vázquez D.P., Nuñez M.A., Simberloff D. Revisiting the Potential Conservation Value of Non-Native Species. // Conservation Biology, 2012, Vol. 26, No. 6, p. 1153–1155.

A multi-parameter simulation framework for debris flow hazard assessment using environmental and hydrological inputs

R.K. Isaac, M. Isaac

Sam Higginbottom University of Agriculture Technology and Sciences, Prayagraj, India, rajendra.isaac@gmail.com

Abstract. Mandakini River originates from the Chorabari Glacier. Coursing through the Garhwal Himalayas in Uttarakhand, India, has been the epicenter of multiple natural disasters over the past decade. These events, primarily driven by extreme weather patterns and exacerbated by human activities, have profoundly impacted the region's ecology and communities. This study introduces a computational framework designed to assess debris flow hazards by integrating environmental and hydrological parameters. The model calculates a Debris Flow Index (DFI) by normalizing and weighting factors such as precipitation, flow rate, slope, soil saturation, vegetation cover, and debris volume. Additionally, it estimates Expected travel time and distance to evaluate potential impact zones. An interactive interface allows for both real-time data input and predefined scenarios, facilitating rapid hazard assessment across multiple stations. The framework aims to enhance early warning systems and support disaster risk reduction strategies.

Key words: *Mandakini River, debris flow, extreme weather, disaster risk reduction strategies*

Cite of this article: Isaac R.K., Isaac M. A multi-parameter simulation framework for debris flow hazard assessment using environmental and hydrological inputs. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 186–196.

Многопараметрическая структура моделирования для оценки опасности селей с использованием экологических и гидрологических данных

Р.К. Айзек, М. Айзек

Университет сельского хозяйства, технологий и наук имени Сэма Хиггинботтома, Праяградж, Индия, rajendra.isaac@gmail.com

Аннотация. Река Мандакини берет начало от ледника Чорабари. Протекая через Гархвалские Гималаи в Уттаракханде, Индия, за последнее десятилетие она стала эпицентром множества стихийных бедствий. Эти события, в первую очередь вызванные экстремальными погодными условиями и усугубленные деятельностью человека, оказали глубокое влияние на экологию и сообщества региона. В этом исследовании представлена вычислительная структура, предназначенная для оценки опасности селей путем интеграции экологических и гидрологических параметров. Модель рассчитывает индекс селевого потока (DFI) путем нормализации и взвешивания таких факторов, как осадки, скорость потока, уклон, насыщенность почвы, растительный покров и объем мусора. Кроме того, она оценивает ожидаемое время и расстояние в пути для оценки потенциальных зон воздействия. Интерактивный интерфейс позволяет вводить данные как в реальном времени, так и по заранее заданным сценариям, что облегчает быструю оценку опасности на нескольких станциях. Структура направлена на улучшение систем раннего оповещения и поддержку стратегий снижения риска бедствий.

Ключевые слова: *река Мандакини, сель, экстремальные погодные условия, стратегии снижения риска стихийных бедствий*

Ссылка для цитирования: Айзек Р.К., Айзек М. Многопараметрическая структура моделирования для оценки опасности селей с использованием экологических и гидрологических данных. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 186–196.

Introduction

Debris flows are common phenomenon in landslide susceptible regions throughout the world, casing rapid mass movements of water-saturated soil and rock, often triggered by intense rainfall or rapid snowmelt. These events pose significant risks and losses to infrastructure and human life, particularly in mountainous regions [*Geertsema et al., 2009; Alimohammadlou et al., 2013*].

In Asia, India is considered the most landslide-affected nation, whose 12.6% of the land is prone to landslides worldwide [*Froude and Petley, 2018*], the scenario is more alarming in the Himalayan states, due to the diverse topography, intense and variable climatic conditions, and high anthropogenic activities which make it highly vulnerable to landslides [*NDMA, 2019*].

Uttarakhand lies in the Himalayas, with 93% land as a hilly region [*Khali et al., 2023*], prone to landslides due to its complex geology, climate, seismo-tectonic setting, and geomorphological condition [*Gupta et al., 2022; Chauhan and Dixit, 2023*]. Uttarakhand has undergone a considerable major natural disaster in Uttarakhand include of 1970, 1986, 1991, 1998, 2001, 2002, 2004, 2005, 2008, 2009, 2010, 2012, 2013, 2016, 2017, 2019, 2020, and 2021 [*Das et al., 2006; Dimri at al., 2017*]. Several studies have been conducted on landslide susceptibility in Uttarakhand [*Pham et al., 2015, 2016, 2017, 2022; Sangeeta and Maheshwari, 2019; Ram et al., 2020; Batar and Watanabe, 2021; Khali et al., 2023; Singh et al., 2023*].

Mandakini River Valley in Rudraprayag district of the state experienced maximum destruction caused by rainfall, followed by cloudbursts and flash floods. Landslide tragedy in August 1998 around Madhmaheshwar and the Kaliganga sub-watersheds; Phata cloudburst (2001), Lwara slide and Basukedar slide (1992) and cloudburst in Ukhimath (2012) are some examples of important devastating events in Mandakini Valley that caused large-scale loss of lives, damage to resources and associated environmental–social hazards. Landslides triggered due to extreme rainfall during the 15–17th of June 2013 around Kedarnath destroyed more than 250 villages and killed an estimated 6074 people [*Martha et al., 2015*].

Flood risk management is crucial as it provides optimal utilization and exploitation of land and water resources that bring prosperity and sustainable development to a nation [*Wheater and Evan, 2009*]. In India, flood risk management in hilly regions is still in the infancy stage, particularly due to complex and tough terrain with limited accessibility and a low level of monitoring [*Tullos et al., 2016; Li et al., 2019*].

In last few decadal floods and disasters event has shown that the structural measures alone could not ensure adequate security against such disasters and an effective strategy to safeguard these disasters is essential. Traditional assessment methods may not adequate to tackle the complex environmental factors influencing debris flow initiation and propagation. This study presents a simulation framework that integrates multiple parameters to assess debris flow hazards, aiming to improve predictive capabilities and inform mitigation efforts.

Materials and methods

Study area

Uttarakhand, a Northern state of India, is located between 28° to 32° N and 77° to 81° E, as shown in Fig. 1 [*Chauhan et al. 2024a*]. It occupies approximately 53,400 km^2 region of India lies majorly in the Himalayas, with elevation values above mean sea level ranges from 169 to 7795 m. It is surrounded by two international borders (China in the North and Nepal in the East).

Mandakini Valley, an upstream part in Rudraprayag district , an area of about 1982.09 km^2 lies between lat. 30°12′ 58.132–30°48′ 27.642N and long. 79°2′ 58.649–79°2′ 0.952E , comprises two separable major litho-stratigraphical units, i.e. the Garhwal Group and

the Central Crystalline Group, Survey of India topo sheets No. 53J /14, 53J/15,53N/1, 53N/2, 53N/3, 53N/4 and 53N/6. These groups are separated from each other by a major tectonic contact known as the Main Central Thrust (MCT). The Valley appears to have undergone several phases of tectonic movements, which are depicted by local folds, faults and thrusts. The zone between Rudraprayag and Kund consists of quartzite, slate, schist, crystalline limestone, dolomite, marble, gneiss and occasionally intruded by meta-volcanic rocks of the Garhwal Group. Upstream of Mandakini River from Kund to Kedarnath and Kund to Mandal, and beyond, various. The altitude of Mandakini River catchment extends from 670 to 6000 m a msl (Fig. 1).

Fig. 1. Mandakini River vie from Google Earth

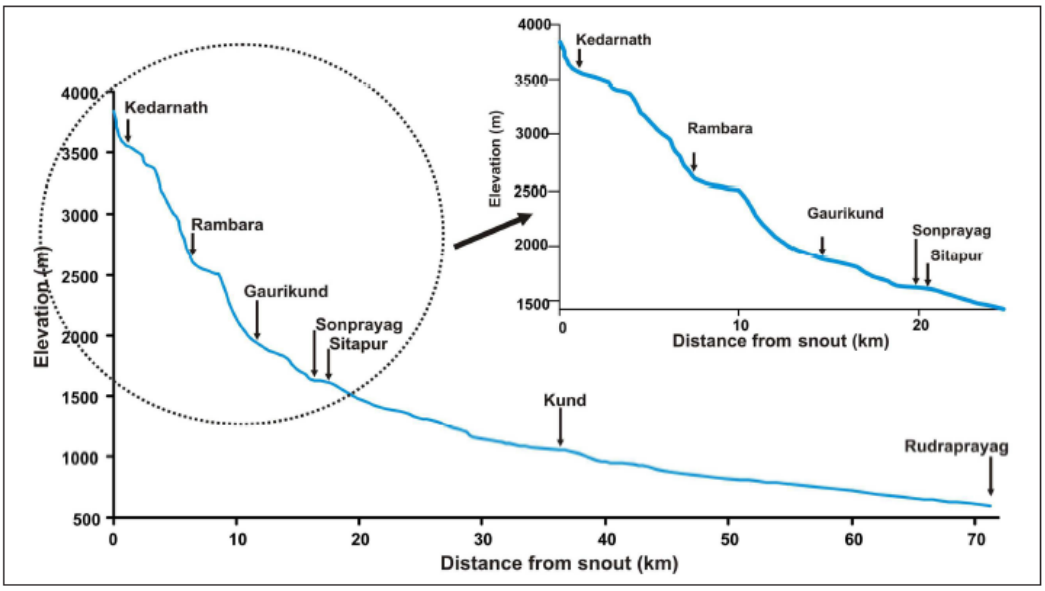


Fig. 2. Longitudinal profile of Mandakini River. Discontinuities show the depocenters for the sediment transport [*Sundriyal et al., 2015*]

The flow chart explains the full procedure of debris flow simulation model development (Fig. 3).

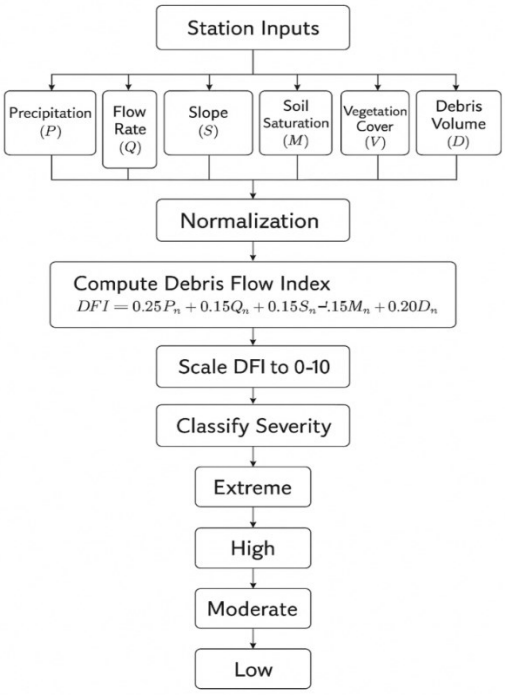


Fig. 3. Flow diagram of modeling process

Table 1 defines the input Parameters and their role in debris flow management. Each station in the simulation takes the following primary inputs obtained from secondary sources (Table 2). A simulation model was developed using python programming.

Table 1. Input parameters and their mathematical representations

Variable	Symbol	Unit	Role in Debris Flow
Precipitation	PPP	mm	Triggers surface runoff and potential landslides
Flow Rate	QQQ	m^3/s	Indicates water discharge which contributes to material movement
Slope	SSS	degrees	Controls gravitational force and flow velocity
Soil Saturation	MMM	%	Influences pore pressure and slope stability
Vegetation Cover	VVV	%	Acts as a stabilizer; less cover increases risk
Debris Volume	DDD	m^3	Determines potential mass and impact severity

Table 2. Input parameters for risk management model

Station	Precipitation, mm	Flow, Cumec	Slope, %	Saturation, %	Vegetation, %	Debris Volume, cum
Custum-1	250	150	90	10	10	900
Custum-2	300	270	60	40	20	1500
Custum-3	400	900	30	90	80	3900

Modeling

Data Normalization

Each parameter is normalized using min-max scaling based on predefined minimum and maximum values to ensure comparability across different units and scales.

Debris Flow Index Calculation

The Debris Flow Index (DFI) is computed as a weighted sum of the normalized parameters:

$$DFI = (0.25 \times Precipitation) + (0.15 \times Flow\ Rate) + (0.15 \times Slope) + (0.15 \times Soil\ Saturation) - (0.10 \times Vegetation\ Cover) + (0.20 \times Debris\ Volume). \quad (1)$$

The resulting DFI is scaled to a range of 0 to 10.

Travel Time and Distance Estimation

Travel time is estimated using the formula:

$$Travel\ Time = Travel\ Distance / Adjusted\ Velocity, \quad (2)$$

where adjusted velocity accounts for slope and frictional losses. Travel distance is estimated based on terrain slope and empirical relationships.

Severity Classification

Based on the DFI and estimated travel time, debris flow events are classified into severity levels:

- **Extreme:** DFI ≥ 8.5 and Travel Time < 10 minutes;
- **High:** 6.5 ≤ DFI < 8.5;
- **Moderate:** 4.0 ≤ DFI < 6.5;
- **Low:** DFI < 4.0

Results and discussion

The Debris Flow Index (DFI) values, estimated travel times, and severity classifications, obtained simulation model, provided insights into potential hazard levels. Fig. 3. shows the DEM of Mandakini River, which has an inimitable topographical and climatic setting, making it prone to numerous hydro-meteorological disasters such as floods, cloudbursts, glacier lake outbursts, and landslides [*Lindell et al., 2019; Dash and Punia, 2019*]. In the last 30–40 years, the frequency and severity of natural hazards have risen due to various anthropogenic and changing climatic conditions [*Dimri et al., 2018*].

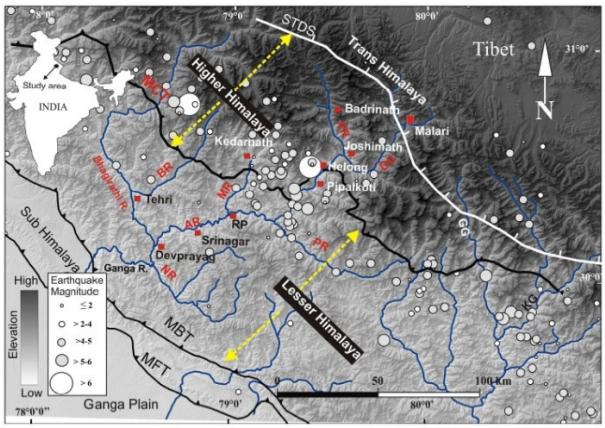


Fig. 3. DEM of Uttarakhand Himalaya. MFT – Main Frontal Thrust, MBT – Main Boundary Thrust, MCT – Main Central Thrust, STDS – South Tibetan Detachment System, BR – Bhilangana river, MR – Mandakini River, AR – Alaknanda River, NR-Nayar river, DG – Dhauliganaga river, PR – Pinder River, MCT is a zone of recurrent seismicity as indicated by the concentration of earthquake epicenters (Source: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/) and physigraphic boundary between Lesser and Higher Himalayas)

Debris Flow Index (DFI) and Severity

Table 3 shows the debris flow index and severity for estimated travel distance and the time for three selected stations; the table shows the time taken by the debris to reach station two and three. The index integrates multiple physical and environmental parameters. Stations Custom_2 and Custom_3 fall into the "High" severity category, indicating increased risk to downstream aquatic systems, population and infrastructure.

Table 3. Debris Flow Index (DFI), severity class, Travel distance and time across three custom stations

No.	Station	Debris flow index	Severity	Estimated travel distance, km	Travel time, min
0	Custom_1	5.733333	Moderate	5.715934e+16	1.337061e+17
1	Custom_2	6.900000	High	6.060000e+00	9.100000e+00
2	Custom_3	7.550000	High	2.020000e+00	1.580000e+00

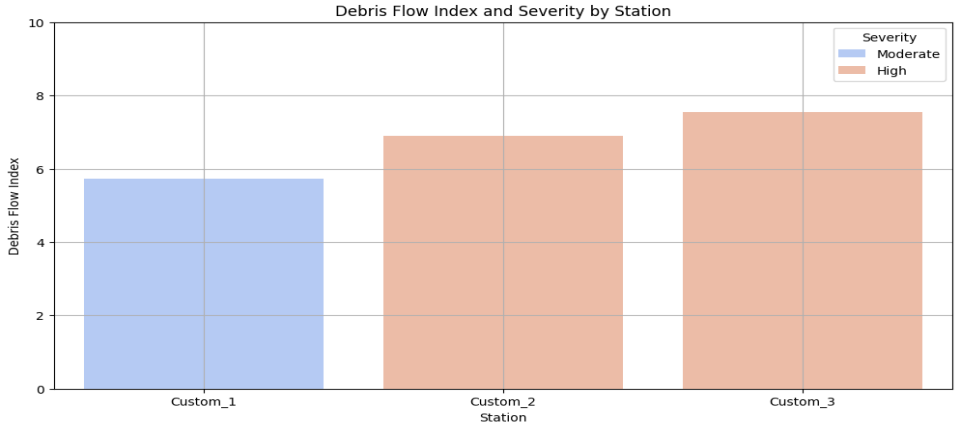


Fig. 4. Debris Flow Index (DFI) and severity class across three custom stations

The Debris Flow Index (DFI) presented in Fig. 4. and for their corresponding severity classifications, for three custom stations across the Mandakini River. Debris Flow Index (DFI), based on normalized inputs, ranging from 0 to 10, quantifying the hazard and pollution of debris in Mandakini River flows at each station. The DFI increases steadily from Custom_1 to Custom_3, indicating a rising debris flow hazard gradient, which may be possibly due to increasing slope, precipitation, or debris load.

It is evident from the results that water stress and quality would be low at the station Custom_1, due to low temperatures, high oxygen, and clear water. Although DFI is moderate (5.7), the resulting eco-impact remains relatively lower. This reflects healthy upstream water conditions, typical of glacial-fed Himalayan segments at the upstream. At Custom_2 (Midstream), the temperature was observed increasing and the decrease of DO begin to elevate water stress which increased the hazard impact. Degradation in water quality would lead to reasonable ecological amplification. Custom_3 (Lower Reach / Impact Zone) shows the high thermal and chemical stress, lowest DO, lowest WQI, high dustiness, triggers maximum ecological hazard magnification causing severe ecological vulnerability, especially in heavily sediment or polluted zones. Difference in DFI between Custom 1 and Custom 3, underscores the compound nature of debris hazards, where physical events and degraded water quality synergistically intensify risk.

The transition from moderate to high DFI across Custom_1 to Custom_3 showed that the hazard levels escalated spatially, probably due to terrain or hydrological factors such as slope steepness or recent rainfall. All respective stations fall in the High and moderate severity class and preemptive action such as slope stabilization, debris traps, or ecological monitoring is required. The clear separation of DFI values across severity thresholds supports the model's utility in classifying risk zones. Integrated watershed management practices are highly required,

not only to check debris flow initiation but also to protect downstream water quality, which is crucial for maintaining overall ecosystem resilience.

The anthropogenic activities at lower reaches, such as the construction of dams, roads, deforestation, etc., aggravated the disasters and disrupted the Himalayan ecosystem in the various states such as Uttarakhand [*Geneletti and Dawa, 2009*]. The climate change in the Himalayas has resulted in irregular precipitation, temperature rise, drying up of perennial rivers, depletion of natural resources, and an increase in the frequency and intensity of flash floods [*Mishra et al., 2021*].

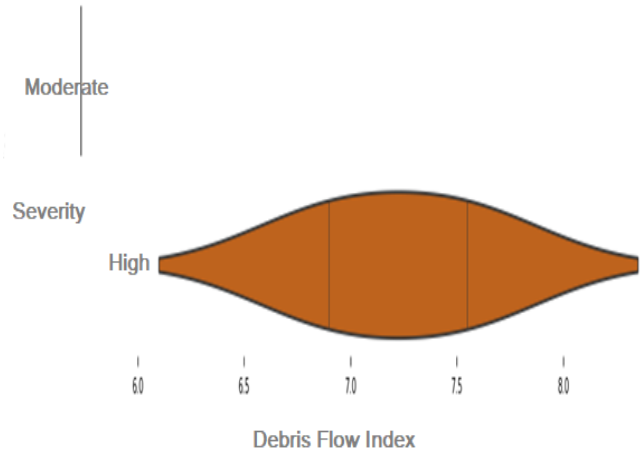


Fig. 5. Debris Flow Index (DFI) values according to severity class

Fig. 5 represents the distribution of Debris Flow Index (DFI) values categorized by severity Class, as part of your simulation results. The plot combines a boxplot and a kernel density estimate (KDE). It visually shows the distribution, range, and concentration of DFI values within each severity category. The plot shows the physical hazard from factors like precipitation, slope, debris volume, etc. The plotted DFI values range approximately from 6.0 to 8.1. The plot of severity category classified from simulation results shows high and a thin line appears for moderate, but no data is shown because there are zero cases in this range). Violin plot shows that all the custom stations are exposed to debris flows (DFI values ranging from 6.9 and 7.55), leading to "High" severity category. The study shows that even with the variation in environmental inputs the debris flow hazard remains persistently high across the modeled stations. The clustering around a DFI of ~ 7 shows debris-generating conditions (e.g., moderate slope, moderate precipitation, and moderate debris volume) and consistently contributing to high ecological stress.

Fig. 6a shows that there is linear increase in values, starting from 0.0 and reaching 2.0 by index 2. The graph suggests a uniform rate of change at every step forward along the x-axis corresponds to a fixed increase in the index value. DFI shows the linear increase in hazard severity and ecological impacts. The trend validates the index weighting system and confirms the comuted index changes with each input variation and verifies the scaling function. The controlled simulation scenario Shows uniform environmental degradation, as expected behavior by the normalized index function. It also shows the model's internal consistency, especially when testing with synthetic data or analyzing the scaling behavior of impact metrics.

Fig. 6b. Shows a monotonic increasing trend in DFI values across the stations. Rate of DFI growth decreases with the stabilization and saturation of environmental conditions. Progressive rise in DFI growth from custum_1 to Custom_3 shows spatial gradient in debris flow hazard along the Mandakini River watershed area caused due to due to increase in slope, sedimentation or less vegetation in downstream areas. Transition from moderate to high severity between station 1 to station 2 shows model's sensitivity to small changes in saturation or flow volume.

The steady but non-linear increase in DFI demonstrates that the index appropriately accounts for multiple compounding variables. The leveling off near Station 3 could indicate a

saturation effect in hazard accumulation, suggesting that mitigation efforts could be more effective if focused upstream.

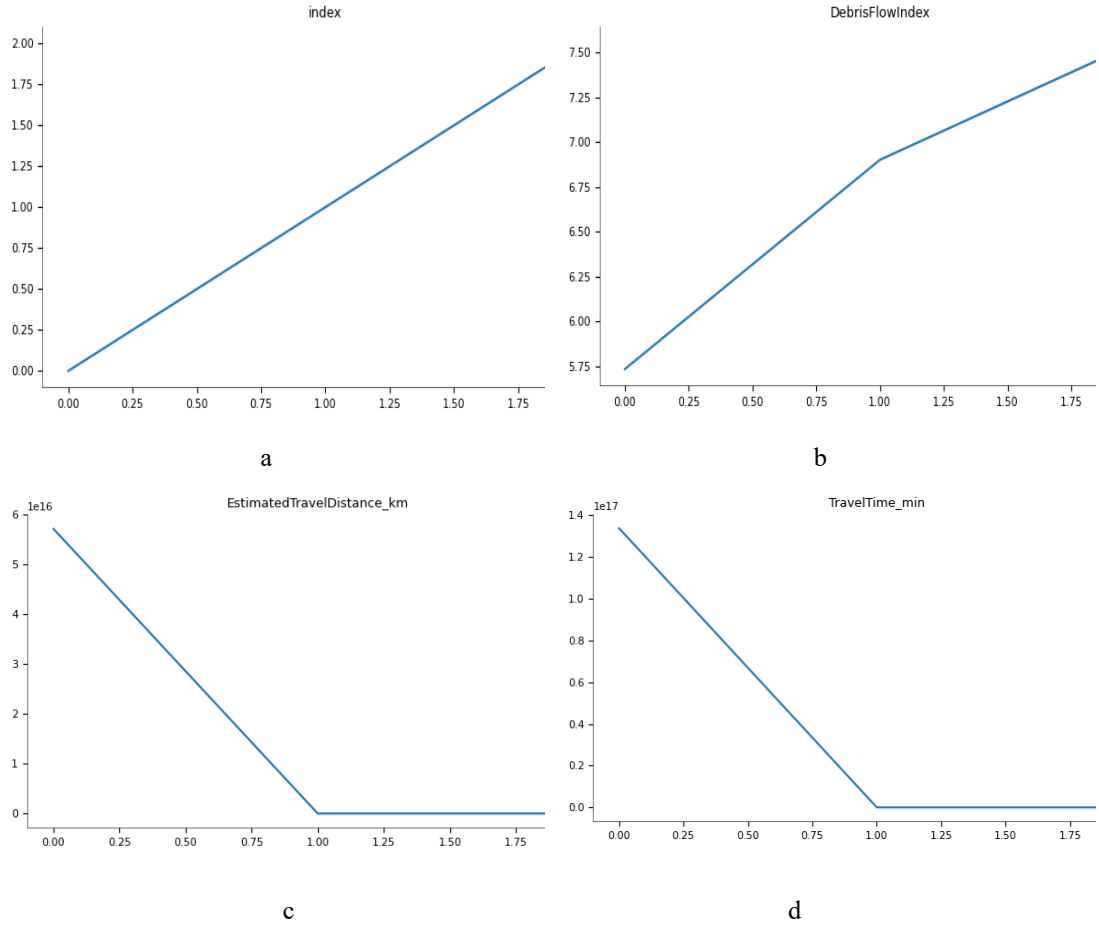


Fig. 6. Linearly increasing index (a); debris Flow Index (DFI) (b); estimated debris flow travel distance (c); estimated travel time (in minutes) for debris flow simulation across three sequential positions (d)

Travel Time, distance and Hazard Zonation

Fig. 6c shows the estimated debris flow travel distance at three stations. Due to a data anomaly (likely slope or depth = 0), Custom_1 shows a non-physical travel distance. This highlights the importance of slope and flow parameter validation in predictive hazard modeling. On the other side there may be possibility of collection of debris at the lower slope side causing velocity of flow to become extremely slow and spread of debris to wider area.

Fig. 6d estimated travel time (in minutes) for debris flow simulation across three stations. Anomalous values are observed at Station 0, suggesting input-related instability in the velocity calculation. Such cases reinforce the need for pre-validated input ranges to maintain numerical reliability in debris flow travel modeling. The values increase linearly, starting from 0.0 and reaching 2.0 by index 2. This suggests a uniform rate of change, every step forward along the x-axis corresponds to a fixed increase in the index value. This graph reflects a uniform increase in hazard severity across stations Custom_1 to Custom_3. A straight-line trend confirms the model's linear response to increasing input values, validating the weighting system used for index calculation. As a control or validation plot, the graph confirms that each increment in the input causes an equal increment in the computed index, verifying the scaling function.

Figure shows a linearly increasing index across three sequential positions, suggesting uniform environmental degradation, a controlled simulation scenario, or the expected behavior of a normalized index function. This kind of linearity is useful in validating the internal consistency of model while analyzing the scaling behavior of impact metrics of the model.

The result shows that debris could reach critical zones within 1.5 to 9 minutes depending on flow velocity and channel geometry, the river hydraulics and slope gradients will play a major role.

Rapid movement of debris and the downstream areas shows the urgent need for real-time early warning systems, especially in the high risk or populated areas. Since the custum_1 is at higher slope, flow energy is high and travel time was to short i.e. 1.3 minutes, whereas Station Custom_2 had a much higher lead time (> 9 minutes) due to reduction in slope, thereafter Custum_3(< 1.5 minutes) has time with having the risk of spreading of debris in lager area.

Model Behavior Breakdown

The sudden drop from a huge value to zero in the next two stations is non-physical and indicates a computational logic issue, likely related to slope, flow width, or other input conditions. It should not be interpreted as physical behavior of debris flow.

The graph illustrates the estimated travel time (in minutes) for debris flows at three stations – likely Custom_1, Custom_2, and Custom_3 – but exhibits extreme and nonphysical values, indicating computational or data input issues.

Fig. 6d illustrates the estimated travel time (in minutes) for debris flows at three stations – likely Custom_1, Custom_2, and Custom_3 – but exhibits extreme and nonphysical values, indicating computational or data input issues. The figure shows Debris volume too high with very low flow is not a real pattern shows unrealistically slows debris and numerical instability and the values not constrained within physical or empirical ranges, further, it either supports a breakdown in the velocity computation logic under certain edge conditions which requires a enforcement of minimum value for flow depth and slope in the program or extremely slow velocity may be due to spread of debris in larger area taking more time to move down the slope. The event predicted by model needs a physical validation. It is suggested that if there is any input-related instability in the velocity calculation. It requires a pre-validated input ranges to maintain numerical reliability in debris flow travel modeling.

The Mandakini River system exhibits a high baseline hazard profile, especially in areas downstream of glacial valleys. This model confirms that natural topography combined with anthropogenic pressure (e.g., construction, deforestation) significantly increases both debris flow severity and its ecological consequences. Since the single debris flow index includes multiple environmental and hydrological parameters, the model provides much comprehensive assessment of debris flow hazards. Model's applicability may be enhanced to early warning systems, by providing real time data. However, the model's accuracy will depend upon quality of input data, formula used and the assumptions, if any. Model accuracy may be enhanced by calibrating it with historical debris flow events and incorporating additional input factors such as land use changes and soil types et.

Conclusion

Simulation model successfully assesses debris flow hazards by combining key environmental and hydrological parameters for the Mandakni River watershed area. The model provides valuable information for risk assessment and mitigation planning and can be applied to any watershed area. The developed model is interactive and was found to be a versatile tool to support both, real-time monitoring and scenario analysis, and can provide reliable information for disaster risk assessment and mitigation to stakeholders. The debris flow simulation model integrates multiple environmental and hydrological parameters through mathematical normalization, weighting, and index-based classification to simulate debris flow risk and behavior.

The mathematical approach included in the model, enables flexibility, comparability, and scalability across varied terrain and conditions, makes it suitable for early-warning tools and risk assessments. Model evaluates various rainfall and debris scenarios and multi-station hazard profiles in real time and can be successfully used by the stakeholders, including disaster managers, ecologists, and local authorities

The proposed Model bridges the gap between hazard forecasting, risk analysis and ecosystem vulnerability analysis. Model provides a versatile decision-support system for disaster preparedness and response planning for Himalayan river systems.

References

Alimohammadlou Y., Najafi A., Yalcin A. Landslide process and impacts: a proposed classification method. // CATENA, 2013, 104: 219–232.

Batar A.K., Watanabe T. Landslide susceptibility mapping and assessmentusing geospatial platforms and weights of evidence (WoE) method in the Indian Himalayan region: recent developments, gaps, and future directions. // ISPRS Int. J. Geo. Inf., 2021, 10(3): 114.

Chauhan V., Dixit J. Geomorphic anomalies in Uttarakhand, India: a GIS based approach for active tectonics. // J. Earth Syst. Sci., 2023, 133(1): 2. doi: 10.1007/s12040-023-02208-9.

Chauhan V., Gupta L., Dixit J. Unveiling the spatial heterogeneity in Uttarakhand through geomorphodiversity for sustainable LULC practices and its implications on seismicity. Geoheritage, 2024a, 16: 134. doi: 10.1007/s12371-024-01041-w.

Chauhan V., Gupta L., Dixit J. Geomorphic characterization by integrating automated approaches for sustainable land use planning in the earthquake-prone Himalayan region of Uttarakhand, India. // Environ. Chall., 2024b, 17:101047. doi: 10.1016/j.envc.101047.

Das S., Ashrit R., Moncrieff M.W. Simulation of a Himalayan cloudburst event. // J. Earth Syst. Sci., 2006, 115: 299–313.

Dimri A.P., Chevuturi A., Niyogi D., Thayyen R.J., Ray K., Tripathi S.N., Pandey A.K., Mohanty U.C. Cloudbursts in Indian Himalayas: A review. Earth Sci. Rev., 2017, 168: 1–23.

Dash, P., Punia M. Governance and disaster: Analysis of land use policy with reference to Uttarakhand flood 2013, India. // Int. J. Disaster Risk Reduct., 2019, 36, 101090.

Dimri A.P., Kumar D., Choudhary A., Maharana P. Future changes over the Himalayas: Maximum and minimum temperature. // Glob. Planet. Chang., 2018, 162: 212–234.

Froude M.J., Petley D.N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2018, 18: 2161–2181. doi: 10.5194/nhess-18-2161-2018.

Geneletti D., Dawa D. Environmental impact assessment of mountain tourism in developing regions: A study in Ladakh, Indian. // Himalaya. Environ. Impact Assess. Rev., 2009, 29: 229–242.

Geertsema M., Highland L., Vaugeouis L. Environmental impact of landslides. // Landslides–disaster risk reduction, 2009, p. 589–607.

Lindell M.K., Arlikatti S., Huang S.K. Immediate behavioral response to the June 17, 2013 flash floods in Uttarakhand, North India. // Int. J. Disaster Risk Reduct. 2019, 34, 129–146.

Gupta V., Kumar S., Kaur R., Tandon R.S. Regional-scale landslide susceptibility assessment for the hilly state of Uttarakhand, NW Himalaya // India. J. Earth Syst. Sci. 2022, 131(1): 2.

Khali H., Rawat K.S., Chatterjee R.S. Dynamic association of slope movements in the Uttarakhand Himalaya: a critical review on the landslide susceptibility assessment. // Geomat. Nat. Haz. Risk, 2023, 14(1): 2273214.

Li W., Lin K., Zhao, T., Lan T., Chen X., Du H., Chen H. Risk assessment and sensitivity analysis of flash floods in ungauged basins using coupled hydrologic and hydrodynamic models. // J. Hydrol., 2019, 572: 108–120.

Martha T.R., Roy P., Govindharaj K.B., Kumar K.V., Diwakar P.G., Dadhwal V.K. Landslides triggered by the June 2013 extreme rainfall event in parts of Uttarakhand state, India. // Landslides, 2015, 12: 135–146.

Mishra P.K., Thayyen R.J., Singh H., Das S., Nema M.K., Kumar P. Assessment of cloudbursts, extreme rainfall and vulnerable regions in the Upper Ganga basin, Uttarakhand. // India. Int. J. Disaster Risk Reduct, 2021, 69, 102744.

NDMA. Compendium of task force sub group reports on national landslide risk management strategy. A publication of the National Disaster Management Authority. Government of India, New Delhi, 2019.

Pham B.T., Tien Bui D., Indra P., Dholakia M. Landslide susceptibility assessment at a part of Uttarakhand Himalaya, India using GIS – based statistical approach of frequency ratio method. // Int. J. Eng. Res. Technol., 2015, 4(11):338–344.

Ram P., Gupta V., Devi M., Vishwakarma N. Landslide susceptibility mapping using bivariate statistical method for the hilly township of Mussoorie and its surrounding areas, Uttarakhand Himalaya. // J. Earth Syst. Sci., 2020, 129: 1–18.

Sangeeta, Maheshwari B.K. Earthquake-induced landslide hazard assessment of Chamoli District, Uttarakhand using relative frequency ratio method. // Indian Geotech J., 2109, 49: 108-123.

Singh A., Singh T., Nagarajan R. Impact of landslides on environment. // In Recent advances in environmental science from the Euro-Mediterraneanand surrounding regions: Proceedings of Euro-Mediterranean Conference for environmental integration (EMCEI-1), Tunisia 2017. Springer International Publishing, 2018, p.1869–1871.

Sundriyal Y.P., Shukla A.D., Rana N., Jayangondaperumal R., Srivastava P., Chamyal L.S., Sati S.P., Juyal N. Terrain response to the extreme rainfall event of June 2013: Evidence from the Alaknanda and Mandakini River Valleys, Garhwal Himalaya, India. // Episodes, 2015, 38(3): 179-188. doi: 10.18814/epiiugs/2015/v38i3/004.

Wheater H., Evans E. Land use, water management and future flood risk. // Land Use Policy, 2009, 26: 251–264.

Tullos D., Byron E., Galloway G., Obeysekera J., Prakash O., Sun, Y.H. Review of challenges of and practices for sustainable management of mountain flood hazards. // Nat. Hazards, 2016, 83: 1763–1797.

Correlations between rheological parameters and L-Box test parameters of woody-debris suspensions

C.-D. Jan, L.-T. Nguyen

National Cheng Kung University, Tainan, Chinese Taipei, nltrang217@gmail.com

Abstract. Debris flows mobilize large volumes of water, sediment, and woody debris, posing significant hazards to human communities and infrastructure. In forested areas impacted by wildfires, the recruitment of woody debris into drainage channels is accelerated, increasing the potential for more hazardous debris flows. Rheological characteristics play a crucial role in understanding and simulating debris flow behavior. Debris flows consist of complex and heterogeneous materials with particle sizes ranging from clay to boulders. However, conventional rheometers are typically limited to measuring the rheological parameters of debris flows containing only fine particles. The L-box tests have been utilized to assess the flow behavior of woody-debris suspensions, accommodating sediments with larger particles. This study investigates the relationship between rheometer measurements and L-box test parameters for debris flows containing woody debris. The tests were conducted using woody-debris suspensions, which are mixtures of woody debris, clay, silt, and water. The rheological parameters of woody-debris suspensions were measured using the "Brookfield DV-III rheometer". The rheological behavior of the sediment suspensions in this study follows the Bingham fluid model. The rheological parameters, such as yield stress (τ_B) and viscosity (μ_B), are affected by the woody debris size (S_w) and woody debris proportion (C_{vg}), with larger S_w and lower C_{vg} leading to decreased rheological parameters. The L-box test was performed using the same woody-debris suspensions prepared for rheometer measurements, with flow height (H_f) and flow distance (L_f) recorded. The results indicate that as woody debris size increases and its proportion decreases, the flow height ratio (H_r) decreases, while the spread ratio (L_r) increases. Furthermore, the results demonstrate a strong correlation between the parameters obtained from rheometer measurements and those from L-box tests for the woody-debris suspensions in this study. This suggests that the L-box test as a practical alternative for estimating the rheological parameters of debris flows containing larger woody debris.

Key words: *rheological parameters, woody-debris suspensions, Bingham model, L-box test*

Cite of this article: Jan C.-D., Nguyen L.-T. Correlations between rheological parameters and L-Box test parameters of woody-debris suspensions. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 197–204.

Корреляции между реологическими параметрами и параметрами теста L-Box для суспензий с обломками деревьев

Ч.Д. Цзань, Л.Т. Нгуен

Национальный тайваньский университет Чэн Кун, Тайнань, Тайбэй, Китай, nltrang217@gmail.com

Аннотация. Селевые потоки мобилизуют большие объемы воды, осадков и древесного мусора, представляя значительную опасность для человеческих сообществ и инфраструктуры. В лесных районах, затронутых лесными пожарами, поступление древесного мусора в дренажные каналы ускоряется, что увеличивает потенциал для более опасных селевых потоков. Реологические характеристики играют решающую

роль в понимании и моделировании поведения селевых потоков. Селевые потоки состоят из сложных и неоднородных материалов с размерами частиц от глины до валунов. Однако обычные реометры, как правило, ограничиваются измерением реологических параметров селевых потоков, содержащих только мелкие частицы. Тесты L-box использовались для оценки поведения потока суспензий древесного мусора, вмещающих отложения с более крупными частицами. В этом исследовании изучается связь между измерениями реометра и параметрами теста L-box для селевых потоков, содержащих древесный мусор. Тесты проводились с использованием суспензий древесного мусора, которые представляют собой смеси древесного мусора, глины, ила и воды. Реологические параметры суспензий древесного мусора измерялись с помощью реометра «Brookfield DV-III». Реологическое поведение суспензий осадков в этом исследовании следует модели жидкости Бингама. Реологические параметры, такие как предел текучести (τ_B) и вязкость (μ_B), зависят от размера древесного мусора (S_w) и доли древесного мусора (C_{vg}), при этом больший S_w и меньший C_{vg} приводят к снижению реологических параметров. Тест L-box проводился с использованием тех же суспензий древесного мусора, подготовленных для измерений реометром, с регистрацией высоты потока (H_f) и расстояния потока (L_f). Результаты показывают, что по мере увеличения размера древесных остатков и уменьшения их доли отношение высоты потока (H_r) уменьшается, в то время как отношение распространения (L_r) увеличивается. Кроме того, результаты демонстрируют сильную корреляцию между параметрами, полученными из измерений реометра, и параметрами, полученными из тестов L-box для суспензий древесных остатков в этом исследовании. Это говорит о том, что тест L-box является практической альтернативой для оценки реологических параметров потоков мусора, содержащих более крупные древесные остатки.

***Ключевые слова**: Реологические параметры, суспензии древесного мусора, модель Бингхема, L-box тест*

Ссылка для цитирования: Цзань Ч.Д., Нгуен Л.Т. Корреляции между реологическими параметрами и параметрами теста L-Box для суспензий с обломками деревьев. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 197–204.

Introduction

In forested catchments affected by wildfires, large volumes of woody debris are frequently introduced into drainage channels, altering the flow characteristics and increasing flow mobility [*Kean et al., 2011*]. Understanding debris-flow behavior requires accurate characterization of its rheology, the relationship between applied stress and deformation especially for complex, heterogeneous mixtures. Rheology is a science that deals with the study of fluid and deformation behavior of fluid. The rheological behaviors of sediment-slurry mixtures are depended on sediment concentration, sediment type, and particle size distribution. Many researchers have shown that the high concentration slurry mixture could be treated as a Bingham fluid having yield stress and viscosity parameters [*Iverson, 2003; Jan et al., 2009, 2011, & 2018; Major & Iverson, 1999*]. The researchers have been suggested numerous techniques to measure the rheology of concrete, concentrated suspensions, thickened tailings and paste fill, which behave as viscoplastic fluids [*Bird et al., 1983; Utracki, 1988; Nguyen & Boger, 1992; Schramm, 2000*]. Nguyen & Boger [*1992*] mentioned two main methods of rheology measurements; namely direct and indirect methods. In the indirect methods, yield stress can be obtained from the shear stress vs. shear rate graph by extrapolating and in the direct methods the yield stress can be obtained under static conditions (which is also known as true yield stress). Specifically, the slump test has been applied as the indirect method to estimate the rheological parameters of the mixtures with coarser particles by identifying the correlations between rheological parameters and slump-spread parameters from the slump test [*Jan et al., 2009, 2011, 2018*].

Building on this framework, the present study investigates the rheological properties of woody-debris suspensions using a rotational rheometer and compares the results with flow characteristics derived from L-box tests. This study has two main objectives: first, to investigate the influences of woody debris on rheological properties of woody-debris suspensions; and second, to find the correlation between the rheological parameters and L-box test parameters, so as to evaluate the potential of using L-box test to assess the rheological parameters.

Materials

In this study, woody-debris suspensions were prepared by combining a fine-sediment suspension (C_{vf} = 0.30) with various sizes (S_w = 5, 10, 15, and 20 mm) and proportions (C_{vg} = 0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, and 0.25) of woody debris (Table 1). The fine-sediment suspension was a concentrated clay-silt-water mixture, formed by mixing volumes of fine sediment (V_f) and tap water (V_w) as:

$$C_{vf} = \frac{V_f}{V_f + V_w} \tag{1}$$

The fine sediment, sourced from reservoir deposits, was cleaned, dried, and free of organic matter. Its particle size distribution (Fig. 1a) had a median diameter (D_{50}) of 0.0036 mm and a density of 2.65 g/cm³ [*Dey et al., 2021*].

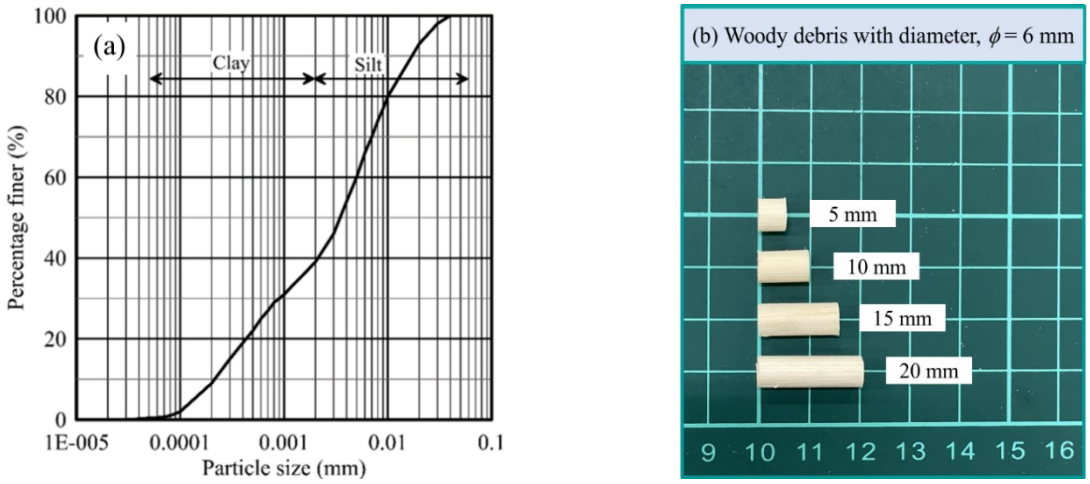


Fig. 1. Size distribution of particles within the fine-sediment suspension (a) and woody debris attributes in present experiments (b)

Woody-debris suspensions were created by mixing a volume (V_g) of woody debris (6 mm diameter; lengths of 5, 10, 15, and 20 mm; Fig. 1b) with a fine-sediment suspension (V_f+V_w) to achieve a woody debris proportion (C_{vg}). The corresponding debris densities were 0.36, 0.34, 0.33, and 0.32 g/cm³ for the respective lengths.

$$C_{vg} = \frac{V_g}{V_g + V_f + V_w}. \tag{2}$$

A woody-debris suspension, containing fine sediment and woody debris, has a total sediment fraction of C_{vt}:

$$C_{vt} = \frac{V_f + V_g}{V_g + V_f + V_w} \tag{3}$$

Table 1. Woody-debris suspensions and their corresponding sample numbers used in the present study

Woody-debris suspensions with a base fine-sediment fraction, C_{vf} = 0.30						
Proportion of woody debris, C_{vg}	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
Total sediment concentrations, C_{vt}	0.30	0.335	0.37	0.405	0.44	0.475
Sample No. for various sizes, S_w						
5 mm	W-0	W5-1	W5-2	W5-3	W5-4	W5-5
10 mm	W-0	W10-1	W10-2	W10-3	W10-4	W10-5
15 mm	W-0	W15-1	W15-2	W15-3	W15-4	W15-5
20 mm	W-0	W20-1	W20-2	W20-3	W20-4	W20-5

Methodology

In the present study, the experiments were conducted in two phases: firstly, woody-debris suspensions were used as the tested material, and a traditional rheometer was used to measure its rheology. In the second stage, the same suspension was used as the testing materials and its flow behavior were measured by a L-box instead of a rheometer. The Bingham fluid model, having two parameters (i.e., the yield stress and viscosity), was used to simulate the rheological behavior of woody-debris suspensions:

$$\tau = \tau_B + \mu_B \dot{\gamma}, \tag{4}$$

where τ is shear stress (Pa), τ_B is Bingham yield stress (Pa), μ_B is Bingham viscosity (Pa·s), and $\dot{\gamma}$ is shear rate (s^{-1}). The rheological curves of woody-debris suspensions were measured using the "Brookfield DV-III rheometer" and were shown in Fig. 2. The slope of each trend line in the shear stress versus shear rate plot represents the viscosity coefficient. Subsequently, the rheological parameters will be compared with the slump and spread measurements obtained from the L-box tests to identify potential correlations.

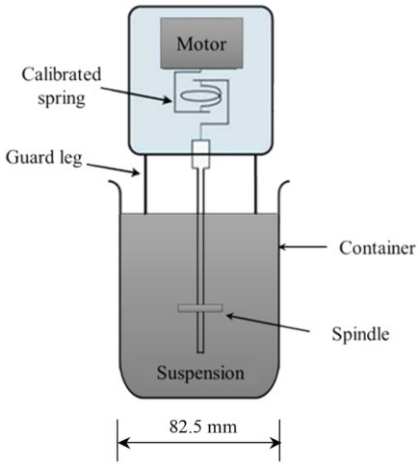


Fig. 2. Schematic diagrams of rheometer measurement by a Brookfield DV–III rheometer

An L-box apparatus was used to evaluate the flowability and passing ability of woody-debris suspensions. The device comprises a vertical section (H_0 = 0.3 m) connected to a horizontal channel (L_0 = 0.7 m), separated by a sliding gate. The vertical section was filled with suspension, and upon lifting the gate, the mixture flowed into the horizontal section. The slump height (H_f) and flow length (L_f) difference were measured to assess flow behavior under various slurry conditions. The experimental setup is illustrated in Fig. 3. To evaluate the flow behavior of the tested suspensions, the final slump height and flow length were normalized by the initial

sample height (corresponds to the height of the vertical section H_0). These normalized parameters are referred to as the flow height ratio (H_r) and the spread ratio (L_r), and are defined in eqs. (5) & (6):

$$H_r = H_f / H_0, \tag{5}$$

$$L_r = L_f / H_0. \tag{6}$$

Based on the calculated H_r and L_r values, the relationships between the rheological properties (e.g. yield stress and viscosity) and the flow behavior (e.g. flow height ratio and spread ratio) were analyzed. By comparing the experimental results of the rheological parameters and the L-box test parameters to assess their correlations.

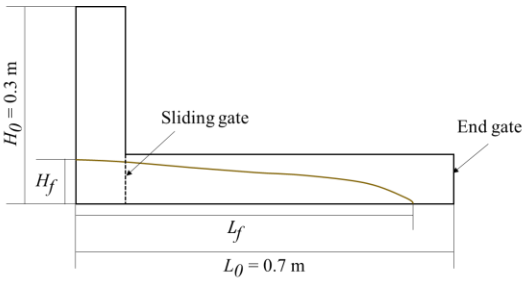


Fig. 3. Schematic diagrams of a L-box test setup

Results

Rheological parameters of woody-debris suspensions

As illustrated in Fig. 4, a linear relationship between shear stress and shear rate is evident, indicating that the suspensions examined in this study exhibit Bingham fluid behavior. For a fine-sediment fraction C_{vf} of 0.30 without woody debris (C_{vg} = 0.00), the shear rate does not exceed 20 s^{-1}, and the corresponding shear stress ranges from approximately 12.4 to 18.1 Pa. When woody debris is present, the shear stress increases with the proportion of woody debris. Specifically, at C_{vg} of 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, and 0.25, the shear stress ranges are 14.2~20.3 Pa, 16.1~22.9 Pa, 18.1~26.0 Pa, 20.3~29.6 Pa, and 22.6~34.2 Pa, respectively, as also depicted in Fig. 4.

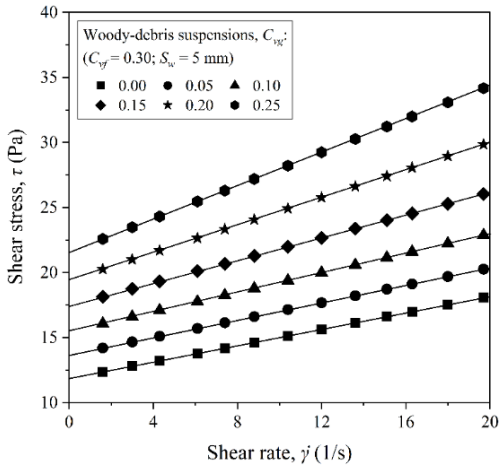


Fig. 4. Rheological relations of woody-debris suspensions with different C_{vg} under the same C_{vf} of 0.30 and S_w = 5 mm

To further illustrate the Bingham fluid model, Fig. 5 displays that the mean values of the rheological parameters, Bingham yield stress (τ_B) and viscosity (μ_B), of the woody-debris

suspensions increase as woody debris proportion (C_{vg}) increases and woody debris size (S_w) decreases. Specifically, increasing the woody debris proportion enhances internal friction and structural rigidity within the suspension, resulting in higher yield stress as more force is required to initiate flow (Fig. 5a). The presence of woody debris also contributes to greater energy dissipation, thereby increasing the viscosity, or resistance to shear deformation [*Major & Iverson, 1999; Berger et al., 2011; Matioli et al., 2013*]. Conversely, increasing woody debris size at a constant volume fraction reduces the number of particles and their interparticle interactions, weakening mechanical interlocking. This leads to a decline in both yield stress and viscosity (Fig. 5b). In addition, larger particles interact less with the fluid due to their lower surface area-to-volume ratio, further reducing internal resistance to flow [*Iverson, 1997; Matioli et al., 2013*].

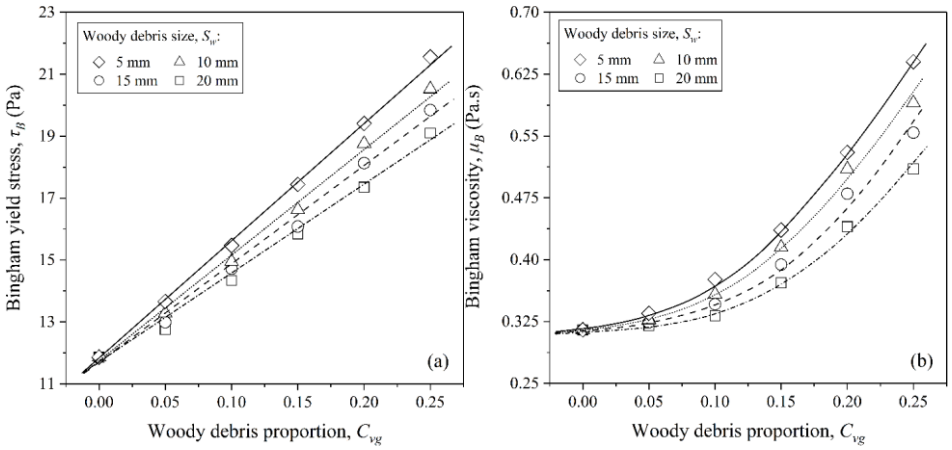


Fig. 5. The effects of woody debris proportions and sizes on the rheological parameters of woody-debris suspensions with C_{vf} of 0.30

L-box test

The flow height ratios and spread ratios from the L-box tests under various conditions are presented in Fig. 6. As shown in Fig. 6a, the flow height ratio slightly increases with higher woody debris proportions and smaller particle sizes, while lower proportions combined with larger sizes lead to a decrease. Conversely, the spread ratio exhibits an opposite trend, greater values are observed with lower woody debris proportions and larger sizes, whereas higher proportions of larger woody debris slightly reduce the spread ratio (Fig. 6b). These trends suggest that woody debris content and morphology influence the deformation behavior and mobility of the suspensions. The increase in flow height ratio indicates enhanced resistance to flow, while the reduced spread ratio implies lower lateral mobility under more structurally rigid conditions.

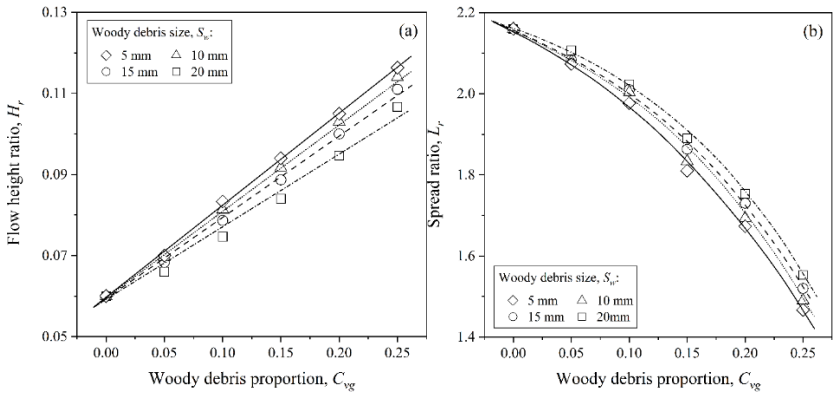


Fig. 6. The effects of woody debris proportions and sizes on the flow height ratio and spread ratio of woody-debris suspensions with C_{vf} of 0.30

Correlations between the rheological parameters and L-box test parameters

The rheological parameters (the yield stress and viscosity) obtained from rheometer measurements, L-box test parameters (flow height ratio and spread ratio) obtained from L-box tests for woody-debris suspensions used in this study were compared as shown in Fig. 7. In the above rheological and L-box test parameters models analysis, the values of R^2 for the relation of parameters of woody-debris suspensions ranges from 0.95 to 0.99. The R^2 values greater than 0.7 are considered as strongly correlated [*Cohen et al., 2003*], as a result it implies that the rheological parameters are strongly related to L-box test parameters.

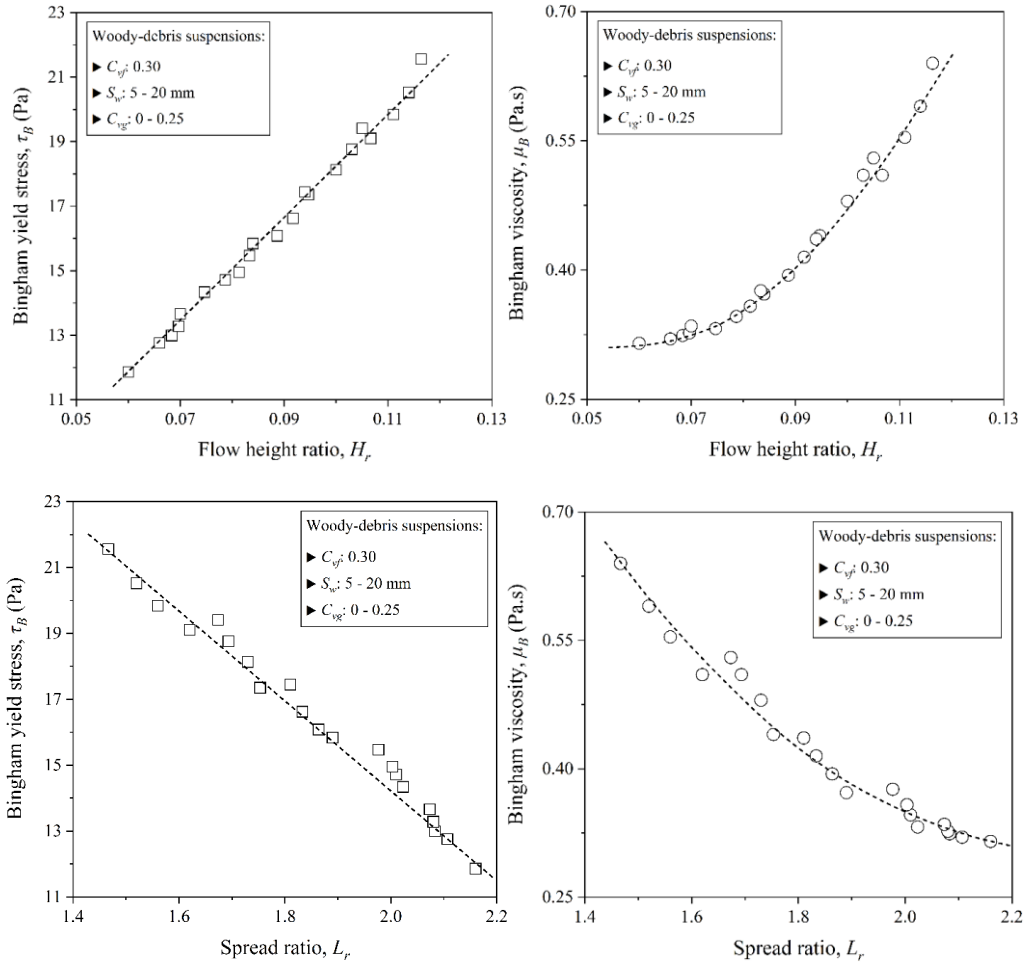


Fig. 7. Correlations between the rheological parameters and L-box test parameters of woody-debris suspensions

Table 2. The correlations between the rheological parameters and L-box test parameters of woody-debris suspensions

Correlation model	Coefficients of model		Coefficient of determination, R^2
	a	b	
$\tau_B = aH_R + b$	162.45	2.03	0.99
$\mu_B = ae^{bH_R}$	0.14	12.03	0.95
$\tau_B = aL_R + b$	-13.49	41.36	0.98
$\mu_B = aL_R^b$	1.29	-1.86	0.98

Conclusions

This study conducted rheological experiments and L-box tests of woody-debris suspensions that have Bingham fluid behavior, to explore the correlation between the rheological parameters and L-box test parameters. The key findings and conclusions of this study are summarized as follows:

1. The woody-debris suspensions at low shear rates ($< 20\ s^{-1}$) exhibit the characteristics of Bingham fluid.
2. The rheological parameters, including yield stress and Bingham viscosity, are influenced by both the proportion and size of woody debris. Generally, larger woody debris combined with higher proportions lead to increased values of these parameters.
3. Higher woody debris proportions and smaller sizes tend to increase flow height ratio, while lower proportions and larger sizes promote greater lateral spread ratio.
4. The rheological parameters show a strong correlation with L-box test parameters, highlighting the potential of using L-box test as an indirect method for estimating the rheological parameters of concentrated debris flows containing the large woody debris.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the National Science and Technology Council, Taiwan (Project No.: NSTC 113-2625-M-006-013).

References

Berger C., McArdell B.W., Schlunegger F. Sediment transfer patterns at the Illgraben catchment, Switzerland: Implications for the rheology of debris flows. // Earth Surface Processes and Landforms, 2011, 36(8): 1162–1178.

Bird R.B., Gance D., Yarusso B.J. The rheology and flow of viscoplastic materials. // Reviews in Chemical Engineering, 1983, 1: 1–70.

Cohen J., Cohen P., West S.G., Aiken L.S. Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences (3rd ed.). Routledge, 2003.

Dey L., Jan C.D., Wang J.S. Effects of particle fractions on the Bingham yield stress and viscosity of fine-coarse particle suspensions. // Journal of Mountain Science, 2021, 18 (11): 2960–2970.

Iverson R.M. The physics of debris flows. Reviews of Geophysics, 1997, 35(3): 245–296.

Iverson R.M. The debris-flow rheology myth. // In D. Rickenmann, C.L. Chen (Eds.) Debris-flow hazards mitigation: Mechanics, prediction, and assessment. 2003, 1: 303–314.

Jan C.D., Chang Y.W., Kao F.H., Lo W.C. Effects of solid particles on the rheological parameters of Bingham fluid. Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 2009, 40(1): 95–104. (in Chinese).

Jan C.D., Kuo F.H., Chang L.Y. (2011). An experimental study on the time-dependent rheological parameters for kaolin slurries. // Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 2011, 42(3): 196–206. (in Chinese).

Jan C.D., Hsu C.K., Yang C.Y. Study on rheological experiments and slump tests of kaolin slurries. // Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 2018, 49(2): 110-116. (in Chinese).

Kean J.W., Staley D.M., Cannon S.H. 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, 2011, 116: 1–21.

Major J.J., Iverson R.M. Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins. // Geological Society of America Bulletin, 1999, 111(10): 1424–1434.

Matioli A.S., Bezerra F.H., Costa C.L. Influence of woody debris on debris flow viscosity and flow dynamics. // Geophysical Research Letters, 2013, 40(24): 6196–6201.

Nguyen Q.D., Boger D.V. Measuring the flow properties of yield stress fluids. // Annual Review of Fluid Mechanics, 1992, 24: 47–88.

Schramm G. A practical approach to rheology and rheometry. Karlsruhe: Thermo Haake Rheology, 2000.

Utracki L.A. The rheology of two-phase flows. // In A.A. Collyer (Ed.), Rheological measurement, 1988, p. 349–400.

Численное моделирование связных селевых потоков и оползней на горных склонах

Г.С. Хакимзянов[1,2], О.И. Гусев[1,2], В.С. Скиба[1,2], А.В. Бакулина[1,2], А.В. Кладов[2], С.А. Церешко[2], Л. Чжао[2]

[1]Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия, khak@ict.nsc.ru

[2]Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Аннотация. Содержание настоящего доклада связано с разработкой вычислительного инструментария, основанного на упрощенной и одновременно универсальной математической модели, описывающей как сход оползня с криволинейного горного склона, так и движение связного селя по криволинейному наклонному водотоку, а также с разработкой и исследованием численных алгоритмов решения задачи о каскадном стихийном бедствии, связанном с образованием опасных волн цунами при входе берегового оползня в водоем. Будут приведены результаты верификации численных алгоритмов и валидации используемых математических моделей на наборе тестовых задач и данных лабораторных экспериментов, результаты численного моделирования разрушительного цунами, возникшего при входе берегового оползня в водохранилище Бурейской ГЭС, результаты расчетов различных сценариев прохождения связного селя по наклонному криволинейному руслу и выноса селевого материала к подножью склона.

Ключевые слова: *горный склон, связный сель, конус выноса, оползень, цифровая модель рельефа, численный алгоритм*

Ссылка для цитирования: Хакимзянов Г.С., Гусев О.И., Скиба В.С., Бакулина А.В., Кладов А.В., Церешко С.А., Чжао Л. Численное моделирование связных селевых потоков и оползней на горных склонах. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 205–216.

Numerical modeling of viscous debris flows and landslides on mountain slopes

G.S. Khakimzyanov[1,2], O.I. Gusev[1,2], V.S. Skiba[1,2], A.V. Bakulina[1,2], A.V. Kladov[2], S.A. Tsereshko[2], L. Zhao[2]

[1]Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russia, khak@ict.nsc.ru

[2]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

Abstract. This presentation is devoted to the development of computational tools based on a simplified but universal mathematical model that describes both the movement of a landslide down a mountain slope and the flow of a viscous debris flow along an inclined watercourse. It also discusses the development and testing of numerical algorithms to solve the complex problem of cascading natural disasters associated with the formation of tsunami waves when a landslide enters a reservoir. The verification of the numerical algorithms and the validation of the mathematical models will be demonstrated through a series of test problems and laboratory experiments. The results of the numerical simulations of a catastrophic tsunami triggered by the landslide entering the reservoir of the Bureyskaya Hydroelectric Power Plant will be presented. Additionally, the presentation includes the results of calculations for various scenarios involving the viscous debris flow moving along a curved channel and its deposition at the base of a slope.

Key words: *mountain slope, viscous debris flow, fan, landslide, digital relief, numerical algorithm*

Cite of this article: Khakimzyanov G.S., Gusev O.I., Skiba V.S., Bakulina A.V., Kladov A.V., Tsereshko S.A., Zhao L. Numerical modeling of viscous debris flows and landslides on mountain slopes. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 205–216.

Введение

Сели и оползни являются одними из самых опасных и распространенных стихийных бедствий [*Михайлов и Черноморец, 2011*; *Ward et al.*, *2011*]. Исследование сценариев возникновения и развития селевых потоков и оползней является чрезвычайно сложной задачей и поэтому она может быть решена только в рамках междисциплинарного подхода, объединяющего усилия специалистов многих научных дисциплин и различных методик исследования – исторических, натурных, лабораторных и численного моделирования. В частности, оценка опасности 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 оползней и селей, законов их движения по склону, а также механизмов генерации и распространения поверхностных волн, возникающих при входе оползня в водоем.

При построении математических моделей исследуемых явлений целесообразно использовать иерархический подход, реализующий принцип «от простого к сложному», когда после достаточно подробного изучения не очень сложной модели делается следующий шаг, состоящий в отказе от одного или нескольких упрощающих предположений. При этом возникает цепочка (иерархия) все более полных моделей, каждая из которых обобщает предыдущие, включая их в качестве частного случая. Такой подход позволяет поэтапно изучать всё более реалистичные модели, сопоставлять результаты, а в некоторых случаях обосновывать возможность применения упрощенных моделей, позволяющих описывать характеристики явлений с достаточной для практических приложений точностью.

Содержание настоящего доклада связано с разработкой вычислительного инструментария, основанного на упрощенной математической модели, описывающей как сход оползня с криволинейного горного склона, так и движение связного селя по криволинейному наклонному водотоку, а также с разработкой численных алгоритмов решения задачи о стихийном бедствии, связанном с образованием опасных волн цунами при входе берегового оползня в водоем. В краткой форме приведены результаты верификации численных алгоритмов и валидации используемых математических моделей на наборе тестовых задач и данных лабораторных экспериментов, результаты численного моделирования разрушительного цунами, возникшего при входе берегового оползня в водохранилище Бурейской ГЭС 11 декабря 2018 г., результаты расчетов сценариев прохождения связного селя по наклонному криволинейному руслу и выноса селевого материала к подножью склона.

Математическая модель движения оползней и связных селей

Обзор существующих математических моделей и созданных на их основе комплексов программ для численного моделирования оползней и селей дан в книге [*Михайлов и Черноморец, 2011*]. 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; Grilli et al., 2005*]. 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.

Исследованию селевых потоков также посвящено множество научных публикаций. Наибольшее число работ связано с описанием полевых наблюдений последствий селевых потоков, изучением русел, по которым они распространяются, изучением геоморфологических, гидрологических и реологических условий возникновения селевых потоков [*Malet et al., 2005*]. Много работ посвящено исследованию селевых потоков с помощью инженерных (гидравлических) методик и формул. Чаще всего методы этого направления основаны на использовании сложных аналитических формул, насыщенных большим количеством эмпирических констант [*Натишвили и Тевзадзе, 2007; Натишвили и Тевзадзе, 2011; Тевзадзе и Гавардашвили, 1995*]. В связи со сложностью лабораторного моделирования, связанной с трудностью изготовления макетов реальных водотоков, работ этого направления значительно меньше (см., напр., [*deLange et al., 2020; Shrestha et al., 2008*]). В последние десятилетия стали бурно развиваться методы численного моделирования селей на основе тех или иных математических моделей [*Михайлов и Черноморец, 2011*]. В работах по численному моделированию селей в основном используются уравнения мелкой воды, дополненные источниковыми членами, в которых учитываются различные физические факторы, влияющие на движение селя и его взаимодействие с ложем русла и его бортами [*Brien et al., 1993; Zic et al., 2015*]. В статье [*Cetina et al., 2003*] предложен оригинальный подход к моделированию селей, заключающийся в применении комбинированной методики: в верхних частях движения селя, где селевой поток находится в крутом узком каньоне, используются одномерные модели, а ниже по течению, на относительно пологих участках более широкого русла, применяются двумерные модели.

Далее представлена математическая модель, которая использовалась нами для численного решения задач:

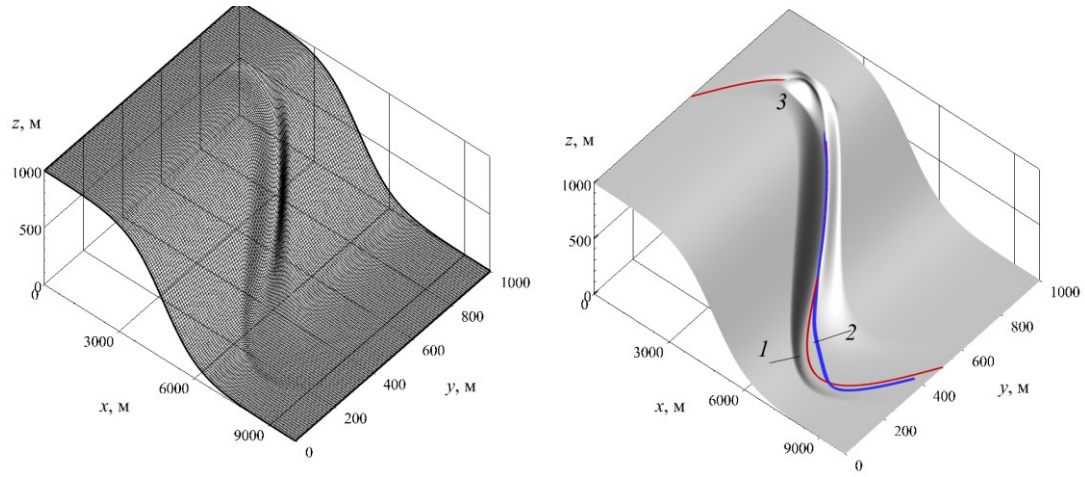
1) об оползнях на горных склонах,
2) о подводных оползнях,
3) о береговых оползнях, обрушающихся в водоемы (рис. 1),
4) о движении связных селей по криволинейным водотокам с меняющейся формой поперечного сечения (рис. 2).

а б

Рис. 1. Обрушение берегового оползня: в водохранилище Бурейской ГЭС [*Gusiakov et al., 2021*] (*а*); в водохранилище «Три ущелья» [*Huang et al., 2016*] (б)

Для моделирования реальных ситуаций необходимо учитывать неровность горного или подводного склона и возможность деформации оползня или связного селя. Рассмотрим вначале математическую модель для задачи 3, которая является наиболее общей. При выводе уравнений движения выполнялось разбиение объема берегового оползня на бесконечное число блоков, а в качестве силы, приводящей его в движение по

склону, принималась интегральная сумма сил тяжести, трения, плавучести и сопротивления, действующих на бесконечно малые элементарные объемы [*Khakimzyanov et al., 2020*]. В рамках модели квазидеформируемого тела форма его поверхности меняется в соответствии с встречающимися по ходу движения неровностями рельефа (как у деформируемого тела), а мгновенные горизонтальные компоненты вектора скорости одинаковы в каждой точке оползня (как у твердого тела).



а б

Рис. 2. К задаче о движении связного селя: (*а*) – цифровая модель горного склона с криволинейным водотоком; (б) – траектория движения связного селя (*2*) из начального положения (*3*), *1* – тальвег русла

Движение берегового оползня определяется следующей системой из четырех обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dv_\alpha}{dt}=\frac{R_\alpha}{2}-\frac{\sqrt{g_{\alpha\alpha}}}{\left(\gamma+C_{\text{add}}(\mathbf{x}_c(t))\right)V}\left[g\left(I_{1,\alpha}+\sigma_\alpha I_2\right)+\sigma_\alpha\left(\gamma\left(u^2I_{3,11}+2uvI_{3,12}+v^2I_{3,22}\right)+\frac{C_{\text{res}}(\mathbf{x}_c(t))}{2}\Pi v_c^2\right)\right], \quad (1)$$

$$\frac{dx_c}{dt}=u, \qquad \frac{dy_c}{dt}=v, \quad (2)$$

где $\alpha=1,2$, g – ускорение свободного падения, $\gamma=\rho_{\text{sl}}/\rho_{\text{w}}>1$, ρ_{w} – плотность воды, ρ_{sl} – плотность оползневой массы, V – объем оползня,

$$\sigma_\alpha=\frac{v_\alpha}{\sqrt{g_{\alpha\alpha}}v_c}, \qquad R_\alpha=\frac{\partial g_{11}}{\partial x^\alpha}u^2+2\frac{\partial g_{12}}{\partial x^\alpha}uv+\frac{\partial g_{22}}{\partial x^\alpha}v^2. \quad (3)$$

Предполагается, что оползень, ограниченный снизу твердым склоном $z=h(x,y)$, а сверху поверхностью $z=h(x,y)+h_{\text{sl}}(x,y,t)$, где $h_{\text{sl}}(x,y,t)>0$, начинает свое движение из состояния покоя с заданной начальной формой $h_{\text{sl}}(x,y,0)=h_{\text{sl}}^0(x,y)$ оползневой массы и скользит без отрыва по криволинейной поверхности склона, геометрические характеристики которого определяются компонентами метрического тензора

$$g_{11}=1+\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2, \qquad g_{12}=g_{21}=\frac{\partial h}{\partial x}\cdot\frac{\partial h}{\partial y}, \qquad g_{22}=1+\left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2. \quad (4)$$

Уравнения движения квазидеформируемого оползня (1), (2) базируются на предположении о том, что в каждый момент времени его положение определяется точкой $\mathbf{x}_c(t)=\left(x_c(t),y_c(t),z_c(t)\right)$, скользящей по поверхности $z=h\left(x,y\right)$, при этом $\left(x_c(t),y_c(t)\right)\in D_t$, $z_c(t)=h\left(x_c(t),y_c(t)\right)$, D_t – ортогональная проекция трехмерной области, занятой оползневой массой, на плоскость $z=0$ декартовой системы координат $Oxyz$, ось Oz которой направлена вертикально вверх. Форма оползня определяется формулой $h_{\rm sl}(x,y,t)=h_{\rm sl}^0\left(x+x_c(0)-x_c(t),\,y+y_c(0)-y_c(t)\right)$.

Первые две ковариантные компоненты v_α вектора скорости $\mathbf{v}_c$ точки $\mathbf{x}_c(t)$ определяются путем решения нелинейных уравнений (1). Нелинейность этих уравнений обусловлена тем, что в их правые части входят зависящие от искомых величин v_α декартовы компоненты

$$u=\frac{g_{22}v_1-g_{12}v_2}{G},\qquad v=\frac{-g_{21}v_1+g_{11}v_2}{G} \tag{5}$$

вектора $\mathbf{v}_c$, а также величина вектора скорости $v_c=\left|\mathbf{v}_c\right|=\sqrt{g_{11}u^2+2g_{12}uv+g_{22}v^2}$, Π – максимальная площадь сечения оползня плоскостью, перпендикулярной горизонтальной составляющей вектора скорости $\mathbf{v}_c$.

Уравнения движения (1) являются интегро-дифференциальными, поскольку в них входят интегралы, зависящие от искомого решения:

$$I_{1,\alpha}(t)=\iint\limits_{D_t}C_{\rm A}(\mathbf{x})\frac{h_{\rm sl}(x,y,t)}{\sqrt{g_{\alpha\alpha}(x,y)}}\frac{\partial h}{\partial x^\alpha}(x,y)dxdy,\qquad I_2(t)=\iint\limits_{D_t}C_{\rm A}(\mathbf{x})C_{\rm fr}(\mathbf{x})\frac{h_{\rm sl}(x,y,t)}{\sqrt{G(x,y)}}dxdy>0, \tag{6}$$

$$I_{3,\alpha\beta}=\iint\limits_{D_t}C_{\rm fr}(\mathbf{x})\frac{h_{\rm sl}(x,y,t)}{\sqrt{G(x,y)}}\frac{\partial^2 h}{\partial x^\alpha\partial x^\beta}(x,y)dxdy,\qquad \alpha,\beta=1,2,\qquad G=g_{11}g_{22}-g_{12}^2\ge 1,\quad \mathbf{x}=\left(x,y,h(x,y)\right), \tag{7}$$

где

$$C_{\rm A}(\mathbf{x})=\begin{cases}\gamma, & \text{если}\quad \mathbf{x}\in\Omega_{\rm dry}\\ \gamma-1, & \text{если}\quad \mathbf{x}\in\Omega_{\rm wet}\end{cases},\qquad C_{\rm fr}(\mathbf{x})=\begin{cases}C_{\rm fr,1}, & \text{если}\quad \mathbf{x}\in\Omega_{\rm dry}\\ C_{\rm fr,2}, & \text{если}\quad \mathbf{x}\in\Omega_{\rm wet}\end{cases}. \tag{8}$$

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. Предполагается, что сила Архимеда действует только на те части оползневой массы, которые попали в воду ($\mathbf{x}\in\Omega_{\rm wet}$), и не действует на надводную часть оползня, расположенную на берегу ($\mathbf{x}\in\Omega_{\rm dry}$). Функция $C_{\rm fr}(\mathbf{x})$ связана с коэффициентом трения, который предполагается разным на склоне и в водоеме. Поэтому используются два значения коэффициента трения скольжения: $C_{\rm fr,1}=\operatorname{tg}\theta_{*,1}$ для надводной части оползня и $C_{\rm fr,2}=\operatorname{tg}\theta_{*,2}$ – для подводной, $\theta_{*,1}>\theta_{*,2}$.

Функция $C_{\rm res}(\mathbf{x})$ предназначена для учета отличий сопротивлений окружающей среды при движении оползня в воздухе и в воде:

$$C_{\rm res}(\mathbf{x})=\begin{cases}0, & \text{если}\quad \mathbf{x}\in\Omega_{\rm dry}\\ C_{\rm d}, & \text{если}\quad \mathbf{x}\in\Omega_{\rm wet}\end{cases}, \tag{9}$$

то есть предполагается, что сопротивление воздуха пренебрежимо мало, а сопротивление воды определяется постоянным коэффициентом $C_{\mathrm{d}} > 0$.

В уравнении (1) учитывается также присоединенная масса воды при движении подводной части оползня. Коэффициент присоединенной массы $C_{\mathrm{w}} > 0$ становится значительным только при входе оползня в воду, для надводной части он пренебрежимо мал в силу относительно малой плотности воздуха. Этот эффект учитывается функцией

$$C_{\mathrm{add}}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & \text{если} \quad \mathbf{x} \in \Omega_{\mathrm{dry}} \\ C_{\mathrm{w}}, & \text{если} \quad \mathbf{x} \in \Omega_{\mathrm{wet}} \end{cases}. \qquad (10).$$

Для модели подводного оползня (задача 2) следует положить $\Omega_{\mathrm{dry}} = \varnothing$. При численном решении задач о движении оползня на горном склоне (задача 1) и задач о движении связных селей по наклонным руслам (задача 4) полагается $\Omega_{\mathrm{wet}} = \varnothing$. Для описания таких движений необходимо иметь подробную цифровую модель изучаемого горного бассейна и конкретного русла, а также выполнять тщательную калибровку параметров, входящих в дифференциальные уравнения и влияющих на характеристики селя.

Нелинейные уравнения (1), (2) решались численно с помощью метода Рунге – Кутты до того момента времени, когда в результате воздействия на оползень сил трения и сопротивления воды произойдет его остановка.

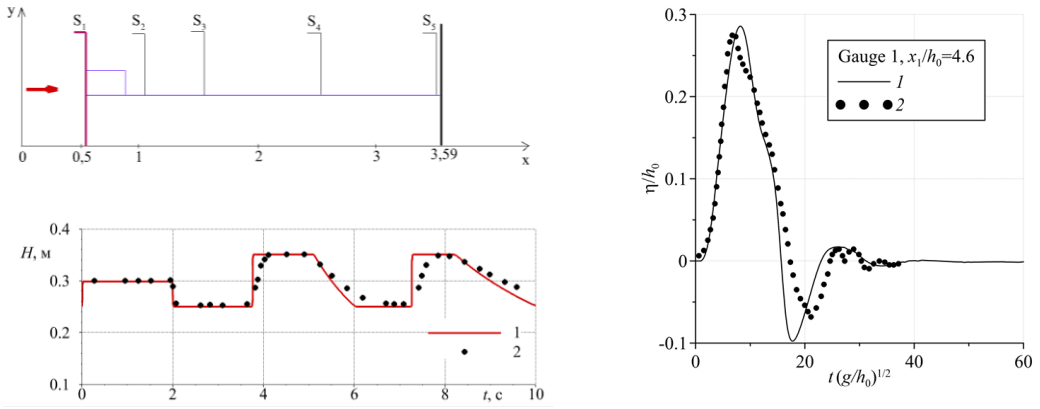
О тестовых задачах

Создание надежных алгоритмов для расчета селевых потоков требует не только теоретического анализа математических моделей и применяемых для их реализации численных методов, но и проверки их на тестовых задачах, которые отражают основные физические аспекты рассматриваемого явления. Такая проверка должна выполняться путем верификации численного алгоритма и валидации математической модели.

Сравнения с расчетами других авторов, с известными данными лабораторных экспериментов и натурных наблюдений показали эффективность использования уравнений движения (1), (2) квазидеформируемого оползня при численном решении задач о генерации поверхностных волн оползнями, возникающими на подводных склонах морских акваторий [*Chubarov et al., 2005; Beisel et al., 2012; Khakimzyanov et al., 2015; Gusev et al., 2019*].

Для «селевых» и «оползневых» задач важным аспектом задачи конструирования системы тестов является формирование модельных рельефов водотоков и склонов (см., напр., рис. 2). Выполнена верификация численного алгоритма решения уравнений (1), (2) путем сравнения результатов расчетов с точным решением задачи о сходе берегового оползня в случае плоского берегового склона [*Чжао, 2024*], с точным решением задачи о движении связного селя в прямолинейном водотоке постоянного поперечного сечения, с точным решением задачи о генерации бора при входе берегового оползня с постоянной скоростью в водоем с горизонтальным дном $h(x) = h_0 = \mathrm{const}$. Были выполнены также сравнения с результатами расчетов других авторов процесса образования волн при движении левой стенки бассейна по заданному закону, в частности, когда вертикальная стенка (рис. 3*а*), возвышающаяся над поверхностью воды, вначале движется с постоянной скоростью, а затем останавливается [*Cea et al., 2004*]. Отличие хронограмм связано с тем, что в наших расчетах использовались очень мелкие сетки, что приводило к более точному представлению динамики изменения уровня воды. Остальные параметры, такие как амплитуда начальной волны, максимум свободной поверхности на левой стенке, время резкого падения уровня воды после остановки стенки, хорошо согласуются с численными результатами, представленными в [*Cea et al., 2004*].

Задача о генерации волн движением стенки имеет непосредственное отношение к задаче входа высокого надводного оползня в воду, поэтому эта задача использовалась для валидации разработанной модели генерации волн оползнем, в частности, путем сравнения (рис. 3*б*) полученных численных решений с данными лабораторных экспериментов [*Sander et al., 1992*], в которых волны возникали при движении по заданному закону наклонной левой стенки бассейна.

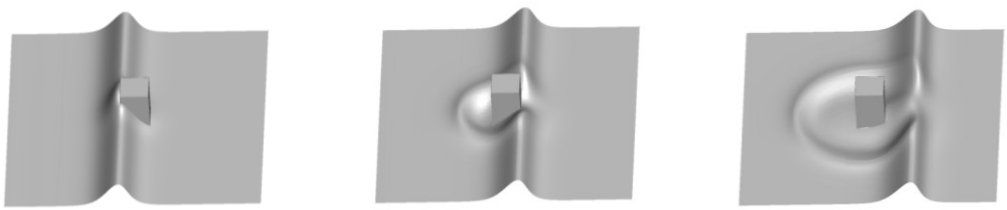


а б

Рис. 3. Генерация поверхностных волн подвижной левой стенкой бассейна: хронограмма свободной границы, рассчитанная в настоящей работе (1) и (*а*) – в расчетах [*Cea et al., 2004*] (2) для волномера S_1, прикрепленного к стенке; (*б*) – в экспериментах [*Sander et al., 1992*] в точке $x/h_0 = 4.6$

Валидация математической модели движения оползня (1), (2) выполнена на оцифрованном рельефе береговых склонов и дна водохранилища Бурейской ГЭС. Геометрические размеры начальной оползневой массы взяты из [*Коковкин, 2020; Кулаков и др., 2019; Махинов и др., 2019*], значения параметров C_w и C_d взяты такими же, как для подводного оползня [*Khakimzyanov et al., 2020*], плотность оползневой массы ρ_{sl} взята из работы [*Иванова и др., 2020*]. На основе вычислительных экспериментов найдены значения коэффициентов трения $C_{fr,1}$ и $C_{fr,2}$, при которых оползень прекращает свое движение непосредственно в ложе водохранилища, перекрывая его плотиной, что наблюдалось в реальном событии (см. рис. 1*а*).

Для численного исследования поверхностных волн, возникающих при оползнях, авторы использовали иерархию одномерных, двумерных и трехмерных математических моделей. Для созданной цепочки математических моделей разработана иерархия конечно-разностных алгоритмов на адаптивных сетках для численного решения задач о генерации поверхностных волн оползнями, в том числе и алгоритмы расчета наката волн на берег [*Gusev et al., 2023*] и их силового воздействия на неподвижные полупогруженные в воду сооружения (рис. 4).



а б в

Рис. 4. Форма свободной поверхности при накате уединенной волны на полупогруженное сооружение: $t\sqrt{g/h_0}$ =18.79 (*а*); 28.19 (*б*); 37.58 (*в*)

В иерархическую цепочку входят нелинейные бездисперсионные и нелинейно-дисперсионные модели мелкой воды, модель потенциальных течений идеальной жидкости, модель уравнений Навье-Стокса течений вязкой несжимаемой жидкости со свободной границей. Каждая из моделей имеет свою ценность, важное значение для понимания характеристик взаимодействия волн с сооружениями. Результаты верификации алгоритмов и валидации моделей показывают, что в случае слабой зависимости параметров течения от одной из горизонтальных координат удовлетворительные результаты могут быть получены даже в рамках одномерных нелинейных моделей мелкой воды. Выполнено многопараметрическое исследование степени влияния на взаимодействие с полупогруженными сооружениями формы набегающих волн, их амплитуды и длины [*Гусев и др., 2022*], горизонтальных размеров сооружения, осадки полупогруженного объекта, формы неровности дна перед сооружением, о влиянии причальной стенки, вблизи которой находится конструкция [*Скиба и др., 2025*], о влиянии дифракционных эффектов на значения максимальных заплесков на грани сооружения, на максимальные значения горизонтальных и вертикальных компонент силовой нагрузки. Достоверность результатов численного моделирования основывается на успешном сопоставлении с результатами расчетов других авторов, с данными лабораторных измерений, на тестировании разработанных алгоритмов как на известных тестах, так и на новых, созданных авторами.

Некоторые результаты численного моделирования

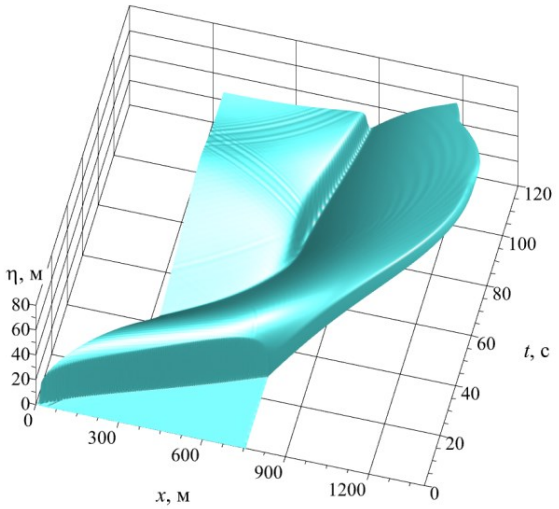
11 декабря 2018 г. случилось обрушение левого берегового склона водохранилища Бурейской ГЭС и возник крупный оползень, который полностью перекрыл русло водохранилища и вызвал сильное цунами, затопившее пологий правый берег на значительную высоту. Движение оползня по склону рассматривается в одномерном приближении в рамках модели квазидеформируемого тела (1), (2) с учетом кривизны рельефа и различий коэффициентов трения на суше и в воде. Расчет поверхностных волн, сгенерированных оползнем, выполнялся в рамках модели мелкой воды в одномерном приближении с учетом неровного дна водохранилища, подвижной границы, имитирующей вход оползневой массы в воду, и подвижной линии уреза [*Khakimzyanov et al., 2016*] при накате цунами на правый берег.

На рис. 5*а* показана динамика свободной поверхности воды. Видно, что оползень генерирует волну в виде бора. В процессе движения бор трансформируется в волну с вертикальным передним фронтом, сглаженной вершиной и пологим задним склоном. В момент, когда сгенерированная волна достигает правого берега, возникает мощный заплеск. После того, как точка уреза достигнет максимальной высоты, начинается сток воды с берега назад в водохранилище. В окрестности первоначального уреза образуется волна в виде стоячего бора, а также отраженная от берега волна, которая начинает двигаться по водохранилищу в направлении, обратном движению набегающей волны. К этому моменту точка уреза на правом берегу уже движется вниз от своего крайнего самого высокого положения, при котором высота заплеска достигла примерно 70 метров (рис. 5*б*).

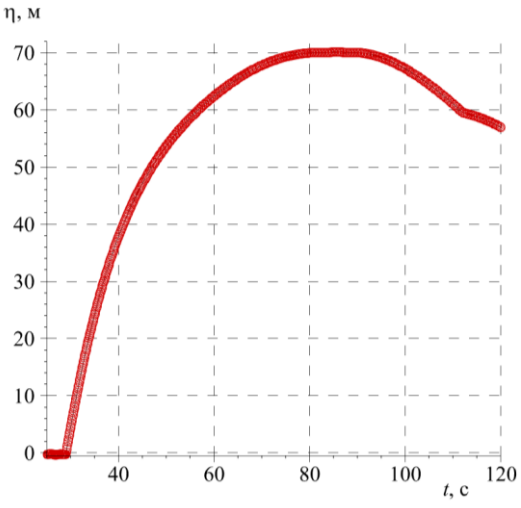
В [*Gusiakov et al., 2021*] отмечается, что напротив оползня высота максимального вертикального заплеска на правый берег водохранилища была до 62 м, если судить по полностью срезанным деревьям и разрушенному почвенному покрову, однако по аэрофото- и спутниковым снимкам видно, что вода прошла еще дальше и реальный заплеск был на 5–10 м выше линии полного уничтожения леса. Таким образом, наш численный результат в 70 м находится в очень хорошем соответствии с натурными наблюдениями.

На практике поверхность реального склона задается не аналитически, а набором точек, поэтому в расчетах движения связного селя используется цифровая модель рельефа (рис. 2*а*). Для того чтобы выяснить влияние того или иного параметра (угол трения, координаты начального расположения селя, его размеры) на характеристики движения связного селя по цифровому рельефу, выполнены вычислительные

эксперименты, в которых изменялся только один из параметров, а остальные оставались неизменными. На основе результатов экспериментов по численному моделированию движения связного селевого потока в наклонном водотоке сложной формы, расположенном на оцифрованном модельном горном склоне, можно сделать вывод о том, что коэффициент трения и высота места старта селевой массы имеют более важное значение в вопросе о траектории движения связного селя (линия 2 на рис. 2*б*) и месте его остановки, чем другие рассмотренные параметры, входящие в уравнения движения (1).



а

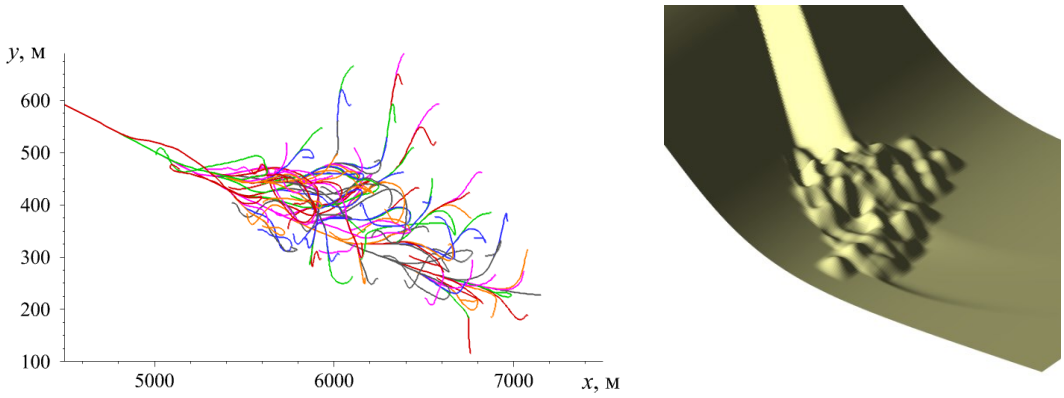


б

Рис. 5. Динамика свободной поверхности воды $z = \eta(x,t)$ при распространении сгенерированной оползнем волны поперек водохранилища и ее наката на правый берег (*а*); хронограмма движения точки уреза на правом берегу водохранилища (*б*)

Особый интерес представляет изучение конусов выноса, образованных скоплением материала, отложенного селевыми потоками у подножия склона. Для этого используются лабораторные методы исследования [*Натишвили и др., 2011; Степанов и др., 2014; Яфязова, 1996*] и методы численного моделирования [*Михайлов и Черноморец, 2011*]. В экспериментах [*Степанов и др., 2014*] формирование конуса выноса исследовалось путем многократного запуска модели связного селя по наклонному желобу. Такая же методика формирования конуса выноса применяется в настоящей работе на основе численного моделирования. После прохождения по водотоку очередная селевая волна останавливается в основании склона и за счет своей формы изменяет

рельеф в месте выхода водотока к основанию склона, изображенного на рис. 2. Следующая селевая волна уже пойдет по измененному рельефу, поэтому траектория движения и точка остановки будут другими (рис. 6*а*). В результате в основании склона формируется новый рельеф, который является моделью образовавшегося конуса выноса с бугристой формой поверхности. Показано, что на форму конуса выноса существенно влияют коэффициент трения, место старта селевых волн и рельеф водотока в его основании. Из рис. 6*а* видно, что основная часть отложений возникла на левом склоне водотока. Возможным объяснением этого является то, что склон водотока слева от тальвега имеет более пологую форму, чем правый склон (см. рис. 2*б*).



а б

Рис. 6. Проекции на плоскость Oxy траекторий движения отдельных селевых волн (*а*) и конус выноса, сформировавшийся у подножия склона (*б*)

Благодарности

Исследования воздействия поверхностных волн на прибрежные сооружения выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

Список литературы

Гусев О.И., Скиба В.С., Хакимзянов Г.С. Силовое воздействие длинных поверхностных волн на полупогруженное в воду тело. I. Влияние формы набегающей волны // Вычисл. технологии, 2022, 27(4): 33–62.

Иванова А.А., Куликов Е.А. 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, 2020. С. 25–26.

Коковкин А.А. Феномен Бурейского оползня: данные полевых исследований и модель формирования // Отечественная геология, 2020, 4–5: 48–63.

Кулаков В.В., Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В. Катастрофический оползень и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС (бассейн Амура) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2019, 3: 12–20.

Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В., Матвеенко Д.В. Крупный оползень в долине реки Бурея и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС // Вестн. Дальневосточного отд. РАН, 2019, 2: 35–44.

Михайлов В.О., Черноморец С.С. Математическое моделирование селей, обвалов и оползней. М.: МГУ, 2011. 131 с.

Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. Основы динамики селей. Тбилиси: Институт водного хозяйства Национальной академии наук Грузии, 2007. 214 с.

Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. Волны в селях. Тбилиси: Институт водного хозяйства Национальной академии наук Грузии, 2011. 160 с.

Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Селевые процессы и селетехнические сооружения. Т. 3. Алматы: Институт географии МОН РК, 2014. 434 с.

Тевзадзе В.И., Гавардашвили Г.В. Определение скорости связного селевого потока с учетом коэффициента лобового сопротивления воздуха // Сообщения АН Грузии, 1995, 151(3): 444–447.

Чжао Л. Численное моделирование волн, вызванных сходом оползня или связного селя в водохранилище // 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. С. 550–562.

Яфязова Р.К. Особенности механизмов формирования конусов выноса горных рек // Гидрометеорология и экология, 1996, 2: 175–187.

Ataie-Ashtiani B., Yavari-Ramshe S. Numerical simulation of wave generated by landslide incidents in dam reservoirs // Landslides, 2011, 8: 417–432.

Beisel S.A., Chubarov L.B., Dutykh D., Khakimzyanov G.S., Shokina N.Yu. Simulation of surface waves generated by an underwater landslide in a bounded reservoir // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, 2012, 27(6): 539–558.

O'Brien J., Julien P., Fullerton W. Two-dimensional water flood and mudflow simulation // J. Hydraulic Engineering, 1993, 119(2): 244–259.

Cea L., Ferreiro A., Vazquez-Cendon M.E., Puertas J. Experimental and numerical analysis of solitary waves generated by bed and boundary movements // Int. J. Numer. Methods Fluids, 2004, 46(8): 793–813.

Cetina M., Krzyk M. Two-dimensional mathematical modelling of debris flows with practical applications // In: Water Pollution VII: Modelling, Measuring and Prediction. WIT Transactions on Ecology and the Environment, WITpress, 2003, 65: 435–444.

Chubarov L.B., Eletskij S.V., Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S. Simulation of surface waves generation by an underwater landslide // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, 2005, 20(5): 425–437.

Delis A.I., Kazolea M. Finite volume simulation of waves formed by sliding masses // Int. J. Numer. Methods Biomedical Eng., 2011, 27: 732–757.

Fructus D., Grue J. An explicit method for the nonlinear interaction between water waves and variable and moving bottom topography // J. Comput. Physics, 2007, 222(2): 720–739.

Gusev O.I., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B. Bulgarian tsunami on 7 May 2007: numerical investigation of the hypothesis of a submarine-landslide origin // In: Subaqueous Mass Movements and their Consequences: Assessing Geohazards, Environmental Implications and Economic Significance of Subaqueous Landslides (D.G. Lintern, D.C. Mosher, L.G. Moscardelli et al., editors), 477. London: Geological Society, Special Publications, 2019, p. 303–313.

Gusev O.I., Khakimzyanov G.S., Skiba V.S., Chubarov L.B. Numerical modeling of the long surface wave impact on a partially immersed structure in a coastal zone. I. Solitary waves over a flat slope // Physics of Fluids, 2023, 35(8): 087124.

Gusiakov V., Makhinov A. 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, 2021, 351–360.

Higman B., Shugar D.H., Stark C.P. et al. The 2015 landslide and tsunami in Taan Fiord, Alaska // Scientific Reports, 2018, 8: 12993.

Huang B., Yin Y., Du C. Risk management study on impulse waves generated by Hongyanzi landslide in Three Gorges Reservoir of China on June 24, 2015 // Landslides, 2016, 13: 603–616.

Khakimzyanov G., Dutykh D., Fedotova Z., Gusev O. Dispersive Shallow Water Waves. Theory, Modeling, and Numerical Methods. Basel: Birkhauser, 2020. 284 p.

Khakimzyanov G.S., Gusev O.I., Beisel S.A., Chubarov L.B., Shokina N.Yu. Simulation of tsunami waves generated by submarine landslides in the Black Sea // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, 2015, 30(4): 227–237.

Khakimzyanov G., Shokina N.Yu., Dutykh D., Mitsotakis D. A new run-up algorithm based on local high-order analytic expansions // J. Comput. Applied Math., 2016, 298: 82–96.

de Lange S.I., Santa N., Pudasaini S.P., Kleinhans M.G., de Haas T. Debris-flow generated tsunamis and their dependence on debris-flow dynamics // Coast. Eng., 2020, 157: 103623.

Lindstrom E.K., Pedersen G.K., Jensen A., Glimsdal S. Experiments on slide generated waves in a 1:500 scale fjord model // Coast. Eng., 2014, 92: 12–23.

Ma G., Kirby J.T., Shi F. Numerical simulation of tsunami waves generated by deformable submarine landslides // Ocean Modelling, 2013, 69: 146–165.

Malet J.-P., Laigle D., Remaitre A., Maquaire O. Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows // Geomorphology, 2005, 66(1-4): 215–235.

Mohammed F., Fritz H.M. Physical modeling of tsunamis generated by threedimensional deformable granular landslides // J. Geophys. Res., 2012, 117: C11015.

Paris A., Okal E.A., Guérin C. et al. Numerical modeling of the June 17, 2017 landslide and tsunami events in Karrat Fjord, West Greenland // Pure and Applied Geophys., 2019, 176: 3035–3057.

Sabeti R., Heidarzadeh M. Numerical simulations of water waves generated by subaerial granular and solid-block landslides: Validation, comparison, and predictive equations // Ocean Eng., 2022, 266(3): 112853.

Sander J., Hutter K. Evolution of weakly non-linear shallow-water waves generated by a moving boundary // Acta Mechanica, 1992, 91(3-4): 119–155.

Sepulveda S., Serey A. Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the April 21, 2007 Aisén earthquake, southern Chile (45.5°S) // Andean Geology, 2009, 36(1): 131–136.

Shrestha B.B., Nakagawa H., Kawaike K., Baba Y. Numerical simulation on debris-flow deposition and erosion processes upstream of a check dam with experimental verification // Annuals of Disastrous Preventing Research Institute, Kyoto University, 2008, 51 B: 613–624.

Ward S.N., Day S. The 1963 landslide and flood at Vaiont Reservoir Italy. A tsunami ball simulation // Italian J. Geosciences, 2011, 130: 16–26.

Xu W.-J., Dong X.-Y. Simulation and verification of landslide tsunamis using a 3D SPH-DEM coupling method // Computers and Geotechnics, 2021, 129: 103803.

Zic E., Arbanas Z., Bicanic N., Ozanic N. A model of mudflow propagation downstream from the Grohovo landslide near the city of Rijeka (Croatia) // Natural Hazards and Earth System Sciences, 2015, 15: 293–313.

Опасность образования крупных селевых очагов в зонах водоподводящих разломов (на примере Чвежипсинского подрайона Западного Кавказа)

И.В. Крыленко[1], В.И. Крыленко[2], Е.В. Дзагания[3], М.Ю. Дзагания[4]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, i-krylenko@yandex.ru

[2]Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, krylenkovasiliy@gmail.com

[3]ГОО «Сочинское географическое общество», Сочи, Россия, krylenka@gmail.com

[4]НАО «Красная Поляна», Сочи, Россия, ya-lesnoi2012@yandex.ru

Аннотация. Активизации селевых потоков в горной местности предшествует скопление рыхлообломочного материала на склонах долин и в руслах рек. На среднегорных и низкогорных территориях в теплых климатических поясах, покрытых густыми лесами, объемы эрозионного смыва грунта со склонов водосборных бассейнов в русла рек относительно невелики, вследствие чего селевая опасность считается низкой. Это повышает неожиданность и неготовность населения к внезапной чрезвычайной угрозе селевых паводков после схода крупных оползней. Стремительная активизация комплекса опасных процессов обусловлена гидрогеологическим строением, рельефом, сейсмическими, климатическими, гидрологическими, геоботаническими факторами, карстовыми процессами, которые могут осложняться техногенными воздействиями. При градостроительном планировании, в целях предотвращения селевых катастроф, высокое значение имеет заблаговременное определение селеопасных бассейнов, где имеется высокая вероятность схода крупных оползней и обвалов. В качестве объекта изучения крупных селевых очагов был выбран Чвежипсинский гидрогеологический подрайон на территории Муниципального городского округа Сочи, в поясе субтропических широколиственных лесов низкогорий и среднегорий Западного Кавказа. При исследовании Чвежипсинского подрайона было выявлено, что сход крупных оползней порядка нескольких миллионов метров кубических происходил по линиям главных и второстепенных водоподводящих разломов, вблизи источников подземных вод, в областях с распространением карста. Эта совокупность признаков высокой вероятности образования селевых очагов позволяет выделить наиболее селеопасные долины рек, где хозяйственное освоение сопряжено с риском для населения и сооружений. Изучение закономерностей селевых процессов района исследований позволит совершенствовать методы предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: *водоподводящий разлом, селевой очаг, селевая опасность, поток, оползень, гидрогеологические условия, Западный Кавказ, карст, Чвежипсинский подрайон*

Ссылка для цитирования: Крыленко И.В., Крыленко В.И., Дзагания Е.В., Дзагания М.Ю. Опасность образования крупных селевых очагов в зонах водоподводящих разломов (на примере Чвежипсинского подрайона Западного Кавказа). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 217–226.

The hazard of the formation of large debris flow origination sites in the zones of water-supply faults (case study of the Chvezhipse subdistrict of the Western Caucasus)

I.V. Krylenko[1], V.I. Krylenko[2], E.V. Dzaganiia[3], M.Yu. Dzaganiia[4]

[1]*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, i-krylenko@yandex.ru*
[2]*Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, krylenkovasiliy@gmail.com*
[3]*CPO "Sochi Geographical Society", Sochi, Russia, krylenka@gmail.com*
[4]*NPJSC "Krasnaya Polyana", Sochi, Russia, ya-lesnoi2012@yandex.ru*

Abstract. The activation of debris flows in mountainous areas is preceded by the accumulation of loose debris on valley slopes and in riverbeds. In mid-mountain and low-mountain areas in warm climate zones covered with dense forests, the volumes of erosive soil washout from the slopes of catchment areas into riverbeds are relatively small, as a result of which the debris flow hazard is considered low. This increases the unexpectedness and unpreparedness of the population for a sudden emergency threat of debris flows after large landslides. The rapid activation of a complex of dangerous processes is caused by the hydrogeological structure, relief, seismic, climatic, hydrological, geobotanical factors, karst processes, which can be complicated by man-made impacts. In urban planning, to prevent mudslides, early identification of debris flow-prone basins is of high importance, where there is a high probability of large landslides and landslides. The Chvezhipse hydrogeological subdistrict on the territory of the Municipal Urban District of Sochi, in the belt of subtropical broad-leaved forests of the lowlands and midlands of the Western Caucasus, was chosen as the object of studying large debris flow centers. During the study of the Chvezhipse subdistrict, it was revealed that large landslides of the order of several million cubic meters occurred along the lines of main and secondary water-supply faults, near groundwater sources, in areas with the spread of karst. This set of features of a high probability of debris flow centers formation allows us to identify the most debris flow-hazardous river valleys, where economic development is associated with a risk to the population and structures. The study of the characteristics of debris flow processes in the field of research allows us to improve the methods for identifying situations.

Key words: *water-supply fault, debris flow source, debris flow hazard, flow, landslide, hydrogeological conditions, Western Caucasus, karst, Chvezhipse subdistrict*

Cite of this article: Krylenko I.V., Krylenko V.I., Dzaganiia E.V., Dzaganiia M.Yu. The hazard of the formation of large debris flow origination sites in the zones of water-supply faults (case study of the Chvezhipse subdistrict of the Western Caucasus). In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 217–226.

Введение

Субтропический пояс в России занимает очень малую долю территории страны, расположенной преимущественно в умеренном, субарктическом и арктическом поясах. Теплый климат, уникальные ландшафты, близость Черного моря в городе-курорте Сочи Краснодарского края способствуют росту численности постоянного населения и туристов. Создание безопасных условий жизни людей, исключение зон, чрезвычайно опасных для застройки, своевременное предупреждение опасностей, в том числе селевых катастроф в условиях глобальных изменений климата – важнейшие задачи при долгосрочном планировании освоения очень ценных для рекреационного освоения земель.

Крупные склоновые процессы трудно прогнозировать. Чаще всего они носят внезапный характер и могут вызывать в руслах рек селевые потоки с тяжелыми последствиями для людей и населенных пунктов. Такие события время от времени случаются в Китае, Бразилии, России, Грузии и других регионах, расположенных в горных районах с густым лесным покровом во влажных тропических и субтропических поясах (рис. 1) [*РИА Новости, 2010*].

Исследование закономерностей комплексных опасных процессов, формирующих селевые потоки, особенно актуально в условиях повышения количества атмосферных осадков, связанных с глобальными изменениями климата [*Дзагания, 2024, Яцкая и др., 2023*].

Рис. 1. Остров Илья Гранди, штат Рио-де-Жанейро. Фото REUTERS / BRUNO DOMINGOS [*РИА Новости, 2.01.2010*]

Краткий обзор проблемы

В последние десятилетия на территории Муниципального образования городского округа города-курорта Сочи (далее МО Сочи) происходили селевые события, связанные с крупными оползнями на р. Кепша (с. Кепша), р. Сулимовская (п. Красная Поляна), притоках р. Мацеста (с. Семеновка), притоках р. Вост. Дагомыс (с. Сергей-Поле). Все эти территории относятся к Чвежипсинскому гидрогеологическому подрайону. Высокая повторяемость схожих событий в одном подрайоне позволяет предположить, что на его территории имеется комплекс факторов, способствующих активному проявлению опасных событий.

Риск схода селевых потоков может возрастать при вырубке лесов, создании техногенных отвалов грунта на крутых склонах, в руслах и на поймах рек, что приводит к появлению селевых очагов. Тем не менее, не всегда причиной селевой опасности низкогорных и среднегорных бассейнов рек в субтропическом поясе является накопление эрозионного материала при деградации растительного и почвенного покрова и техногенных воздействиях. Гидрогеологические условия горных районов, распространение карста и подземных вод при влажном климате создают комплекс условий для развития крупных склоновых процессов различных типов со сложным комбинированным механизмом их проявления в долинах малых рек.

В задачи исследования входило изучение указанных выше гидрогеологических и иных факторов, влияющих на формирование крупных селевых очагов в Чвежипсинском подрайоне Западного Кавказа.

Опасность образования крупных селевых очагов в зонах водоподводящих разломов в Чвежипсинском подрайоне Западного Кавказа

Изучаемый подрайон состоит из двух квази- параллельных участков с различными площадями (южный участок с площадью около 1020 км кв. и северный – с площадью около 50 км кв.), что составляет примерно 1/3 от площади МО Сочи, территория

которого составляет около 3500 тыс. кв. км (рис. 2). Оба участка вытянуты на 106 км с юго-востока на северо-запад, вдоль главных структурных швов, от истоков р. Мзымта (43º22’42” с.ш., 41º07’28” в.д.) до устья р. Чухукт – с. Каткова Щель (43º50’58” с.ш., 39º24’25” в.д). На рис. 2 показано местоположение Чвежипсинского гидрогеологического подрайона и селеопасных русел (грязекаменных, водокаменных и наносоводных) на территории МО Сочи.

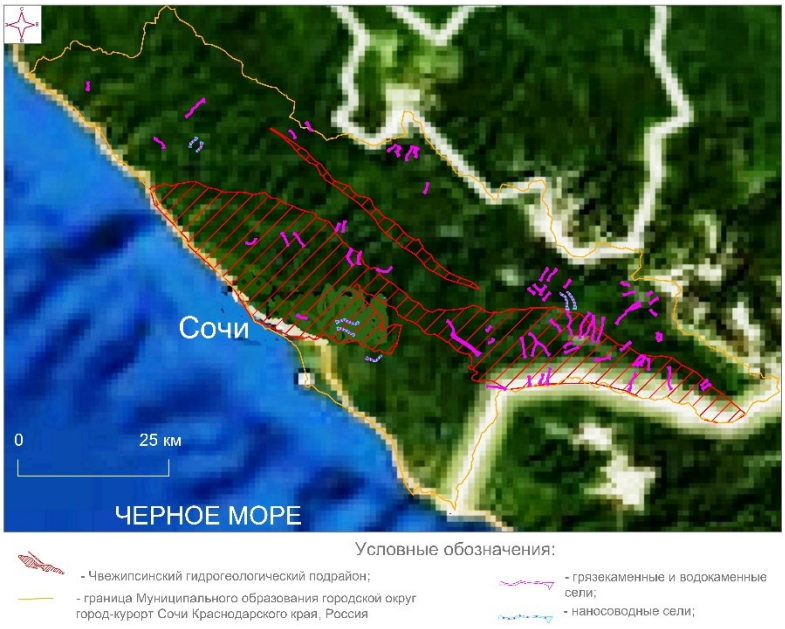


Рис. 2. Схема распространения селеопасных русел и местоположение Чвежипсинского гидрогеологического подрайона в пределах МО Сочи

Всего на территории МО Сочи отмечено 72 основных селеопасных русла, из которых 39 (54%) находятся на территории Чвежипсинского гидрогеологического подрайона. Чвежипсинский подрайон (IV-25Б-3-5) является гидрогеологической структурой IV порядка в составе Западно-Кавказского района Большекавказской складчатой области (рис. 3). Границы южного участка Чвежипсинского подрайона проходят по линиям Краснополянского и Воронцовского структурных швов, границы северного участка – по Бекишейскому структурному шву с севера и границе между Новороссийско-Лазаревским и Чвежипсинским подрайонами по линии разлома.

Формирование крупных селевых очагов в Чвежипсинском районе происходит в результате переувлажнения слабопрочных горных пород в зонах водопроводящих разломов, особенно главного, чаще в холодный период года, при совместном воздействии снеготаяния и продолжительных дождевых осадков [*Крыленко и др., 2024a, b*]. Положение главного водоподводящего разлома совпадает с северо-восточной границей южного участка Чвежипсинского подрайона (рис. 3).

Об этом свидетельствуют крупные оползни и обвалы последних лет в с. Эсто-Садок, с. Семеновка, с. Кепш, с. Сергей-Поле. При наличии двух из трех основных факторов селеопасности (крутых уклонов водосборных бассейнов, возможности формирования достаточно мощных водных потоков), к реализации третьего фактора – крупных селевых очагов в условиях лесопокрытых территорий низкогорья и среднегорья могут приводить обвалы и оползни, возникшие в зонах разломов с широким распространением подземных вод и карста. Водообильность достигает максимумов на площадях поперечных тектонических зон, нарушая устойчивость горных масс и способствуя крупным склоновым подвижкам [*Гиоргадзе и др., 1978*].

В геологическом строении принимают участие породы от эоцена до средней юры (мощность около 1200 м). Все стратиграфические комплексы содержат подземные воды. Наиболее водонасыщенными являются отложения верхнего палеоцена и эоцена,

меловой системы и батского яруса средней юры. Подземные воды приурочены к пластам песчаников, известняков и известковистых мергелей. В разрезе нижнего палеоцена, сеномана и нижнего сенона, верхней юры и байосского яруса наблюдаются пласты потенциально водоносных пород – песчаников, известняков и изверженных пород (порфириты, диабазы, туфы, лавобрекчии). В долине р. Сочи у с. Пластунка скважины вывели высоконапорные воды с дебитами на самоизливе 15,0–28,5 л/с. По химическому составу воды теплые (32 ºС), щелочные (pH 8–8,5), с высоким содержанием фтора, с минерализацией до 0,23 г/л, в газовом составе преобладает метан. В бассейне р. Сочи находится «Алекский источник» с дебитом от 9 до 35 л/с (зимой) [*Гиоргадзе и др., 1978*].

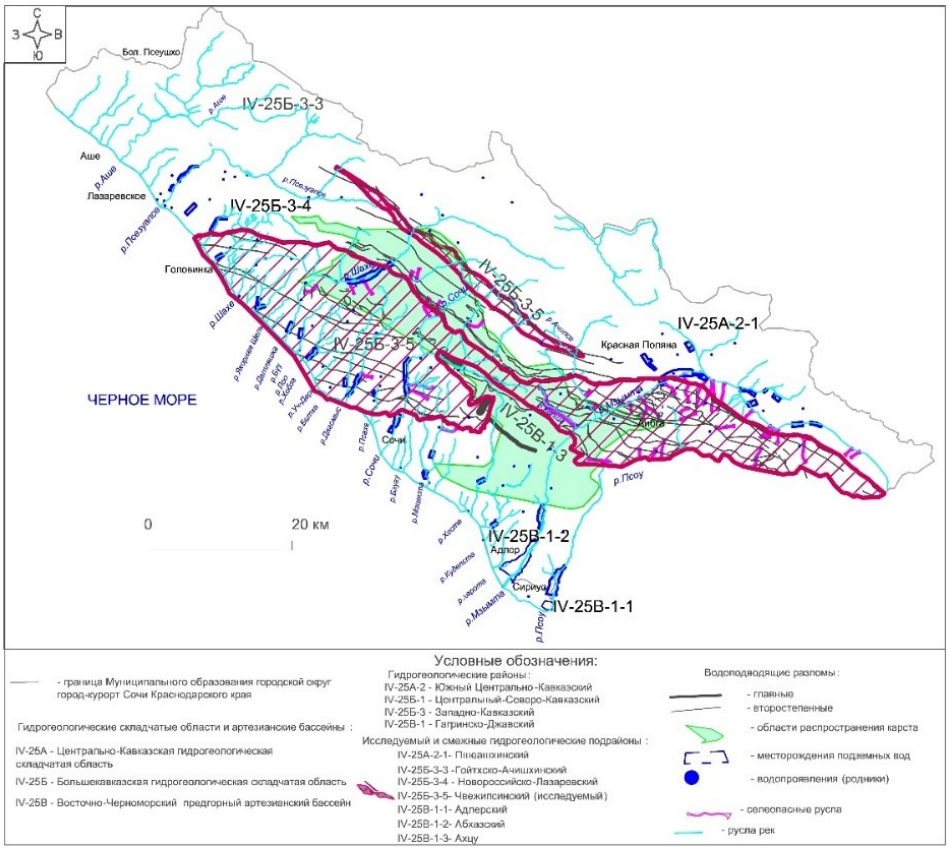


Рис. 3. Схема Чвежипсинского гидрогеологического подрайона с указанием водоподводящих разломов, селеопасных русел, водопроявлений и месторождений вод, области распространения карста. Схема составлена авторами по фондовым материалам

Водоносный комплекс нижнего палеоцена представлен переслаиванием кварцитовидных песчаников, мергелей, алевролитов и аргиллитов, часто окремненных.

Подземные воды в отложениях кампанского, маасстрихского и датского ярусов распространены в зонах разломов в долине р. Чимит, в верховьях р. Хобза, на северной границе южного подрайона, где описаны кастовые родники с дебитами до 12 л/с. Скважинами вскрыты напорные воды на глубине 300–376 м [*Гиоргадзе и др., 1978*].

Водоносный комплекс нижнего сенона и сеноманского яруса проявляется на Дагомысском поднятии и в бассейне р. Мзымта. Отложения представлены плитчатыми известняками, переслаивающимися с черными кремнями, мергелями, окремненными аргиллитами и алевролитами с мощностью 130 м. Солоноватые воды Чвежипсе характеризуются высоким содержанием мышьяка, железа, йода, свободной углекислоты, брома, бора.

Подземные воды отложений нижнего мела (переслаивания мергелей, известняков, песчаников) проявляются на Дагомысском поднятии, в средней части бассейнов рек Шахе и Мзымта на глубинах 10–114 м. В районе Солох-Аула (р. Шахе) встречены

солоноватые и соленые хлоридные натриевые воды с повышенным содержанием йода, брома и газирующие метаном [*Гиоргадзе и др., 1978*].

В комплексе подземных вод юрской системы (отложения верхней юры и байосский ярус) наиболее высокодебитные родники встречаются на площади карстующихся карбонатных пород верхней юры – до 2,5 л/с [*Гиоргадзе и др., 1978*].

Рельеф Чвежипсинского подрайона отличается значительным разнообразием, что отражается в высотной поясности климата и смене ландшафтов. Вдоль побережья Черного моря находятся сравнительно узкие приморские террасы, в юго-восточном направлении рельеф меняется от низкогорий до высокогорий альпийского типа с высотой до 3000 м над уровнем моря.

Высокогорный рельеф (субальпийская и альпийская зона, 1800–3000 м над уровнем моря) представлен горными массивами и хребтами Аибга, Ачишхо, Фишт, Аишхо и др. в верховьях основных рек: Псезуапсе, Шахе, Сочи, Мзымта, Псоу, занимает менее 25% площади подрайона. Среднегорный рельеф представлен хребтами Алек, Ахцу, Псехако и др.

Рельеф высокогорья и среднегорья выработан на меловом и юрском субстрате, собранном в складчатое сооружение Чвежипсинской фациальной зоны. Горные хребты тянутся с юго-востока на северо-запад, постепенно снижаясь. От них на юго-запад ответвляется ряд более низких хребтов второго порядка (Якорный, Варданский, Барановский и др.). Склоны хребтов и отрогов крутые (свыше 30º) с многочисленными скальными обрывами. Долины основных рек имеют трапецевидное сечение с узким (до 50 м), плоским днищем и крутыми склонами. Русла водопадного типа. Переходы склонов к речным террасам часто смягчаются делювиально-пролювиальными шлейфами, а в долинах рек Мзымта и Псоу – обвально-осыпными накоплениями, мощность которых достигает 100 м. Долины притоков, входящих в бассейны указанных рек, в большинстве своем имеют каньонообразные либо V-образные сечения и ступенчатый продольный профиль. В области среднегорья особенно четко отмечается связь форм рельефа с литологией субстрата и тектоникой. Мягкие, сглаженные формы рельефа характерны для поля развития барем-альбских отложений. На водоразделах и приводораздельных участках склонов прослеживаются формы карста (пещеры, ниши и др.)

Селевые бассейны с крупнообломочным материалом, поступающим преимущественно из оползневых очагов, отмечаются на притоках рек Шахе, Сочи, Мзымта и Псоу, а также на реках Бзыч, Ачипсе, Бешенка, Кепша, Чвежипсе и др. (таблица 1). Сели формируются на склонах хребтов Хуко, Чура, Амуко, Иегош, Ачишхо, Аибга и др. в верховьях бассейнов основных рек Псезуапсе, Шахе, Сочи, Мзымта и Псоу.

Ландшафт низкогорий представлен цепью горных хребтов и гряд, максимальная высота которых достигает 500 м, а глубина эрозионного расчленения – 200–400 м. В области развития карбонатных пород речные долины имеют трапецевидное поперечное сечение, крутые, местами обрывистые склоны, а овражно-балочная сеть – v-образное сечение. На площади развития палеоцен-эоценовых отложений низкогорья развиты оползневые образования. Размеры оползневых форм от десятков метров до одного километра. Для крупных речных долин характерна конфигурация, обусловленная чередованием расширенных (в зонах легко разрушаемых пород) и суженных (на пересечении наиболее устойчивых участков).

Основными неблагоприятными экзогенными геологическими процессами в низкогорной и среднегорной зонах являются оползни, обвалы и осыпи на склонах, селевые явления и русловые деформации [*Крыленко и др., 2024a, b*].

Для нижнегорно-лесных ландшафтов характерны склоны средней крутизны с глубокими речными ущельями и труднопроходимыми каньонами. В условиях среднегорий наблюдается большее увлажнение в связи с более низкими летними температурами. В этих условиях преобладают буково-пихтовые леса. В условиях низкогорья формируются каштановые и смешанные широколиственные леса с хорошо выраженным подлеском из листопадных кустарников и папоротников, которые при приближении к Черному морю сменяются густыми широколиственными лесами колхидского типа [*Дзагания и др., 2024*].

В отличие от высокогорных областей, где селевые очаги формируются под воздействием ледников, лавин, обвалов, осыпей, склоны гор в низкогорных и среднегорных областях в естественном состоянии обычно густо покрыты широколиственными лесами, обильная растительность препятствуют развитию эрозии, крупные селевые очаги отсутствуют. Опасность неблагоприятных экзогенных процессов часто недооценивается, что приводит к аварийным ситуациям при освоении территорий. Оползни и обвалы зачастую происходят внезапно, образуя новые крупные селевые очаги (рис. 4) [*Крыленко и др., 2024*].

Рис. 4. Разрушение склона в районе новой застройки в Чвежипсинском подрайоне, бассейн реки Вост. Дагомыс (с. Сергей-Поле, 2021 г.)

Широтное положение, близость Черного моря, орография и особенности циркуляции атмосферных масс создают предпосылки для формирования влажного, с большим количеством осадков климата, изменчивого в зависимости от имеющейся горной высотной поясности, рельефа, лесистости и экспозиции по отношению к сторонам света. Среднемесячная температура на побережье (Сочи, 142 м) составляет от +6,3ºС в январе до 24,3ºС – в августе, в высокогорье (метеостанция Ачишхо, 1880 м, закрыта в 1988 г.) – от -5,0ºС в январе до 12,9ºС – в августе. Абсолютная максимальная температура (Сочи) достигала 39,4ºС, абсолютная минимальная температура воздуха опускалась до минус 29ºС (Ачишхо).

Среднее количество осадков за год составляет в Сочи – 1389 мм, на метеостанции Ачишхо – до 3202 мм, абсолютный годовой максимум осадков достигал 4284 мм (Ачишхо). Наблюденные суточные максимумы осадков составили 245 мм (Сочи) и 298 мм (Ачишхо). В период современного глобального изменения климата за последние годы наблюдается увеличение количества осадков как во влажной, так и сухой субтропических зонах Кавказа, за исключением юго-восточной части пояса. Средний прирост сумм осадков (мм/год) за период 2012–2023 гг. для влажной зоны субтропического пояса Кавказа составил +41 мм/год [*Дзагания и др. 2024*].

Большая часть Чвежипсинского подрайона мало подвержена техногенному воздействию, в этой зоне расположены небольшие села и дачные поселки. Наибольшая антропогенная нагрузка наблюдается в п. Красная Поляна и его окрестностях, где после 2007 г. происходила интенсивная вырубка лесов для строительства спортивных и рекреационных объектов (долина р. Мзымта).

Густая гидрографическая сеть подрайона относится к бассейну Черного моря. В таблице 1 представлен перечень основных рек, пересекающих Чвежипсинский подрайон, с отметкой о наличии селеопасных русел [*Джапаридзе, 1964*].

Таблица 1. Некоторые гидрографические характеристики рек, пересекающих Чвежипсинский гидрогеологический подрайон

Название реки (населенные пункты)	Притоки	Часть бассейна в Чвежипсинском подрайоне	Площадь водосборного бассейна, км кв.	Длина, км	Притоки длиной менее 10 км, количество	Наличие селеопасных русел в бассейне
Псезуапсе	–	верхняя	290	39	49	+
Реки менее 10 км	–					
Чухукт (Каткова Щель)	–	средняя, нижняя	15,0	8,7		+
Реки менее 10км	–	полностью				
Чимит (Зубова Щель)	–	средняя, нижняя	33,6	14		+
Реки менее 10 км	–	полностью			3	
Шахе (Головинка, Большой Кичмай, Бзогу)	–	нижняя и средняя	553	59	165	+
–	Бзыч (лв)	верхняя, нижняя	110	25	29	+
–	Псий (пр)	средняя и нижняя	20,5	9,8	1	+
–	Кичмай (пр)	нижняя	50,7	12	19	+
Реки менее 10 км	–	полностью			22	
Якорная Щель	–	полностью	24,6	9		+
Беранда	–	полностью	6,4	5,3		
Детляшка	–	полностью	6,3	5,5		+
Буу	–	полностью	21,6	10	16	
Хобза	–	полностью	21,9	13	11	
Лоо	–	полностью	36,6	13	14	
Уч-Дере	–	полностью				+
Битха	–	полностью	6,0	5,8		+
Реки менее 10 км	–	полностью			12	
Дагомыс (Дагомыс)	–	полностью	103	0,8		
–	Дагомыс Западный	полностью	48	21	6	
–	Дагомыс Восточный	полностью	52	19	17	+
Реки менее 10 км	–	полностью			7	
Псахе (Мамайка)	–	верхнее течение	18,6	11	9	
Сочи	–	нижняя и средняя	296	45	82	+
–	Ушха (пр)		24,1	11	5	
–	Ац (лв)	верхняя и нижняя	24,6	12	7	
–	Агва (пр)	нижнее течение	46,1	15	14	
–	Кутарха (лв)		12,7	6,5	7	+
Бзугу	–	верхняя	13,6	10	6	
Мацеста	–	верховья	67,5	18	25	+
	Цаныk (пр)	верхняя				+
Хоста	–	верхняя	96,2	4,5	2	
–	Большая Хоста (4,7)	верхняя	46,4	17	17	
–	Малая Хоста (4,7)	верхняя	40,6	15	21	

Название реки (населенные пункты)	Притоки	Часть бассейна в Чвежипсинском подрайоне	Площадь водосборного бассейна, км кв.	Длина, км	Притоки длиной менее 10 км, количество	Наличие селеопасных русел в бассейне
Мзымта	–	верхняя и средняя	885	89	205	+
–	Лаура (лв. Ачипсе)	устье	60	17	26	+
–	Ачипсе	нижняя	141	20	13	+
–	Бешенка	нижнее течение	17	7,5	6	+
–	Монашка	нижняя	13	7,1	5	+
–	Чвежипсе	нижняя и средняя	140	19	48	+
–	Кепш	полностью			13	+
Псоу	–	верхняя	421	53	135	+

Как следует из таблицы 1, в преобладающей части бассейнов наиболее крупных рек имеются селеопасные русла. Все реки в нижнем течении имеют субмеридиональное простирание, а наиболее крупные из них (Псезуапсе, Шахе, Мзымта, Псоу) в своем среднем течении меняют ориентировку на субширотную, образуя коленообразные изгибы, отражающие ориентацию основных геологических структур и зон тектонических нарушений субмеридионального направления. В бассейнах рек, пересекающих Чвежипсинский гидрогеологический подрайон, высока вероятность формирования селевых потоков на притоках основных рек. В каньонах горных рек с зоной приповерхностной экзогенной трещиноватости, в пределах распространения флишевых песчанико-алевролитовых и карбонатных пород наиболее часто происходят обвалы и оползни, насыщающие водные потоки рыхлообломочным материалом.

Выводы и рекомендации

В Чвежипсинском гидрогеологическом подрайоне имеются следующие факторы, способствующие формированию крупных селевых очагов на крутых склонах речных бассейнов и в руслах рек [*Крыленко и др., 2024a, b*]:

1. Наличие множества горных рек со средними уклонами водосборных бассейнов более 350 промилле.
2. Глубоко врезанные V-образные долины.
3. Склоны, сложенные легко разрушающимися породами, при оползнях и обвалах.
4. В днище долин могут образовываться запрудные озера.
5. Влажный климат с интенсивными и продолжительными осадками, с периодами наложения снеготаяния и дождевых осадков, с достижением максимальных суточных осадков 250–300 мм.
6. Расположение на пересечениях главных или второстепенных водоподводящих разломов, на границах водоупорных и водоносных горизонтов и гидрогеологических формаций при повсеместной обводненности.
7. Широкое распространение месторождений подземных вод и водопроявлений (родников).
8. Широкое распространение карста, в том числе зрелых и крупных форм (ниш, пещер).

Таким образом, на территории Чвежипсинского района имеются благоприятные условия для образования крупных селевых очагов после схода оползней и обвалов на участках, расположенных на пересечениях главных или второстепенных водоподводящих разломов, на границах водоупорных и водоносных горизонтов, в

бассейнах с месторождениями подземных вод, особенно в периоды интенсивных осадков в сочетании со снеготаянием в холодный период года.

Список литературы

Гиоргадзе Г., Зуев П., Селиванов Б., Лысов А. Гидрогеологическое обоснование источников водоснабжения. Сочи: ГЗПИ Южгипрокоммунстрой, 1978.

Дзагания Е.В., Дзагания Л.М., Сухаржевский Г.Н., Бригида В.С. Тенденции изменения селевой опасности, обусловленные климатическими изменениями в субтропическом поясе Кавказа // 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. С. 580–590.

Джапаридзе Т.Н. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Том 9. Закавказье и Дагестан. Выпуск 1. Западное Закавказье / под ред. Т.Н. Джапаридзе. Л.: Гидрометеоиздат, 1964.

Крыленко В.И., Крыленко И.В., Дзагания Е.В., Дзагания М.Ю. Общие закономерности формирования природных селевых потоков на Западном Кавказе в районе г. Сочи // ГеоРиск, 2024a, т. 18, № 1, с. 26–39. doi 10.25296/1997-8669-2024-18-1-26-39.

Крыленко В.И., Крыленко И.В., Дзагания Е.В., Дзагания М.Ю. Природные селевые потоки на Западном Кавказе в районе Сочи // 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», 2024b, с. 262–272.

Яицкая Н.А., Дзагания Л.М., Бригида В.С. Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений территорий субтропической зоны Кавказа // Геология и геофизика Юга России, 2023, т. 13, № 2, с. 118–132. doi 10.46698/VNC.2023.54.85.010.

Электронный ресурс: РИА Новости, 2.01.2010 – https://ria.ru/20100102/202667919.html (дата обращения 29.05.2025 г.).

Региональные особенности влияния селевых процессов на изменение ландшафтов южного склона Большого Кавказа

И.Я. Кучинская, Э.Д. Керимова

Институт географии имени академика Г.А. Алиева Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджан, irina.danula@gmail.com, Bakinskiy.breeze@gmail.com

Аннотация. В конце XX – начале XXI в. отмечается повышенная активность проявления селевых процессов в горных геосистемах Большого Кавказа в пределах Азербайджана, территория которых интенсивно осваивается под туристско-рекреационную деятельность. Установлено, что селевые явления оказывают значительное влияние на отдельные компоненты природных ландшафтов, особенно в нивальной, горно-луговой и горнолесной зонах. Сели способствуют разрушению почвенно-растительного покрова, изменению условий увлажнения, водооттока и других экологических характеристик. Сложное и разнообразное строение ландшафтов Большого Кавказа определяет неравномерность проявления селевых процессов, особенно в долинах таких рек, как Кишчай, Мухахчай, Шинчай, Гирдыманчай, Дамирапаранчай и других. Причем как в дифференциации ландшафтов, так и в изменении степени их трансформации наблюдается влияние взаимодействия комплекса факторов, действующих в виде цепочки. Одни факторы непосредственно влияют на сложность структуры ландшафтов, другие являются их следствием. Для оценки активности селевых процессов и изменений в ландшафтной структуре региона использовались данные спутниковых снимков Landsat, а также картографический, фондовый и полевой материал. В ходе работы были выявлены характерные черты трансформации геосистем, вызванные селевыми потоками, и установлено, что подобные изменения отличаются продолжительным воздействием и напрямую зависят от высотного положения, мощности и свойств селевых отложений. В статье проведен комплексный анализ селевых процессов с использованием разновременных дистанционных данных и их интеграцией с ландшафтными характеристиками, что позволило установить пространственно-временные закономерности трансформации геосистем. Впервые выполнена попытка ландшафтной интерпретации последствий селевых явлений на разных высотных поясах горных территорий Азербайджана. Результаты исследования могут быть полезны при зонировании территорий по степени подверженности селевым процессам, в планировании природоохранных мероприятий и устойчивого развития туристско-рекреационных зон.

Ключевые слова: *селевой процесс, ландшафт, трансформация ландшафтов, градация, ГИС-технология*

Ссылка для цитирования: Кучинская И.Я., Керимова Э.Д. Региональные особенности влияния селевых процессов на изменение ландшафтов южного склона Большого Кавказа. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 227–239.

Regional features of the influence of debris flow processes on changes in the landscapes of the southern slope of the Greater Caucasus

I.Ya. Kuchinskaya, E.J. Karimova

Institute of Geography named after academician H.A. Aliyev, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan, irina.danula@gmail.com, Bakinskiy.breeze@gmail.com

Abstract. At the end of the 20th century and the beginning of the 21st century, increased activity of debris flow processes was observed in the mountainous geosystems of the Greater Caucasus within the territory of Azerbaijan, which is being intensively developed for tourism and recreational purposes. It has been established that debris flows significantly affect certain components of natural landscapes, particularly in the nival, mountain-meadow, and mountain-forest zones. These processes lead to the destruction of soil and vegetation cover, changes in moisture conditions, runoff patterns, and other ecological characteristics. The complex and diverse structure of the landscapes of the Greater Caucasus contributes to the uneven manifestation of debris flow activity, especially in the valleys of rivers such as Kishchay, Mukhakhchay, Gusarchay, Shinchay, Girdymanchay, Damiraparanchay, and others. Both the differentiation of landscapes and the degree of their transformation are influenced by the interaction of a range of factors acting in a chain-like manner. Some factors directly impact the complexity of landscape structures, while others are consequences of those changes. To assess the intensity of debris flow activity and changes in the region's landscape structure, data from Landsat satellite imagery were used, alongside cartographic materials, archival sources, and field observations. The study identified characteristic features of geosystem transformation caused by debris flows and found that these changes are long-lasting and strongly dependent on elevation, thickness, and the properties of debris deposits. The article presents a comprehensive analysis of debris flow processes using multi-temporal remote sensing data integrated with landscape characteristics, which allowed for the identification of spatial and temporal patterns of geosystem transformation. For the first time, an attempt was made to interpret the landscape consequences of debris flow events across different altitudinal zones of Azerbaijan's mountainous territories. The findings of this study can be useful for zoning areas according to their susceptibility to debris flows, as well as for planning environmental protection measures and the sustainable development of tourism and recreational zones.

Key words: *debris flow, landscape, landscape transformation, gradation, GIS technology*

Cite of this article: Kuchinskaya I.Ya., Karimova E.J. Regional features of the influence of debris flow processes on changes in the landscapes of the southern slope of the Greater Caucasus. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 227–239.

Введение

Селевые процессы представляют собой одну из главных природных угроз в горных и предгорных регионах Азербайджана. Специфика рельефа, резкие климатические изменения и человеческое воздействие способствуют увеличению частоты и масштаба селей. Изучение распространения и классификации селевых очагов в различных высотных ландшафтах, а также оценка их влияния на изменение ландшафтов являются важными задачами. Это понимание позволяет глубже разобраться в динамике природных явлений и их воздействии на экологическую ситуацию в регионе.

Краткий обзор проблемы

В рамках нашего исследования мы сосредоточились на современных геосистемах южного склона Большого Кавказа. Эти районы, как и большинство горных экосистем, показывают низкую устойчивость к природным и антропогенным нагрузкам, что делает их подверженными трансформации как всего комплекса, так и его отдельных частей. Южный склон демонстрирует высокую активность селевых потоков, и за последние 15 лет здесь было зафиксировано около 100 случаев схода селей, что существенно повлияло на окружающую среду [*Керимова, Кучинская, 2018*] (рис. 1).

На южном склоне Большого Кавказа наиболее интенсивное распространение селевых очагов наблюдается в междуречье Мухахчай и Фильфиличай [*Махмудов, 2008;*

Набиев, 1985]. Это объясняется сочетанием множества факторов, таких как наличие горных пород с низкой устойчивостью к денудации, активность неотектонических процессов, выраженная расчленённость рельефа, крутые склоны, преобладание ливневых осадков и влияние человеческой деятельности (таблица 1).

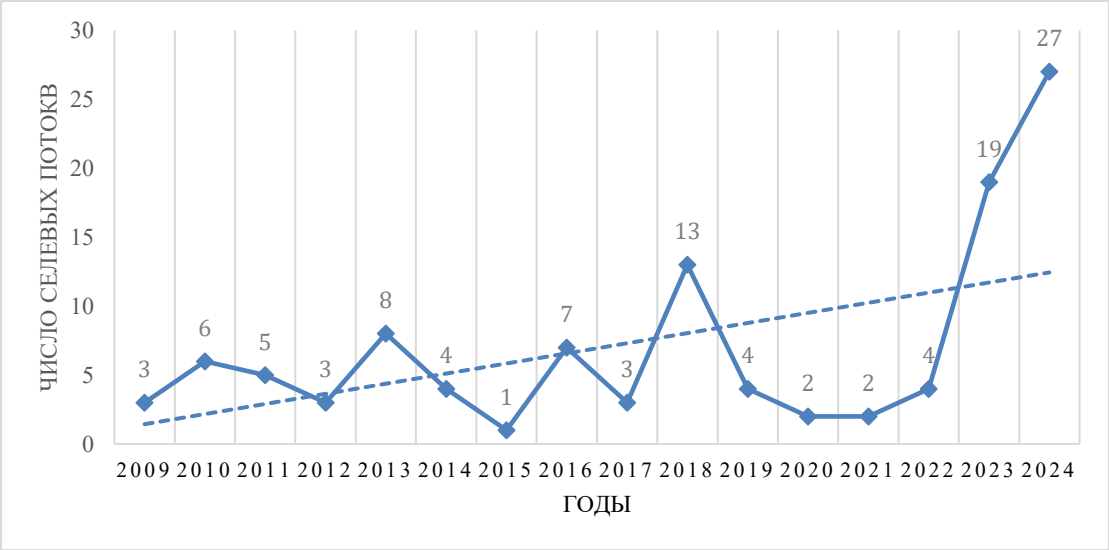


Рис. 1. Динамика количества селевых потоков по годам (2009–2024)

Таблица 1. Анализ площади и доли селевых очагов в разных ландшафтных поясах бассейнов рек южного склона Большого Кавказа

Названия бассейнов селеносных рек	Площадь бассейнов селеносных рек в км²	**Площадь селевых очагов в бассейне рек**		**Нивально-субнивальный ландшафтный пояс**				**Горно-луговой ландшафтный пояс**										**Горно - лесной ландшафтный пояс**			
												Альпийско-луговой ландшафтный подпояс			*Субальпийско-луговой ландшафтный подпояс*						
				Общая площадь пояса в бассейне		Площадь селевых очагов в ландшафтном поясе		Общая площадь пояса в бассейне		Площадь селевых очагов в ландшафт-ном поясе		*Общая площадь пояса в бассейне*	*Площадь селевых очагов в ландшафт-ном подпоясе*		*Общая площадь пояса в бассейне*	*Площадь селевых очагов в ландшафт-ном подпоясе*		Общая площадь пояса в бассейне		*Площадь селевых очагов в ландшафт-ном подпоясе*	
		в км²	в %	в км²	в %	в км²	в %	в км²	в %	в км²	в %	в км²	в км²	в %	в км²	в км²	в %	в км²	в %	в км²	в %
Мухахчай	373,4	66,6	17,8	7,0	1,87	4,6	65,7	86,7	23,2	19,3	22,2	26,3	6,1	23,2	60,4	13,2	21,9	213,2	57,1	42,7	20,0
Курмухчай	263,0	66,5	25,3	7,20	2,73	5,5	76,4	115,6	43,9	45,7	39,5	26,8	17,5	65,3	88,8	28,2	31,8	107,8	41,0	15,3	14,2
Шинчай	160,7	47.5	29,6	9,10	5,66	5,3	58,2	81,8	50,9	28,4	34,7	18,3	10,6	57,9	63,5	17,8	28,0	88,8	55,3	13,8	15,5
Кишчай	154,4	48,4	31,3	16,00	10,4	10,7	66,9	36,1	23,4	21,4	59,3	9,2	4,7	51,1	26,9	16,7	62,1	88,9	57,6	16,3	18,3
Дашагильчай	143,3	36,1	25,1	5,70	3,98	4,1	71,9	49,7	34,7	17,6	35,4	14,6	8,6	58,9	35,1	9,0	25,6	73,3	51,2	14,4	19,6
Халхалчай	93,9	22,4	23.9	1,8	1,91	1,7	94,4	28,0	29,8	7,5	26,8	5,5	3,1	56,4	22,5	4,4	19,5	58,2	62,0	13,2	22,7
Фильфиличай	108,6	46.5	42,8	15,40	14,2	11,3	73,4	46,9	43,2	18,0	38,4	16,3	10,3	63,2	30,6	7,7	25,1	27,2	25,0	17,2	63,2

Методы

Для оценки активности селевых процессов и изменений в ландшафтной структуре южного склона Большого Кавказа использовались различные данные, включая спутниковые снимки (CNES/Airbus, Maxar Technologies GeoEye-1, Sentinel-2A и 2B) с различным временным разрешением, топографические (М 1:100000) и тематические карты, фондовые материалы, а также результаты полевых исследований. Анализ космических снимков позволил выявить динамику развития селевых очагов, изменения в растительном покрове, морфологические преобразования склонов и русловых систем. Картографический материал использовался для сопоставления исторических данных и актуального состояния ландшафтов, а полевые наблюдения позволили уточнить типологические особенности селевых форм, характер антропогенного воздействия и степень деградации геосистем.

Комплексный подход обеспечил всестороннюю оценку пространственно-временной динамики селевых процессов, а также их вклада в трансформацию природной среды региона.

Анализ

Анализ фондовых и полевых материалов показал, что условия образования, распространения и генетической дифференциации селевых очагов в различных высотных ландшафтных поясах значительно различаются.

Нивально-субнивальный ландшафтный пояс

Селевые очаги наибольшее распространение получили в нивально-субнивальном ландшафтном поясе, который охватывает узкую водораздельную часть Главного Кавказского хребта с абсолютными высотами более 3000 м. В зависимости от изменения высот рельефа этот ландшафтный пояс местами сужается или расширяется. В верховьях рек Мухахчай, Курмухчай, Шинчай, Кишчай, Фильфиличай данный пояс приурочен к районам гор Ахвай, Сейит-Юрт, Чахыл, Малкамуд и др., распространяясь на 2–2,5 км к югу от водораздела Главного Кавказского хребта [*Керимова, Кучинская*, *2018*].

Нивально-субнивальный ландшафтный пояс характеризуется высокой обнаженностью коренных пород, интенсивными процессами их разрушения, формированием твердых составляющих селевых потоков, что делает его одним из самых активных селеопасных районов. Территория пояса состоит в основном из глинистых сланцев и песчаников юрского возраста, частично — из мергелей и известняков мелового возраста [*Шихалибейли, 1956*].

Наличие крутых (более 35°) обрывистых склонов, суровый климат нагорных тундр и ограниченное развитие почвенно-растительного покрова в пределах этого ландшафта способствуют усилению процессов физического выветривания. В период выпадения ливневых осадков и интенсивного снеготаяния происходит движение продуктов выветривания вниз по склонам и их накопление в основном русле, что усиливает активность селевых процессов [*Будагов, 1963*].

Горно-луговой ландшафтный пояс

Горно-луговой ландшафтный пояс охватывает полосу интенсивно расчленённого рельефа в пределах абсолютных высот от 2100 до 3000 м. Под влиянием антропогенной трансформации, в частности вырубки лесов, его нижняя граница местами смещается до отметок 1600–1700 м. С литологической точки зрения, территория пояса сложена преимущественно темноцветными глинистыми и песчанистыми сланцами, песчаниками, а также мергелями и известняками юрского и мелового возраста. Пространственно он приурочен к сопредельной зоне Тфанского антиклинория и северному крылу Загатало-Говдагского синклинория [*Будагов, 1963*].

Рельеф пояса характеризуется глубоко врезанными речными долинами и крутыми, сильно расчленёнными склонами, на которых развиты процессы обвалов, осыпей, оползней и россыпей. Эти формы рельефа во многих случаях выступают как локальные очаги формирования селевых процессов.

Климат территории холодный, с избыточным увлажнением, влажной зимой и прохладным летом. В холодный и относительно сухой период года активизируются процессы физического выветривания, способствующие накоплению рыхлого обломочного материала, являющегося основой формирования селевых потоков. Продолжительность периода активного выветривания и денудации на южном склоне Большого Кавказа достигает 180–200 дней в году, что имеет важное значение для образования коры выветривания и накопления продуктов разрушения горных пород [*Тарихазер, 2019; Nabiyev et al., 2019*].

Интенсивная расчленённость рельефа (до 4–6 км/км²), обилие крутых склонов (более 35°), а также большое количество атмосферных осадков способствуют формированию оголённых участков, где луговые ландшафты развиты фрагментарно, в виде разорванных ареалов.

В пределах пояса сформировались горно-луговые дерновые почвы, характеризующиеся достаточно мощным почвенным профилем. На них произрастают густые низкотравные сообщества: типчаковые, типчаково-осоковые, злаковые, злаково-бобовые и др. Вместе с тем, на склонах, лишённых почвенно-растительного покрова, активно развиваются очаги селевой активности, представленные преимущественно обвалами, осыпями, россыпями и оползнями.

Природно-территориальные комплексы, сформированные на этих генетических типах селевых очагов и расположенные у подножий склонов и в понижениях рельефа, относятся к числу наиболее молодых [*Тарихазер и др., 2021; Тарихазер и др., 2022*]

В сравнении с нивально-субнивальным поясом, интенсивность экзогенных рельефообразующих процессов здесь относительно ниже. Однако, согласно результатам исследований, значительная часть территории пояса представляет собой активные или потенциальные селевые очаги, что позволяет рассматривать его как зону перспективного селепроявления.

Альпийский ландшафтный подпояс в пределах исследуемой территории развит на высоте от 2600 до 3000 м. Здесь склоны крутые (более 35°), сильно расчленены (3,5–5,5 км/км^2) речной и овражной сетью. Количество выпадающих атмосферных осадков (часто в виде ливней) составляет 1200–1300 мм [*Мамедализаде, 1986; Мамедов, 1976*].

В подпоясе широко распространены селевые очаги, представленные обвальными, осыпными, россыпными и оползневыми материалами. Эти генетические типы селевых очагов осложняют комплексы ландшафтных видов и придают им специфический характер.

Климат подпояса характеризуется суровой зимой и прохладным летом. Среднегодовая температура 0–2С°, среднемесячная января от -3,7С° до -9С° [*Шихлинский, Мадатзаде, 1968*].

В данном ландшафтном подпоясе развиты горно-луговые дерновые, частично торфянистые и примитивные почвы. Инфильтрационные свойства горно-луговых дерновых почв способствуют поглощению большей части атмосферных осадков. Это должно было бы привести к ослаблению поверхностного стока на склонах, но разрушение дернового покрова в результате интенсивного и неплановомерного выпаса скота в условиях большой крутизны склонов оказывает сильное влияние на ухудшение водопроницаемости этих почв, усиление экзогенных рельефообразующих процессов, вследствие чего образуются различные селевые очаги [*Nabiyev et al, 2019*].

Субальпийский ландшафтный подпояс развит на высоте от 200–2200 до 2600 м. Рельеф здесь сильно расчленен (94,5–5,5 км/км^2) речной и овражной сетью, литологически сложен легкоподдающимися выветриванию глинистыми сланцами и песчаниками юрского возраста в западной части, и известняками и мергелями мелового возраста на востоке. Климат данного подпояса характеризуется сухой зимой и прохладным летом. Здесь наблюдается некоторое повышение температуры: среднегодовая 2–5°С, среднемесячная января -10–6С°, а июля +11–15°С. Годовая сумма среднегодовых осадков составляет 1300 мм [*Шихлинский, Мадатзаде, 1968*].

Горно-лесной ландшафтный пояс

Горно-лесной ландшафтный пояс имеет наиболее широкое распространение между абсолютными высотами от 500–550 м до 2000–2200 м (местами может подниматься до 2500–2550 м). Однако, крутые склоны, интенсивные экзогенные процессы, ливневый характер атмосферных осадков и антропогенные факторы препятствуют развитию сплошного лесного покрова на этих высотах.

В поясе господствует умеренно-теплый климат с почти равномерным распределением осадков во все сезоны, характеризующийся мягкой зимой и умеренно-жарким летом. Сумма температур среднегорья более 10 градусов достигает 2500–3800 [*Шихлинский, Мадатзаде, 1968*].

В горно-лесном поясе оголенные участки встречаются меньше, чем в предыдущих поясах, но в связи с вырубкой деревьев, усилением выпаса скота, наличием крутых

склонов имеются предпосылки для образования селевых очагов, представленных осыпными, обвальными, оползневыми материалами.

Здесь, в основном, развиты флювиальные типы (аккумулятивные террасы, конусы выносов боковых притоков и оврагов, пойменные и русловые отложения) селевых очагов, нагроможденных в речной долине во время прохождения селей.

Изменение ландшафтов в горных районах связано не только с непосредственным сходом селей, но и с воздействием комплекса процессов, предшествующих их формированию, — таких как обвалы, осыпи, оползни и лавины, оказывающих существенное влияние на морфологию склонов и пространственную структуру природных комплексов. Эти процессы дестабилизируют склоновые системы, активизируют перенос рыхлого материала и подготавливают условия для последующего формирования селевых потоков. В результате их воздействия происходит не только разрушение устойчивых геокомплексов, но и формирование новых морфологических форм, отличающихся по степени расчленённости, почвенному покрову и растительности [*Кучинская и др., 2017*] (рис. 2–4).

Рис. 2. Молодой лес, сформировавшийся на селевых массах в бассейне реки Кишчай

Рис. 3. Кустарниковые заросли, сформировавшиеся на селевых массах в бассейне реки Шинчай

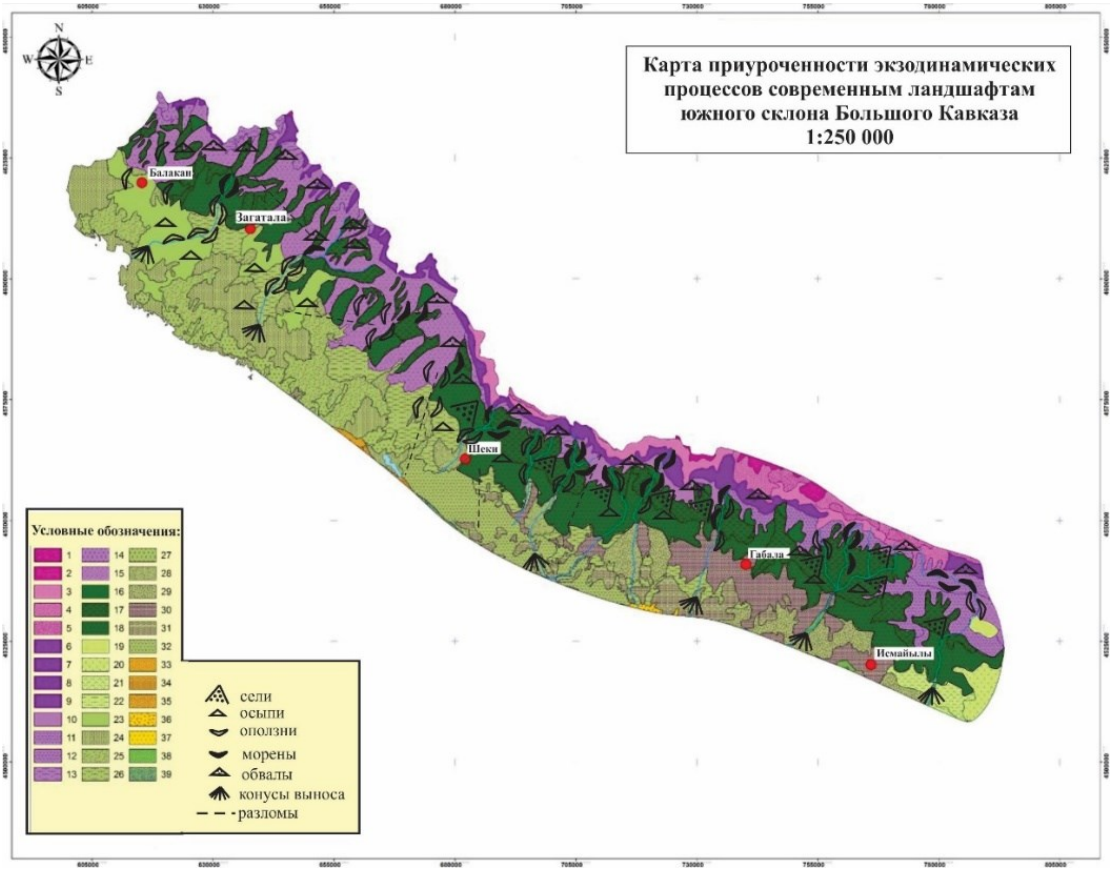


Рис. 4. Карта приуроченности экзогенных процессов современным ландшафтам южного склона Большого Кавказа.

Легенда: Ландшафты высоких гор с холодным, умеренно-влажным климатом: 1. Нивальные (1–2). 2. Субнивальные (3–5). Горно-луговые ландшафты с влажным и умеренно-влажным климатом: 3. Альпийские луга (6–9). 4. Субальпийские луга (10–15). Умеренно-влажные горно-лесные ландшафты: 5. Буково- и дубово-грабовые леса среднегорий и частично высокогорий (16–18). Ландшафты среднегорий и низкогорий с умеренно-влажным климатом: 6. Лесостепные, степные и горно-луговые ландшафты низкогорий и среднегорий (19–22). Ландшафты умеренно-влажных аккумулятивных равнин: 7. Лесные, лесостепные и луго-степные, кустарниковые ландшафты аккумулятивных равнин (23–32). Аридные и семиаридные ландшафты низкогорий: 8. Ландшафты аридно-денудационных низкогорий и равнин (33–35). 9. Послелесные степные ландшафты денудационно-аккумулятивных равнин (36–37). 10. Интразональные ландшафты аккумулятивных равнин (38–39)

В формировании ландшафтов высокогорной зоны значительную роль играют нивально-ледниковые, гравитационные и эрозионные процессы селевого типа. Под их воздействием формируются ландшафты оголённых скал со снежниками, многочисленными осыпями и склонами с высокой степенью расчленённости. В бассейнах рек Дамирапаранчай, Фильфиличай, Халхалчай, Дашагильчай, Кишчай, Шинчай, Курмухчай и Мухахчай формируются ландшафты вечных снегов и ледников, а также крутые склоны с осыпями и фрагментами маломощных горно-луговых почв со слаборазвитым растительным покровом. В результате действия селеформирующих процессов эти ландшафты находятся в состоянии постоянной динамики. Наблюдаются участки, которые ранее были покрыты нестабильным осыпным материалом, а в настоящее время начинают формироваться слабые почвенно-растительные комплексы [*Tarikhazer et al., 2021; Тарихазер и др., 2022*].

Степень влияния осыпей – движущихся, полузакреплённых и закреплённых — на ландшафтные изменения различна. Природные условия горно-луговой зоны способствуют активному развитию подвижных и полузакреплённых осыпей. В процессе перемещения осыпи изменяют морфологию склонов, нарушают почвенный покров и

растительность, формируя особые типы ландшафтов. Со временем поверхность осыпей стабилизируется: формируется почва, развиваются высокотравные сообщества и кустарники (ежевика, шиповник), которые закрепляют склон (рис. 5).

Рис. 5. Закрепленные оползне-осыпные склоны

Сходные процессы – обвалы, осыпи и селевые потоки – в сочетании с обнажёнными скалистыми участками склонов оказывают влияние и на горно-лесные ландшафты. В данной зоне особенно активны оползни, формирующиеся преимущественно после длительных ливней. Так, в бассейне реки Мухахчай (1969 г.) после продолжительных осадков активизировались оползневые процессы, в результате чего на месте букового леса площадью около 200 га сформировались безлесные участки.

Через 10 лет на месте разрушенного леса, на маломощных бурых горно-лесных почвах наблюдалось формирование вторичных ландшафтных комплексов с разнотравьем и кустарниковой растительностью (ежевика, шиповник). Оползни в данной зоне наиболее часто развиваются на северных склонах, которые отличаются повышенным увлажнением. Здесь лесная растительность менее устойчива, а обнажённые участки склонов интенсивно эродируются, как, например, в бассейнах рек Дашагильчай и Фильфиличай.

Значительное влияние на трансформацию горно-лесных ландшафтов оказывают и обвалы. На их месте формируются скалистые участки склонов, которые со временем заселяются травянистой и кустарниковой растительностью. Подобные изменения зафиксированы, в частности, севернее села Халхал, на правобережье реки Халхалчай [*Кучинская и др., 2017*].

Таким образом, селеформирующие процессы выступают ключевым фактором динамики и трансформации ландшафтов высокогорных и лесных зон, способствуя формированию новых морфологических типов природных комплексов и изменяя пространственную структуру горной среды (рис. 6.).

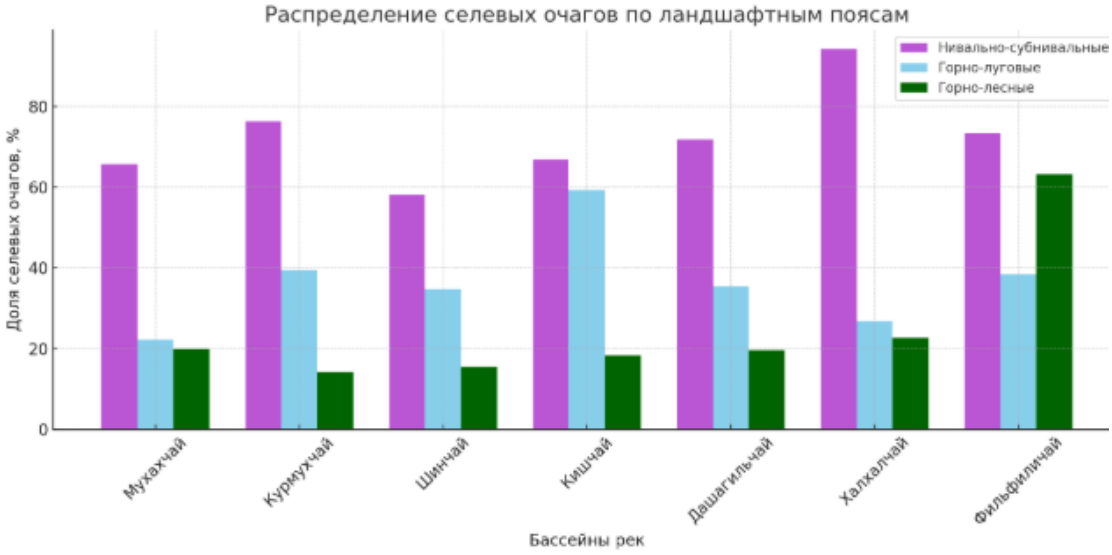


Рис. 6. Распределение селевых очагов по ландшафтным поясам междуречья Мухахчай-Фильфиличай южного склона Большого Кавказа

Процесс трансформации и виды ландшафтной трансформации

Трансформация природных ландшафтов под воздействием селевых процессов отличается выраженной пространственной неравномерностью, что обусловлено комплексом морфометрических характеристик местности (уклон, высота, расчленённость рельефа), экспозицией склонов, типологической принадлежностью ландшафтов, а также характером и интенсивностью хозяйственного освоения территории. Особенно высокая плотность нарушений природной среды отмечается в районах, где наблюдается сочетание природных предрасполагающих факторов (интенсивное снеготаяние, ливневые осадки, высокая сейсмическая активность, крутые склоны) и активного антропогенного воздействия (строительство, сельское хозяйство, вырубка лесов, прокладка дорог).

Трансформация ландшафтов в результате селевых процессов может быть рассмотрена с двух позиций: во-первых, по видам воздействия, которое селевые процессы оказывают на природные компоненты (деструктивный, аккумулятивный, комбинированный и антропогенно-деградированный типы трансформации); во-вторых, по степени изменений, которые происходят в ландшафтах, где выделяются сильно трансформированные, частично трансформированные и практически нетронутые ландшафты. Таким образом, процесс трансформации зависит как от характера и интенсивности самого селевого воздействия, так и от масштаба и глубины изменений в природной среде.

В зависимости от характера воздействия селевых процессов и последствий их проявления, условно выделяются следующие типы ландшафтной трансформации:

Деструктивный тип — сопровождается разрушением природных компонентов геосистемы, включая смывание почвенного покрова, выкорчёвывание растительности,

снос рыхлых пород и изменение морфологических характеристик склонов. Наиболее характерен для нивальных ландшафтов и субнивальных высокогорий, а также для альпийских лугов верховьев рек, где селевые потоки обладают наибольшей эрозионной способностью и действуют на фоне резких перепадов высот и крутизны склонов.

Аккумулятивный тип — связан с отложением селевых илов, валунов, гравия, песка и других продуктов переноса, что ведёт к формированию новых форм микрорельефа (конусы выноса, террасы, селевые валы) и постепенной смене фитоценозов. Наиболее ярко выражен в пределах предгорных лугостепей и нижней части горных лесных ландшафтов, а также в субальпийских лугах на понижениях рельефа, где рельеф более сглажен, и условия способствуют аккумуляции.

Комбинированный тип — представляет собой сочетание как деструктивных, так и аккумулятивных процессов в пределах одной геосистемы. На одних участках происходит вынос и разрушение ландшафтных компонентов, на других – их накопление. Наиболее типичен для среднегорных лесных и субальпийских ландшафтов, особенно в зонах резких локальных контрастов рельефа, например, на переходах между крутыми и пологими склонами, в ложбинах стока и устьевых участках малых притоков.

Антропогенно-деградированный тип — формируется в результате послеселевой переработки территории человеком, когда нарушенная структура природного ландшафта упрощается, замещаясь техногенными компонентами. Это может выражаться в строительстве инженерных сооружений (дамб, укреплений, дорог), повторной вспашке, изменении гидрологического режима и снижении биоразнообразия. Наиболее часто наблюдается в горных лугах и лугостепях, активно используемых под пастбища и сельхозугодья, а также в лесных ландшафтах, подвергшихся вырубке, расчистке склонов и строительству дорог, особенно в прибрежных и устьевых зонах рек (таблица 2).

Таблица 2. Характеристика типов трансформации ландшафтов под влиянием селевых процессов

Критерий	**Деструктивный**	**Аккумулятивный**	**Комбинированный**	**Антропогенно-деструктивный**	**Эрозионно-аккумулятивный**	**Стабилизированный**
Характер воздействия	Разрушение природных компонентов	Накопление селевых отложений	Сочетание разрушения и накопления в разных участках	Человеческая переработка нарушенных территорий	Чередование эрозии и накопления в одном месте	Восстановление и стабилизация ландшафта
Основные процессы	Смыв почвы, выкорчевка, эрозия склонов	Осаждение илов, песка, гравия, формирование новых форм	Локальные, эрозионные и аккумулятивные процессы	Упрощение структуры, застройка, повторная вспашка	Нестабильный морфогенез, чередование фаз	Устойчивый рельеф, регенерация растительности
Ландшафтные условия	Верховья рек, узкие ущелья, крутые склоны	Поймы, предгорья, пониженные участки	Среднегорья, переменный	Населенные пункты, сельхозугодия, техногенные объекты	Участки со сменой уклонов, изменяющиеся русла	Старые конусы, склоны после инженерного укрепления
Роль человека	отсутствует	отсутствует	Не обязательна	Определяющая вмешательство после селя	Минимальна или эпизодическая	Возможна, но с целью стабилизации
Экологическое состояние	Утрата биоценозов, высокая нестабильность	Изменение состава фитоценозов, формирование новых экосистем	Пространственная мозаичность, экологическая разорванность	Нарушение экосистем, снижение биоразнообразия	Чередование нестабильности и локального восстановления	Частичная или полная эко регенерация
Устойчивость	Крайне низкая	Средняя, со временем может возрастать	Низкая-средняя	Устойчивая деградация, высокая уязвимость	Очень низкая, нестабильная структура	Повышенная тенденция к стабилизации
Пример геосистем	Нивально-субнивальный пояс	Предгорные луга, аллювиальные равнины	Среднегорные леса, кустарники, ландшафтные переходные зоны	Окрестности дорог, поселков, восстановленных сельхозугодий	Ложбины стока, неустойчивые склоны в среднегорьях	Стабилизированные конусы выноса, восстановленные склоновые луга

Таким образом, типы трансформации ландшафтов, обусловленные различными проявлениями селевых процессов, непосредственно влияют на степень изменений природных комплексов, что позволяет выделить ландшафты, претерпевшие различные уровни трансформации, от сильных изменений до почти нетронутых территорий.

В качестве наглядного примера приведем фрагмент бассейна реки Кишчай, где четко видна степень трансформации ландшафтов в зависимости от их подверженности экзогенным процессам (рис. 7).

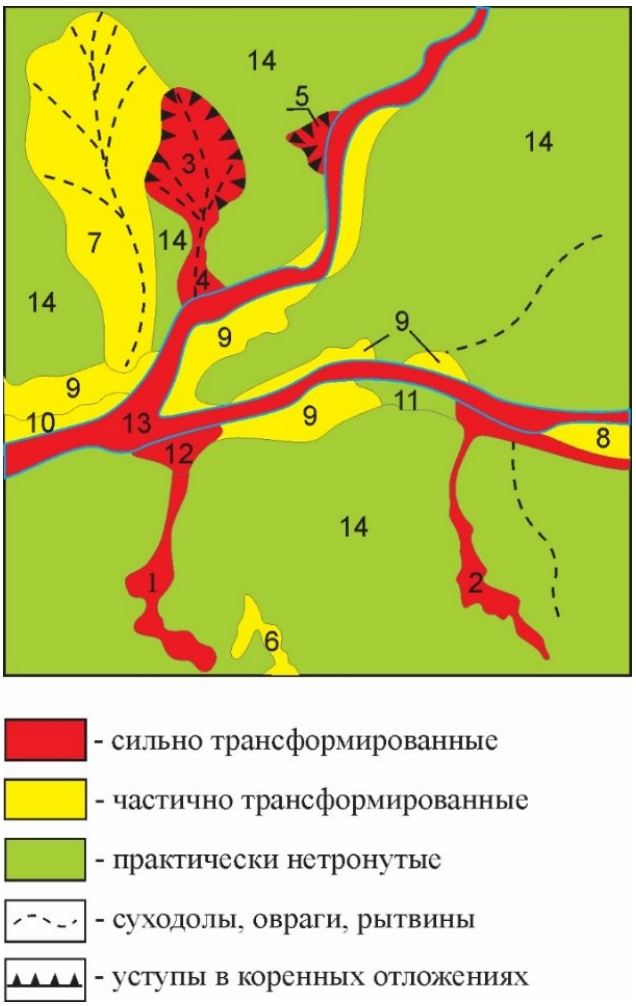


Рис. 7. Карта-сема ландшафтной трансформации экотонной зоны в долине Кишчай под воздействием селеформирующих процессов. Легенда:1. Активный оползневой очаг; 2. Среднеактивный оползневой очаг; 3. Осыпные очаги с кустарниковой растительностью, находящиеся в стадии спада развития; 4. Конусы осыпных материалов; 5. Свежие обвальные материалы коренных пород, нагроможденные в долинах; 6. Территория, находящаяся в стадии подготовки к развитию осыпных очагов; 7. Древние осыпные участки с лесокустарниками, находящиеся в стадии прекращения развития; 8. Пойменные и надпойменные террасы с кустарниками; 9. Низкие террасы с лесокустарниками; 10. Аккумулятивные террасы с луговой растительностью; 11. Аккумулятивные террасы с лесным покровом; 12. Конусы выноса эрозионно-оползневых очагов с кустарниками; 13. Дно долины селеносной реки; 14. Лесные массивы

Сильно трансформированные ландшафты

Селевые процессы оказывают наибольшее негативное воздействие на эти природные комплексы, приводя к значительным и зачастую необратимым изменениям в их геоморфологической структуре и растительном покрове. Характерными признаками таких ландшафтов являются эрозия почв, обвально-лавинные процессы, которые приводят к разрушению растительности, вымыванию и смещению грунтов. Эти изменения сильно нарушают природное равновесие, что ведет к значительному снижению биоразнообразия и разрушению экосистем. В таких ландшафтах биологические сообщества часто не могут восстановиться без вмешательства человека.

Частично трансформированные ландшафты

Эти природные комплексы претерпели более умеренные изменения под воздействием селевых процессов. Хотя они также пережили определенные экологические изменения, нарушившие их первоначальное состояние, уровень биоразнообразия и экологической устойчивости здесь сохраняется значительно выше, чем в сильно трансформированных ландшафтах. В таких ландшафтах остаются относительно устойчивые экосистемы, которые могут восстанавливаться, но этот процесс требует времени и благоприятных условий. Здесь еще возможен регенеративный процесс и восстановление нарушенных экосистем, хотя и с определёнными ограничениями.

Практически нетронутые ландшафты

Эти природные комплексы остаются относительно неприкосновенными в контексте селевых процессов. В таких ландшафтах воздействия природных катастроф минимальны, что позволяет поддерживать их первоначальную структуру и разнообразие. Эти территории характеризуются высокой степенью экологической устойчивости и способны сохранять стабильное природное состояние, несмотря на возможные малые локальные воздействия, такие как незначительные селевые потоки или эрозионные процессы. Сохраняя высокое биоразнообразие и природную гармонию, такие ландшафты являются ценными для сохранения природного наследия и изучения естественных процессов экосистем.

Выводы

Исходя из вышеизложенного, селевые процессы выполняют не только роль спонтанного природного деструктора, но и функционируют как инициаторы долговременной трансформации ландшафтной структуры, особенно в условиях переходных природно-антропогенных систем. Их проявление усиливает существующие контрасты геосистем, ускоряет процессы морфогенеза и изменяет экологические параметры территорий. В этой связи селевые процессы должны рассматриваться как ключевой фактор в рамках оценки геоэкологической устойчивости ландшафтов, а также при разработке стратегии рационального природопользования, инженерной защиты и территориального планирования в горных регионах.

На южном склоне Большого Кавказа особенно уязвимыми оказываются трансформированные природно-антропогенные ландшафты, где хозяйственная деятельность (выпас, сельское строительство, вырубка лесов) снижает устойчивость экосистем и способствует частой генерации селевых очагов. Такие условия наблюдаются, например, в бассейнах рек Мухахчай, Шинчай и Кишчай, где пространственная мозаичность ландшафтов сочетается с высокой плотностью потенциально селевых участков.

Учитывая данные особенности, селевые процессы на южном склоне Большого Кавказа следует учитывать как один из определяющих факторов геоэкологической устойчивости, влияющий на устойчивость инфраструктуры, экосистемное равновесие и безопасность населения. Это требует:

- комплексной картографической оценки селевых очагов и опасных склонов;
- приоритетного внедрения мероприятий инженерной защиты;
- включения селевых рисков в схемы пространственного планирования;
- восстановления деградированных территорий средствами природо-ориентированного подхода.

Таким образом, в условиях южного склона Большого Кавказа селевые процессы выступают не только как угроза, но и как важный индикатор устойчивости геосистем,

требующий приоритетного внимания при управлении ландшафтами и природными рисками.

Список литературы

Будагов Б.А. Вертикальная поясность современных денудационных процессов южного склона Главного Кавказского хребта в связи с формированием селей // Известия АН Азерб. ССР. Серия геол.- географ. наук и нефти, № 1, 1963, с. 45-53

Керимова Э.Д., Кучинская И.Я. Геоэкологический анализ ландшафтной структуры селеносных бассейнов южного склона Большого Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий Кавказа, №1, 2018, 50–57.

Кучинская И.Я., Алекберова С.О., Мамедова Д.С. Системный анализ рельефа южного склона Большого Кавказа как индикатора эколого-ландшафтного потенциала территории // Вестник Башкирского университета, т. 22, №3, 2017, с. 717–725.

Мамедов И.Т. Структура ландшафтов южного склона Большого Кавказа в пределах Азербайджанской ССР. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Баку, 1976.

Мамедализаде М.О. Изучение ландшафтов бассейнов селеносных рек южного склона Большого Кавказа с использованием материалов аэрофотоснимков. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук, Баку, 1986.

Махмудов Р.Н. Каталог селевых процессов. Баку, 2008. 104 с.

Набиев Г.А. Сели в Азербайджанской ССР и условия их формирования // Известия АН Азерб. ССР, Серия Науки и Земле, т. 6, 1985, с. 76–81.

Тарихазер С.А. Селевые процессы в Азербайджане и метеорологические факторы их формирования (на примере Большого Кавказа) // Устойчивое развитие горных территорий, 11(1), 2019, с. 44–54.

Тарихазер С.А., Керимова Э.Д., Кучинская И.Я., Гамидова З.А. Ландшафтно-геоморфологическая характеристика селевых ландшафтов бассейна р. Курмухчай (на основе аэрокосмических снимков) // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле, 1, 2022, с. 139–151 doi 10.46689/2218-5194-2022-1-1-139-151

Шихалибейли Э.Ш. Геологическое строение и развитие азербайджанской части южного склона Большого Кавказа. Изд. АН Азерб. ССР, 1956.

Шихлинский Э.М., Мадатзаде А.А. Климат Азербайджана. Изд. АН Азерб. ССР, 1968. 143 с.

Nabiyev G., Tarikhazer S., Kuliyeva S., Mardanov I., Aliyeva S. Formation characteristics of the debris flow process in Azerbaijan and the division into districts of territory based on risk level (on the example of the Greater Caucasus) // Applied Ecology & Environmental Research, 17(2), 2019.

Tarikhazer S.A., Kuchinskaya I.Y., Karimova E.J., Alakbarova S.O. issues of geomorphological-landscape risk (on the example of the Kishchay river) // News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan Satbayev University, Series of geology and technical sciences, 6(450), 2021.

Потенциальная опасность приледниковых озёр в бассейне реки Мижирги (Кабардино-Балкарская Республика)

О.А. Курашева

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, oks.anchik@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены приледниковые озёра в бассейне р. Мижирги (Кабардино-Балкарская Республика, Центральный Кавказ). Материалами исследования послужили данные полевых исследований. Использованы космические снимки с сервисов Google Earth Pro и EO Browser (Sentinel-2). Приледниковые озёра выявлены перед ледниками № 446, 442, 442a и 440b. Наибольшая площадь зафиксирована у озера Брно перед ледником № 446–5080 м^2. Уровень воды озер перед ледниками № 446 и 442a отличаются сезонной изменчивостью площади. Озера на ледниках № 440b и 440v расположены на горном хребте на высотах 4144 м н.у.м. и 4260 м н.у.м. между вершинами Укю Малая (4306 м н.у.м.) и Укю (4334 м н.у.м.) и не представляют опасности вследствие малых размеров. Поверхность этих озер частично покрыт снежным льдом.

Ключевые слова: *ледниковые озера, ледник Мижирги, селевой поток, селевая опасность, Северный Кавказ*

Ссылка для цитирования: Курашева О.А. Потенциальная опасность приледниковых озёр в бассейне реки Мижирги (Кабардино-Балкарская Республика). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 240–245.

Potential hazard of proglacial lakes in the Mizhirgi River basin (Kabardino-Balkarian Republic)

O.A. Kurasheva

High-Mauntain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, oks.anchik@mail.ru

Abstract. The paper considers proglacial lakes in the Mizhirgi River basin (Kabardino-Balkarian Republic, Central Caucasus). The study materials are based on field research data. Satellite images from Google Earth Pro and EO Browser (Sentinel-2) services were used. Periglacial lakes were identified in front of glaciers No. 446, 442, 442a and 440b. The largest area was recorded at the lake in front of glacier No. 446–5080 m^2. The water level of the lakes in front of glaciers No. 446 and 442a is characterized by seasonal variability in area. Lakes on glaciers No. 440b and 440v are located on a mountain ridge at an altitude of 4144 m above sea level. and 4260 m above sea level between the peaks of Ukyu Malaya (4306 m above sea level) and Ukyu (4334 m above sea level) and do not pose a danger due to their small size. The surface of these lakes is partially covered with snow ice.

Key words: *glacial lakes, Mizhirgi glacier, debris flow, debris flow hazard, North Caucasus*

Cite of this article: Kurasheva O.A. Potential hazard of proglacial lakes in the Mizhirgi River basin (Kabardino-Balkarian Republic). In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 240–245.

Введение

Усиление деградации ледников, происходящая в настоящее время практически во всех горных районах способствует появлению новых приледниковых озер. Как правило, они формируются за счёт талых ледниковых вод, в результате чего могут образоваться ледниковые сели.

Ледниковый сель − один из генетических типов селей, формирование которого связано с нарушением устойчивости ледниково–моренных комплексов, а жидкая составляющая образуется преимущественно за счет талых ледниковых вод. По составу селевой массы ледниковые сели могут быть водокаменными, грязекаменными, водоледяными [*Перов, 1996*].

Деградация ледников способствует увеличению селевой активности и образованию приледниковых озер, при прорыве которых, могут нести катастрофический характер. В качестве примера на Северном Кавказе можно привести катастрофический прорыв озера Башкара (01.09.2017 г.) в долине р. Адылсу (бассейн р. Баксан) [*Черноморец и др., 2018; Кидяева и др., 2018; Докукин и др., 2020; Солодова и др., 2024*] и др.

В данной работе предметом исследования является группа приледниковых озёр в бассейне р. Мижирги (Северный Кавказ). Цель исследования – оценка потенциальной опасности при прорыве приледниковых озёр в верховьях бассейна р. Мижирги (правого притока р. Черек Безенгиийский).

В бассейне р. Черек Безенгийский четко прослеживается система хребтов, вытянутых примерно параллельно друг другу с северо-запада на юго-восток. Основными хребтами бассейна являются Главный и Боковой хребты, к ним приурочены все современные ледники. Главный хребет является водоразделом рек Черного и Каспийского морей, который представляет единую горную цепь с вершинами, превышающими в отдельных точках 5000 м. К северу от Главного хребта на расстоянии 4–7 км проходит Боковой хребет, который сложен кристаллическими сланцами, гранитами и другими кристаллическими породами архея и палеозоя. Боковой хребет не является единым монолитным, а состоит из двух массивов, разделенных глубоко врезанной долиной, занятой ледником Безенги [*Панов, 1978*]. Сложный долинный ледник Безенги является крупнейшим ледником на Кавказе, длина которого составляет 16,5 км, а площадь 33,03 км^2 [*Ледники России*].

Сложный долинный ледник Мижирги расположен на северном склоне Бокового хребта. Площадь его примерно 9,9 км^2 и длина около 8,8 км. Ледник Мижирги относится к пульсирующим. Висячие ледяные формирования и лавины со склонов гор пятитысячников Кавказа – г. Коштан-тау (5152 м н.у.м.) и Мижирги (5025 м н.у.м.) в основном питают зону активизации ледника. Как морфологически, так и топографически и экспозиция ледника Мижирги более благоприятна для существования по сравнению с ледником Безенги [*Панов, 1978*]. Река Мижирги берет начало с одноименного ледника и является правым притоком р. Черек Безенгиийский. Длина реки Мижирги составляет 3,6 км. Селепроявления в верховьях долин р. Черек Безенгийский описаны в работах [*Марченко и др., 2016; Керимов и др., 2018; Батчаев и др., 2021; Акаев и др., 2023; Беккиев и др., 2024*] и др.

Материалы и методы

Работа основана на результатах полевых и камеральных исследований. Для определения параметров приледниковых озер использованы космические снимки с сервисов Google Earth Pro и EO Browser (Sentinel-2). Космоснимки Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м (рис. 1).

Результаты исследования и обсуждение

В результате полевых исследований и анализа космоснимков в бассейне р. Мижирги были выявлены озера перед ледниками № 446, 442, 442a и 440b. Номера

ледников соответствуют всемирному каталогу ледников RGI (The Randolph Glacier Inventory), из сайта Каталога ледников России [*Ледники России*], включенный в Мировой каталог ледников (WGI – World glacier inventory) WGI, база данных проекта GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space). Параметры приледниковых озер в бассейне р. Мижирги представлены в таблице 1.

Рис. 1. Расположение ледников и озер в долине р. Мижирги. Космоснимок Sentinel-2 21.08.2024 г.

Таблица 1. Параметры приледниковых озер в бассейне р. Мижирги

№ ледника	Площадь ледника, км^2	№ озера	Координаты озера	Площадь озера, м^2	Абсолютная высота, м н.у.м.
446	0,27	1 оз. Брно	43° 4'29.23"с.ш. 43° 8'56.84"в.д.	5080	3405
442а	0,05	2	43°5'20.60" с.ш. 43°11'26.91" в.д.	2800	3602
442	1,31	3	43° 5'20.21"с.ш. 43°12'59.57"в.д.	1200	3875
440b	0,06	4	43° 5'51.86"с.ш. 43°12'34.49"в.д.	16,2	4144
440v	0,05	5	43° 5'50.31" с.ш. 43°12'38.86" в.д.	47,6	4260
		6		34,7	

Исследуемые озера находятся в высокогорной зоне. Сравнение разновременных снимков с сайтов Google Earth Pro и EO Browser (Sentinel-2) выявили, что озеро Брно (№ 1) перед ледником № 446 отличается значительной сезонной изменчивостью. По данным космоснимков максимальную площадь составляет – 5080 м^2. При отсутствии таяния с ледника № 446 (в зимний период), озеро полностью исчезает. Этот факт был подтвержден в работе [*Докукин, 2014*]. Потенциальную опасность представляет прорыв озера в случае обвалов с близ находящихся склонов. У озера находится популярный у

альпинистов и туристов «Курсантские ночевки», вниз по склону на высоте 3094 м н.у.м. «Судейские ночевки», где также останавливаются альпинисты и туристы.

Озеро № 2 находится на высоте 3602 м н.у.м., питается он за счет таяния ледника № 442а. В течение сезона площадь озера подвержена небольшим изменениям. Явного поверхностного стока озеро не имеет, предположительно имеется небольшой подземный канал стока.

Озеро №3 расположен на высоте 3875 м н.у.м. у перевала Укю. С одной стороны озеро окружено ледником № 442, с другой стороной ригельной плотиной и относится к непрорывоопасным озерам.

Озера № 4, 5 и 6 расположены на ледниках № 440b и 440v на горном хребте на высотах 4144 м н.у.м. и 4260 м н.у.м. между вершинами Укю Малая (4306 м н.у.м.) и Укю (4334 м н.у.м.). Озера перед ледником 440v имеют небольшие размеры 47,6 и 34,7 м^2 соответственно. Особенностью этих озер является их расположение. Поверхность этих озер частично покрыт снежным льдом (рис. 2, 3). Данные озера (№ 5 и 6) представляют собой небольшой каскад с минимальным уклоном, из озера № 5 вода попадает в озеро № 6, который предположительно имеет небольшой сток по подземному каналу.

Рис. 2. Озеро № 4 перед ледником 440b, август 2024 г. (фото автора)

В связи с ростом темпов деградации оледенения, потенциальную угрозу образования и прорыва ледниково-подпрудных озер также представляет ледник Мижирги Ледниково-подпрудные озера – крупные скопления воды, возникающие перед краем ледников в горных долинах при их подпруживании долинными ледниками. В горах такое подпруживание может быть результатом медленного наступания или резких

подвижек ледниковых языков. Представляют большую опасность из-за прорывов ледяной плотины, ведущих к формированию разрушительных водно-ледово-каменных селей [*Гляциологический словарь, 1984*]. Ледник Мижирги относится к пульсирующим, в связи с чем необходимо проводить непрерывные наблюдения за состоянием поверхности ледника. На расстоянии около 3 км от языка ледника Мижирги расположен альпинистский лагерь «Безенги», сход селевых масс разного генезиса может нести катастрофический характер.

Рис. 3. Озеро № 5 перед ледником 440v, август 2024 г. (фото автора)

Выводы

Современные ледники находятся на стадии деградации, исключением не являются и ледники бассейна р. Черека Безенгийского.

Потенциальную опасность прорыва имеет озеро Брно (№ 1), перед ледником № 446, при возможном падении обломочных масс в озеро. Большинство озер имеют площадь менее 100 м^2 и не представляют угрозу прорыва.

Необходимо информацию о потенциальных угрозах прорыва озер и схода селевых масс доводить до альпинистов и туристов, в связи с ростом внутреннего туризма, число посетителей растет с каждым годом, многие из которых останавливаются у популярных ночевок с экзогенными опасностями.

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. Т. 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.

Батчаев И.И., Анаев М.Т. Исследования селевых потоков в Безенгийском ущелье (Центральный Кавказ, Кабардино-Балкарская Республика): динамика, последствия // Природообустройство, 2021, № 1, с. 107–111. doi: 10.26897/1997-6011-2021-1-107-111.

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.О., Калов Р.Х., Шагин С.И. Экстремальные селепроявления в бассейне реки Черек Безенгийский // Успехи современного естествознания, № 4, 2024, с. 28–33. doi 10.17513/use.38245

Гляциологический словарь. Под редакцией академика РАН В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеоиздат, 1984, 526 с.

Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Условия и механизмы прорывов Башкаринских озёр в долине р. Адыл Су (Центральный Кавказ) // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа, т. 10, ч. 2, 2020, с. 369–375.

Докукин М.Д., Шагин С.И. Особенности динамики ледниковых озер с подземными каналами стока (анализ разновременной аэрокосмической информации) // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 47–56.

Керимов А.М., Гегиев К.А., Анаев М.Т., Гергокова З.Ж. Изменение селевой активности в бассейне реки Черек Безенгийский в связи с интенсивной деградацией оледенения // Грозненский естественнонаучный бюллетень, т. 3, № 2(10), 2018, с. 43–47.

Кидяева В.М., Петраков Д.А., Крыленко И.Н., Алейников А.А., Штоффел М., Граф К. Опыт моделирования прорыва Башкаринских озёр // ГеоРиск, 2018, т. 12, № 2, с. 38–47.

Ледники России [Электронный ресурс] https://sites.google.com/view/glaciersrussia/

Shovi catastrophic debris flow

G. Lominadze, M. Gongadze, G. Kavlashvili

Vakhushti Bagrationi Institute of Geography, Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Tbilisi, Georgia, georglomin@yahoo.co.uk

Abstract. The Shovi catastrophic debris flow, which occurred on August 3, 2023, developed in the gorge of the right tributary of the Chanchakhi River – the Bubustskali River. It is formed in Jurassic and Lower Cretaceous sedimentary rocks and creates a sharply expressed erosion-denudation relief. The Buba Glacier has been actively retreating over the past decades due to intense melting. In parallel with this process, the glacier's front, bottom and side moraines were exposed. Their material consists of unprocessed boulders, between which snow accumulated in winter. It did not have time to melt completely in summer. At the end of July 2023, extremely hot days and torrential rains alternated in Upper Racha, the alternation of which with active ablation sharply increased the saturation of the moraine material with liquid mass. As a result, the gravitational equilibrium of solid material was disrupted, and the accumulated rain and melted snow water, together with the swollen river flow, carried a large amount of solid mass into the valley, which, upon entering the forest zone, also tore off weakly rooted coniferous plants from the slopes. All this descended at great speed towards Shovi and destroyed the resort buildings. The Shovi tragedy clearly demonstrates the complexity and unpredictability of natural processes, as well as human criminal carelessness and ignorance of these processes.

Key words: *debris flow, sedimentary rocks, moraines, ablation*

Cite of this article: Lominadze G., Gongadze M., Kavlashvili G. Shovi catastrophic debris flow. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 246–251.

Катастрофический сель в Шови

М. Гонгадзе, Г. Ломинадзе, Г. Кавлашвили

Институт географии Тбилисского государственного университета имени Иванэ Джавахишвили, merabgongadze@ymail.com

Аннотация. Катастрофический сель Шови, произошедший 3 августа 2023 г., образовался в долине р. Бубусцкали – правого притока реки Чанчахи. Он был сформирован преимущественно в юрских и нижнемеловых осадочных породах в условиях резко выраженного эрозионно-денудационного рельефа. Ледник Буба активно отступает в течение последних нескольких десятилетий из-за интенсивного таяния. Параллельно с этим процессом обнажались фронтальная, нижняя и боковые морены ледника. Их материал состоит из неокатанных валунов, между которыми зимой скапливается снег, который летом полностью не тает. В конце июля 2023 г. в Верхней Раче чередовались экстремально жаркие дни и проливные дожди, чередование которых с активной абляцией резко увеличило насыщенность моренного материала жидкой массой. В результате гравитационный баланс твердого материала был нарушен, а накопившиеся дождевые и талые воды вместе с речным потоком вынесли в долину большое количество твердой массы, которая, попав в лесную зону, срывала со склонов слабо укоренившиеся хвойные растения. Все это на огромной скорости обрушилось на Шови и разрушило здания курорта, в результате чего погибло 35 человек. Трагедия Шови наглядно демонстрирует сложность и непредсказуемость природных процессов, а также преступную халатность и незнание этих процессов со стороны человека.

Ключевые слова: *грязевой поток, осадочные породы, морены, абляция*

Ссылка для цитирования: Гонгадзе М., Ломинадзе Г., Кавлашвили Г. Катастрофический сель в Шови. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 246–251.

Introduction

Racha, known for its frequent exodynamic processes and the resulting damage to the environment and population, is one of the most challenging regions in Georgia. The aim of our research is to study these processes, identify their causes, and observe patterns of development. The region experiences a variety of natural phenomena, such as riverine erosion, debris flows, denudation-gravitational processes, and snow avalanches. Complicating matters further is the high seismic activity, with Racha and southern Georgia situated in a zone prone to 9-point earthquakes. Earthquakes often act as triggers for catastrophic exogenic processes, exacerbated by a rugged, high-mountainous terrain and abundant precipitation. This article seeks to analyze the mechanisms behind these natural exodynamic processes, predict their potential development, and propose preventive measures.

Fig. 1. Caucasus Mountains in Racha region

Methods and materials

Our field studies utilized geomorphological and geological methods. The morphological method was employed to identify the main relief forms, their contours, and arrangement. Morphometric analysis determined the dimensions of these forms, while the morphostructural method helped establish the relationship between relief and geological structures. Geological methods included lithological analysis, sedimentary layer sequencing, and granulometry studies. Literature and cartographic materials were also reviewed to support our findings. The conclusions presented in this article are based on the data gathered through these methods.

Geological formations

The northern wing of the Upper Racha syncline consists mainly of thick-bedded marls from the Upper Jurassic period, carbonate shales, and interlayers of limestones. Tectonic

movements in Lower Cretaceous sediments have created wrinkled structures, with young and old faults of various directions visible in the relief. [*Adamia et al., 2004*]. Relatively recent sediments include eluvial, deluvial, colluvial, alluvial, proluvial, and fluvioglacial layers from the Quaternary period.

Upper Racha features two distinct types of relief

High-mountainous rocky-denudation relief with modern glaciation, hosting glaciers like Tbilisa, Buba, and Chanchakhi; and high-mountainous denudation relief with evidence of past glaciation, found on sedimentary and metamorphic formations from the Jurassic era. The denudation-depressed relief is characterized by easily eroded flysch rocks, deep erosional valleys, and distinctive features like the Bubi transverse uplift. The southern slopes of the Central Caucasus, Shoda-Kedela, and Lechkhumi ranges exhibit a diverse relief, ranging from high-mountainous subalpine to alpine zones. Erosional valleys of the Rioni River and its tributaries dominate the lower part of the region, with V-shaped valleys transitioning to ravine-shaped valleys in areas with shale slopes. The width of the Rioni floodplain near the village of Ghebi is 150 m, expanding to 280 m between Ghebi and Chiora, and 230 m near Chiora [*Gongadze et al., 2024*].

The second type of relief is the erosional-denudation relief of medium-mountainous mountains and valleys, with erosional divisions of 300–600 m depth and slopes of 30–450, together with climatic and meteorological conditions that determine the active development of landslide-sedimentary processes. This type of relief is widespread in the central and southern parts of Upper Racha and is the eastern continuation of the Racha-Lechkhumi syncline depression. It is developed on a substrate of clayey-sandy and carbonatite rocks of Upper Jurassic, Cretaceous, and Tertiary age. Here, old landslide forms of the relief are preserved in abundance, and new landslides are actively developing. They are found on the slopes of the valleys of the Rioni, Jejora rivers, and their tributaries, where the origin and development of strong debris flows are also actively taking place. These processes cover the areas of the villages of Khideshlebi, Mazhieti, Somitso, Skhieri, Kristese, and Khirkhonis. The profile of the slopes here almost everywhere bears traces of the movement of landslide bodies – they are wavy-stepped. Where massive chalk limestones come to the surface, 20–50 m high cornices are developed (Khirkhonis, Skhieri), the colluvial soils formed at the bases of which create conditions for the development of erosion and landslide processes. The remains of river terraces have been preserved on the slopes of the river valleys. In the vicinity of the villages of Skhieri, Kristesi, Somitso, Komandli, and others. The first terraces above the floodplain extend along the Rioni River, at a height of 1.5–4 m from the riverbed. The city of Oni is built on such a terrace. In the zone of distribution of limestones of Cretaceous and Tertiary age, karst processes are underway, karst fields, funnels, caves have formed. They are especially numerous in the areas of spreading of massive Baerem limestones of the Lower Cretaceous age – in the northern part of the northwestern slope of the Racha ridge – in the areas of Khikhat and Khirkhonis, Shkmere and Usholta, Kharistvali, Mljadzli, Futieti, Gerohi, as well as in the areas of Kvemo, Zemo Bari, and Mkholi.

In these difficult geological and geomorphological conditions, on the southern slope of the Central Caucasus, between the Caucasus and its southeastern branch, the Shoda-Kedela ridge, the Chanchakhi River valley has formed, which in the middle of the year has developed two beds: one of the main stream, and the other – of a small stream, which is filled during heavy rainfall. The depth of the cut into the bed of the main stream is 1.5 m, along both banks proluvial boulders with tree and plant inclusions have accumulated. The dimensions of the unprocessed boulder bed vary within 0.2–0.7 m, and the thickness of the bulk reaches 1.5 m. The islands formed in the riverbed are covered with dense vegetation (mainly alder), which clearly show the strong debris flow trace.

Three main types of exodynamic processes develop in Upper Racha: constantly occurring, periodically occurring, and catastrophic natural processes.

Constant processes such as erosion and denudation cover the entire territory of Upper Racha. Erosion develops more intensively in the nival zone, while deep erosion occurs in the upper reaches of the tributaries of the Rioni River. Lateral erosion is pronounced in the Rioni

River valley below the village of Saglolo. Denudation processes mainly occur on steep slopes (25–300 degrees or more) that are less covered with vegetation. On these steep slopes, cinder cones form and rock avalanches occur.

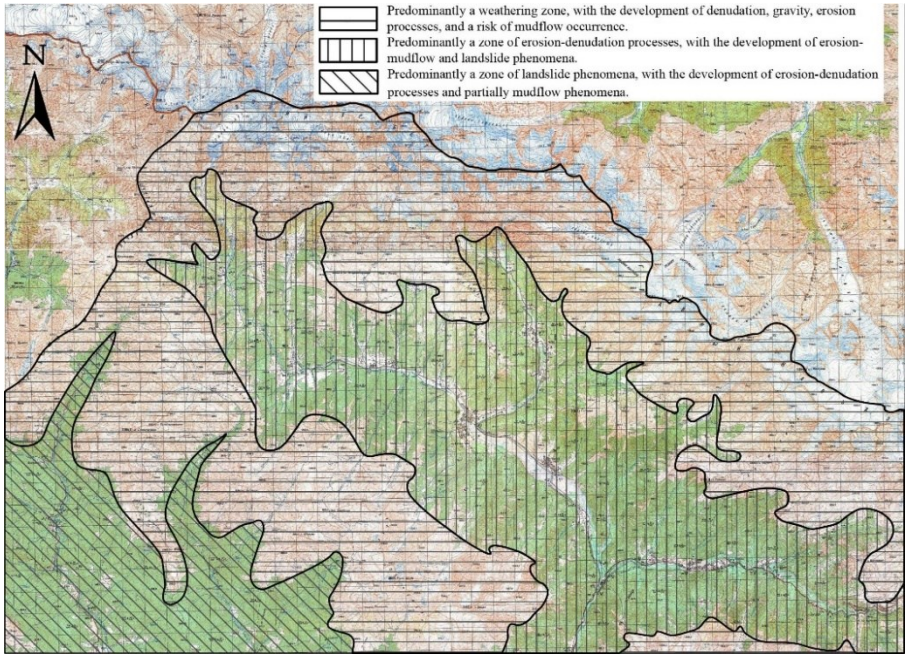


Fig. 2. Exodynamic processes in Upper Racha

Periodic processes include debris flows, which form due to heavy precipitation, accumulated material in valleys, and steep valley beds. Landslides also occur periodically, mainly on deluvial slopes with a slope greater than 25 degrees, where the lower part is washed by river flow.

Catastrophic natural processes are extreme manifestations of exodynamic processes that occur under specific meteorological conditions such as heavy rains and increased solar radiation. The debris flow that occurred in the Bubistskali gorge on August 3, 2023, resulting in 35 fatalities and significant damage to the resort of Shovi, falls into this category of exodynamic processes.

The Bubistskali River, a right tributary of the Chanchakhi River, originates from the Buba Glacier and joins the Chanchakhi River near the resort of Shovi. The Bubistskali Gorge, formed in Jurassic and Lower Cretaceous sedimentary rocks below the alpine zone, exhibits a pronounced erosion-denudation relief. The Shovi catastrophe was caused by various factors including climate, relief, and geology. The active retreat of the Buba Glacier in recent decades, due to global climate change, has exposed the glacier's front, bottom, and side moraines. Accumulated snow between these moraines, unable to fully melt in the summer, likely contributed to the debris flow in the Bubistskali Gorge. The rising air temperatures globally have accelerated glacier melting, including the Buba Glacier.

Table 1. Average annual temperature variation in Upper Racha

Period	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Average annual
1961–1990	-4.1	-2.7	0.5	5.9	10.5	13.6	16.7	16.1	12.6	7.6	2.7	-2.3	6.4
1991–2020	-3.4	-1.9	1.6	6.7	11.9	15.4	18.2	18.2	14.3	9.4	3.1	-2.0	7.6
Difference	0.7	0.8	1.1	0.8	1.4	1.8	1.5	2.1	1.7	1.8	0.4	0.3	1.2

Source: [*https://nea.gov.ge/ge/Download/File/1314*]

One of the authors of this article took part in the glaciological expeditions of the Vakhushti Batonishvili Institute of Geography to the Tbilisi and Buba glaciers in 1971–73. During this time, the tongues of both glaciers descended approximately 400 meters below their current level. The lateral moraines are significantly larger in volume than the frontal moraine, indicating a relatively active advance of the glacier. The glaciers experienced a catastrophic retreat in the following years, exposing the bottom moraines to a length of 400–450 meters, with widths varying between 150–200 meters. In the case of the Buba glacier, the exposed bottom moraine covers around 80,000 square meters and is made up of boulders of different sizes and lithological compositions. The depth and volume of this material are challenging to determine, but it is evident that both snowfall from atmospheric precipitation and ice mass from glacier retreat accumulated over a long period. It is worth noting that the slope of the area where the moraine material accumulated does not exceed 25–30 degrees, which contributed to the relatively stable state of the moraine material. Unlike the Chanchakha river, the Bubistskali gorge has not experienced debris flow occurrences due to this reason. In late July 2023, Upper Racha experienced extremely hot days and heavy rains, setting the stage for the development of a complex catastrophic event in early August.

Table 2. Average annual precipitation variability in Upper Racha

Period	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Average annual
1961–1990	83	68	81	108	126	130	114	114	96	101	90	86	1197
1991–2020	72	59	88	88	112	112	98	87	86	111	73	77	1064
Difference	-11	-9	7	-20	-14	-18	-16	-27	-10	10	-17	-9	-133

Source: [*https://nea.gov.ge/ge/Download/File/1314*]

The alternating heavy rains and active ablation significantly increased the saturation of the moraine material with liquid. This caused the gradual melting of snow and ice accumulated over decades, leading to the movement of part of the moraine material on the slope. This disruption of gravitational equilibrium exceeded the critical point. Additionally, water likely accumulated in the lower part of the glacier, near the tongue, where small reservoirs could exist within the icefall, further increasing the water volume. The rain and melted snowwater overflowed the river, carrying a substantial amount of solid mass into the valley. As the debris flow entered the forest zone, it uprooted weakly rooted coniferous plants and soil, descending rapidly towards Shovi. The volume increased sharply, and after passing through a narrow section of the gorge, it transformed into a landslide, burying the resort's central plain under a thick layer of debris.

The Geological Department of the National Environmental Agency concluded that the breaking off of ice masses in the Buba Eni section of the glacier was the primary cause of this catastrophic event, forming a glacial avalanche. The material in the resort area consisted not only of moraine fragments but also of soil, debris, and plant matter from the Bubistskali gorge. A glacial avalanche occurs on steep slopes when the descending ice simultaneously melts, excavates, and carries a large amount of soil. This mirrors the catastrophic glacial avalanche of the Devdoraki glacier in 2014.

Conclusions

The mudslide in the Bubistskali Gorge on August 3, 2023, resulting in 35 deaths and significant damage to the Shovi resort, falls under the catastrophic category of exodynamic processes. The retreat of glaciers due to global warming has been observed on a planetary scale,

affecting the Buba Glacier. The author's participation in glaciological expeditions to the Tbilisi and Da Buba Glaciers between 1971–73 highlighted the significant retreat of glacier tongues and the exposure of bottom moraines. The stable state of moraine material in the Bubistskali gorge, with no previous debris flows, changed in July 2023 due to extreme heat and heavy rains, leading to the catastrophic event in August.

The Shovi resort, established in the 1930–40ss, survived the mudslide due to careful consideration of the local environment during construction. The disaster underscores the challenges of predicting natural processes, as well as human negligence and lack of understanding of these phenomena.

References

Adamia Sh., Gujabidze G. Geological Map of Georgia. Scale: 1:500,000, Georgian Department of Geology (ISTC Project), 2004.

Gongadze M, et al. Analysis of spontaneous exodynamic processes in the Dghviora River basin taking into consideration the perspectives of Shovi-Glola (Georgia) tourist agglomeration // GGJ (Georgian Geographical Journal), 2024, 4(1): 26–34.

Оползни и сели полуострова Мангышлак

А.А. Лукашов[1], Р.Н. Курбанов[1,2]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, smoluk@yandex.ru

[2]Институт археологии и этнографии СО РАН, Новосибирск, Россия, roger.kurbanov@gmail.com

Аннотация. Арены эпизодического (при реализации соответствующих гидро-климатических предпосылок) протекания высокодинамичных оползневых и селевых процессов на Мангышлаке охватывают несколько геоморфологических обстановок. Таковы прежде всего чинки Устюрта, борта ряда изолированных «островных» возвышенных плато и их подножия, периферия низкогорных сооружений полуострова, Мангышлакские обрывы Каспия, борта крупных впадин, осложняющих поверхность низменных плато. Наиболее яркие примеры районов локализации крупных оползней: юго-восточные обрывы впадины Карагие, северные обрывы полуострова Тюб-Караган, в частности гигантский оползневой комплекс Джигалган. Основные ареалы селепроявлений: долины западной части полуострова Мангышлак, системы долин, открывающихся в СЗ часть впадины Карагие. Известно, что образование орографически наиболее контрастных – из числа перечисленных – морфологических комплексов происходило, в основном, в среднем плиоцене. Об этом убедительно свидетельствует прислонение акчагыльских отложений к берегам Мангышлака [*Федорович, 1932; Клейнер и др., 1962*].

Ключевые слова: *оползни, сели, Мангышлак, полуостров Тюб-Караган, впадина Карагие, хвалынские морские террасы*

Ссылка для цитирования: Лукашов А.А., Курбанов Р.Н. Оползни и сели полуострова Мангышлак. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 252–258.

Landslides and debris flow processes of the Mangyshlak Peninsula

A.A. Lukashov[1], R.N. Kurbanov[1,2]

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, smoluk@yandex.ru

[2]Institute of Archaeology and Ethnography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, roger.kurbanov@gmail.com

Abstract. The arenas of episodic occurrence (with the implementation of appropriate hydro-climatic prerequisites) of highly dynamic landslide and debris flow processes in Mangyshlak peninsula cover several geomorphological settings. These are primarily the chinks of Ustyurt Plateau, slopes of as the neighboring isolated "island" upland plateaus and their foothills, the periphery of the peninsula's low-mountain structures, the Mangyshlak cliffs of the Caspian Sea coast, and the sides of large depressions that complicate the surface of the low-lying plateaus. The most striking examples of areas large landslides are the southeastern cliffs of the Karagiye Depression, the northern cliffs of the Tupkaragan Peninsula, in particular the gigantic Jigalgan landslide complex. The main areas of debris flows are the valleys of the western part of the Mangyshlak Peninsula, valley systems opening into the north part of the Karagiye Depression. It is known that the formation of the orographically most contrasting morphological complexes occurred mainly in the Middle Pliocene. This is strongly evidenced by the leaning of the Akchagyl sediments against the shores of Mangyshlak [*Fedorovich, 1932; Kleiner et al., 1976*].

Key words: *landslides, debris flow processes, Mangyshlak, Tyub-Karagan, Karagie depression, Khvalyn sea terraces*

Cite of this article: Lukashov A.A., Kurbanov R.N. Landslides and debris flow processes of the Mangyshlak Peninsula. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 252–258.

Введение. Краткий обзор проблемы

Современная климатическая обстановка в пределах низменной пустынной периферии полуострова Мангышлак (годовая сумма осадков – в пределах 140–160 мм), казалось бы, не провоцирует широкого развития современной оползневой и селевой деятельности. Однако нерегулярность ливней и длительные интервалы между годами со сравнительно обильными осадками меняют картину. Так в летние месяцы 1965–1967 гг. сильные ливни в горной части полуострова (хребты Каратау и Актау) мобилизовали большие объёмы накопившейся за счёт выветривания рыхлой массы и «породили» протяжённые селевые потоки, выходившие по обычно сухим долинам в пределы низменного обрамления гор [*Боровский, 1980*]. Попутно – за счёт пополнения водоносных горизонтов – активизировались и оползни.

Арены эпизодического действия высокодинамичных оползневых и селевых процессов охватывают ряд геоморфологических обстановок Мангышлака. Таковы прежде всего чинки Устюрта (а также соседних «островных» возвышенных плато) и их подножия, периферия низкогорных сооружений полуострова, Мангышлакские обрывы Каспия, борта крупных впадин, осложняющих поверхность низменных плато (Карагие и др.). Границами гипсометрически низких плато и столовых возвышенностей, а также структурно-денудационных плато и береговых низменностей нередко служат сложнопостроенные уступы – чинки – крутые, часто вертикальные обрывы, достигающие высоты в первые сотни метров. Они возникают при наличии стойких бронирующих пластов неогеновых известняков, под которыми залегают легко разрушающиеся рыхлые породы. Карнизы обрывов обычно нависают над отвесами склонов, в результате чего создаются предпосылки для масштабных гравитационных процессов [*БСЭ, 1957; Мурзаевы, 1959*]. Узкие днища глубоко врезанных в плато эрозионных долин сохраняют в своём микрорельефе морфологические следы схода протяжённых селей.

Методы

В ходе казахстано-российской геоархеологической экспедиции на полуостров Мангышлак 10–25 апреля 2024 г. и дальнейшей обработки собранных материалов использованы следующие методы. Применены полевое маршрутное изучение ключевых участков, наиболее активных в отношении схода оползней и прохождения селей, анализ специальной литературы - в сочетании с дешифрированием дистанционных материалов разных лет и датированием плейстоценовых и голоценовых рыхлых отложений методом оптически стимулированной люминесценции [*Методы, 2010*].

Результаты

Начало образования (в предакчагыльское время) большинства замкнутых впадин Южно-Мангышлакского плато, в том числе – глубочайшей на территории СНГ (-132 м) сорово-дефляционной впадины Карагие – связано с карстовыми процессами. Они разрушили бронирующие неогеновые (сарматские) карбонатные породы в своде дочерней антиклинали («вздутия») на южном крыле крупной Беке-Башкудукской антиклинали и обнажили породы, легко поддающиеся выветриванию и дефляции. Основная роль в углублении впадины принадлежит агентам аридной денудации во второй половине среднего плиоцена. Наибольшее дефляционное углубление впадина

испытала в ксеротермическую предхвалынскую эпоху. В позднечетвертичное время хвалынская трансгрессия достигла своего максимума, оставив на бортах впадины террасы с отметками +20 (береговая линия буйнакской стадии ранней «хвалыни») и -10 м (сартасская береговая линия поздней «хвалыни») [*Леонтьев, Фёдоров, 1953*]. В отсутствие в настоящее время постоянного поверхностного стока периодические селевые потоки «стекают» в криптодепрессию Карагие (Южный Мангышлак) по двум сложным системам сухих долин юго-западной ориентировки, берущих начало на хребте Каратау и пересекающих кряж Южный Актау узкими поперечными долинами. Хребет Северный Актау прорезан в нескольких местах сквозными долинами «калами», углубившимися в делювиально-пролювиальные отложения и эпизодически пропускающими сток из прикаратаусского понижения бурными кратковременными селевыми потоками [*Сваричевская, 1965; Щукин, 1983*].

Климат на Мангышлаке в течение хвалынской трансгрессии стал более холодным и влажным, чем до этого; значительно усилилась эрозионная деятельность [*Свиточ, 2012*]. Верхнеплейстоценовые эрозионные долины наследуются разомкнутой сетью современных преимущественно сухих долин. Имеющиеся материалы дают основание предположить последнее значительное увлажнение климата региона в XXIV–XII вв. до н.э. и хронологически сопоставить его с первым из «новокаспийских» периодов повышенной увлажненности [*Мякокин и др., 1964*]. Редкие современные сели уступают по масштабам потокам «ранненовокаспийского» времени.

Одной из наиболее ярких площадей формирования крупных оползней является восточный борт впадины Карагие. Оползневые блоки шириною до 2 км и протяжённостью по уклону до 1600 м располагаются под уступами хвалынских террас, опираясь на пролювиальные шлейфы [*Клейнер и др., 1958*] (рис. 1).

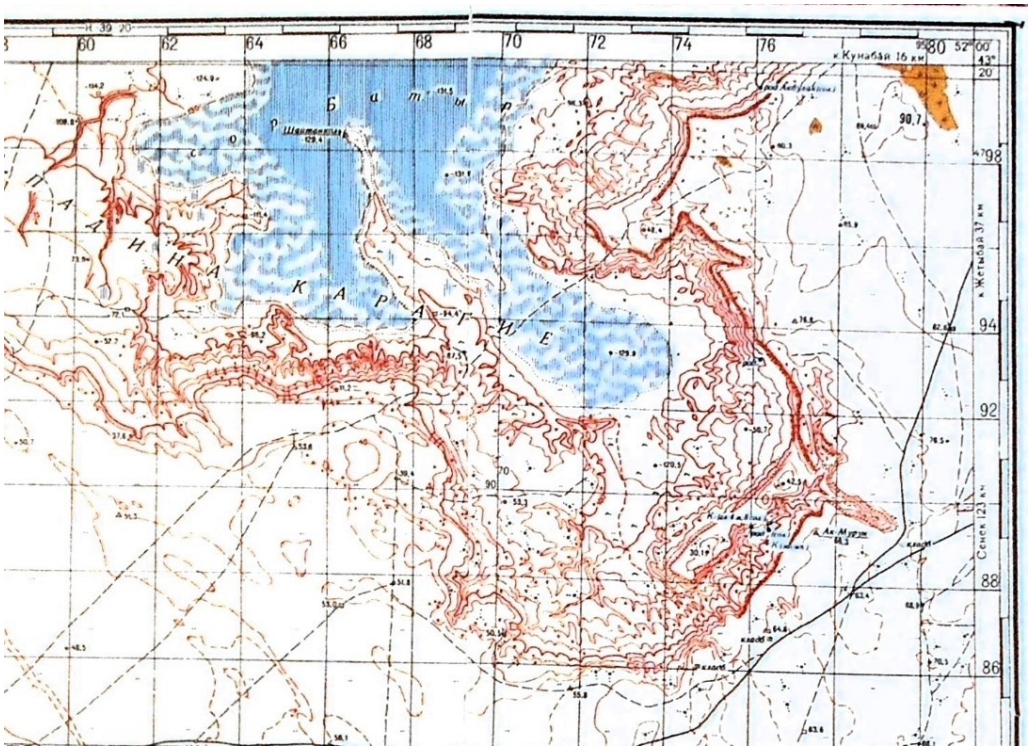


Рис. 1. Юго-восточный борт впадины Карагие, в максимальной степени охваченный оползневыми смещениями послехвалынского времени.
Исходный м-б топографической карты – 1:100 000

Ещё более масштабным оползневым деформациям подверглись северные обрывы полуострова Тюб-Караган, располагающиеся вдоль неотектонически активной Мангышлакской борозды (Mangyshlak furrow) [*Nurmambetov, 2006*]. Здесь выделяется

один из крупнейших «дальнепробежных» оползневых комплексов на территории Казахстана Джигалган (*упавшая земля – каз.*). При ширине комплекса по фронту в 3 км оползневой «язык» распространяется на 5 км, вдаваясь на 3 км в акваторию северного Каспия (рис. 2). Бровка стенки срыва находится на высоте 155 м, так что перепад высот – вплоть до морского мелководья – превышает 190 м.

Рис. 2. Гигантский оползневой комплекс Джигалган (*упавшая земля*) на северном обрыве полуострова Тюб-Караган. Мощные пачки сарматских известняков вовлечены в масштабное оползневое смещение, вертикальный размах которого превышает 190 м. Фото А.А. Лукашова

Морфологические следы прохождения в недавнем прошлом протяжённых селевых потоков наиболее явственно прослеживаются в западной части Мангышлака по долинам Ащиагар, Тулькили (рис. 3), Шакпат-ата, Кызыл-Озень и ряду других. В современном днище сухих долин присутствуют преимущественно продольно ориентированные полосы гряд несортированного материала, в котором полуокатанные обломки карбонатных пород «погружены» в алеврито-песчаную массу. Врезы послеселевых паводков при этом почти не выражены, будучи отчасти сглажены эоловым воздействием.

Рис. 3. Типичный селевый микрорельеф в днище долины Тулькили близ южного берега полуострова Тюб-Караган, в 1,6 км к северу от мыса Сегенды Фото А.А. Лукашова

Селевый морфолитогенез выступает на Мангышлаке в роли эпизодически действующего механизма. Колебания уровня Каспия, судя по всему, не оказывают заметного влияния на селевую деятельность. Более того, в разрезах отложений позднеплейстоценовых и голоценовых трансгрессий встречаются прослои и линзы плохо сортированного материала, внешне сходного с селевыми фациями (рис. 4). Так, в долине Кызыл-Озень нами описано два разреза левого борта, в основании обоих присутствуют слои селевых фаций. В первом разрезе (рис. 5А) характерный несортированный материал со средними и крупными валунами, неокатанной галькой известняков и линзами песка, алеврита и супеси, залегает под толщей раннехвалынских отложений. Последние представлены различными фациями прибрежно-морских и озерных отложений, содержат типичную для северо-восточного Каспия фауну двустворчатых моллюсков (определения Т.А. Яниной). Предварительные результат абсолютного датирования указывают на то, что в данном разреза селевые отложения формировались незадолго до проникновения в долину Кызыл-Озеня вод второй стадии хвалынской трансгрессии, когда уровень начал подниматься и превзошел современные отметки береговой линии Каспийского моря около 20 тыс. лет назад. Такое строение разрезов с хвалынскими отложениями встречено в целом ряде сухих долин п-ова Тюб-Караган, что указывает на широкую распространенность селевых процессов на Мангышлаке в эпохи МИС 3 и МИС 2.

Рис. 4. Селевые фации в основании разреза левого борта долины Кызыл-Озень, перекрытые песчано-глинистыми осадками средней стадии раннехвалынской трансгрессии, юг полуострова Тюб-Караган, в 3-х км от современной береговой линии Каспийского моря. Фото А.А. Лукашова.

Второй разрез в долине Кызыл-Озень представлен отложениями, сформированными уже в среднем плейстоцене. В кровле его залегают детритусовые бакинские известняки, которые с размывом перекрывают мощную толщу субаэральных лессов и палеопочв. В основании разреза – слой с селевыми фациями и подстилающими их аллювиально-пролювиальными осадками. Интересной особенностью этого разреза является значительная древность выделенного слоя с селевыми осадками. Известняки в кровле разреза, по-видимому, формировались в позднебакинский этап, уровень которого был максимальным [*Федоров, 1957*]. Пачка лёссов соотносится по возрасту с отложениями тюркянской субэральной свиты, формирование которой происходило в этапы низкого положениями уровня Каспия в первую половину среднего плейстоцена. Лёссы заполнили широкую сухую долину Кызыл-Озеня и перекрыли селевые и аллювиально-пролювиальные отложения, развитые в её днище. Позднее воды позднебакинского моря проникли в долине и образовали слой известняка, который бронировал субаэральные отложения. Стратиграфические построения подтверждаются

первыми результатами люминесцентного датирования: образцы из толщи лёссов показали полную сатурацию зерен полевых шпатов, т.е. отложения имеют возраст за пределами возможностей метода, который может быть оценен как более древний чем 350 тыс. л. н. Таким образом в данном разрезе описан один из древнейших известных эпизодов развития селевых процессов на п-ове Мангышлак.

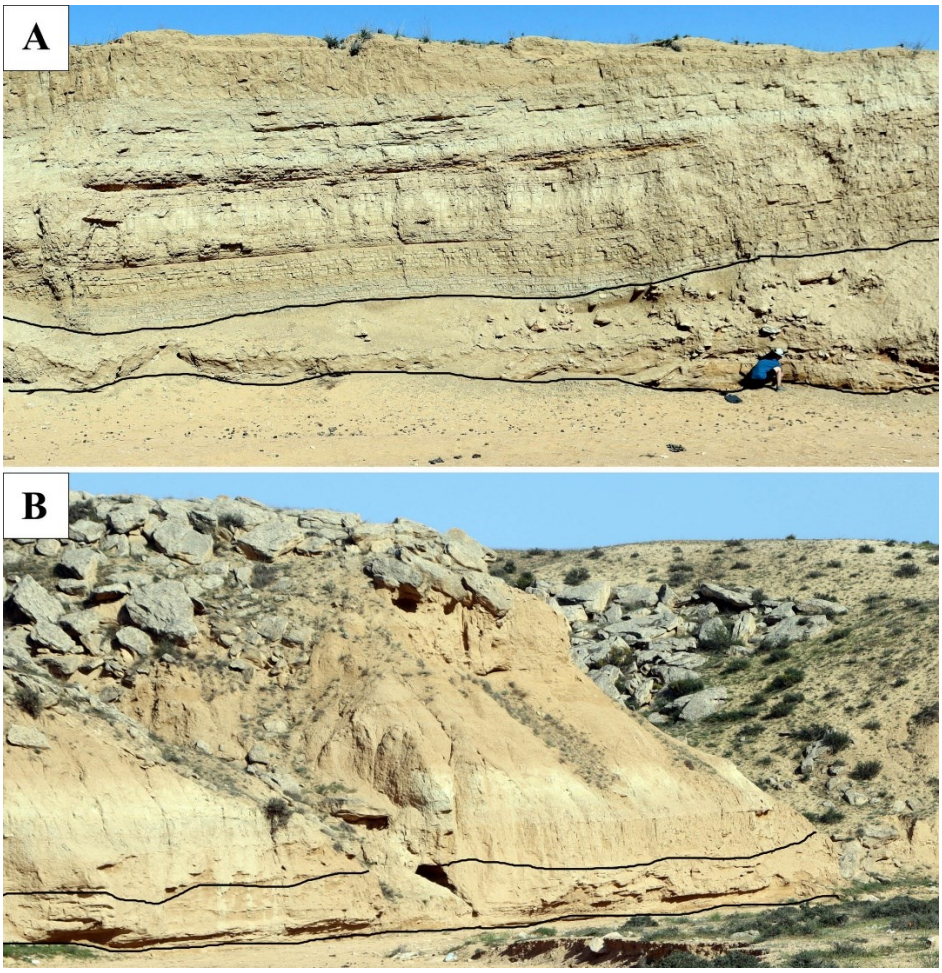


Рис. 5. Селевые фации в долине Кызыл-Озень, перекрытые раннехвалынскими отложениями (А) и древними лессово-почвенными сериями с известняками позднебакинской трансгрессии в кровле разреза (В). Границы слоев селевых отложений выделены линиями. Фото И.А. Идрисова.

Анализ и выводы

Гидро-климатические факторы позднего плейстоцена и голоцена, а также литология приморских районов Мангышлака способствуют эпизодической активизации оползневых и селевых процессов. Неравномерность атмосферного увлажнения и высокая результативность физического (термического и инсоляционного) выветривания имеют следствием импульсную подвижность подготовленных выветриванием литопотоков как относительно компактного, так и линейно ориентированного характера. Аридность обстановки обеспечивает длительную сохранность возникших морфологических комплексов от водной и ветровой эрозии. Горизонтальные параметры крупных оползневых образований измеряются первыми километрами, перепады высот – многими десятками метров. Селевые выплески достигают протяжённости десятков километров при ширине в десятки метров и при мощности селевых отложений в несколько метров.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 24-18-00941. Авторы искренне благодарят И.А. Идрисова (в.н.с. Института геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН), М.В. Капитанову (ИГ РАН) и П.В. Чистякова (Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН) за участие в полевых маршрутах. Особой благодарности заслуживает А.Н. Васильева (МГУ), принимавшая участие не только в полевых работах, но также и в опробовании рыхлых толщ с целью получения абсолютных датировок методом оптически стимулированной люминесценции.

Список литературы

Боровский В.М., Джамалбеков Е.У. Пустыни Мангышлака и проблемы их освоения. 1980, 33 с.

Клейнер Ю.М., Бляхер И.И. Геологическое строение листов К-30-X, К-30-XI. Часть I. М., 1958, 122 с.

Клейнер Ю.М. Новые данные о происхождении бессточных впадин // Доклады АН СССР, т. 147, № 2, 1962, с. 434–437.

Леонтьев О.К., Фёдоров П.В. К истории Каспийского моря в поздне- и послехвалынское время // Изв. АН СССР, Сер. геогр., 1953, № 4, с. 64–74.

Методы палеогеографических реконструкций. М.: МГУ, 2010, 429 с.

Мурзаевы Э.М. и В.Э. Словарь местных географических терминов. М.: Географгиз, 1959, 303 с.

Мякокин В.С. Никифоров Л.Г., Самсонов С.К. О возрасте и стадиях новокаспийской трансгрессии // Океанология, 1964, т.4, вып. 1, с. 86–97.

Сваричевская З.А. Геоморфология Казахстана и Средней Азии. Л., 1965, 296 с.

Свиточ А.А. Общая палеогеография. История внутриконтинентальных морей Юга России и сопредельных территорий. М.: МГУ, 2012, 607 с.

Федоров П.В. Стратиграфия четвертичных отложений и история развития Каспийского моря // Тр. ГИН АН СССР. М.: Наука, 1957, вып. 10, 299 с.

Федорович Б.А. Карабогазская геохимическая экспедиция // В сб.: Экспедиция Всесоюзной Академии Наук в 1931. М.: Изд-во АН СССР, 1932.

Чинк // БСЭ, II изд., т. 47, 1957, с. 380.

Щукин И.С. Геоморфология Средней Азии. М.: Изд-во МГУ, 1983, 432 с.

Nurmambetov E.I. Tectonic characteristics of Kazakhstan Caspian seaside relief and the shorelines situation // Materials of a 4th International Conference of UNESCO programme 481. Almaty, 2006, p. 99–102.

Особенности развития селевого процесса в бассейнах Кабардино-Балкарии 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 развитии селевого процесса в бассейнах Кабардино-Балкарии в XXI веке. Отмечены аномальные проявления селей в 2000 и 2017 г. Годы в XXI в. 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. Учтены изменения солнечной активности и особенности космической погоды в последние годы, которые приближаются к максимуму 25-го 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. Особенности развития селевого процесса в бассейнах Кабардино-Балкарии в XXI веке. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 259–266.

Features of the development of the debris flow process in the basins of Kabardino-Balkaria 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

[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 paper presents materials on the development of the debris flow process in the basins of Kabardino-Balkaria in the 21st century. Anomalous manifestations of debris flows in 2000 and 2017 are noted. The years in the 21st century were distinguished by abnormally high air temperatures in the summer in the Caucasus, and in the Northern Hemisphere as a whole. It is noted that the features of the development of the most dangerous geological processes (landslides, debris flows, etc.) are due to global climate change. To assess climate change and the largest disasters, the typification of the atmospheric circulation of the Northern Hemisphere of the Earth developed under the supervision of B.L. Dzerdzeevsky. Changes in solar activity and features of space weather in recent years, which are approaching the maximum of the 25th cycle of solar activity, are considered.

Key words: *debris flows, landslides, solar activity, space weather, atmospheric circulation, elementary circulation mechanism*

Cite of this article: Malneva I.V., Dokukin M.D., Anaev M.A., Khadzhiev M.M. Features of the development of the debris flow process in the basins of Kabardino-Balkaria in the 21st century. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 259–266.

Введение

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 в оползни, эрозия и др. К числу регионов с наиболее высокой активностью селевых процессов на территории России относится Северный Кавказ, где в течение XXI века отмечена наиболее катастрофическая активизация селей в Приэльбрусье.

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 в 2022, 2023 и 2024 г. во многом были похожи. Однако катастрофических проявлений селей не наблюдалось. Для оценки опасности подобных катастроф в будущем необходимо определить причину низкой и высокой активности селей в эти годы в наиболее опасных бассейнах.

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.

Активность селей обусловлена прежде всего быстроизменяющимися факторами – 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. В каждом из наиболее значительных селевых бассейнов при развитии селевого процесса все факторы выступают во взаимодействии. При этом особенно большое значение приобретает мониторинг всех факторов в каждом бассейне.

Основными тенденциями факторов, определяющих развитие селевого процесса в Кабардино-Балкарии в XXI веке, являются следующие:

1. Повышение температуры воздуха в начале XXI века и создание условий для изменения абляции, повышения снеговой линии на ледниках.
2. Характер погоды во все годы значительной активизации селей обусловлен соответствующим характером атмосферной циркуляции.
3. Процессы связанные с активностью Солнца – космическая погода и ее изменения в XXI веке.

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 озёр и т. д., активно и весьма эффективно используется дистанционное зондирование и земли, метод дешифрирования космических снимков. Кроме эмпирических методов, специалистами ведётся многолетний сбор и обобщение моделей возможного развития событий. Модели строятся также и по наихудшему сценарию развития событий. В настоящей работе были использованы статистические методы.

Использованные данные

Авторами использованы суточные данные метеорологических наблюдений за температурой воздуха, атмосферными осадками, снежным покровом по данным метеостанции Терскол за июнь–август 2000–2024 гг., метеопоста Тырныауз, метеостанции Нальчик, а также данные многолетних наблюдений на метеостанции Терскол и Нальчик. 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 солнечно-ветровым данным – помещённым в сети Интернет в открытом доступе на сайте http://www.speaceweather.com.

Анализ данных

1. Вследствие тенденции повышения температуры воздуха в начале XXI века были созданы условия для изменения абляции, повышения снеговой линии на ледниках, которые сохраняются до настоящего времени (рис. 1).

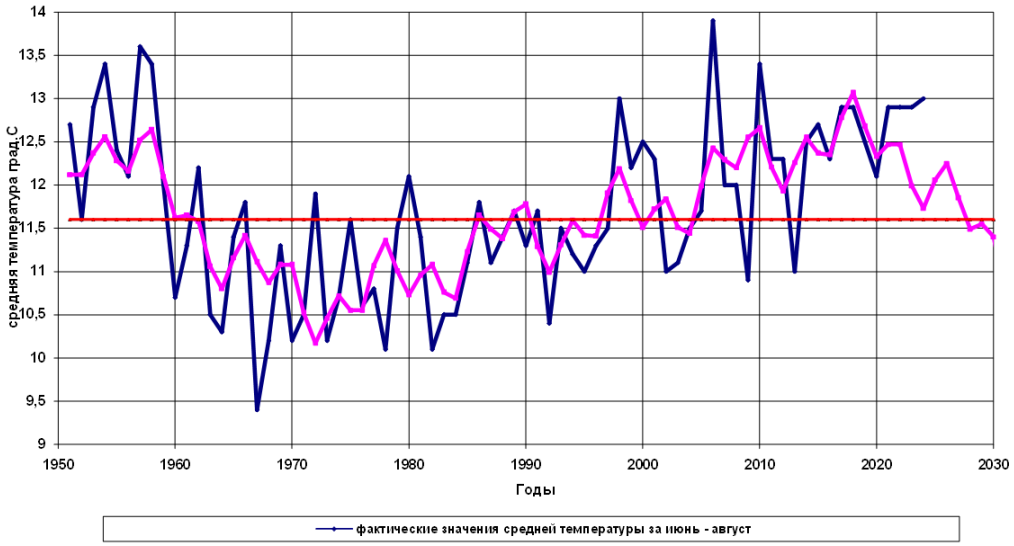


Рис. 1. Многолетний ход средней температуры воздуха за июнь – август по данным ГМС Терскол

Освободились значительные территории, свободные ото льда, но входящие в ледниково-моренный комплекс. 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 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 [*Мальнева, 2022*].

Вместе с тем конкретные даты проявления селей не всегда совпадают с повышенными значениями метеорологических факторов. Наиболее наглядно это проявляется при сравнении условий формирования катастрофических селей в бассейнах рек Герхожансу и Адылсу при аномально жаркой погоде летом 2000, 2017 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.

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. 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 [*Мальнева, 2001*].

В 2017 г. прохождение селей также 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 объёмов талых ледниковых вод, которые могут накапливаться внутри ледника и затем прорываться в виде гляциальных паводков [*Докукин, 2018*]. 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 [*Черноморец и др., 2018*].

Таблица 1. Среднемесячные температуры воздуха ($T_{ср.}$ °С) и количество осадков ($Q_{мм}$) в годы проявления катастрофических селевых потоков в 2022, 2023 и 2024 г. по отношению к среднему многолетнему значению

Год	Месяцы					
	Среднемесячные значения температуры воздуха ($T_{ср.}$) и количества осадков (Q, мм)					
	июнь		июль		август	
Среднее многолетнее значение	$T_{ср.}$	Q, мм	$T_{ср.}$	Q, мм	$T_{ср.}$	Q, мм
	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
2024	12,5	47,8	13,2	99,2	13,3	33,4

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 прошёл сель по р. Герхожансу 5 августа 2022 г. с небольшим объемом выносов. За 4,5 ч 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 наиболее селеопасным водотокам не наблюдалось. Прохождение воздушных масс при аномально жаркой погоде, как видно, всегда опасно для данной территории, оно часто приводит к опасной погодной ситуации и активизации оползневых и селевых процессов вместе с другими факторами [*Мальнева, 2022*].

2. Одним из наиболее важных факторов при развитии селевого процесса является погода, определяющая режим и степень увлажнения территории и изменчивость температуры воздуха. При исследовании условий формирования селей 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.

Характер погоды во все годы значительной активизации склоновых процессов 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*]. 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. По данным календаря ЭЦМ можно подсчитать число дней с каждым ЭЦМ за месяц, за год и т.д. На основании анализа данных селевой деятельности и многолетних исследований совместно с Н.К. Кононовой можно сказать, что ЭЦМ являются моделью погоды для конкретного района [*Мальнева и др., 2001; Мальнева 2019*] (рис. 2) [*Кононова, 2015*].

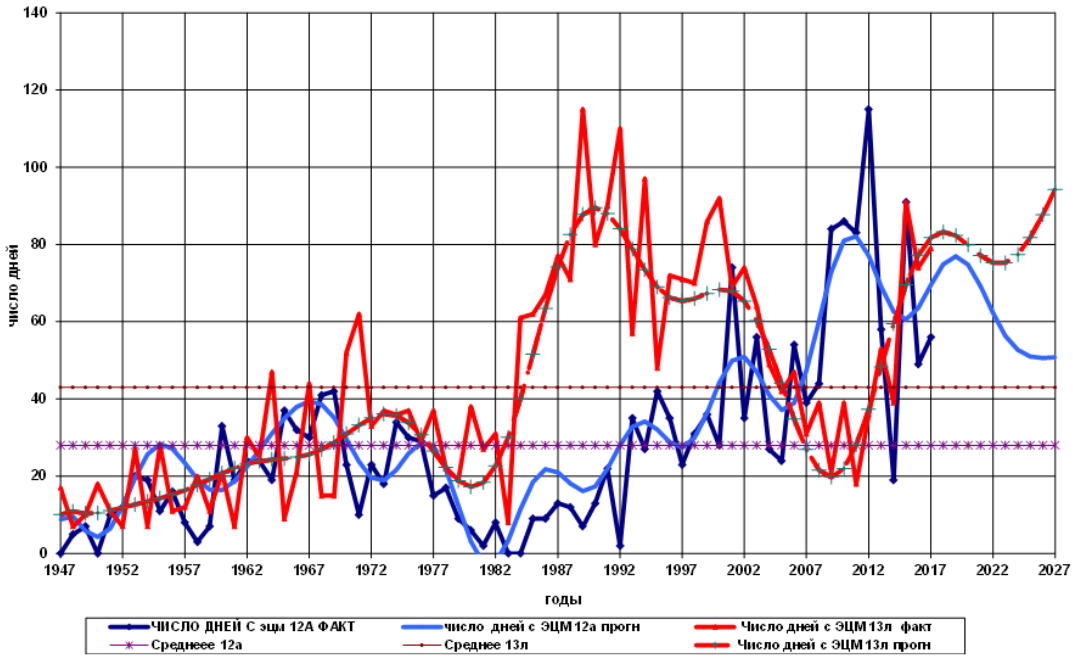


Рис. 2. Продолжительность ЭЦМ 13л и 12а в настоящее время и по прогнозу в ближайшие годы

Годы максимального развития в северном полушарии меридиональной северной и южной групп циркуляции неоднократно были годами природных катастроф. 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 бассейна р. Кабардино-Балкарии совершенно не охвачены метеорологическими наблюдениями приобретают особенно большое 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, можно сказать, что ЭЦМ являются моделью погоды для конкретного района (рис. 2) [*Кононова, 2015*].

Наиболее опасным в 2000, 2017 г. был ЭЦМ 13л. Анализ всех известных случаев проявления селей в Приэдьбрусье позволил отметить, что 52 % всех случаев связано с 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. Летом при ЭЦМ 13л уменьшается количество осадков, но повышается температура воздуха. На рис. 1 представлена продолжительность ЭЦМ 13л в настоящее время и по прогнозу в ближайшие годы [*Мальнева, 2019*].

3. При исследовании условий формирования селей наряду с другими факторами, прежде всего метеорологическими условиями, следует обратить внимание на процессы, связанные с активностью Солнца – на космическую погоду.

На характеристику космической погоды мы обратили внимание при ежегодных исследованиях условий формирования селей в Приэльбрусье (после катастрофического селя 2000 г.) [*Докукин и др., 2018*] и в течение. 2001—2024 гг. вели наблюдения с целью установить связь между проявлением селей и, прежде всего, метеорологическими условиями [*Гонсировский, 2017*]. Основной фактор, 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. Фактические данные по солнечному ветру помещены в сети Интернет в открытом доступе (например, на сайтах http://spaceweather.com/, www.tesis.xras.ru).

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 [*Плазменная гелиогеофизика, 2008*].

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. На основании имеющихся данных были собраны сведения о наиболее значительных проявлениях оползней и селей на Кавказе в XXI в. и сопоставлены с некоторыми параметрами солнечного ветра [*Мальнева, 2019*]. Некоторые из этих материалов представлены в таблице 2.

Указанные катастрофы – это результат прорывных инжекций в приповерхностную область Земли сгустков отсоединившихся в геомагнитосферу компонент геоэффективного солнечного ветра.

В наших работах [*Шеко, 1980; Мальнева, 2019*] было отмечено, что опасными периодами для развития процессов являются переломные моменты в ходе солнечной активности. В декабре 2019 г. закончился 24 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 [*Шеко, 1980*].

Таблица 2. Показатели параметров солнечного ветра при наиболее значительных природных катастрофах на Северном Кавказе в XXI в.

Катастрофические проявления ОЭГП, даты проявления процессов*	Скорость солнечного ветра, км/с, и даты	Средняя часовая плотность протонов, ед./см^3, и даты
Многофазный селевой поток по р. Герхожансу, 18–25.07.2000 г.	600–1000 (13–18.07.2000 г.)	14–22 (13.07.2000 г.)
Катастрофические наводнения, сели, оползни на Северном Кавказе, лето 2002 г.	700–843 (19–31.07.2002 г.)	11–19 (июнь 2002 г.)
Обвал ледника Колка, 20.09.2002 г.	700 (18–19.09.2002 г.)	–
Сели на Северном Кавказе по р. Герхожансу, 14–15.08.2017 г.	638	–
Прорыв оз. Башкара и катастрофический сель по долине р. Адылсу (Северный Кавказ), в ночь с 31 августа на 1 сентября 2017 г.	594–670	–

Как отмечено на сайте spaceweather.com, в 2021 г. характер активности Солнца начал меняться. Хотя солнечная активность оставалась очень высокой, различные события в эти годы чаще происхоят 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 происходило. Высокие значения скорости солнечного ветра уже не являлись предвестниками опасных проявлений склоновых процессов в различных регионах на Земле.

2024 г. – год природных катастроф во всем мире. В октябре прошлого года NOAA и NASA объявили, что наступил солнечный максимум. Однако, большая часть солнечной активности происходит только в одном из полушарий солнца — южном. Например, солнечная супербуря 10 мая 2024 г. была вызвана гигантским южным солнечным пятном. Возникает вопрос может быть, возможна еще вторая половина солнечного максимума, когда солнечные пятна в достаточном количестве будут и в северном полушарии Солнца. Следует привести в качестве примера график солнечных циклов за XX и XXI вв. (рис. 3).

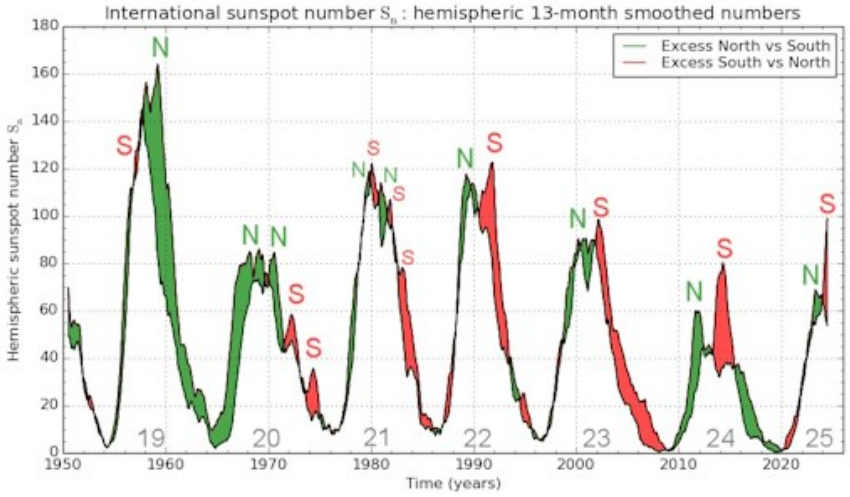


Рис. 3. Международное число солнечных пятен S, полусферическое 13-месячное сглаженное число (speaceweather.com)

Здесь мы видим все семь солнечных циклов Космической эры, многие из них имеют двойной пик, при этом северные солнечные пятна (зеленые) и южные солнечные пятна (красные) достигают своего собственного солнечного максимума с разницей в примерно два года. Это не большая новость. Исследователи давно знают, что два полушария Солнца немного не синхронизированы. Специалисты NASA предполагают, что возможно северный пик все еще впереди. Эта ситуация может повлиять на природные условия всей нашей планеты.

Выводы

В связи с неопределённостью об окончании максимального периода 25 солнечного цикла в ближайшее время в Кабардино-Балкарии можно предположить развитие селевого процесса в бассейнах наиболее крупных рек по различному сценарию. Возможно повторение на уровне либо 2000 и 2017 г., либо 2023 и 2024 г., т.е. аномально жарких.

Росту положительных экстремумов температуры воздуха и других погодных аномалий способствует меняющийся характер циркуляции атмосферы: увеличение повторяемости блокирующих процессов (арктических вторжений, заканчивающихся формированием обширного стационарного антициклона) и выходов южных циклонов.

Необходим мониторинг всех факторов, обуславливающих развитие селевого процесса, в том числе и изменения космической погоды.

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., 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.

Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Л.М. Зелёного, И.С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008, т. 1, 672 с.

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.

Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. Москва: Недра, 1980, 296 с.

Определение зон восприимчивости и оценка селевого риска бассейна реки Гудиалчай на основе данных дистанционного зондирования

С.Г. Мамедов, С.А. Тарихазер

Институт географии имени академика Г.А. Алиева Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджан, kerimov17@gmail.com

Аннотация. В результате освоения земель геосистемы способны претерпевать изменения, от частных до кардинальных. Такой процесс, в свою очередь, способен обострить существующие взаимоотношения между человеческим сообществом и окружающим миром. В результате возникают зоны экологических бедствий, которые приведут к серьезным экологическим и социально-экономическим последствиям. Одним из селеопасных регионов Азербайджана является северо-восточный склон Большого Кавказа. Большой потенциал туризма и курортов привлекает инвесторов и отдыхающих в данный район. Все реки данного региона селеопасные, однако речь пойдет о наиболее селеопасной реке Гудиалчай. 16 апреля 2025 г. в результате интенсивных дождей (в Губинском районе выпало 25 мм (52%) атмосферных осадков) на р. Гудиалчай прошел сель. Был поврежден мост, разрушены дорожные полотна, прервана связь ряда сел с райцентром города Губа, повреждены системы электропередачи и газоснабжения, погибло большое количество домашней птицы. В селе Деллякли Губинского района селевой поток затопил сельское кладбище, а в селе Чичи разрушен жилой дом, жители которого были эвакуированы. Целью данного исследования явилось выявление условий формирования селевых очагов, дать оценку риска восприимчивости территории от них. В статье, исходя из имеющихся данных, особенностей селей и взаимосвязей между склоновыми процессами и факторами, вызывающими сели на р. Гудиалчай, для оценки ее селевой опасности были выбраны шесть факторов, связанных с оползнями, – гипсометрия, углы наклона (крутизна склонов), экспозиция склонов, геологическое строение (литология), среднегодовое количество осадков и землепользование. Для оценки и зонирования селевой опасности был использован метод соотношения частотностей (англ. Frequency Ratio method – FR). В конечном итоге была составлена карта землепользования, анализ которой показал, что в основном селевые очаги приурочены к зонам альпийских и субальпийских лугов, и к зонам со скудной растительностью.

Ключевые слова: *селевой риск, восприимчивость, оползень, дистанционное зондирование, землепользование, антропогенный фактор*

Ссылка для цитирования: Мамедов С.Г., Тарихазер С.А. Определение зон восприимчивости и оценка селевого риска бассейна реки Гудиалчай на основе данных дистанционного зондирования. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 267–282.

Determination of susceptibility zones and assessment of debris flow risk in the Gudiyalchay river basin based on remote sensing data

S.G. Mammadov, 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. In the process of land use, geosystems can be partially or completely transformed, and this can ultimately lead to an aggravation of human interaction with the environment. As a result, zones of environmental disasters can arise, which will lead to serious environmental and socio-economic consequences. One of the debris flow-hazardous regions of the Azerbaijan is the northeastern slope of the Greater Caucasus. The great potential of tourism and resorts attracts investors and vacationers to this area. All rivers in the region are debris flow- hazardous, but we will talk about the most debris flow-hazardous of them – the Gudiyalchay River. On April 16, 2025, as a result of intense rains (25 mm (52%) of precipitation fell in the Guba district), a debris flow occurred on the Gudiyalchay River. A bridge was damaged, road surfaces were destroyed, communication between a number of villages and the district center of the city of Guba was interrupted, power and gas transmission systems were damaged, and a large number of poultry died. In the village of Dellyakli, Guba district, a debris flow flooded a rural cemetery, and in the village of Chichi, a residential building was destroyed, the residents of which were evacuated. The aim of this study was to identify the conditions for the formation of debris flow centers and to assess the risk of the territory's susceptibility to them. In the article, based on the available data, debris flow characteristics and the relationships between slope processes and factors causing debris flows on the Gudiyalchay River, six factors associated with landslides were selected to assess its debris flow hazard: hypsometry, slope angles (steepness of slopes), slope exposure, geological structure (lithology), average annual precipitation and land use. The frequency ratio method (FR) was used to assess and zone the debris flow hazard. Ultimately, a land use map was compiled, the analysis of which showed that debris flow centers are mainly confined to alpine and subalpine meadow zones and to zones with sparse vegetation.

***Key words**: debris flow risk, susceptibility, landslide, remote sensing, land use, anthropogenic factor*

Cite of this article: Mammadov S.G., Tarikhazer S.A. Determination of susceptibility zones and assessment of debris flow risk in the Gudiyalchay river basin based on remote sensing data. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 267–282.

Введение

За последние два десятилетия около 90% крупных катастроф в мире были вызваны природными явлениями. За этот период было выявлено 6457 стихийных бедствий, в результате которых погибли 606 тыс. чел., а 4,1 млрд чел. получили ранения, остались без крова или нуждаются в помощи. Согласно отчету пресс-центра ООН «Человеческие потери от стихийных бедствий», наибольшее количество катастроф приходится на пять стран – США, Китай, Индию, Филиппины и Индонезию.

В Азербайджане начинает развиваться «осознание бедствий» и предпринимаются важные шаги по снижению ущерба, наносимого стихийными бедствиями. Это хорошо известный факт. В Азербайджане были выявлены и оценены риски, разработаны цели, основанные на рисках. Кроме того, внедряются новые методы для устранения или уменьшения их воздействия. Указ № 2198 от 23 мая 2007 г. Президента Азербайджанской Республики Ильхама Алиева «Об утверждении Концепции национальной безопасности Азербайджанской Республики» законодательно обязывает всю страну проводить исследования по снижению урона от природных катастроф.

Постоянный представитель Генерального секретаря ООН Маргарет Вальстрем сказала, что «Погода и климат являются основными факторами, вызывающими стихийные бедствия, и этот доклад показывает, что мир платит за это самую дорогую цену – человеческие жизни». По оценкам Секретариата Международной стратегии ООН по уменьшению опасности стихийных бедствий, эти потери составляют 250–300 млрд $ США в год.

Изменение климата увеличивает частоту и интенсивность суровых погодных явлений, и если экономические стимулы для создания и развития опасных зон будут перевешивать предполагаемый риск бедствий, то бедствия останутся одним из главных препятствий на пути устойчивого развития. По оценкам ООН, к 2030 г. в мире будут происходить примерно 560 природных катастроф в год.

Азербайджан прилагает все усилия для решения климатических проблем. Доказательством тому служит прошедшая с 11 по 22 ноября 2024 г. в городе Баку Саммит стран участников рамочной конференции по климату COP-29.

Средства массовой информации Азербайджана в последние годы часто сообщают о проявлении селей – одного из самых опасных явлений, сравнимых с такими стихийными бедствиями, как землетрясения и тайфуны.

Наиболее селеопасным регионом Азербайджана является территория Большого Кавказа [*Ализаде и др., 2017*]. Большой потенциал туризма и курортов (горно-лыжный комплекс “Tufandag Mountain Resort”, “Macara Sheki City Hotel”, зимне-летний туристический комплекс “Shahdag Mountain Resort”, принявший 280 тыс. людей в 2025 г., что на 35% больше, чем в 2023 г.; “Macara Village Resort”, “Guba Palace Hotel” и мн. др.) привлекает инвесторов и отдыхающих в селеопасные районы.

Сели – едва ли не самый важный фактор воздействия для нашей страны. В труднодоступных горных районах расширяются населенные пункты, прокладываются автомобильные дороги и пр. Коварство селей, проявляющееся в их связи с другими геологическими процессами, делает их важной и порой очень сложной проблемой при строительстве. Эта проблема требует разработки противоселевых мероприятий, что приводит к дополнительным финансовым затратам [*Мамедов, Тарихазер, 2023; Тарихазер, Мамедов, Гамидова, 2024*].

Приведем несколько примеров проявления наиболее опасных селей, прошедших только на территории азербайджанской части Большого Кавказа в 2024 г. 24 апреля 2024 г. сель на р. Пирсаатчай Шамахинского района повредил дорожное полотно Шамаха – Пиргулу, в сел. Чухурюрд поток унес 20 пчелиных улей. 20 мая 2024 г. селевой поток на р. Талачай повредил 20 жилых построек в сел. III-Тала Загатальского района, погибло большое число домашнего скота и птицы. 14 июня 2024 г. селевой поток на р. Пирсаатчай Шамахинского района разрушил дорожное полотно, ведущее в сс. Арчиман, Талышнуру, Демирчи, Сафали и Зарат Хейбари, были снесены интернет-, телефонные и электрические столбы. 7 июля 2024 г. селевой поток на р. Агсучай Агсуинского района разрушил мост, были затоплены подвалы жилых домов, повалены деревья. 27 июля 2024 г. сель на р. Айричай разрушил дорожное полотно сел. Гудула Шекинского района, были затоплены дворы и личные хозяйства ряда домов, ореховые сады, погибла домашняя птица.

Примеров тому множество. По данным Министерства Экологии и Природных ресурсов в 2024 г. в Азербайджане зарегистрировано 110 селевых потоков. Ежегодно сели наносят ущерб экономике Азербайджана в среднем 1,3–1,5 млрд манат (765–882 млн $) [*Пашаев, 2018*].

Цель исследования

По данным Махмудова Р.Н. (2008) на северо-восточном склоне Большого Кавказа 12 рек селеопасные, вблизи которых расположено 154 населенных пункта с населением свыше 250 тыс. человек [*Пашаев, 2018*].

Целью данной работы является выявление основных факторов развития и распространения селевых очагов в бассейне одной из селеопасных рек северо-восточного склона Большого Кавказа – р. Гудиалчай, условий их формирования, дать оценку риска восприимчивости территории от них.

В фонде Института Географии им. акад. Г.А. Алиева имеется обширный объем информации, включающий в себя сведения о распространении селевых процессов на северо-восточном склоне Большого Кавказа [*Марданов, 1965; Будагов, 1973, 1993; Тарихазер, 1997; Мамедов, 2007; Махмудов, 2008; Алекперова, 2018, 2024; Tarikhazer,*

Kuchinskaya, Karimova, Alakbarova, 2021 и др.]. Однако в свете новых факторов, а именно того, что в последнее время ведется интенсивная эксплуатация русла р. Гудиалчай – незаконная добыча песка и гравия. В результате русло реки углубилось на 30 м, что привело к многочисленным развитиям в береговых зонах оползней и обвалов (рис. 1).

Рис. 1. Последствия добычи песка и гравия в русле р. Гудиалчай

Объектом исследования являются опасные экзогенные процессы (оползни, обвалы), развитые в бассейне селеносной р. Гудиалчай (рис. 3). Считаем, что оценка развития и распространения опасных экзогенных процессов вблизи речного бассейна позволит решить широкий круг экономических и практических задач, снизить до минимума серьезные последствия. Следовательно, наши исследования, которые впервые проведены в Азербайджане, уже сегодня весьма важны, т.к. позволят спрогнозировать опасные процессы и минимизировать урон от них, а также применить эти результаты для рационального использования земель.

Характеристика района исследования

Для северо-восточного склона Большого Кавказ атипично ориентация орографических элементов, следующая за Водораздельным поднятием. Среди них выделяется Боковой хребет – он является наиболее масштабным. Именно он обуславливает значительные различия в степени интенсивности водных эрозионных процессов.

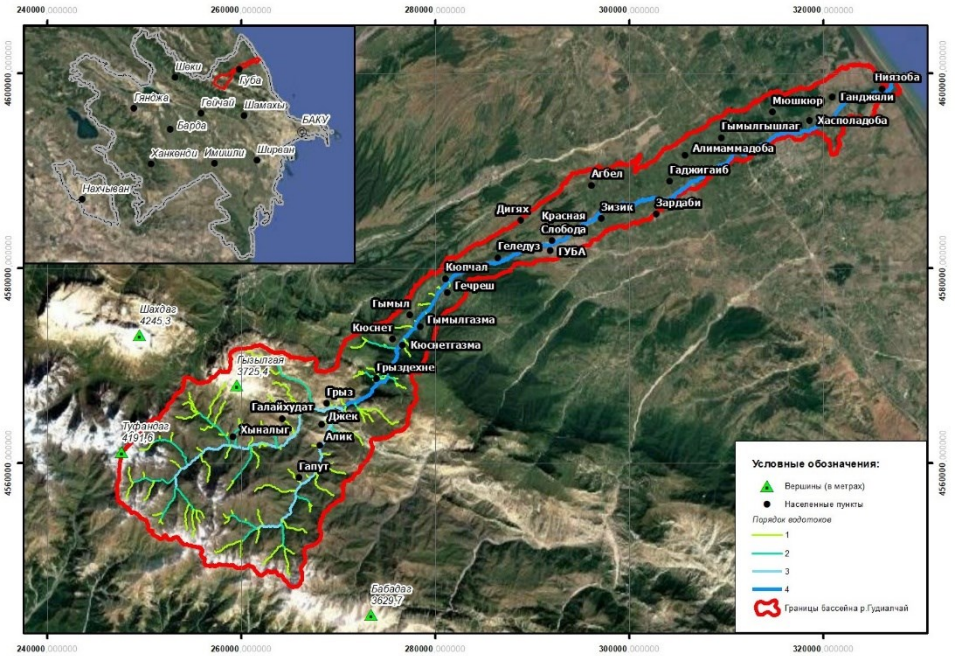


Рис. 2. Географическое расположение бассейна р. Гудиалчай

С этого хребта берут начало свои истоки Агчай, Гуручай, Джагадугчай, Шабранчай, Девечичай и прочие реки. Между Водораздельным и Боковым хребтами находятся межгорные котловины: Хыналыгская, Рустовская, Шахнабадская, Халтанская, Гильгильчайская и ряд других.

Следующий значительный горный массив – это Гайтар-Годжинский, изрезанный с правой стороны притоками р. Гильгильчай. В этой области находится Ерфинский хребет, определяющий водораздел между рр. Гарачай и Вельвеличай. Предгорья представлены Гусарской наклонной равниной, которая восточнее переходит в Самур-Девечинскую низменность. При выходе из горных районов все реки формируют конусы выноса, которые, соединяясь, образуют общий шлейф.

Северо-восточный склон Большого Кавказа сформирован осадочными отложениями юрского, мелового, третичного и четвертичного периодов (рис. 3).

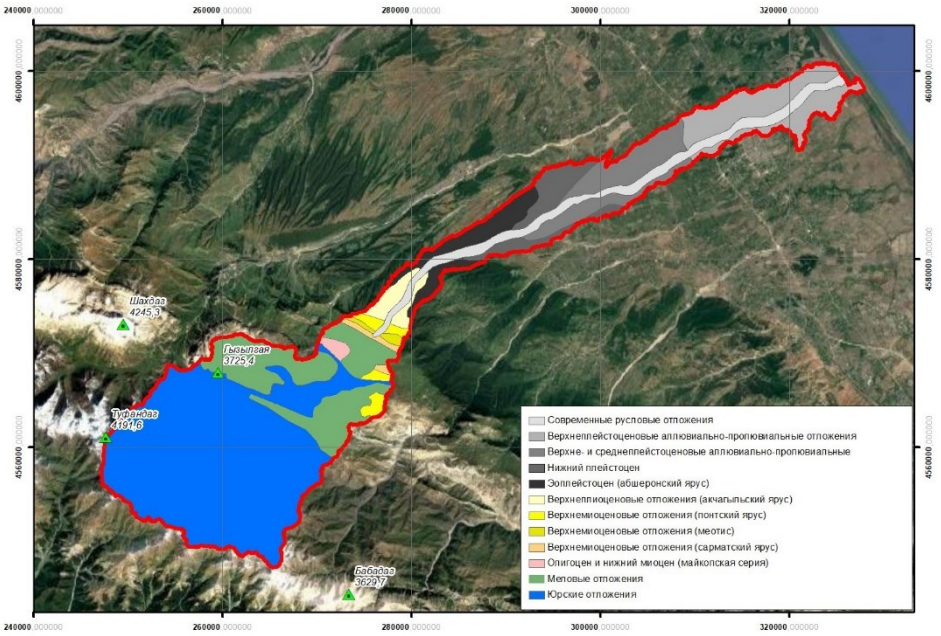


Рис. 3. Геологическое строение бассейна р. Гудиалчай

В окрестностях вершин Базардюзю (4466 м) и Туфандаг (4191 м) в бассейнах рек Гусарчай, Гудиалчай и других преобладают известняки, доломиты, глины, глинистые сланцы, песчаники, мергели и конгломераты. Третичные отложения наиболее характерны для среднегорного и частично низкогорного поясов, где они представлены глинами, песчаниками, галечниками и суглинками. В верховьях рр. Гусарчай, Гудиалчай, Агчай, Гарачай и Вельвеличай наблюдаются верхнечетвертичные ледниковые отложения. В высокогорной зоне также широко распространены осыпи, обвалы и россыпи.

Рельеф северо-восточного склона Большого Кавказа отличается высокой изрезанностью и подвержен активному разрушению [*Будагов, 1993*]. В формировании ландшафта важную роль играют внешние процессы. Тем не менее, под влиянием современных тектонических изменений, процессы эрозии и денудации значительно активизируются. О проявлении современных тектонических подвижек свидетельствуют особенности речных долин, террас и других форм рельефа.

К актуальным экзогенным рельефообразующим факторам причисляют ледниковую деятельность, физическое выветривание, эрозионные процессы, обвалы, россыпи, осыпи, оползневые явления, селевые потоки и иные процессы. В верхних частях рек, где наблюдаются резкие перепады суточных температур, практически полное отсутствие растительности, высокая трещиноватость горных пород и другие факторы, поверхности водосборов подвергаются активному разрушению. Следствием этого становится накопление на склонах речных долин значительного объёма

крупнообломочного материала, представленного россыпями, осыпями и обвалами. При обильных осадках и интенсивном таянии снега этот материал перемещается в речные долины, что обусловливает формирование мощных селевых потоков (рис. 4).

Рис. 4. Денудационные процессы на склонах гор

На северных склонах Бокового поднятия фиксируются оползни, провоцируемые несколькими факторами: составом горных пород, присутствием тектонических разломов, избыточным увлажнением пород атмосферными осадками, влиянием грунтовых вод, крутизной склонов, сейсмичностью и прочими явлениями. Наиболее часто оползни наблюдаются в бассейнах рек Гарачай, Агчай, Вельвеличай, Гильгильчай и Атачай.

На северо-восточном склоне Большого Кавказа, расположенном на высоте в 1000 м. над уровнем моря, среднегодовое количество осадков равняется 710 мм. Если подняться выше, то показатель снижается до 590 мм. Однако, начиная с отметки в 2500 м., годовое количество атмосферных осадков снова начинает расти, достигая значений от 1000 до 1200 мм и более на высотах свыше 3000 метров. Важной особенностью является наличие двух пиков осадков в течение года – весной (май-июнь) и осенью (сентябрь).

При сопоставлении годового цикла атмосферных осадков с гидрологическим режимом рек, а также с характером стока взвешенных наносов, обнаруживается следующая взаимосвязь: наблюдается общность в их сезонном распределении; в весенний период на реках фиксируется повышение водоотдачи, что, в свою очередь, приводит к возрастанию расходов взвешенных наносов.

На северо-восточном склоне Большого Кавказа реки, истоки которых находятся на Водораздельном и Боковом хребтах, демонстрируют различия по целому ряду параметров. Среди них — водный режим, размеры речных бассейнов, объемы переносимых наносов, а также морфология речных долин. Эти различия обусловлены, в частности, пестротой литологического состава горных пород, формирующих поверхность бассейнов, и спецификой почвенно-растительного покрова [*Tarikhazer, Kuchinskaya, Karimova, 2022*].

С.Г. Рустамов (1960) предложил следующую классификацию рек рассматриваемой территории, основанную на их водном режиме:

1. Реки с паводковым режимом, характерным для весны и лета. К этой группе относятся реки, берущие начало на Водораздельном хребте, такие как Гусарчай, Гудиалчай, Гарачай, Агчай и им подобные. Основной источник питанияэ тих рек - талые снеговые воды (до 40%) и подземные воды (до 50%).
2. В зону паводков включены реки, берущие начало на склонах Бокового хребта. Среди них – Девечичай, Шабранчай, Атачай и другие. Основной источник их питания – дождевые осадки, доля которых может достигать 50%.

Почвенно-растительный покров играет ключевую роль в формировании интенсивности эрозионных процессов, связанных с водой. Как и прочие физико-географические элементы, почвы подчинены правилу вертикальной зональности. Выше 3800–3900 м. царствует зона вечного снега, и, соответственно, почвы отсутствуют. На высотах от 3000 м. и выше простирается скалистая зона, широко представленная россыпями и осыпями, которые являются источниками наносов, питающими реки.

В высокогорье преобладают горно-луговые, торфянистые и торфяно-дерновые типы почв. В субальпийском поясе сформировались горно-луговые дерновые и горно-луговые светло-серые почвы. Эти почвы характеризуются плотной дерниной и низкой подверженностью эрозии. Здесь процветает низкорослая злаковая растительность, иногда встречаются кусты можжевельника. Эти леса играют огромную почвозащитную роль и препятствуют развитию эрозионных процессов.

В пределах среднегорного пояса формируются бурые горно-лесные почвы, являющиеся основой для роста дуба, бука, граба и прочих широколиственных пород. Указанные лесные массивы выполняют важнейшую функцию по защите почвенного покрова, существенно снижая вероятность эрозионных явлений.

Низкогорный пояс характеризуется степными почвами, такими как горный чернозем, каштановые и прочие. Эти почвы преимущественно распространены на территории Гусарской наклонной равнины, а также частично в Гонагкендском районе. Здесь преобладает разнотравная растительность со злаками.

Из представленного материала логично вытекает, что специфика речных бассейнов северо-восточного склона Большого Кавказа такова: значительное количество осадков, выпадающих из атмосферы, аккумулируется в мощный поверхностный сток. В совокупности с высокой крутизной склонов это провоцирует формирование селевых потоков. Важно также отметить, что наличие на склонах речных долин обвально-оползневого материала напрямую влияет на объемы твердых пород, переносимых реками (рис. 6). Стоит подчеркнуть, что селевые потоки – грязекаменные образования – представляют собой распространенное явление практически во всех высотных поясах северо-восточного склона Большого Кавказа.

Материалы и методы исследования

Для оценки и зонирования селевой опасности нами использовался метод соотношения частотностей (англ. Frequency Ratio method – FR).

Модель Frequency Ratio (FR) широко используется при прогнозировании геолого-геоморфологических процессов, впервые предложен Lee, Talib (2005). FR – это полезный инструмент геопространственной оценки, который прогнозируют вероятности распределения возникновение и ненаступление геологических процессов для каждого класса связанных факторов.

Классы «взвешивают» исходя из отношения наблюдаемых оползней ко всей исследуемой территории.

FR – один из лучших геопространственных инструментов оценки для определения пространственной корреляции между данными инвентаризации и классом связанных факторов. Количество или процент данных инвентаризации в каждом классе указывает на важность корреляция с развитием геологических процессов. FR показывает корреляцию между местоположениями геологических процессов и факторами, влияющими на возникновение процессов в данной области. Факторы развития процессов можно «взвесить», учитывая соотношение наблюдаемых процессов на рассматриваемой территории. Корреляцию между факторами классов можно найти через FR, который является довольно полезным инструментом геопространственной оценки.

Результаты исследования

Река Гудиалчай является одной из крупных и селеопасных рек северо-восточного склона Большого Кавказа. Длина реки 101 км, площадь бассейна 768 км^2. Берет начало

со склонов г. Туфандаг на высоте 4180 м, средняя высота бассейна 2053 м. Истоком реки являются талые воды снегов и дождевые воды со склонов гор Туфандаг и Хыналыг, которые дают начало небольшим рекам как Агчай и Гарабурга, а те, в свою очередь, ниже селения Джек сливаются и образуют р. Гудиалчай. Длина речной сети составляет 335,2 км, густота речной сети – 0,444 км/км^2.

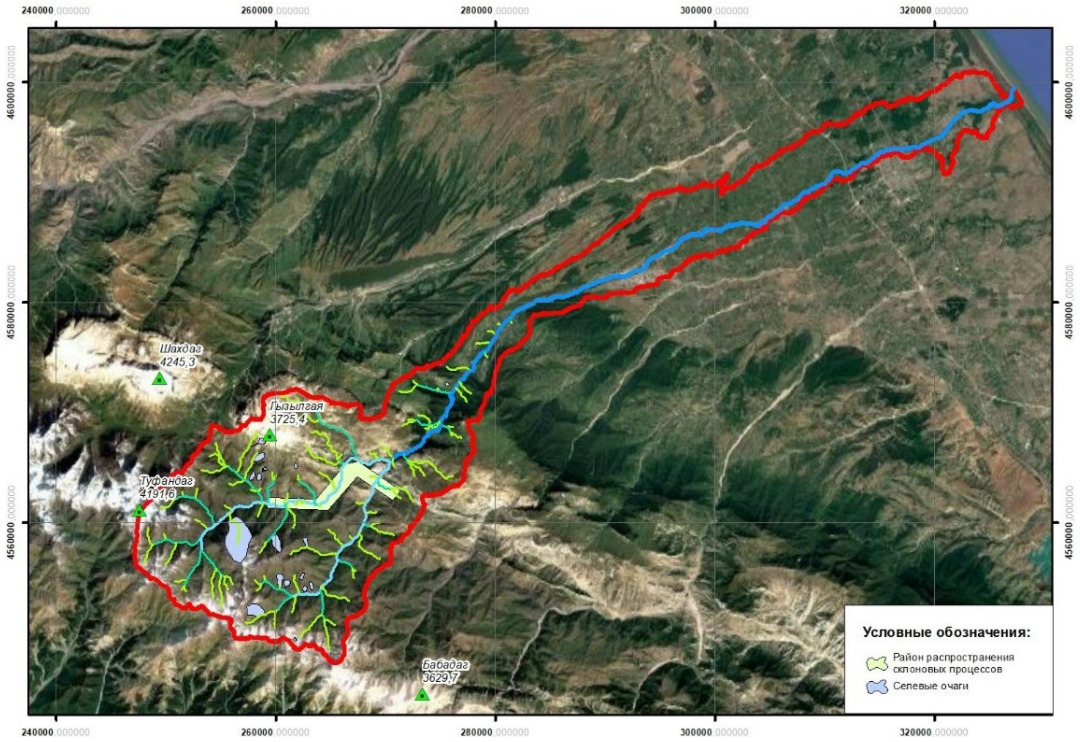


Рис. 5. Селевые очаги в бассейне р. Гудиалчай

В верховье река протекает в глубоком и узком русле с крутыми склонами. В среднем течении реки развиты многочисленные обвальные, осыпные, оползневые процессы, которые обильно питают реку мелкоземом (рис. 6, таблица 1).

Затем река в районе селения Гачреш выходит на Гусарскую наклонную равнину, где течет в широкой ящикообразной долине. На правом берегу реки развиты многочисленные террасы. К примеру, город Губа находится в пределах широкой террасы. Ниже города Губа на аллювиально-пролювиальной равнине река делится на ряд рукавов, пересекающие Самур-Девечинскую низменность и впадает в Каспийское море. В среднем в бассейне р. Гудиалчай выпадает 607 мм/год атмосферных осадков (рис. 7).

Рис. 6. Оползне-обвальные процессы в долине р. Гудиалчай

Таблица 1. Даты прохождения наиболее опасных селевых потоков на р. Гудиалчай Большого Кавказа за 2008–2024 гг.

№	Дата прохождения селя	Последствия селя
1	07–08.07.2008 г.	Нанесен материальный ущерб домам и социальным объектам города Хачмаз
2	04.03.2008 г	Повреждено 24 дома. Погиб 1 человек
3	19.07.2009 г.	Повреждено 4 социальных объекта и дома сел. Тюлякяран Губинского района
4	23.04.2013 г.	Селевые потоки перекрыли участок трассы Баку – государственная граница с Россией вблизи с. Владимировка. Движение транспорта по трассе ограничено
5	29.08.2013 г.	Разрушено около 10 домов сел. Алексеевка Губинского района. Нанесен ущерб более 100 домов, находящихся по ул. Вагифа сел. Красная Слобода
6	31.10.2014 г.	Размыты 36 км и 38 км автодороги Губа-Хыналыг Губинского района
7	17.04.2016 г.	Разрушен мост в Губинском районе
8	20.05.2016 г.	Разрушен мост в сел. Тюлер Губинского района
9	01–02.09.2016 г.	Нанесен ущерб около 10 селам Губинского района. Сель смыл опоры линий электропередачи в сел. Красная Слобода. Разрушен участок дороги Губа-Хыналыг. Сель разрушил почти 30 столбов телекоммуникации, в результате была прервана связь с 20 населенными пунктами района. Наибольший урон нанесен АТС, функционирующим в селах по направлению Гонагкент-Сохуб, Купчал-Гечреш, Заргова-Чичи и Хыналыг
10	07.05.2020 г.	Селевые потоки разрушили мост в сел. Ханагях Губинского района
11	16.07.2020 г.	Селевые потоки разрушили дорожные покрытия, затопили сады и огороды местных жителей
12	31.07.2022 г.	Сель в сел. Грыз Губинского района разрушил деревья, линия электропередачи, затопил дома
13	16.06.2023 г.	Селевой поток разрушил 50 и 57 км автомобильного полотна Губа-Хыналыг
14	22.07.2023 г.	Сел нанес ущерб земельным и хозяйственным угодьям жителей Губинского района. Смыли бетонные опоры моста
15	13.05.2024 г.	Разрушен мост через р. Гудиалчай сел. Гырыз Губинского района
16	16.06.2024 г.	В сел. Ерфи Губинского района сель нанес серьезный ущерб ряду жилых домов. Повреждены дорожные полотна, разрушен мост
17	21.06.2024 г.	Селевые воды затопила близлежащие населенные пункты, территорию отеля, расположенного на трассе Губа - Хыналыг. Сель унес автомобиль. Пассажиры были спасены
18	27.07.2024 г.	Сель разрушил дорожное полотно сел. Кюпчалгышлаг Губинского района. Разрушены высоковольтные линии электропередачи
19	18.10.2024 г.	В сел. Джими Губинского района селевой поток унес машину с пассажирами. Люди были спасены

По материалам С.А. Тарихазер (2020, 2024).

Среднегодовой расход воды 8,5 м^3/сек (в многоводный период этот показатель составляет 15,6 м^3/сек, а в маловодный период – 5 м^3/сек), годовой сток составляет 270 106 м^3. Главным в питании реки выступают талые ледниковые и снеговые воды, затем грунтовые воды. Воды реки широко используются в поливе земель Губа-Хачмазского экономического района, а также при заполнении Самур-Абшеронского канала.

Климатические условия, необходимые для формирования селевых очагов в исследуемом бассейне, характеризуются тремя основными чертами. К ним относятся

значительные суточные колебания температуры атмосферы и почвы, способствующие физическому выветриванию, наличие продолжительных засух в теплые месяцы года и, как правило, высокая интенсивность осадков, предшествующих сходу селей и оползней. Наибольшее количество атмосферных осадков выпадает в высотах от 2400 до 2800 м. Большая часть из них является ливневыми осадками и ограничена склонами южной экспозиции, которые покрыты небольшими холмами, гравийными и сыпучими отложениями. Таким образом, в районе исследований роль ливневых осадков очень важна (таблица 2).

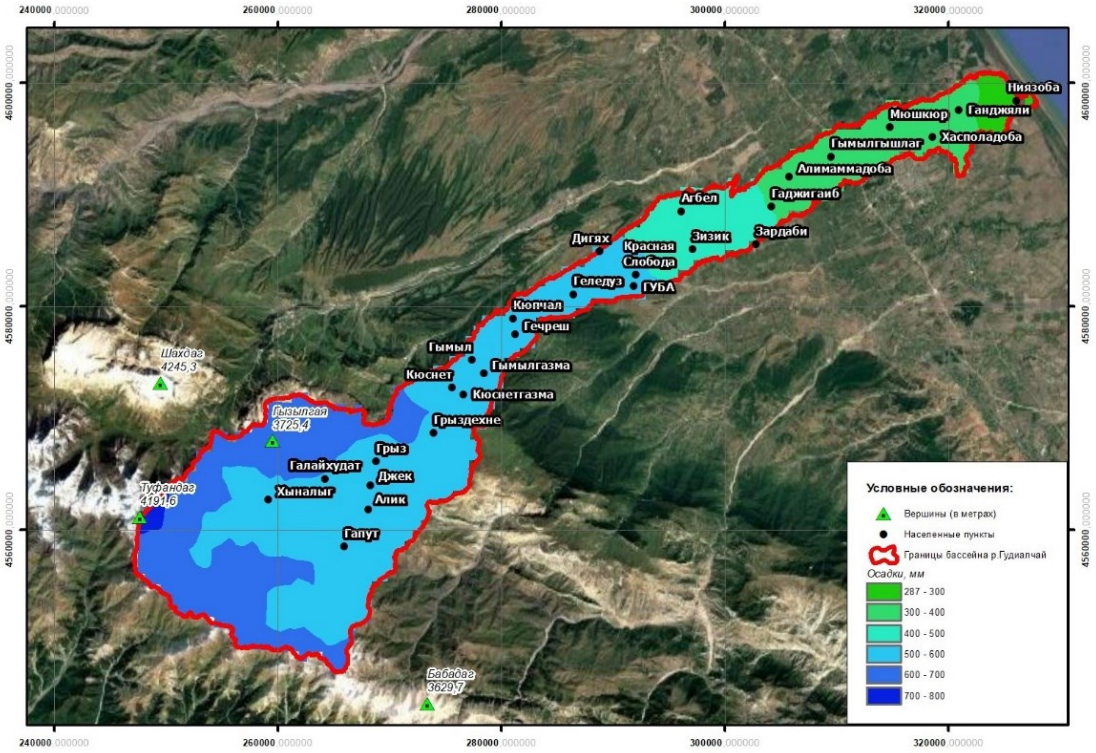


Рис. 7. Распределение годового количества атмосферных осадков в бассейне р. Гудиалчай

Таблица 2. Распределение количества осадков в бассейне р. Гудиалчай

Населенные пункты	Высота, м	Месяцы											
		I	*II*	*III*	*IV*	*V*	*VI*	*VII*	*VIII*	*IX*	*X*	*XI*	*XII*
Губа	588	31	30	38	48	55	48	30	34	62	64	47	36
Грыз	2006	18	25	41	68	85	91	57	54	48	49	29	22

В данном исследовании, исходя из имеющихся данных, особенностей селей и взаимосвязей между склоновыми процессами и факторами, вызывающими сели, для оценки селевой опасности были выбраны шесть факторов, связанных с оползнями, – гипсометрия, углы наклона (крутизна склонов), экспозиция склонов, геологическое строение (литология), среднегодовое количество осадков и землепользование.

Карты гипсометрии, крутизны и экспозиции склонов были составлены с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) с разрешением 12,5 м (ASF Data Search). Карта среднемесячного количества осадков была составлена путем интерполяции данных о количестве осадков в близлежащих населенных пунктах и данных с глобальной базы (CHELSA, Climatologies at High Resolution for Earth's Land Surface Areas). Карта землепользования (LULC-Land use and land cover map) была составлена на основе обучающей классификации в программной среде ArcGIS. Данные о геологическом строении (литологии) и тектонические нарушения были оцифрованы с геологической карты Губа-Хачмазского экономического района масштаба 1:200 000.

Гипсометрия влияет через климатические факторы, так как с изменением высоты меняются термический режим, атмосферное давление и влажность воздуха (рис. 8). Как видно из составленной карты большую площадь в пределах бассейна занимают территории, расположенные на абсолютной высоте более 1000 м (66% территории бассейна).

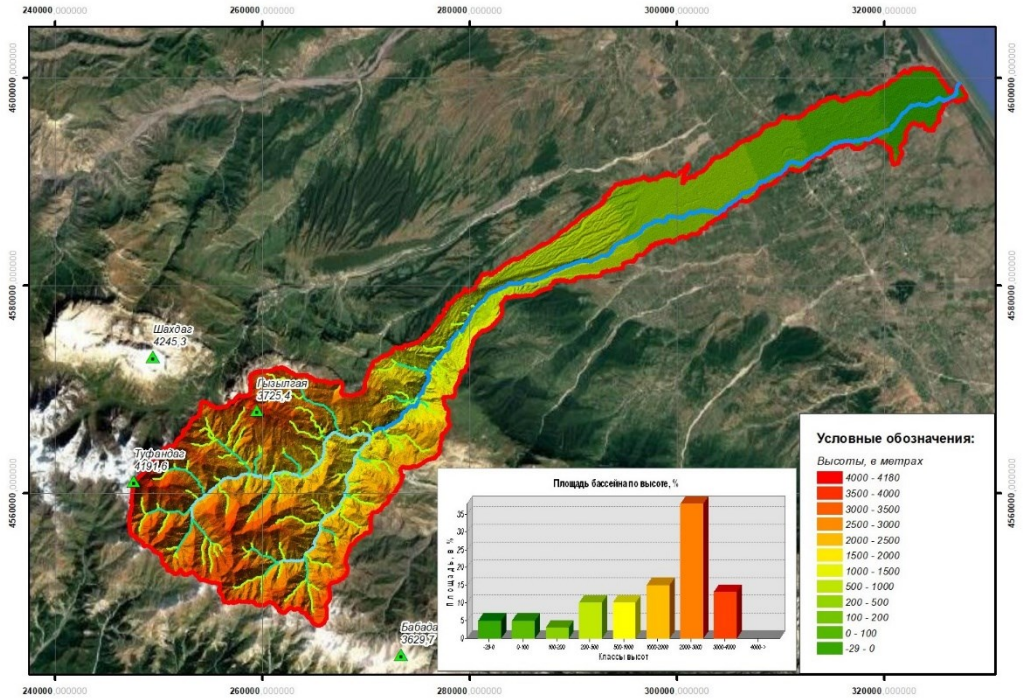


Рис. 8. Гипсометрическая карта бассейна р. Гудиалчай

Угол наклона считается одним из основных причинных факторов с явлений и широко используется при картировании подверженности оползням; этот параметр был получен на основе ЦМР с помощью инструментов пространственного анализа (рис. 9).

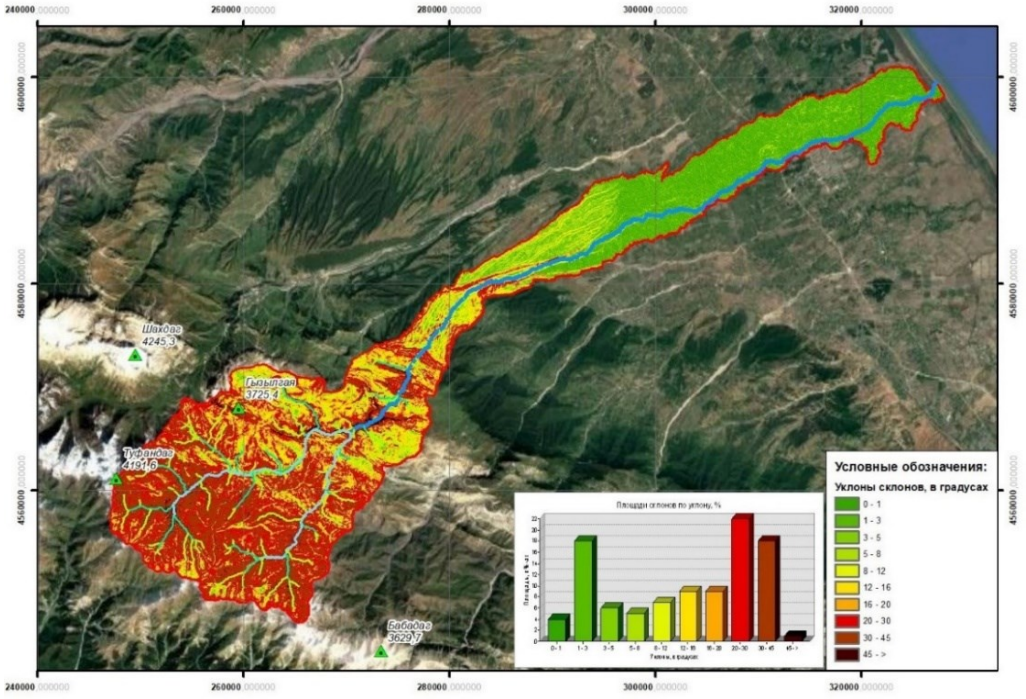


Рис. 9. Карта углов наклона бассейна р. Гудиалчай

Анализ данных цифровой модели рельефа показывает, что большую площадь в пределах бассейна занимают склоны крутизной 20–30° (22%).

Экспозиция является наиболее важным источником изменения свойств грунта. Экспозиция определяет направление склона. Она измеряется по часовой стрелке в градусах 0 (к северу) до 360 (к северу снова), образуя полный круг. Плоские участки имеют значение -1.

Влияние экспозиции склона отражается в различиях в температуре и влажности между полярным и экваториальным воздействием. Таким образом, склоны, обращенные к югу и западу теплее, чем склоны - к востоку и северу. С другой стороны, южные склоны в горном районе позволяют определить места, где снег может таять в первую очередь.

Различия в воздействии по склонам определяют изменения свойств почвы в результате их воздействия на микроклиматические и вегетационные условия. Экспозиция склонов была разделена на девять категорий: плоские поверхности (–1°), северная (0°–22,5°; 337,5°–360°), северо-восточная (22,5°–67,5°), восточная (67,5°–112,5°), юго-восточная (112,5°–57,5°), южная (157,5°–202,5°), юго-западная (202,5°–247,5°), западная (247,5°–292,5°–292,5°–337,5°), северо-западная (292,5°–337,5°) (рис. 10). В пределах бассейна большую площадь занимают склоны преимущественно северной экспозиции (41%).

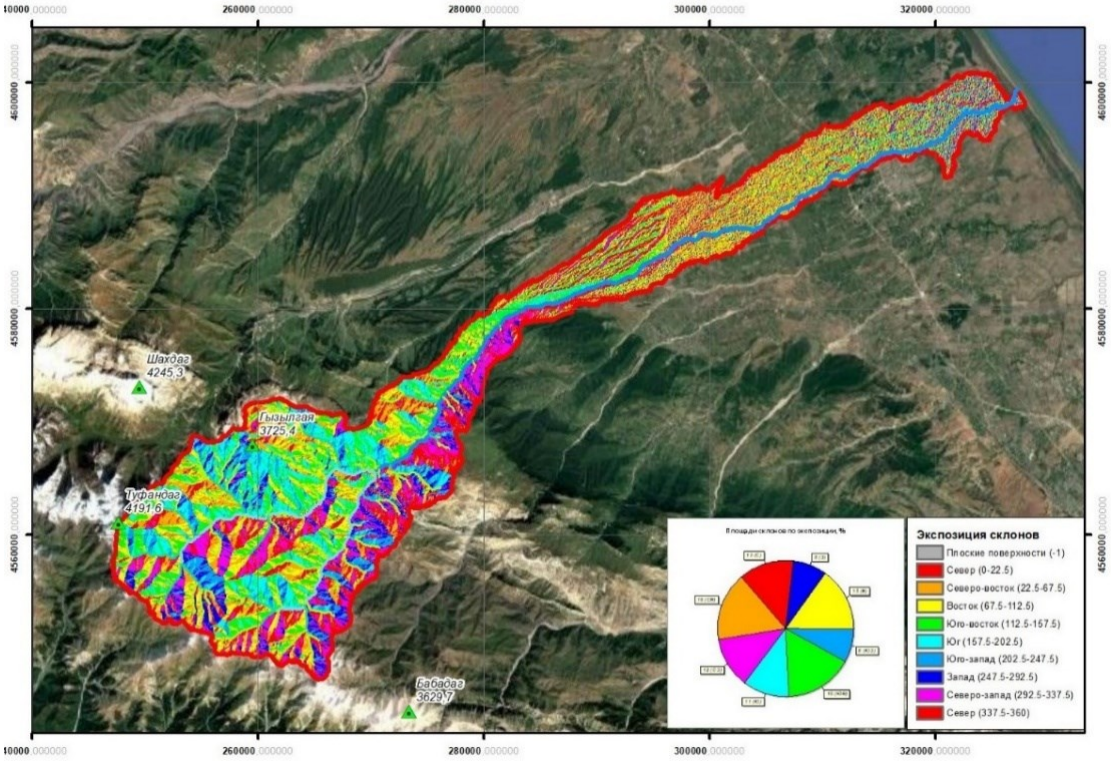


Рис. 10. Карта экспозиции склонов бассейна р. Гудиалчай

Карта землепользования показывает различные классы физической поверхности земли, например леса, луга, пашни, озера, водно-болотные угодья (рис. 11, 12). Половину площади бассейна занимают луга. Анализ карты показывает, что в основном селевые очаги приурочены к зонам альпийских и субальпийских лугов, и к зонам со скудной растительностью.

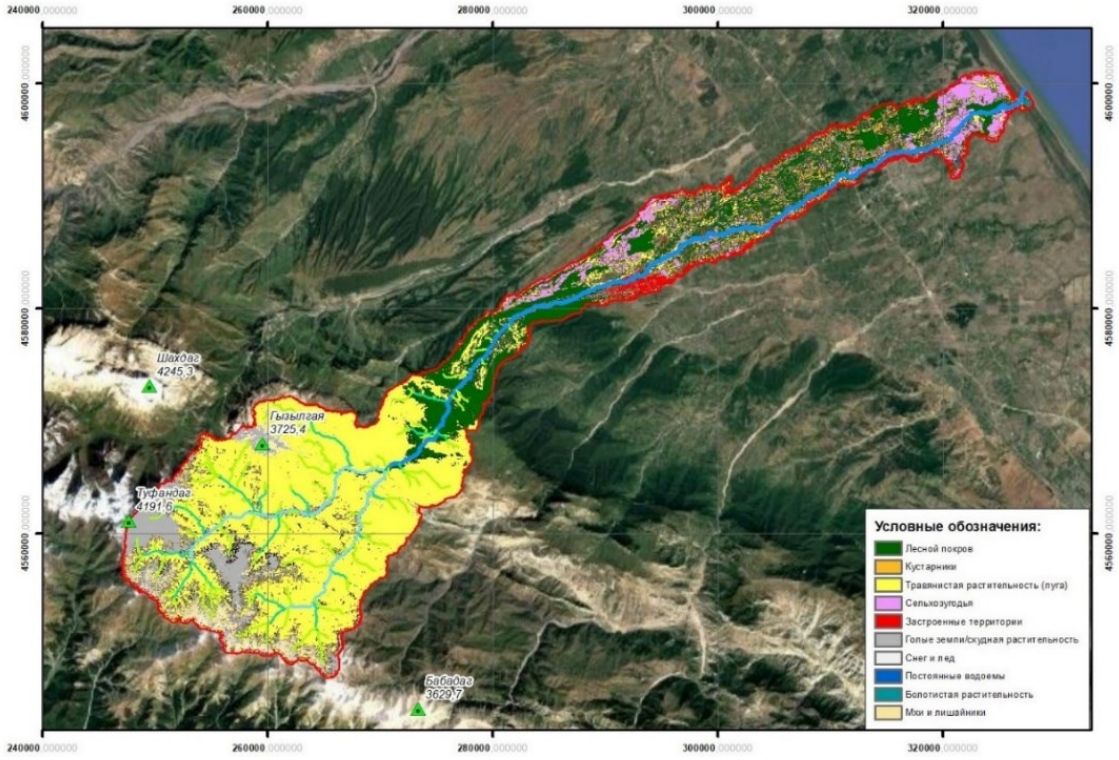


Рис. 11. Карта типов землепользования в бассейне р. Гудиалчай

Рис. 12. Распределение типов землепользования в бассейне р. Гудиалчай

В данной статье была проанализирована взаимосвязь между факторами, вызывающими сели и фактическим возникновением селей в исследуемом бассейне. Были вычислены соотношения частотностей и значения веса классов каждого фактора (таблица 3).

Таблица 3. Анализ связи между факторами, вызывающими оползни, и распределением оползней

Факторы, влияющие на селевую опасность	Классы	Площадь класса, км^2	Частота класса, N	Площадь селевых очагов, км^2	Частота селевых очагов в пределах класса, P	Вес класса фактора, P/N
Гипсометрия	-29–0	35,98	0,047	0,00	0,000	0,000
	0–100	38,67	0,050	0,00	0,000	0,000
	100–200	26,46	0,034	0,00	0,000	0,000
	200–500	78,19	0,102	0,00	0,000	0,000
	500–1000	79,84	0,104	0,00	0,000	0,000
	1000–2000	114,14	0,148	14,17	0,483	3,252
	2000–3000	293,02	0,381	10,50	0,358	0,939
	3000–4000	102,10	0,133	4,67	0,159	1,199
	4000->	0,23	0,000	0,00	0,000	0,000
Уклон	0–1	29,42	0,039	0,35	0,012	0,308
	1–3	133,87	0,176	1,71	0,058	0,331
	3–5	49,39	0,065	0,88	0,030	0,465
	5–8	39,30	0,052	1,09	0,037	0,717
	8–12	56,75	0,075	2,22	0,076	1,015
	12-16	69,29	0,091	3,06	0,104	1,145
	16–20	72,11	0,095	3,48	0,119	1,254
	20–30	164,65	0,216	8,00	0,273	1,261
	30–45	136,48	0,179	8,19	0,279	1,557
	45->	10,44	0,014	0,37	0,013	0,926
Экспозиция	С	99,84	0,133	4,54	0,155	1,160
	СВ	118,85	0,159	4,12	0,140	0,885
	В	117,93	0,157	4,27	0,145	0,924
	ЮВ	123,91	0,165	3,69	0,126	0,760
	Ю	82,94	0,111	3,01	0,102	0,926
	ЮЗ	57,91	0,077	3,56	0,121	1,568
	З	57,18	0,076	5,98	0,204	2,671
	СЗ	90,58	0,121	0,00	0,000	0,000
Геологическое строение*	1	52,07	0,066	0,00	0,000	0,000
	2	91,55	0,116	0,00	0,000	0,000
	3	59,25	0,075	0,00	0,000	0,000
	4	37,06	0,047	0,00	0,000	0,000
	5	39,78	0,051	0,00	0,000	0,000
	6	16,19	0,021	0,00	0,000	0,000
	7	12,69	0,016	0,00	0,000	0,000
	8	3,76	0,005	0,07	0,002	0,476
	9	5,23	0,007	0,00	0,000	0,000
	10	4,59	0,006	0,00	0,000	0,000
	11	110,31	0,140	3,54	0,121	0,860
	12	354,61	0,451	25,77	0,877	1,947
	287–300	44,65	0,058	0,00	0,000	0,000

Факторы, влияющие на селевую опасность	Классы	Площадь класса, км^2	Частота класса, N	Площадь селевых очагов, км^2	Частота селевых очагов в пределах класса, P	Вес класса фактора, P/N
Атмосферные осадки, мм	300–400	98,22	0,128	0,00	0,000	0,000
	400–500	71,44	0,093	0,00	0,000	0,000
	500–600	346,87	0,452	23,96	0,816	0,000
	600–700	201,26	0,262	5,41	0,184	0,000
	700–800	5,50	0,007	0,00	0,000	0,000
Типы землепользования	Лесной покров	129,59	0,168	0,09	0,003	0,019
	Кустарники	39,85	0,052	0,00	0,000	0,000
	Травянистая растительность	417,18	0,541	18,53	0,684	1,263
	Сельхозугодья	48,89	0,063	0,15	0,005	0,086
	Застроенные территории	16,57	0,021	0,10	0,004	0,172
	Голые земли/скудная растительность	83,48	0,108	7,65	0,282	2,605
	Снег и лед	0,00	0,000	0,00	0,000	0,000
	Постоянные водоемы	0,29	0,000	0,00	0,000	0,000
	Болотистая растительность	1,14	0,001	0,01	0,000	0,167
	Мхи и лишайники	33,90	0,044	0,59	0,022	0,494

* 1 – современные русловые отложения, 2 – верхнеплейстоценовые аллювиально-пролювиальные отложения, 3 – верхне- и среднеплейстоценовые аллювиально-пролювиальные отложения, 4 – нижний плейстоцен, 5 – эоплейстоцен (апшеронский ярус), 6 – верхнеплиоценовые отложения (акчагыльский ярус), 7 – верхнемиоценовые отложения (понтский ярус), 8 – верхнемиоценовые отложения (меотис), 9 – верхнемиоценовые отложения (сарматский ярус), 10 – олигоцен и нижний миоцен (майкопская серия), 11 – меловые отложения, 12 – юрские отложения.

Заключение

В ходе исследования нами было выявлено, что в недавнее время вблизи речных бассейнов наблюдается мощное антропогенное воздействие (активное строительство туристических и рекреационных объектов, дорог, каналов, неравномерный выпас скота и вырубка лесов) на геокомплексы северо-восточного склона Большого Кавказа, что становится причиной развития таких опасных экзогенных процессов, как оползни, обвалы, осыпи. Кроме того, они дают материал для питания рек, где происходят катастрофические грязекаменные селевые потоки.

На примере одной из селеопасной р. Гудиалчай нами для оценки и зонирования селевой опасности был использован метод соотношения частотностей (англ. Frequency Ratio method – FR). Были выбраны шесть факторов, связанных с селями, – гипсометрия, углы наклона (крутизна склонов), экспозиция склонов, геологическое строение (литология), среднегодовое количество осадков и землепользование. В пределах факторов были выделены классы и вычислены площади селевых очагов в пределах каждого класса. Также была выявлены соотношения частотности классов и селевых очагов. Было выявлено, все селевые очаги развиты в зонах альпийских (свыше 2400 м) и субальпийских лугов (2000–2400 м), а также в зонах, где встречаются обнаженные склоны или разряженная растительность.

Список литературы

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, с. 5–11. doi: 10.25744/genb.2018.12.4.001

Алекперова С.О. Динамика селевых явлений в бассейне р. Курмухчай (Азербайджан) // ГеоРиск, Том XVIII, № 1, 2024, с. 40–49, doi: 10.25296/1997-8669-2024-18-1-40-49

Ализаде Э.К., Кулиева С.Ю., Кучинская И.Я., Тарихазер С.А. Ландшафтно-геоморфологическая оценка рекреационного потенциала горных геосистем (на примере азербайджанской части Большого Кавказа) // Устойчивое развитие горных территорий. Владикавказ: СКГМИ (ГТУ), т. 9, №2(32), 2017, с. 130–140.

Будагов Б.А. Геоморфология и новейшая тектоника Юго-Восточного Кавказа. Баку: Элм, 1973, 256 с.

Будагов Б.А. Рельеф Азербайджана. Сели. Баку: Элм, 1993, с. 35–42

Мамедов С.Г. Эколого-геоморфологические особенности бассейнов Гирдыманчая и Вельвеличая и их анализ в ГИС-формате // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора философии по географии. Баку, 2007, 24 с.

Мамедов С.Г., Тарихазер С.А. Применение количественных методов для оценки оползневой восприимчивости бассейна р. Гирдыманчай // Известия Тульского ГУ, вып. 1, 2023, с. 38–67.

Марданов И.Э. Геоморфологические условия развития селей на Большом Кавказе (в пределах Азербайджанской ССР) // Дисс. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Баку, 1965, 213 с.

Махмудов Р.Н. Каталог селевых процессов. Баку, 2008, 104 с.

Пашаев Н.А. Экономико-географическая оценка воздействия стихийных бедствий на экономику Азербайджанской Республики. Баку: AVROPA, 2018, 370 с.

Рустамов С.Г. Реки Азербайджанской ССР и их гидрологические особенности. Баку: Издательство АН Азербайджанской ССР, 1960, 196 с.

Тарихазер С.А. Разработка методики дешифрирования морфоскульптур горных стран (на примере северо-восточного склона Большого Кавказа // Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Баку, 1997, 29 с.

Тарихазер С.А., Мамедов С.Г., Гамидова З.А. Применение количественного метода в исследовании оползневой восприимчивости р. Агсучай // География и водные ресурсы. Казахстан. № 3, 2024, с. 45–57. doi: 10.55764/2957-9856/2024-3-45-57.25.

Тарихазер С.А. Каталог оползневых явлений в Азербайджане. Москва: МАКСПРЕСС, 2024, 307 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. doi: 10.15421/112016.

Tarikhazer S.A., Kuchinskaya I.Ya., Karimova E.J., Alakbarova S.O. Issues of geomorphological-landscape risk (on the example of the Kishchay river) // Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук. Казахстан. № 6 (450), 2021, с. 133–140. doi: 10.32014/2021.2518-170X.129.

Tarikhazer S.A., Kuchinskaya I.Ya., Karimova E.J. Quantitative assessment of debris flow risk in the Greater Caucasus of Azerbaijan (on the example of the northeastern slope) // Journal of Geology, Geography and Geoecology. Украина, Днепропетровск. Т. 31, № 4, 2022, с. 722–736. doi: 10.15421/112268.

Оценка селевой опасности в бассейне реки Гянджачай: морфотектонические характеристики и антропогенные факторы (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. Сели наносят значительный ущерб инфраструктуре регионов и проявляют высокую чувствительность к климатическим изменениям. Наблюдения фиксируют резкое увеличение частоты селей, что приводит к росту материального ущерба. В данной статье проведено детальное исследование морфометрических и морфотектонических характеристик долины реки Гянджачай с использованием цифровой модели и космоснимков для оценки селевой опасности. Применялись карты, методы дистанционного зондирования, а также описательные, статистические и картографические подходы. Определена степень опасности селевых процессов и антропогенных геоморфологических процессов, способствующих их усилению, включая влияние Дашкесанской горнодобывающей и металлургической промышленности, Човдарских золотых рудников и месторождения мрамора, где мелкие частицы смешиваются с водой, изменяя ее цвет. Эти процессы значительно влияют на экосистему реки и усиливают селевые риски. В рамках исследования была составлена картосхема селевой опасности бассейна реки Гянджачай, а также выделены ключевые зоны с повышенным риском, связанные с горнодобывающими предприятиями и сельским хозяйством. Для предсказания катастрофических селей и минимизации ущерба от них предложены меры по защите от селей, включая как инженерные методы (строительство водохранилищ, укрепление берегов рек, очистка русла), так и неинженерные подходы, такие как рециклирование рыхлого обломочного материала. На примере бассейна реки Гянджачай продемонстрированы фрагменты картосхем морфотектонической и морфометрической опасности, что позволяет на местности применить эффективные меры для уменьшения ущерба от селей.

Ключевые слова: *морфометрические характеристики рельефа; бассейн реки Гянджачай; селевые процессы; оценка опасности селей; антропогенные факторы; геоморфологические особенности*

Ссылка для цитирования: Мамиева С.А. Оценка селевой опасности в бассейне реки Гянджачай: морфотектонические характеристики и антропогенные факторы (на примере северо-восточного склона Малого Кавказа в пределах Азербайджана). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 283–293.

Geomorphological studies of the mud-filled Ganjachay river basin (a case study of the northeastern slope of the Lesser Caucasus within 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. Debris flows cause significant damage to regional infrastructure and exhibit high sensitivity to climate change. Observations have recorded a sharp increase in the frequency of debris flows, leading to a rise in material damage. This paper presents a detailed study of the morphometric and morphotectonic characteristics of the Ganjachay River valley using a digital model and satellite imagery to assess debris flow hazards. Maps, remote sensing methods, as well as descriptive, statistical, and cartographic approaches were employed. The degree of danger from debris flow processes and anthropogenic geomorphological processes that contribute to their intensification was determined. A hazard map for the Ganjachay River basin was created. Additionally, the Dashkesan mining and metallurgical industry, Chovdar gold mines, and marble deposits, where fine particles mix with water, altering its color, are considered. The raw materials for the metallurgical industry include the Dashkesan mining and processing complex (iron concentrate), the Zaglik alunite deposit used in the aluminum industry, and the Chovdar polymetallic ore deposit. The raw materials for the chemical industry are represented by the Chiragdara pyrite ore mine and the zeolite deposit of the Ay-Dag field. For the construction industry, the Dashkesan marble quarry, gypsum quarry in Upper Adjikend, as well as quartzite, gravel, limestone, Khashbulag limestone deposits, Shamkir limestone quarries, and the tuff quarry near the village of Murud (Goygol district) are used. Understanding the dynamics of exogenous processes on slopes and the recycling of loose fragmental material is essential for predicting catastrophic debris flows and minimizing the damage they cause. This paper discusses examples of debris flow events in the Ganjachay basin and proposes measures for protection against them. Also presented are fragments of debris flow hazard maps for the Ganjachay River basin. The example of the Ganjachay river basin demonstrates fragments of maps showing morphotectonic and morphometric hazards, which allows for the implementation of effective measures in the field to reduce debris flow damage.

Key words: *morphometric characteristics of relief; Ganjachay River basin; debris flow; hazard assessment; anthropogenic factors; geomorphological features*

Cite of this article: Mamiyeva S.A. Geomorphological studies of the mud-filled Ganjachay river basin (a case study of the northeastern slope of the Lesser Caucasus within Azerbaijan). In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 283–293.

Введение

В последние годы методы дешифрирования космических и аэрофотоснимков получили широкое применение для исследования селей и селевых очагов. Анализ степени развития и распространения селевых очагов с использованием фототонов космических изображений представляет значительный интерес и обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами. Дешифрирование аэрофотоснимков, сделанных в различные годы и в разных условиях, позволяет выявить динамику и тенденции изменений ландшафтов селевых очагов, что способствует определению их типов в зависимости от активности и роли в формировании селей [*Mussina et al., 2023*].

В современных условиях, с целью повышения эффективности использования земельных и ландшафтных ресурсов горных склонов, а также защиты населённых пунктов и хозяйственных объектов от разрушительных селевых потоков, значение дешифрования космических снимков возрастает. Уровень детализации исследования ландшафтов селевых бассейнов во многом зависит от масштаба космических снимков. С увеличением масштаба появляются дополнительные детали, позволяющие более точно распознавать компоненты ландшафта по их дешифровочным признакам. Однако следует отметить, что на крупных космических снимках, охватывающих обширные территории, ландшафтные границы изображаются менее чётко. Для получения количественных и качественных характеристик ландшафтов селевых очагов

дешифрирование проводилось на основе цветных космических снимков, полученных летом и частично зимой [*Мамиева, 2023; Tarikhazer et al., 2023*].

Река Гянджачай протекает по территории Гянджа-Дашкесанского экономического района. Основная часть населения сосредоточена в городе Гянджа, где малые и средние предприятия, включая торговлю, пищевую промышленность, ковроткачество, ткачество и текстиль, составляют основу экономики. В других частях бассейна основными видами деятельности являются сельское хозяйство (земледелие и животноводство). Сельское хозяйство на равнинах северной части Гянджи (Самухский район) в значительной степени зависит от орошения. Традиционно здесь выращивают зерновые, овощи, орехи, фрукты и виноград (80–85% – картофель, 28% – виноград, 15% – мясомолочная продукция).

Основными промышленными районами, влияющими на реку Гянджачай, являются сам город Гянджа (с населением 330,7 тыс. человек на 2024 г.). Участок реки от Гёйгеля до города Гянджа подвергся значительному антропогенному воздействию, включая забор воды для орошения и сброс сточных вод. Участок реки от её впадения в город Гянджа до слияния с рекой Кура также испытал серьёзное воздействие антропогенных факторов. Исследования в этом регионе направлены на решение проблем водопользования для орошения и соблюдения экологических норм.

Река Гянджачай берёт начало с северного склона Муровдагского хребта Малого Кавказа. Высота истока реки составляет 2814 м, а впадает она в р. Куру на 720 км. Длина реки — 99 км, площадь её бассейна — 752 км^2. Из 9 рукавов реки 5 правых и 4 левых (притоки – Зинджирличай, Данагырансу, Зивленчай правый, Гочазчай, Чимкирчай, Дастафурчай, Медюунчай, Деремирзечай, Хабулаг). Бассейн реки Гянджачай широкой и вытянутой формы. Река имеет значительную длину и протекает с юга на север, её направление течения параллельно хребту Муровдаг с запада до Тертерчая, далее течет вдоль бассейна рек Гошгарчай и вдоль реки Крякчай на востоке. Средняя ширина бассейна составляет 7,6 км, средняя высота — 1119 м. Полная длина реки составляет 2744 м, средний уклон реки — 27,7%, а густота русла — 0,64 км/км^2. Подземное питание составляет 44%, снеговое — 32% [*Махмудов, 2008; Мамиева, 2014*].

На участке реки от Топхесенли до Гейгеля речная вода используется для орошения и бытовых нужд. На участке от озера Гейгёля до устья реки также используется вода для орошения, при этом она загрязняется сточными водами, сбрасываемыми населением, проживающим вдоль реки. Тщательный анализ, основанный на топографических картах, представляет собой важный исходный материал для дальнейших исследований.

Цель работы заключается в создании базовых морфометрических карт, которые играют ключевую роль в эколого-геоморфологических исследованиях. С использованием опыта зарубежных и местных ученых и полевые исследования мы провели детальный анализ рельефа и его морфометрических характеристик в бассейне реки Гянджачай, одном из наиболее освоенных человеком регионов, расположенном рядом с городом Гянджа. В этом районе находятся крупные населённые пункты и обширные сельскохозяйственные угодья. С использованием топографических карт масштаба 1:100 000 были составлены карты вертикального и горизонтального расчленения и уклона рельефа для бассейна реки Гянджачай [*Mussina et al., 2023; Tarikhazer et al., 2023; Мамиева, 2014*].

Топографические карты служат основой для создания базовых карт, таких как геоморфологическая, морфотектоническая и морфометрическая. Цифровая модель рельефа была создана по методике В.В. Хромовых и О.В. Хромовых, на основе которой были разработаны гипсометрическая карта, карта крутизны и экспозиции склонов. Сложное сочетание горизонтального и вертикального рельефа, крутизны склонов и геологических особенностей данной территории создаёт условия для возникновения селевых процессов и оползней — опасных природных явлений. Также фиксируются изменения в составе водной биоты и среде обитания живых организмов. Важно учитывать информацию о текущих и планируемых берегоукреплениях для защиты рек от паводков и селей, а также о сельскохозяйственных угодьях и жилых комплексах [*Хромовых и др., 2007; Каширо и др., 2012*].

Анализ

Анализ морфометрических характеристик рельефа в бассейне реки Гянджачай

Исследуемый район северо-восточного склона Малого Кавказа представляет собой одно из трудных горных сооружений альпийской зоны орогенеза, возникший в результате столкновения двух мегаблоков и характеризуется интенсивным развитием блоково-разрывной тектоники, многоэтажностью структурных комплексов, широким распространением интрузивных пород юрского периода (гранитоиды, габброиды, плагиограниты и т.д.) сложной, резко дифференцированным обликом форм рельефа и морфоструктур [*Ализаде и др. 2015*].

На основе составленных нами карт горизонтального и вертикального расчленения, а также крутизны склонов, была разработана карта морфометрической напряженности. Она охватывает территорию Башкенд-Дастафюрской котловины, вдоль реки Гянджачай. Для горных склонов Малого Кавказа характерно наличие как унаследованных, так и наложенных внутригорных котловин. Башкенд-Дастафюрская котловина расположена между Шамкирским поднятием и Шахдагским хребтом. В среднегорных зонах этой котловины вертикальное расчленение составляет 200–400 м, уклон 20–30°, а горизонтальное расчленение — 1–1,5 км/км^2. Данный участок мы отнесли к категории средней морфологической опасности, оценив его в 3 балла по пятибалльной системе (рис. 1).

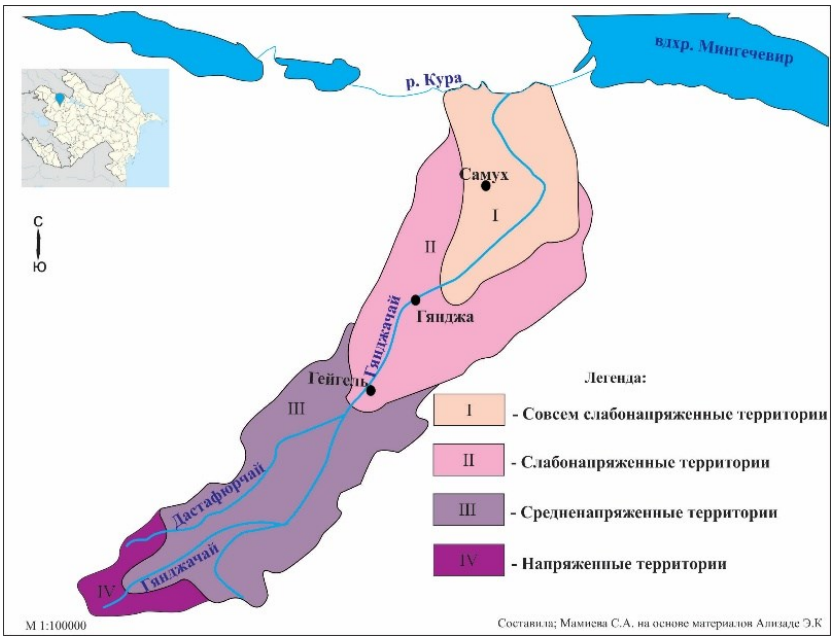


Рис. 1. Картосхема морфометрической напряженности бассейна реки Гянджачай

Из схемы уклонов продольных профилей ясно, что уклонами 200–250 м/км и больше (до 300–350 м/км), а порой и до 500 м/км продольные профили располагают лишь в границах высокогорья (Шахдаг-Муровдагской системы хребтов), то есть в верховьях Гянджачайского бассейна. Все среднегорные хребты лишены зон высоких значений уклонов продольных профилей. На дистанции 10–15 м/км от главных водоразделов продольные профили стремительно выполаживаются, остальная часть всех профилей характеризуется уклонами менее 50 до 300–350 м/км, особенно резкий переход уклонов профилей характерен для южных склонов Муровдагского хребта. Область резкого перехода уклонов соответствует зоне продольного тектонического разлома, которым обусловлена морфологическая асимметрия обозначенной морфоструктуры.

На южных склонах Муровдагского хребта ареалы уклонов продольных профилей 25–50 м/км, занимают обширную площадь, развиты симметрично. Долины рек

Дзегамчай, Шамкирчай и Гянджачай характеризуются комплексной структурой продольного профиля, выражены наличием дополнительных, четко обозначенных перегибов и обусловлены влиянием Газахского прогиба, Шамкирского выступа на северо-восточных склонах и скоплением вулканического материала в центральной части Малого Кавказа.

Слабой напряжённостью в 2 балла характеризуется область Шамкирского поднятия. Поверхность относительно слабо расчленена, уклон поверхности, как правило, не превышает 25–30°, глубина расчленения варьируется в пределах от 30–50 м до 200–400 м, северные склоны являются более крутыми, нежели южные и юго-восточные. Глубина расчленения, в особенности в районе пересечения долин рек Шамкирчай и Гошгарчай. Сгущение изолиний позволяет провести морфологическую границу Предмалокавказской наклонной равнины с Шамкирской морфоструктурой. Совершенно слабой напряжённостью в 1 балл характеризуется территория, охватывающая Предмалокавказскую равнину. Поверхность Гянджа-Газахской равнины имеет ступенчатое строение. Она дренируется многочисленными долинами рек северо-восточного склона Малого Кавказа.

В итоге анализа морфометрических параметров современного рельефа установлено, что количественные свойства выделенных индикационных морфометрических блоков-сегментов предопределяют, в первую очередь, интенсивность развития эндогенных и экзогенных процессов. Это подразумевает, что направление и интенсивность экзогенных процессов обусловлены эндогенными факторами рельефообразования, индикационными признаками которых выступают морфометрические показатели. То есть, сформированные в результате развития экзогенных процессов формы рельефа считаются морфологическими индикаторами в современном рельефе эндогенных процессов и морфотектонического каркаса фундамента. Надо отметить, что полученные морфометрические характеристики представляют собой конечный итог тектонических и экзогенных данных рельефообразования.

Муровдагский горст-антиклинорный хребет характеризуется сложным внутренним строением. Участок хребта Муровдаг, расположенный между реками Шамкирчай и Гянджачай, имеет относительно простую морфотектоническую структуру. В верхнем течении реки хребет интенсивно расчленен, уклон склонов достигает 60–70º, а глубина вреза долин составляет 1000–1200 м. В этом районе породы Муровдагской морфоструктуры погружаются под эоценовые вулканогенно-осадочные отложения Шахдагского хребта. Гянджачайская поперечная зона разломов на северо-восточном склоне Малого Кавказа является наиболее значительным шарнирным. Изменения в долине реки Гянджачай, крутые уступы, выходы минеральных источников и другие явления обусловлены данной разрывной морфоструктурой. Часто эпицентры землетрясений расположены либо вблизи этих изменений, либо в узловых точках их пересечения с разломами, характерными для общекавказского простирания.

Низкогорный пояс долины отличается меньшей степенью расчленения и менее выраженной рельефной напряженностью. Долина расширяется, и на её склонах иногда можно увидеть аллювиально-пролювиальные отложения, а также в среднегорном поясе рельефа. В результате сильных дождей, произошедших 28 июля 2024 г., река Гянджа, протекающая через город Гянджа, вышла из берегов. Сель, возникшее на реке Гянджа из-за интенсивных осадков 25 мая 2016 г., стало катастрофой для домов, расположенных на её берегах. Сильные дожди привели к резкому увеличению уровня воды в реке Гянджа. Разлив реки привел к разрушению земляной плотины на левом берегу и затоплению соседней деревни, в результате чего пострадали 20 частных домов. Сильные паводковые воды вызвали трещины в стенах, что привело к разрушению 10 частных домов, один из которых был полностью уничтожен. В русло реки было направлено специальное оборудование, а поврежденная плотина была засыпана грунтом. Территория вокруг жилых домов была очищена с помощью техники для отвода селевых вод. Граждан, чьи дома стали непригодными для проживания из-за подтопления, переселили.

Анализ тектонической активности и морфоструктур в бассейне реки Гянджачай

В результате активизации эндодинамических процессов в настоящее время долин реки Гянджачай и других рек в данной зоне приобрели каньонообразную форму и являются антецедентными. Поверхность имеет относительно слабую расчлененность, на южных склонах наблюдаются оползневые процессы, в то время как северные склоны более крутые по сравнению с южными и юго-восточными. Дастафюрская, Хошбулагская и Новосаратовская котловины осложнены узкими современными рыхлыми отложениями, такими как суглинки, пески и супесчаники, а в долине реки Гянджачай и ее притоках особенно хорошо выделяются речные террасы [*Ализаде, 2001*].

Река Гянджачай в районе Дашкесан-Дастафюрской участка выделяется особым расположением котловин и рельеф приобретает сложный характер. Долина этой реки расположена вдоль поперечных дизъюнктивных нарушений. Зоны Гейгель-Кяпаз и Башкенд подверглись относительному поднятию. Центральная часть региона характеризуется грабен-синклинальными котловинами, в то время как восточная и западная части представлены горст-синклинальными плато, грядами и хребтами с узкими синклинальными котловинами. Особое внимание следует уделить району к востоку от реки Гянджачай, где наблюдается высокая сложность морфотектонических единиц, а морфология и структура рельефа претерпевают значительные изменения.

В результате выполненного анализа морфотектонических характеристик рельефа северо-восточного склона Малого Кавказа с широким применением материалов дешифрирования космических снимков, и геолого-геоморфологических данных нами выявлены закономерности морфоструктурного строения бассейна реки Гянджачай и составлена картосхема эндодинамической обусловленности форм рельефа в исследуемом участке северо-восточного склона Малого Кавказа (рис. 2). Долина реки Гянджачай представлена поперечной дизъюнктивной дислокацией, которая обуславливает крутые уступы, выходы минеральных источников, также эпицентры землетрясений приурочиваются к этой зоне. Широкое распространение вулканогенных, вулканогенно-осадочных, офиолитовых, осадочно-терригенных, молассовых и других комплексов пород, резкие изменения в экзогенных процессах, неравномерное распределение растительности и напряженная геодинамическая обстановка создают условия, способствующие выявлению общих и частных закономерностей дифференциации морфоструктур. Морфологическими границами отдельных участков являются долины рек Дзегамчай, Шамкирчай и Гянджачай, которые связаны с разрывными нарушениями различного порядка [*Ализаде, 2001*].

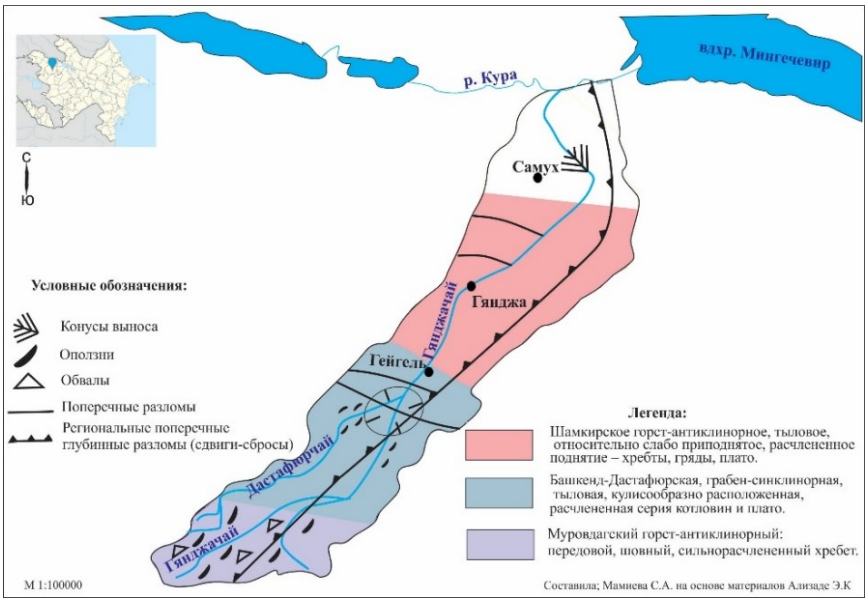


Рис. 2. Картосхема эндодинамической обусловленности рельефа бассейна реки Гянджачай

Заметим, что точки пересечения соседних и пересекающих разрывных морфоструктур отличаются повышенной активностью эндо- и экзогенных явлений и обычно становятся большими очагами сейсмотектонических смещений-землетрясений с разными глубинами размещения гипоцентров. К югу от линии, проложенной через Хошбулак-Дастафюр-Кяпаз, в границах которой плотно размещенные продольные линеаменты формируют единую, сплошную полосу, которые, несомненно, есть продукт действия активных экзодинамических процессов в том числе и селей, хорошо видимых на КС.

Заключение

В итоге дешифровки картографической системы изучаемого региона для выявления закономерностей формирования, эволюции и пространственной дифференциации морфоструктур, а также установления взаимосвязей и взаимозависимостей современного рельефа, поверхностного и глубинного геотектонического строения геодинамически напряженных морфотектонических зон, было выявлено, что ключевыми индикационными признаками для выделения естественных границ рельефа – линеаментов и блоковых морфоструктур считаются геометрические и оптические характеристики данных объектов. Расшифрованная система линеаментов отображает общую картину фрагментации, трещиноватости, расчлененности и дифференцированности рельефа данной области, что путем сопоставления с картой морфометрической напряженности позволило объяснить селеактивность в изучаемом бассейне (рис. 3). [*Мамиева и др., 2025*].

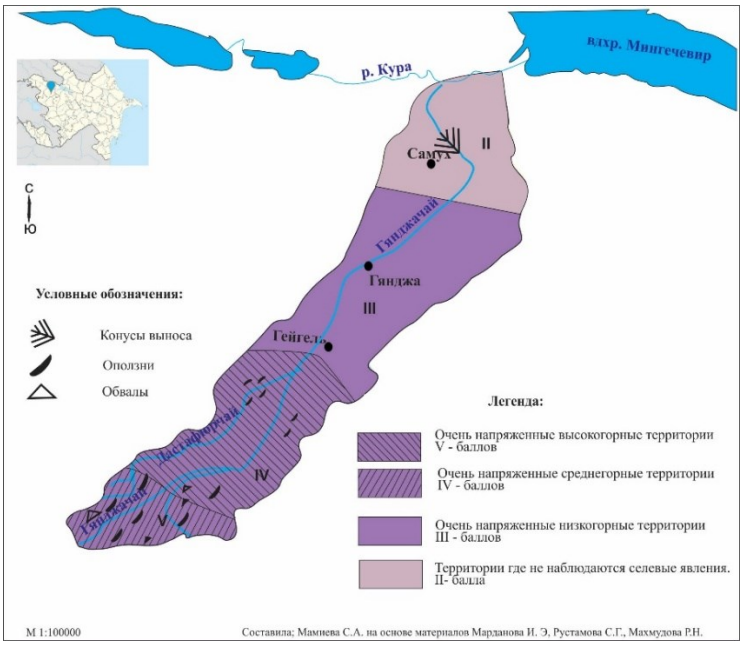


Рис. 3. Картосхема селевой опасности бассейна реки Гянджачай

Массовое строительство водохранилищ в Азербайджане началось в 1950-х гг., и основная цель их создания заключалась в орошении. Для обеспечения водоснабжения города Гянджа используются как поверхностные, так и подземные источники воды. Трубопровод, который поставляет питьевую воду, начинается в районе Гызылгая, расположенном ниже села Топалгасанлы, рядом с рекой Гянджачай. Кроме того, вода для водоснабжения Гянджи также поступает из Гёйгеля. Река Гянджа сильно подвергается антропогенному воздействию. Основные промышленные зоны, оказывающие влияние на реку Гянджачай, включают Дашкесанскую металлургическую промышленность, Човдарские золотые рудники и месторождение мрамора, где мелкие частицы смешиваются с водой, изменяя её цвет. В научных исследованиях за последние

10–15 лет отмечается высокая чувствительность селей к изменениям климата, а также фиксируется резкое увеличение их частоты. В настоящее время наблюдается тенденция к росту материального ущерба, связанного с селями. Известно, что сели наносят разрушительный удар по инфраструктуре регионов [*Тарихазер и др, 2017*].

В центральной части водосборной площади реки Гянджа проводится исследование стационарной сети мониторинга загрязнения, вызванного промышленными отходами. Данная территория включает подземные воды, которые активно используются населением для питья, бытовых нужд и орошения, а также находится в зоне влияния Гянджинского алюминиевого завода, ныне глиноземного. С 1974 г. по периметру завода, начиная с мест сбора отходов и в направлении движения грунтовых вод, бурятся наблюдательные скважины на расстоянии 1000 и 3000 метров для анализа состояния загрязнения грунтовых вод. В деревне Эйюблу концентрация аммония в 7 раз превышает допустимые нормы для питьевой воды, что указывает на загрязнение, вызванное сельскохозяйственной деятельностью. Водозабор для орошения и водоснабжения, а также извлечение материалов из русла реки для использования в гидроэнергетике также оказывают влияние на ситуацию. Зона аэрации состоит из гравия и песка, которые обладают высокой водопроницаемостью. Грунтовые воды располагаются на глубине от 21 до 16 м на всей площади расположения трех накопителей отходов [*Ansbaek et al., 2011*].

В реке Гянджачай наблюдается рост количества разлагаемых органических веществ и азотистых соединений. Жилые здания расположены непосредственно в низине реки, и сточные воды сбрасываются прямо в реку. Кроме того, загрязняющие вещества попадают в реку из-за стока с поверхности во время дождей. Лишь небольшая часть сточных вод (как очищенных, так и неочищенных) поступает в реку от Гянджи до устья. Неочищенные сточные воды поступают из небольших населенных пунктов (без системы канализации) и сельскохозяйственных угодий, а также из городов Гёйгёль и Гянджа. Наблюдаются изменения в режиме течения, температуре воды, уровне растворенного кислорода и увеличении водорослей. Гибель водной биоты происходит из-за разрушения их естественной среды обитания. Высокая проницаемость грунтов вблизи Гянджинского алюминиевого завода и высокая концентрация сульфатов свидетельствуют о локальном загрязнении воды в контрольной скважине, расположенной на данной территории [*Мамиева, 2024*].

На Гянджа-Газахской равнине активно используются подземные воды. С каждым годом наблюдается рост числа пробуренных субартезианских скважин, особенно для нужд орошения. Это приводит к снижению уровня грунтовых вод, уменьшению речного стока и созданию неблагоприятных условий для экосистемы. Гянджа-Газахская равнина на западе граничит с гидрогеологическим бассейном Грузии. Водоснабжение из подземных вод города Гянджи (скважины Гызылгая) требует запрета на ведение хозяйственной деятельности на расстоянии 30 метров от диаметра скважин, в то время как ограниченная хозяйственная деятельность разрешена на расстоянии 100–150 м за пределами данной зоны. В случае водоснабжения из родников, любая хозяйственная деятельность запрещена на расстоянии 200 метров выше, 100 метров ниже, а также по обе стороны от родника. Необходимо провести исследования, касающиеся того, как строительство Гянджачайского водохранилища поможет решить проблемы водопользования для орошения и соблюдения экологических норм по стоку. К 2022 г. была разработана система оценки состояния воды в соответствии с Водной директивой. Также необходимо изучать влияние реабилитации на системы водоснабжения и канализации города Гянджа в рамках проекта МСТС (Национальное водоснабжение и канализация) на снижение загрязнения бытовыми сточными водами. Исследование влияния строительства Гянджачайского водохранилища на решение проблем в регионе, включая обеспечение водопользования для орошения и соблюдение экологических норм по стоку [*Ansbaek et al., 2011*]. Несмотря на систематические природные катаклизмы в районе Малого Кавказа, увеличение финансовых затрат на ликвидацию последствий селей за последнее десятилетие, число человеческих жертв существенно сократилось. Это связано с эффективным исполнением защитных мер, предусмотренных

Государственными Программами. В рамках этих программ была изменена структура расселения населения и ограничено проживание в опасных зонах.

На реке Гянджачай катастрофические сели всегда имели место 10.07.1906; 26.08.1931; 11.07.1965; 20.08.1970, 2002-х гг. В октябре 1997 г. в Геранбойском и Евлахском районах Гянджа-Газахской равнины произошел селевой поток, в результате которого на нескольких автозаправочных станциях произошел разлив нефтепродуктов в окружающую среду. Несмотря на локальный характер этого события, оно привело к загрязнению грунтовых вод на прилегающей территории [*Махмудов, 2008*]. Вследствие мощных ливней, 28 июля 2024 г., река Гянджа в городе Гянджа вышла из русла, вызвав селевые явления и наводнение. Сель, случившийся 25 мая 2016 г., привел к чрезвычайному положению для домов, размещенных вдоль реки. Интенсивные осадки обусловили стремительное увеличение уровня воды, что, в свою очередь, повлекло прорыв земляной дамбы на левом берегу и затопление прилегающей деревни. В итоге наводнения пострадали 20 частных домов, а сильные потоки воды спровоцировали трещины в стенах, которые привели к разрушению 10 из них. Один дом был полностью уничтожен. На место происшествия оперативно прибыли сотрудники Гянджинского регионального центра МЧС и другие службы. В русло реки было направлено специальное оборудование, а прорыв дамбы был засыпан грунтом. Территория вокруг жилых домов была очищена от селевых вод, граждан были переселены из затопленных домов, ставших непригодными для проживания (таблица 1).

Таблица 1. Дата прохождения мильных селевых потоков в бассейне реки Гянджачай

№	Дата прохождения селя	Время прохождения селя	Причина возникновения селя	Последствие селя в пределах бассейна
1	13.06.2014	-	ливни	Повреждены близлежащие приусадебные участки
4	25.05.2016	-	ливни	Разрушено 10 домов, снесена плотина, 20 домов затоплено
5	10. 06.2022	17:20	проливные дожди	Были разрушены хозяйственные объекты
6	25.05.2023	-	ливни	Прошел кратковременный сель
	2.06.2023	10:10	проливные дожди	Затопление домов
7	10.06.2023	11:00	ливни	Затоплены дома, нарушена подача электричества
8	20.06.2023	16:10	ливни	Нанесен серьезный ущерб дорогам, частным домам и хозяйствам в Гейгельском районе
7	27.05.2024	-	ливни	Повреждены дороги, прервана связь между райцентром и несколькими населенными пунктами

Составлена с использованием материалов Р.Н. Махмудова, 2008.

Для уменьшения или предотвращения гибели людей заблаговременно выявляются области с опасными природными явлениями, где осуществляется мониторинг с использованием современных компьютерных технологий. Населенные пункты располагаются в безопасных зонах, а население переселяется и проходит обучение. Результаты показывают, что при возведении промышленных и сельскохозяйственных объектов, учитывая степень риска и опасности территории, можно минимизировать материальный ущерб и человеческие потери. На примере бассейна реки Гянджачай представлены фрагменты картосхем морфотектонической и морфометрической опасности, что создает научную основу для разработки и применения эффективных мероприятий по снижению ущерба от селевых процессов на рассматриваемой территории. Тем не менее, учитывая, что кратковременные сели на реках возникают

неожиданно, полностью предотвратить их невозможно. Однако можно снизить ущерб от селей, применяя эффективные методы. Методы борьбы с селями делятся на две категории: инженерные и не инженерные. Инженерные методы представляют собой традиционные подходы, широко используемые по всему миру для борьбы с селями: строительство водохранилищ, управление речным бассейном, укрепление берегов рек, очистка русла реки от ила и камней, а также перенаправление селевых вод в специально подготовленные места [*Алекперова и др., 2022, Мамиева и др., 2019*].

Изменения в составе водной экосистемы и среде обитания животных. Сведения о текущих и намеченных мероприятиях по упрочнению берегов для защиты рек от паводков и селевых потоков, а также о сельскохозяйственных угодьях и жилых комплексах, размещенных вдоль русла реки. В изучаемом бассейне также наблюдаются активные селевые процессы. Горнодобывающая индустрия, разработка карьеров, бурение скважин и другие виды деятельности в горных областях. Земляные работы, а также промышленные, сельскохозяйственные и бытовые отходы, равно как различные химические и технические вещества, попадающие на территории, подверженные селевым процессам, способны стать возможным источником загрязнения окружающей среды и подземных вод как напрямую, так и косвенно.

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) // Вопросы географии и геоэкологии. Алматы, Казахстан, № 1, 2022, с. 37–46. doi: 10.55764/2957-9856/2022-1-37-45.05/

Ализаде Э.К. Особенности морфоструктурного дешифрирования космических снимков зоны сопряжения морфотектонических блоков (на примере восточной части Малого Кавказа) // Геоморфология, № 1, М., 2001, с. 22–30.

Ализаде Э.К., Тарихазер С.А. Высотно-ландшафтная обусловленность развития селевых процессов в горных геосистемах южного склона Большого Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. Владикавказ, № 4 (26), 2015, с. 33–41.

Каширо М.А., Жилина Т.Н., Васильева М.С., Евсеева Н.С. Эколого-геоморфологические исследования бассейна р. Басандайки (Томская область) // Вестник Томского государственного университета. Томск, № 362, 2012, с. 184–188.

Мамиева С.А. Оценка экогеоморфосистем северо-восточного склона Малого Кавказа: на основе материалов дешифрирования. Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. д-ра философии по географии. Баку, 2014, 27 с.

Мамиева С.А. Использование ГИС-технологии при морфометрическом анализе рельефа (на примере северо-восточного склона Малого Кавказа в пределах Азербайджана) // Cografiya və təbii resurslar jurnalı. Bakı, 2023, № 2 (20), с. 29–33. doi: 10.59423/gnr.2023.36.53.004

Мамиева С.А. Развитие селевых процессов в бассейне реки Гошгарчай (на примере северо-восточного склона Малого Кавказа в пределах Азербайджана) // 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, с. 316–327.

Мамиева С.А., Алекперова С.О. Активизация селевых явлений в современных условиях и пути борьбы с ними на примере Малого Кавказа (в пределах Азербайджана) // Вектор ГеоНаук, т. 8, № 1, 2025, с. 4–15.

Мамиева С.А., Алекперова С.О. Влияние антропогенного фактора на предгорные и горные территории северо-восточного склона Малого Кавказа // Матер. науч. конф. общественных географов «Человеческая география в Азербайджане и России: основные пути развития в XXI веке» 10–14 мая 2019. Баку, 2019, с. 194–201.

Махмудов Р.Н. Каталог рек Азербайджана. Баку, 2008, 106 с.

Тарихазер С.А, Набиев Г.Л. Оценка проявления селеопасности в Азербайджане (на примере Больщого Кавказа) // Устойчивое развитие горных территорий. Владикавказ, Т. 9, № 3 (33), 2007, с. 257–268.

Хромовых В.В., Хромовых О.В. Цифровые модели рельефа. Учебное пособие. Томск: Изд. НТЛ, 2007, 177 с.

Ansbaek J., Pichugin A., Roncak P., İsmayılov V., İmanov F., Verdiyev R. Пилотный план управления речным бассейном для бассейна реки Гянджа. EPTISA Servicios de Ingenieria S.L. (İspaniya) və Grontmij Carl Bro A.S. (Danimarka). Азербайджан, 2011, 78 s.

Mussina A., Raimbekova Zh., Shahgedanova M., Barandun M., Narbayeva K., Abdullayeva A., Nyssanbayeva A. Mountain Resilience: A Tool for Debris flow Risk Management in the Ile Alatau Mountains, Kazakhstan. // Mountain Research and Development, 2023, 43(1): D1–D10. doi: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-22-00004.

Tarikhazer S., Mammadov S., Hamidova Z. Application of quantitative methods for the assessment of landslide susceptibility of the Aghsuchay river basin. // Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", 2023, 58: 257–273. doi: 10.26565/2410-7360-2023-58-20.

Engineering protection of recreational facilities

S.I. Matsiy, U.R. Sidaravichute, V.S. Matsiy

Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russia, dd600902@gmail.com

Abstract. Based on empirical evidence from field surveys, morphometric parameters of debris flows were determined. In laboratory conditions, data on the geological structure of slopes, physical and mechanical properties of soils, etc. were obtained. On the site, three debris flow basins were identified, which in case of prolonged heavy rainfall and snowmelt form debris flows causing damage to various-purpose structures, including the ropeway, ski track No.1, engineering protection facilities, haul road, antenna-mast structure No. 2, and pedestrian crossing. Based on field surveys, it was established that the existing debris flow protection structures were insufficient to ensure full safety of the existing facilities and adjacent structures. Based on these calculations, the following measures were recommended to stabilise the situation, namely along the Sulimovsky Creek: installation of flexible anti-debris flow barriers, arrangement of a network of drainage ditches, and erosion control. Thus, the structure type recommended for Section Line No. 3 was unsupported debris flow barrier 5–6 m high and 15 m wide. The structure type for Section Line No. 4 was unsupported debris flow barrier 4–5 m high and up to 15 m wide.

***Key words**: debris flow protection structures, debris flow, load on protective barrier, hydraulic engineering, morphometric parameters*

Cite of this article: Matsiy S.I., Sidaravichute U.R., Matsiy V.S. Engineering protection of recreational facilities. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 294–300.

Инженерная защита объектов рекреации

С.И. Маций, У.Р. Сидаравичуте, В.С. Маций

Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия, dd600902@gmail.com

Аннотация. На основе эмпирических данных полевых исследований определены морфометрические параметры селей. В лабораторных условиях получены данные о геологическом строении склонов, физико-механических свойствах грунтов и др. На участке выделены три селевых бассейна, в которых при длительных ливневых дождях и снеготаянии формируются сели, наносящие ущерб сооружениям различного назначения: канатной дороге, горнолыжной трассе № 1, объектам инженерной защиты, автодороге, антенно-мачтовому сооружению № 2, пешеходному переходу. По результатам натурных обследований было установлено, что существующие селезащитные сооружения недостаточны для обеспечения полной безопасности существующих объектов и прилегающих к ним конструкций. На основании проведенных расчетов были рекомендованы следующие мероприятия по стабилизации ситуации, в частности, вдоль Сулимовского ручья: установка гибких противоселевых барьеров, устройство сети водоотводных канав, противоэрозионная защита. Так, для участка № 3 был рекомендован тип сооружения – безопорный селезащитный барьер высотой 5–6 м и шириной 15 м. Для участка № 4 – безопорное селезащитное сооружение высотой 4–5 м и шириной до 15 м.

Ключевые слова: *селезащитные сооружения, селевой поток, нагрузка на защитный барьер, гидротехническое строительство, морфометрические параметры*

Ссылка для цитирования: Маций С.И., Сидаравичуте У.Р., Маций В.С. Инженерная защита объектов рекреации. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 294–300.

Introduction

Debris flows are widespread throughout the Russian Federation [*Shvarev, 2021*]. In order to protect buildings and structures from debris flows, anti-debris flow facilities and structures are erected, with preliminary calculations of the debris flow load on the barrier and the capacity of the debris flow-retaining structure [*Bandurin, 2022*]. The analysis of debris flow risk for the territory of the North-West Caucasus, which included probability of the event and its possible consequences, has shown that the highest value of debris flow risk of the territory (R) is found in the Central region (R = 78%), followed by the Southern region (R = 56%), then the Maritime and Eastern regions, respectively (R = 36% and R = 29%) [*Baljyan, 2020*]. Our research object is located within the boundaries of the Maritime District of the North-West Caucasus.

Brief overview of the issue

Over a half of the area within the boundaries of the studied site is covered by forests with evergreen species. There is a widespread undergrowth of Caucasian rhododendron (*Rhododendron caucasicum*) throughout the area, which prevents debris flows, but dense vegetation does not provide complete protection from debris flows (Fig. 1) [*Bogdanov, 2020*]. Debris flow control structures belong to engineering protection structures, which should ensure reliability and the possibility of systematic observations [*Geobrugg, 2024*]. For debris flow-directing and debris flow-preventing structures, the structure category is determined depending on the type of the soils and their height: debris flow-directing and debris flow-preventing structures located in unpopulated areas are assigned class IV; those located in populated areas are assigned class III. Stabilising structures are assigned class IV. Thus, the channels of watercourses contain coarse clastic material of wood origin, as well as various fractions of geological elements.

The aim of this research was to substantiate the need to take measures to stabilise the situation regarding possible debris flows at the site, and to select optimal engineering protection structures.

Materials and methods

In the course of the debris flow hazard assessment process, debris flow basins were identified within the alpine resort's recreational complex. During the field surveys, the boundaries of debris flow basins and their parameters were clarified, and erosion and debris flow activity at the site was examined.

The site is located on the left slope of the Mzymta River valley near the village of Esto-Sadok. Sixty-five debris flow channels were identified in the basin of the Mzymta River. The area affected by debris flows is 510 km^2 [*Ghetto, 2021*]. When assessing the debris flow potential of an area, one of the factors was the lithological composition of the rocks as the source of the solid component of debris flows. The area under study lies within the evolution of rocks of the Jurassic and Cretaceous age. The northern half of the area is represented by the Lower and Middle Jurassic clay shale, siltstones, mudstones, and their interbedding packages, i.e. rocks of low anti-denudation stability, which form a large amount of clayey matter. The main basins of the right tributaries of the Mzymta River are located within the limits of these rocks. Dense limestone, dolomites, marls of the Middle and Upper Jurassic eras are known to

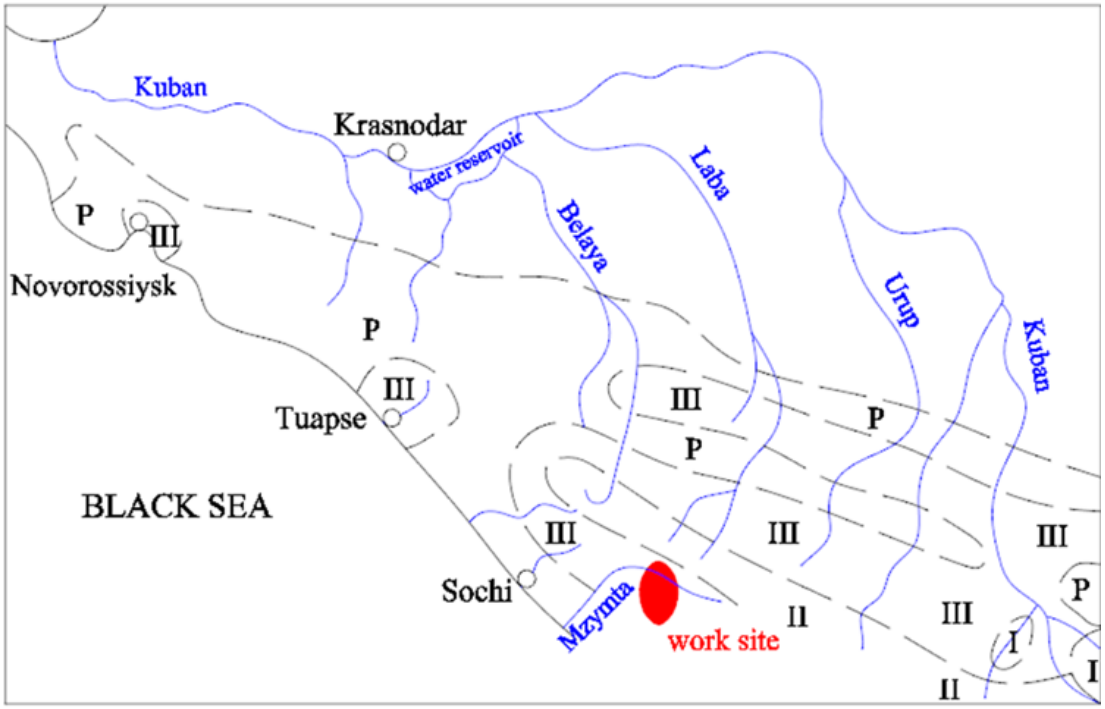
be resistant to degradative agents. These rocks form the rocky Achishkho Ridge and the Aibga Ridge, from where the Mzymta's left tributaries originate. The valleys of these watercourses have the form of gorges, with channel gradients up to 400 ppm. According to archival data, among the Quaternary formations are landslide and deluvial-landslide deposits over 10 m in thickness, and alluvial fan deposits up to 20 m in thickness. The various-age alluvial fan deposits are represented by pebbly-rubbly, grussy-gravelly masses with inclusion of boulders with loamy filler. The alluvium of the Mzymta River terraces is composed by 80% gravel, pebbles and boulders and 20% sandy-clayey rock. The presence of thick friable (soft) deposits on the slopes of the site determines favourable conditions for debris flow formation in the middle and lower parts of the slope.

Fig. 1. The Rzhanoi Creek course with boulders and fragmental material (debris)

The North-West Caucasus is characterised by poorly developed debris flow processes and a low level of knowledge about them. The debris flow processes emerged after deforestation [*Ghetto, 2020*] (Fig. 2). In the region, rainfall is the main factor of soil erosion, leading to the splitting of the Mzymta River into a system of deep basins, which are leftovers of millennia-old depressions before turning into an elongated marshy depression [*Ghetto, 2022*, *Golosov, 2020*]. The study site is located in the Krasnodar Territory, the village of Estosadok (Russia).

Thus, 3 permanent watercourses and 13 temporary water catch basins were identified in the area of survey, the latter of which were becoming more active during incessant rainfall.

Based on the results of field surveys of the area, the following morphometric characteristics of the debris flow basins of the Rzhanoi, Shumikhinsky and Sulimovsky Creeks were computed: channel length, water catchment area, and general slopes; the data are presented below in Table 1. The length of temporary watercourses varied from 0.11 km to 4.58 km.



Laba – river and it's name
– coastline
– border of mudflow hazardous area
Sochi – town and its name
I – the first category of mudflow hazard*
II – second category of mudflow hazard*
II – third category of mudflow hazard*
P – potentially mudflow hazardous area

* Note: Category I areas are characterized by the presence of medium-sized mudflows and medium-active runoff-forming surfaces;
In areas of category II, small mudflows and weakly active runoff-forming surfaces are noted;
Category III areas are characterized by rare or absent mudslides, but due to environmental changes they may occur

Fig. 2. Location of the work site combined with the map of debris flow-prone areas

Table 1. Morphometric parameters of debris flow basins of alpine resorts

Watercourses	Mean watercourse slope, ‰	Weighted average channel slope angle, ‰	Water catch area, km^2	Channel length, km
Rzhanoi Creek, Ski piste No. 1	357	321	2.35	4.58
Shumikhinsky Creek, Ski piste No. 1	425	321	1.77	2.89
Water Intake No. 2, Shumikhinsky Creek	425	321	1.77	2.89
Water Intake No. 1, Sulimovsky Creek	405	398	1.18	2.07

The quantitative parameters of debris flows were identified in accordance with the instruction for determination of rain debris flow calculated characteristics and the debris flow study guide. Based on that, conclusions were made about the spread of debris flows and their hazard within the construction site and measures were proposed to reduce the debris flow hazard.

The existing debris flow protection structure protects the transformer box from debris flows at the Alpika-Service railway station. It is located in the basin of the Rzhanoi Creek. The debris flow protection structures serve to attenuate and detain possible debris flows in case of their passage along the streambed [*Kondratieva, 2015*]. Additionally, the channel is being reinforced downstream both sides of the barriers with gabion meshy products [*Panina, 2017*].

Results and discussion

According to Special Technical Specifications (VSN 03-76 «Instruction for Determination of Rain Debris flow Characteristics»), debris flow barriers should be calculated for the maximum debris flow volume with a 1% exceedance probability. The debris flow velocity ν, m/s, was determined for each gabion mesh (Table 2).

Table 2. Calculation of debris flow velocity of 1% probability

Section line	$Q_{1\%}$, m^3/sec.	I_y, ‰	$W_{1\%}$	ν, m/sec.
No. 2	4.1	299	0.053	2.28
No. 3	6.6	298	0.175	3.18
No. 4	6.5	298	0.175	3.17

The debris flow load calculation was performed using “DEBFLOW” design software for flexible debris flow protection systems. “DEBFLOW” software provides design solutions for debris flow protection structures. The debris flow load calculation for Barrier I in the Sulimovsky Creek is shown in Table 3.

The load calculations for Section Lines Nos. 3 and 4 were carried out similarly.

According to the calculation of debris flow retention volume, the total volume was 1866 m^3, the required volume was 1600 m^3; hence the reserve was 266 m^3.

Table 3. Debris flow load calculation for Barrier I (Section Line No. 2)

Parameter	Identifier	Value	Measurement unit
Debris flow type and density			
Type of debris flow	Typ	typical	–
Density of debris flow mass	ρ	2300	kg/m^3
Weight of debris flow mass	γ	22.6	kN/m^3
Liquid phase content	ω	0.21	–
Debris flow volume and number of debris flow waves			
Aggregate debris flow volume (water included)	V_{tot}	1600	m^3
Number of waves	H	3	–
Average wave volume	V_H	533	m^3
First wave volume	V_{N1}	800	m^3
Peak discharge			
Peak discharge	Q_p	7	m^3/sec.
Reliability factor			
General reliability factor	SF	1.5	

According to point 2.16.8 of Special Technical Specifications VSN 03-76, when determining the height of the structure, the equalising slope of debris flow deposits should be taken into account. For the site under consideration, this slope was 22°. When choosing the type of structures, the following were considered: calculations of retained material; calculations of debris flow velocity; debris flow load on debris flow protection structure. Once the initial data were entered, the optimal types of structures to protect alpine resort facilities from debris flows were determined (Table 4).

The choice of the type of structures required for structures Nos. 3 and 4 was done by analogy.

The construction type for Section Line No. 3 is an unsupported debris flow barrier 5–6 m high and up to 15 m wide. The construction type for Section Line No. 4 is an unsupported debris flow barrier 4–5 m high and up to 15 m wide. Unsupported structures are applicable for

narrow valleys and streambeds of small mountain rivers [*Volosukhin, 2022*]. Thus, according to the calculation of the capacity of the debris flow retention structures: for Section Line No. 2: length of the retained material – 31.7; retained volume – 0.768 m^3; for Gate No. 3: length of the retained material – 31.7; retained volume – 0.725 m; for Section Line No. 4: length of the retained material – 20.0; retained volume 0.373 m.

Table 4. Construction type selection for Barrier I

Parameter	Identifier	Value	Measurement unit
Section line geometry			
System height	H0,1	5	m
Channel width at ground rope	bu,1	5	m
Channel width at head rope	bo,1	22	m
Distance to overlying barrier	L0,1	65	m
Channel slope and volume of retained material			
Height of filled system	H1,1	3.8	m
Average channel slope upstream barrier	lc.1	40	%
Surface slope of barrier-retained material	l'c.1	27	%
Angle between wire net and channel talweg	ξ	73.2	o
Length of barrier-retained material	L1	31.7	m
Volume retained	Vr.1	768	m^3
Front velocity and flow height			
Front velocity	Vstr	3.7	m/sec.
Impact velocity at barrier site	V1	2.3	m/sec.
Flow height	h	0.6	m
Maximum height of lower section line	hd.1	0.4	m

Construction type – debris flow barrier with support, height – 5–6 m, width – up to 25 m.

The total volume of debris flow retention facilities capacity is 1,866,000 m^3 for the total debris flow volume of 1,600,000 m^3.

Conclusions

According to the study, the most typical for the North-West Caucasus are debris debris flows of up to 10,000 m^3 in volume. In the process of debris flow surveys, the following facilities were found to be exposed to debris flow hazard:

Alpine ski track No. 1 at the points where it is crossed by the Shumikhinsky and Rzhanoi Creeks. To protect it, it is necessary to design debris flow protection nets in the narrow part of the valley of the Shumikhinsky Creek; strengthen the bottom and the banks of the Shumikhinskiy Creek upstream of the projected Water Intake No.1. Protection of the ski piste No. 1 from debris flows along the Rzhanoi Creek can be realised by construction of a debris flow-deflecting dam.

Structures of the main water intake located within the Shumikhinsky Creek impact area.

Formation of low-volume debris flows is possible in the Sulimovsky Creek, but it has debris flow protection.

Other facilities are not exposed to debris flows.

To reduce the level of debris flow hazard in the territory of the mountain resort, installation of debris flow barriers is planned as part of engineering protection, for which calculations have been made in this paper. According to their results, two barriers 5 metres high and one barrier 4 metres high are to be installed there. The total capacity of these barriers is sufficient to ensure the protection of the Olympic infrastructure from possible destructive debris flows.

In addition to engineering anti-debris flow measures, it is recommended to perform the following works on reducing the occurrence of debris flow processes in the study area: embankment of the beds of small streams, including temporary watercourses, to prevent the occurrence of erosion and debris flow processes, and reclamative afforestation – soil

reclamation in areas with open soils, including along the routes of roads and ski trails. In addition, for forecasting purposes, it is necessary to organise constant monitoring of the state of the slopes and watercourse beds [*Zharashuev, 2021*].

References

Bandurin M.A., Prikhodko I.A., Bandurina I.P., Rudenko A.A. Analysis of Impact of Urbanization Development on the Deterioration of Ecological State of Rivers // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, 10–12 January 2022, Virtual, Online, 2022, P. 042044, doi: 10.1088/1755-1315/988/4/042044.

Baljyan, P.H., Baljyan V.P. Development of the method of analysis for determining the coordinates of terminal surface of debris flow sediments. // Bulletin of High Technology, 2020, 3(14): 3–13.

Bogdanov I.S. Debris flow protection constructions design experience at the transport infrastructure facilities in dumped conditions // Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection: Proc. of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Vol. 1. Ed. by: S.S. Chernomorets, K.S. Viskhadzhieva. Dushanbe: Promotion LLC, 2020, p. 363–370.

Geobrugg AG: website. – URL: https://www.geobrugg.com/ru/Geobrugg-Safety-is-our-nature-114436.html

Ghetto O.N., Belov V.A. On the reliability and safety of structures for engineering debris flow protection // Land Reclamation and Water Management: Proc. of All-Russian Scientific-Practical Conf., Dedicated to the 145th Anniversary of the Formation of "Donleskhoz" (GBU RO "Directorate of Specially Protected Natural Territories of Regional Significance"). Iss. 19, Novocherkassk, Lik Publ., 2021, p. 88–94.

Ghetto O.N., Belov V.A., Anokhin A.M. Assessment of the reliability of debris flow-retaining structures // Land Reclamation and Water Management: Proc. of All-Russian Scientific-Practical Conf. (Shumakov Readings), Dedicated to the 95th Birthday of Prof. V.S. Lapshenkov. Iss. 18, Novocherkassk, Lik Publ., 2020, p. 124–127.

Ghetto O.N., Belov V.A. Organisational and technical measures to ensure debris flow protection // Land Reclamation and Water Engineering, 2022, 3: 264–276.

Golosov V.N., Kuznetsova Yu.S., Ivanova N.N., [et al.] Geomorphological consequences and hydrometeorological conditions of extreme flood in the Tsanyk river basin, Greater Sochi area // Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection: Proc. of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Vol. 1. Ed. by: S.S. Chernomorets, K.S. Viskhadzhieva. Dushanbe: Promotion LLC, 2020, p. 438–445.

Kondratieva N.V., Adzhiev A.Ch., Bekkiev M.Yu., Geduyeva M.M., Perov V.F., Razumov V.V., et al. Cadastre of Debris flow Hazard in the South of the European Part of Russia, Moscow, Feoriya Publ., Nalchik, Pechatny Dvor Publ., 2015, 148 p.

Panina O.V., Dontsova O.L. Main geological and ecological forecasting of debris flow risks in the North-Western Caucasus // Geology, Geography and Global Energy, 2018, 3(70): 201–207.

Shvarev S.V., Kharchenko S.V., Golosov V.N., Uspenskii M. I. A quantitative assessment of mudflow intensification factors on the Aibga Ridge slope (Western Caucasus) over 2006–2019 // Geogr. Nat. Resour., 2021, 42: 122–130. doi: 10.1134/S1875372821020128.

Volosukhin V.A., Bandurin M.A., Prikhodko I.A. Theoretical justification for reducing the risks of operation of hydraulic structures and the use of flexible dams for engineering protection of the territory from flooding // Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education, 2022, 4(68): 407–418. doi: 10.32786/2071-9485-2022-04-49.

Zharashuev M.V., Terekulov Z.M., Akshayakov Z.T., Battaev A.Sh. Development of a method for floods and debris flows monitoring in hard-to-reach areas // Proc. of Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences, 2021, 15(1): 68–73. doi: 10.31161/1995-0675-2021-15-1-68–73.

Conceptual model of an experimental pile structure for stabilizing landslide processes

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. The paper considers a conceptual model of an experimental pile structure consisting of a vertical and inclined pile, which is proposed to be used to stabilize landslide processes. The operating principles of stud piles and anti-block pillars are described. A distinctive feature of the experimental pile structure under consideration is the combination of the advantages of known technologies for fixing landslide massifs using stud piles and anti-block pillars.

Key words: *pile, landslide, pile structure, landslide massif, anti-landslide measures*

Cite of this article: Mazhaisky Yu.A., Sheshenev N.V. Conceptual model of an experimental pile structure for stabilizing landslide processes. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 301–305.

Концептуальная модель экспериментальной свайной конструкции для стабилизации оползневых процессов

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. Рассмотрена концептуальная модель экспериментальной свайной конструкции, состоящей из вертикальной и наклонной свай, которую предлагается использовать для стабилизации оползневых процессов. Описаны принципы работы свай-шпилек и противообвальных колонн. Отличительной особенностью рассматриваемой экспериментальной свайной конструкции является сочетание преимуществ известных технологий закрепления оползневых массивов с помощью свай-шпилек и противообвальных колонн.

Ключевые слова: *свая, оползень, конструкция сваи, оползневой массив, противооползневые мероприятия*

Ссылка для цитирования: Мажайский Ю.А., Шешенев Н.В. Концептуальная модель экспериментальной свайной конструкции для стабилизации оползневых процессов. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 301–305.

Introduction

Natural disasters have threatened the inhabitants of our planet since the beginning of civilization. There is no such thing as 100% safety anywhere. Natural disasters can cause enormous damage, the size of which depends not only on the intensity of the disasters

themselves, but also on the level of development of society and its political system [*Fomichev, 2017*].

For example, landslides annually affect tens and hundreds of buildings and structures, destruction of road surfaces, collapse of slopes and embankments, collapse of structures and various accidents occur. And, of course, it should be noted that thousands of people become victims of landslides every year. This in itself is the most important factor indicating the relevance of this problem [*Simonyan, 2011*].

It is known that 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, a comprehensive approach is needed, including monitoring, analysis, creation of maps of dangerous areas, development of mathematical models and modern methods of calculating landslide processes using software packages, conducting experimental studies, creating effective engineering structures to secure landslide masses, building debris flow protection structures, assessing the risk of debris flow disasters and mitigating the consequences of natural disasters.

Brief overview of the problem

Soil displacement in the form of landslides occurs when the shear forces exceed the forces that hold the soil. This can occur during periods of soil moisture. Landslide soil displacement occurs along a sliding surface that separates the sliding and stable soil massifs [*Maslov, 1977*].

The modern foreign classification of landslide flows identifies the following patterns of their movement: viscous flow; viscoplastic flow; sliding on a solid surface; mixed form of flow and sliding; spreading, as well as some types of debris flows with a pronounced sliding surface on a stationary underlying layer [*Cruden, 1996*].

Methods

Landslides of the "crash with shear and rotation" type can be calculated using the circular cylindrical sliding surfaces method or the equal-strength slope method, while cover landslides are calculated using the "horizontal forces" method. However, the choice of the calculation model for the flow of soil mass is largely influenced by its composition, moisture state, and the expected dynamics of movement [*Burmina, 2017*].

Therefore, it is advisable to use rheological models of viscous-plastic flow of a landslide, in the form of a structured medium, as one of the most catastrophic phenomena. From a rheological point of view, a structured medium is a medium with initial shear resistance. It is characterized by the fact that, unlike unstructured media, no flow occurs in it at stresses greater than zero but less than the initial shear resistance. Viscous flow of unstructured media is possible at any values of tangential stresses other than zero [*Buslov, 2018*].

In our case, the slope modeling was performed using elasticity theory methods and consisted of dividing the soil massif into a set of finite elements in the Plaxis software package. The calculation scheme of the massif is shown in Fig. 1.

Data

One of the possible methods of fixing landslide deluvium is the use of piles. To fix or prevent landslides, when there is a strong underlying layer in which the lower ends of piles or pillars can be embedded, retaining pile structures are used from one or two rows of reinforced concrete piles, usually bored, with a grillage or in the form of separate pile bushes, as well as reinforced concrete pillars constructed in thrust with the soil in shafts or in large-diameter boreholes. Numerous facts of the use of piles in this area indicate their effectiveness and stability as a means of combating landslides.

It is known to use pillars-nadolbs and piles-studs as a fixation of a landslide soil mass. Piles-nadolbs are a rigid element that takes up landslide pressure and works on bending. Piles-studs are similar to a flexible element that works on tension.

The pillars-nadolbs take on a colossal load from the sliding soil mass, and accordingly, the maximum bending moment occurs in these structures. To increase the bearing capacity of such a structure, to secure the sliding soil masses, it is necessary to use a significant number of pillars-nadolbs of large cross-section.

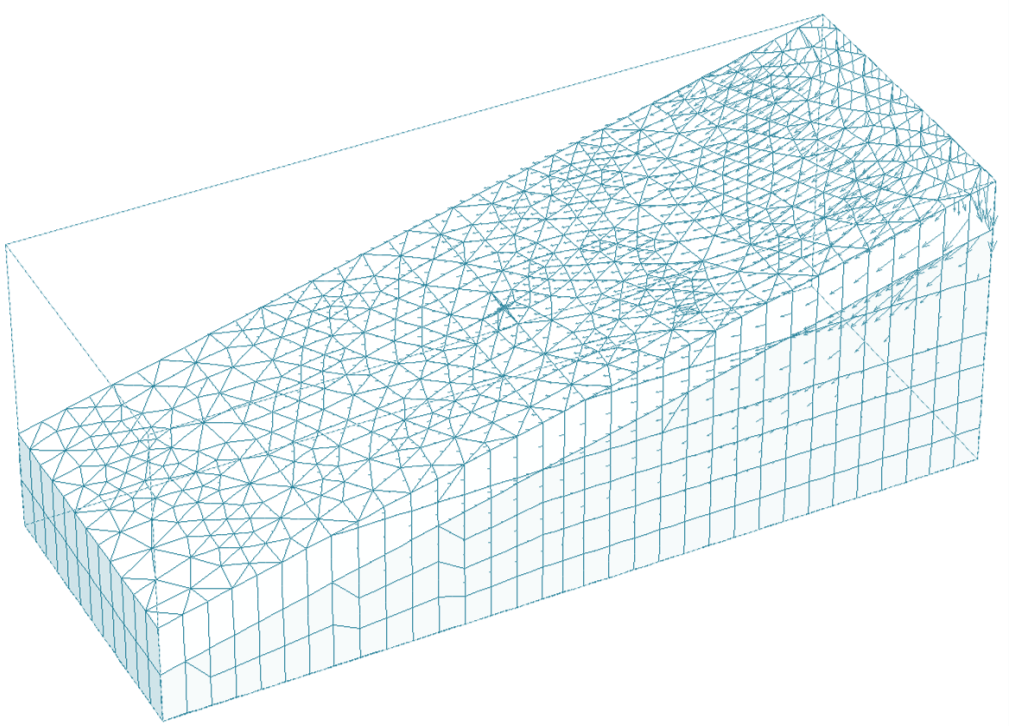


Fig. 1. Soil mass deformation diagram in the Plaxis software package

To ensure the fixing work of pile-studs in the soil massif, it is necessary that they could work in tension and were reliably fixed against tearing out both in the sliding and immobile thickness. We propose to use a conceptual model of a pile structure that combines the advantages of a pillar-nadolb and a flexible pile-stud.

This structure is a combination of two piles (Fig. 2), connected to each other by a hinge and embedded in the supporting layer of soil or bedrock, along which the sliding masses of deluvium slide.

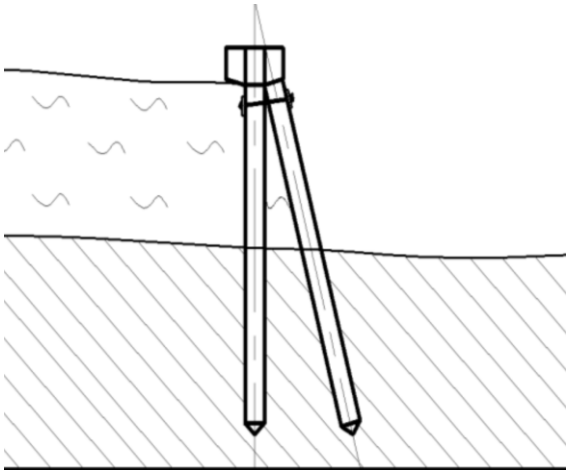


Fig. 2. Schematic diagram of the conceptual model of the experimental pile structure

Analysis

The hinged connection allows the vertical pile, which takes the pressure from the landslide movement, to work like a flexible stud pile, and the inclined pile to take the pressure from the landslide, due to its transfer through the hinge and its transfer to the foundation, performing the function of a thrust, due to which the vertical pile does not tear off. In general, the design is similar to the work of a pillar-thrust. The deformations and moment diagrams of this design can be determined by methods of structural mechanics or modeling in the LinPro software package, the calculation results are shown in Fig. 3.

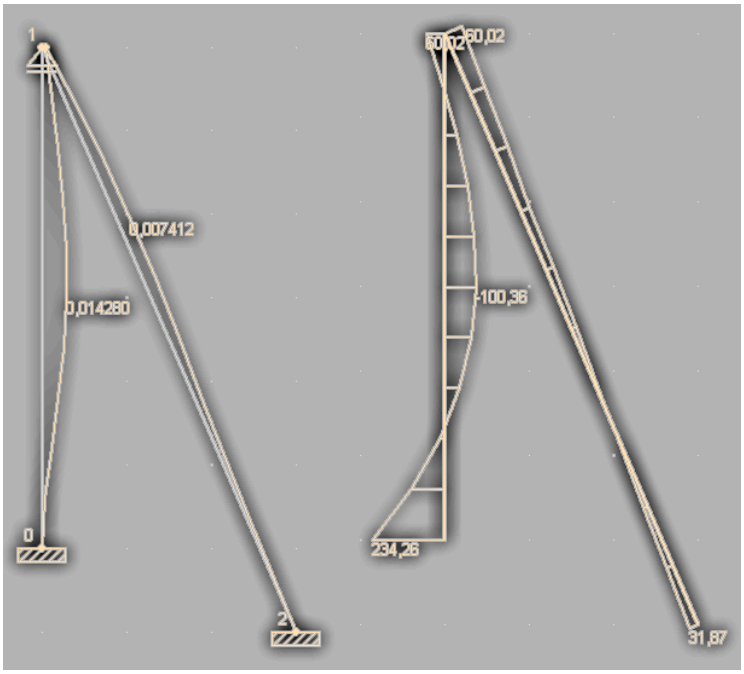


Fig. 3. Deformation and moment diagrams in the LinPro software package

It is advisable to arrange such structures in a staggered pattern, since such arrangement is justified when placing single piles, which allows slowing down the speed of movement of landslide masses. It is possible to connect the hinged heads of ordinary structures using a grillage or to introduce cross-shaped connections to impart greater rigidity and stability to the complex of proposed structures for fixing landslide masses.

Conclusions

The double pile structure allows for the strengthening of a soft soil massif with rheological properties, but in the surface zone the hinge head may "creep". As a result, it is necessary to take measures to reduce the landslide pressure that falls on each experimental structure. The fight against this phenomenon should be carried out with a simultaneous reduction in the distance between the pile rows and between the piles, the use of drainage surface measures and phytogenic measures.

The advantage of the proposed design is the simplicity of installation, the smaller depth of embedment of piles in the bearing layer in relation to the pillars-nadolbs and stud piles, as well as the smaller value of the cross-section of the reinforced concrete pile - this is due to the redistribution of forces in the paired structure of piles connected by a hinge. However, the issue concerning the dimensions of the cross-section of piles, the step in a row and between rows of paired pile structures requires additional study taking into account the angle of inclination of the additional support, which will depend on the nature of the landslide, the physical and mechanical properties of weak soils and bedrock, as well as engineering and geological conditions.

References

Burmina E.N., Bakulina A.A., Suvorova N.A. Selection of calculation models of the flow depending on the dynamics of the landslide / in the collection: principles and technologies of greening production in agriculture, forestry and fisheries // Proceedings of the 68th International scientific and practical conference dedicated to the Year of Ecology in Russia. Ministry of Agriculture of the Russian Federation; FGBOUVO "Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev", 2017, p. 70–74.

Buslov A.S. Rheology of viscoplastic landslides in their natural state and when stabilized by piles / A.S. Buslov, E.N. Kalacheva // Vestnik MGSU, 2012, 11: 45–54.

Buslov A.S., Bakulina A.A., Burmina E.N., Sheshenev N.V. On the issue of modeling viscous-plastic soil flow. // New technologies in the educational process and production: Proceedings of the XVI inter-university scientific and technical conference, Ryazan, April 17-19, 2018 / Ed. Platonov A.A., Bakulina A.A. Ryazan: Individual entrepreneur Zhukov Vitaly Yuryevich, 2018, p. 258–268.

Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes. // In: Turner A.K., Schuster R.L. (eds.) Landslides–Investigation and Mitigation. Washington D.C., National Academy Press, Transportation Research Board Special Report. 1996, 247: 36–75.

Fomichev K.V., Shemyakina A.V., Bakulina A.A. Errors in construction leading to destruction. // In the collection: New technologies in the educational process and production Proceedings of the XV inter-university scientific and technical conference. Edited by Platonov A.A., Bakulina A.A. 2017, p. 110–113.

Maslov N.N. Soil mechanics in construction practice. Moscow: Stroyizdat, 1977, 320 p.

Simonyan, V.V. Study of landslide processes by geodetic methods: Monograph. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, 2011, 172 p.

Перспективы развития селевых прогнозов в Казахстане с применением технологий машинного обучения

А.Р. Медеу[1], В.П. Благовещенский[1], В.В. Жданов[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, Алматы, Казахстан, ZhdanovVitaliy@yandex.kz

[2]Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Аннотация. Прогнозирование селевой опасности является одним из методов защиты. На основе штормовых предупреждений ДЧС г. Алматы принимает экстренные меры. Существующие методы прогноза для данного региона основаны на текущем прогнозировании с заблаговременностью 1–3 ч. Они были разработаны в 1980-е гг., и их точность вызывает сомнение у потребителей. Целью нашей работы является улучшения качества оценки селеопасной обстановки с применением интеллектуального анализа данных и машинного обучения. Искусственные нейронные сети успешно применяются для прогнозирования природных опасностей во многих мировых прогностических центрах. Для создания экспериментального метода применялся профессиональный статистический пакет обработки больших данных от фирмы “StatSoft”. Для обучения была собрана база данных за период 1950–2024 г. В нее вошли гидрометеорологические факторы селеформирования и информация о селевых потоках. Для классификации селеопасной обстановки был предложен свой вариант шкалы селевой опасности. В результате была разработана экспертная система для классификации потенциально опасных гидрометеорологических условий. Для проверки работоспособности модели были проведены испытания на реальных данных за селеопасный сезон 2024 г. Стандартная статистическая ошибка входных данных была в пределах 5% уровня значимости, а ошибка обучения составила 1–8%. Результаты моделирования оказались достоверными. Ее точность в результате производственных испытаний составила 93,6%, что выше точности существующих методов прогнозов. Выполненные работы свидетельствуют о перспективности применения технологий машинного обучения для оценки и прогнозирования уровня селевой опасности.

Ключевые слова: *анализ данных, горы Иле Алатау, искусственный интеллект, классификация, машинное обучение, селевые потоки, юго-восточный Казахстан*

Ссылка для цитирования: Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Жданов В.В., Ранова С.У., Камалбекова А.Н., Алдаберген У.Р. Перспективы развития селевых прогнозов в Казахстане с применением технологий машинного обучения. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 306–315.

Prospects for development of debris flow forecasts in Kazakhstan using machine learning technologies

A.R. Medeu[1], V.P. Blagovechshenskiy[1], V.V. Zhdanov[1], S.U. Ranova[1], A.N. Kamalbekova[1,2], U.R. Aldabergen[1,2]

[1]JSC “Institute of Geography and Water Security” of the Ministry of Science and Higher Education, Almaty, Kazakhstan, ZhdanovVitaliy@yandex.kz

[2] Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Abstract. Debris flow danger forecasting is one of the protection methods. Based on emergency warnings, the Almaty Department of Emergency Situations takes emergency

measures. Existing forecasting methods for this region are now-casting with a lead time of 1–3 h. They were developed in the 80s of the 20th century, and their accuracy is questionable among consumers. The purpose of our work is to improve the quality of debris flow hazard situation assessment using intelligent data analysis and machine learning. Artificial neural networks are successfully used to forecast natural hazards in many global forecasting centers. To create an experimental method, a professional statistical package for big data processing from "StatSoft" was used. For training, a database was collected for the period 1950–2024. It included hydro-meteorological factors of debris flow formation and information on debris flows. To classify the debris flow danger situation, our own version of the debris flow danger scale was proposed. As a result, an expert system was developed for classifying potentially dangerous hydro-meteorological conditions. To verify the model's performance, tests were conducted on real data for the 2024 debris flow season. The standard statistical error of the input data was within 5% of the significance level, and the training error was 1–8%. The modeling results were reliable. Its accuracy as a result of production tests was 93.6%, which is higher than the accuracy of existing forecasting methods. The work performed indicates the promise of using machine learning technologies to assess and predict the level of debris flow danger.

Key words: *data analysis, Ile Alatau mountains, artificial intelligence, classification, machine learning, debris flows, southeastern Kazakhstan*

Cite of this article: Medeu A.R., Blagovechshenskiy V.P., Zhdanov V.V., Ranova S.U., Kamalbekova A.N., Aldabergen U.R. Prospects for development of debris flow forecasts in Kazakhstan using machine learning technologies. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 306–315.

Введение

Катастрофические селевые потоки отмечаются во многих горных районах мира. Они способны причинить значительный материальный ущерб и вызвать многочисленные жертвы. Поэтому защита от них имеет важное государственное значение. На основе предупреждений планируется работа спасательных служб и возможная эвакуация населения. В последние годы новейшие методы прогноза селевых потоков разрабатывались в крупных научно-исследовательских центрах. Лидерами являются страны, где горные районы занимают большие площади. Это США, Китай, Индия, Россия, Швейцария, Япония и Южная Корея [*Будагов, 2008; Dash, 2022; Li, 2019; Huang, 2022; Heckmann, 2014*]. Применяются два подхода к прогнозу – детерминистский и стохастический. В первом используют расчетные формулы, учитывая физические и гидравлические законы возникновения потоков. Во втором применяют статистические зависимости между опасными явлениями погоды и возникновением селевого потока.

В Республике Казахстан исследования в области селевых потоков начались в 1920-х гг. Система предупреждения в те годы заключалась в телеграфной передаче данных с наблюдательных постов метеорологической службы. В 1960–1970-е гг. уже был открыт научный институт и внедрены первые методы прогноза катастрофических потоков [*Степанов, 2023*]. В настоящее время изучением и прогнозированием селевых потоков занимается национальная метеорологическая служба. Государственное Учреждение «Селезащита» является проектной организацией и отвечает за эксплуатацию защитных инженерных сооружений. Принятие экстренных мер по оповещению и эвакуации населения проводит департамент по чрезвычайным ситуациям. Основания для этого являются предупреждения от гидрометеорологической прогностической службы [*Яфязова, 2007*].

Воздействию селевых потоков подвержены предгорные районы на востоке, юго-востоке и юге республики. Масштабы явления могут меняться от локальных потоков, до гигантских с многочисленными жертвами. Их объемы могут достигать миллионов

кубометров и расход воды несколько тысяч кубометров в секунду. Крупнейшие катастрофы в 1921, 1963, 1973 г. приводили к огромным жертвам и ущербу в миллиарды долларов [*Виноградов, 1976; Таланов, 2001*]. Опасность этого природного явления вызывает необходимость в разработке разных методов защиты. Долговременная постоянная защита в виде дамб и отводящих каналов стоит очень дорого, но значительно уменьшает риск для населения и объектов. Прогнозирование опасности прохождения селя стоит значительно меньше и позволяет организовать предупреждение для населения. Поэтому он очень широко применяется в стране [*Баймолдаев, 2007*].

В работе РГП «Казгидромет» и ГУ «Казселезащита» используются статистические методы прогноза, разработанные группой авторов: Степанов, Яфязова, Виноградов, Таланов [*Степанов, 2014; Степанов, 2023; Таланов, 2001; Таланов, 2016; Виноградов, 1977*]. В них учитывается зависимость между метеорологическими параметрами и прохождением селевых потоков. Рассчитывается превышение критических значений температуры воздуха и количества осадков, необходимых для формирования селевых потоков. Отдельно оцениваются условия формирования низкогорных паводков и высокогорных ливневых и гляциальных селей. Методы относятся к нау-кастинг прогнозам. Для увеличения заблаговременности применяются данные прогноза, составленного в синоптическом отделе РГП «Казгидромет». По требованию гидрологов составляются прогнозы погоды в районе расположения основных селевых очагов. Точность локальных прогнозов в изученном районе всегда выше фоновых по большой территории. По данным национальной гидрометеорологической службы для хребта Иле Алатау точность прогнозов достигает 90% [*Степанов, 2023; селевой бюллетень, 2024*].

Материалы и методы

Существуют два способа внедрения технологий машинного обучения в работу ученых, анализирующих природные явления [*Бишоп, 2020*]. Первый из них это написание собственной программы нейросимулятора. Самый распространенный язык программирования PYTON с открытым кодом и использованием бесплатных библиотек. Но этот способ требует соответствующей квалификации программиста и больших затрат времени на разработку собственной нейронной сети (ИНС). Другой способ создания ИНС это использование готового программного обеспечения от известных производителей [*Akgun, 2012; Бурова, 2020; Lutsenko, 2022*].

Для работы мы выбрали пакет профессиональной статистики и анализа больших данных “StatSoft” от компании “Dell”. Русскоязычная версия адаптирована для рынка СНГ компанией “StatSoft Russia” и широко применяется многими научными организациями [*StatSoft Russia, 2022*]. Пакет представляет электронные таблицы данных и блоки статистического анализа. Программа включает интеллектуальный анализ данных использующих различные алгоритмы контролируемого и неконтролируемого обучения [*Боровиков, 2018*]. Присутствуют режимы обучения, тестирования и прогнозирования с помощью полученной ИНС.

В пакете интеллектуального анализа данных “StatSoft” реализованы следующие параметры:

1. Тип сети: многослойный персептрон (MPL).
2. Алгоритм обучения: итерационный метод численной оптимизации (BFGS), разновидность метода обратного распространения ошибки.
3. Функция активации: Тождественная, Гиперболическая, Логистическая, Софтмакс.
4. Эпохи обучения. Полный цикл обработки всего обучающего массива. Реализация от 1 до нескольких тысяч.
5. Функция ошибки обучения: сумма квадратов и кросс-энтропия. Математический метод выражения суммарной ошибки расчетов.
6. Режим хранения и прогнозирования. Позволяет сохранить готовую нейронную сеть в формате PMML и использовать для прогнозирования.

Обучающая выборка и уровень селевой опасности

Для оценки селевой опасности в горах Иле Алатау используются многолетние архивы Казахстанской метеорологической службы. Данные наблюдений включены в международный фонд Всемирной метеорологической организации и находятся в свободном доступе в стандартном коде КН-01 – SYNOP [*www.rp5.ru, 2024, архив Казгидромета 2024*]. Это старейшие пункты наблюдений, которые являются репрезентативными для горных районов всего Юго-Восточного Казахстана:

- метеостанция «Мынжылки», высота 3017 м н.у.м., индекс 36889 (N43°05’06,9”; E77°04’37,5”);
- метеостанция «озеро Улкен Алматы», высота 2502 м н.у.м., индекс 36789 (N43°03’33,3”; E76°58’55,0”);
- метеостанция Шымбулак, высота 2200 м н.у.м., индекс станции 36873 (N43°07’57,3”; E77°04’39,51”).
- На этих станциях проводится полный комплекс метеорологических наблюдений по стандарту ВМО. По данным метеорологических станций создана электронной базы данных со следующими характеристиками:
- период наблюдений: 1950–2024 гг.,
- дискретность наблюдений: суточные данные метеоэлементов за селеопасный период с 1 мая по 30 сентября;
- объем выборки: 16 рядов переменных по 11100 значений в каждом;

Данные о селевых потоках собираются в многолетних архивах наблюдений Национальной метеорологичской службы, государственного селезащитного управления [*селевой бюллетень 2024, сайт МЧС 2024*]. Анализировались селевые явления на реках северного склона Иле Алатау: Узынкаргалы, Узынагаш, Шамолган, Каскелен, Каргалы, Аксай, Улкен и Киши Алматы, Талгар, Есик, Турген. Данные хранятся в форматах «Microsoft Excel» и «Statistica Spreadsheet».

Прогнозы опасных гидрометеорологических явлений передаются в вероятностной форме согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации (ВМО) [*Кутвал, 2008; Флеминг, 2015*]. Это позволяет учесть степень угрозы и принятие необходимых мер защиты. Чаще всего используются 5 и 4 балльные шкалы погодной опасности, где учитывается вероятность возникновения явления и его интенсивность. Для удобства потребителей уровни опасности обозначаются стандартными понятными для потребителя фразами. Дополнительный текст выделяется цветом для привлечения внимания. Низкий уровень опасности – зеленый, высокий уровень опасности – красный.

В Казахстанской национальной метеорологической службе в 2022 г. разработана собственная 4-балльная шкала селевой опасности и начат выпуск селевого бюллетеня в новом формате [*Степанов, 2023*]. Решение о необходимости внедрения вероятностных форм прогноза было принято ранее [*Таланов, 2016*]. Для выделения уровней опасности селевого потока применяются известные критерии: опасное явление погоды и стихийное гидрометеорологическое явление. Критические значения метеорологических элементов для селеопасной зоны хорошо изучены и входят в большинство методов прогноза селевых потоков. Нами предложен свой вариант шкалы опасности, немного отличный от официального. Отличие заключается в цифровом обозначении уровней: от 1 до 4 и от 0 до 3. Мы изменили обозначение и обозначили отсутствие явление 0 уровнем для удобства классификации и обучения нейронной сети. В официальном бюллетене 1 уровень дается с начала теплого периода. Мы же предлагаем считать дни с отсутствием селевых явлений нулевым уровнем, что бы не вводить в заблуждение потребителей прогноза. А первым низким уровнем будет считаться ситуация, когда появляется вероятность возникновения локальных потоков на отдельных реках. Она приведена в таблице 1 и будет использоваться для классификации селевых явлений и дальнейших экспериментальных моделей прогноза.

В зависимости от распределения нулевой изотермы селевые потоки могут формироваться в различных высотных зонах. И для составления предупреждений

инженеру прогнозисту важно оценить температурные условия в горах [*Киренская, 1985; Киренская, 1989*]. Стандартное разделение на низкогорные, среднегорные и высокогорные сели используется при составлении прогнозов в настоящее время. Оно же будет применяться при обучении нейронной сети. Их классификация зон зарождения по высоте приведена в таблице 2.

Таблица 1. Шкала селевой опасности

Уровень опасности	Вероятность возникновения селевого потока	Описание гидрометеорологической обстановки	Степень угрозы и меры защиты
0. Нулевой	Отсутствие селевых явлений	Низкая температура воздуха, осадки в твердом виде во всех горных зонах	Угроза отсутствует, меры защиты не нужны
1. Низкий	Катастрофический селевой поток маловероятен. Ожидается повышение водности в отдельных горных реках	Повышение температуры воздуха, увлажненности почвы и выпадение незначительных осадков, приводящие к росту уровня и мутности воды в горных реках	Угроза подтоплений в руслах рек, угрозы для любых хозяйственных объектов нет. Необходимо оповещение заинтересованных организаций в опасных районах
2. Умеренный	Катастрофический поток вероятен. Ожидается аномальное повышение водности во всех горных реках	Возникновение селеопасной гидрометеорологической обстановки. Температура воздуха, увлажненность почвы и количество осадков в горах достигают критерия опасного явления погоды	Есть локальная угроза для людей и хозяйственных объектов в руслах селеопасных рек. Необходимо оповещение заинтересованных организаций в опасных районах
3. Высокий	Катастрофический поток весьма вероятен. Аномальное повышение водности во всех горных реках неизбежно	Возникновение экстремальной селеопасной гидрометеорологической обстановки. Температура воздуха, увлажненность почвы и количество осадков в горах достигают критерия стихийного явления погоды	Высокая угроза для людей и хозяйственных объектов в селеопасных районах. Необходимо закрытие объектов, ограничение доступа людей в опасную зону и всеобщее оповещение населения

Таблица 2. Классификация высотных зон формирования селевых потоков

Высотная зона	Вероятность возникновения селевого потока	Описание гидрометеорологической обстановки	Степень угрозы
0. Предгорная	Отсутствие селевых явлений	Высота нулевой изотермы ниже 3200 м, замерзшая почва и осадки в твердом виде	Нет угрозы
1. Низкогорная, высота H_0 ниже 3000 м н.у.м	Формирование ливневых селевых потоков	Высота нулевой изотермы в пределах 3200–3800 м. Выпадение жидких осадков только в низкогорной зоне	Угроза подтоплений только в низкогорных и предгорных районах
2. Среднегорная, высота H_0 от 3000 до 3500 м н.у.м	Формирование ливневых селевых потоков	Высота нулевой изотермы в пределах 3800–4200 м. Выпадение жидких осадков в низкогорной и среднегорной зонах	Угроза прохождения селевых потоков по основным руслам рек в среднегорной и низкогорной зоне
3. Высокогорная, высота H_0 выше 3500 м н.у.м	Формирование ливневых, смешанных, гляциальных селевых потоков	Высота нулевой изотермы выше 4200 м. Выпадение жидких осадков во всех высотных зонах	Угроза прохождения селевых потоков по всем горным рекам и высотным зонам

Обсуждение результатов исследований

В качестве прогностических предикторов были выбраны доминирующие факторы формирования селевых потоков в данном регионе. Они приведены в таблице 3. Это 13 входных переменных (X) и 3 выходные переменные (Y). Важная причина выбора входных данных – это стандартные наблюдения, проводимые на сети метеорологических и станций Казахстана в течение длительного периода времени [*www.rp5.ru, 2024; архив Казгидромета 2024*].

Таблица 3. Метеорологические критерии, анализируемые нейронной сетью для оценки уровня селевой опасности

Переменная	Значение переменной		
Входные переменные			
X_1	Озеро Улкен Алматы	T	Среднесуточная температура воздуха, °С
X_2		ΣT_5	Сумма температур за предыдущие 5 суток, °С
X_3		$X_{сут}$	Суточная сумма осадков, мм
X_4		ΣX_{30}	Сумма осадков за предыдущий месяц, мм
X_5	Мынжылки	T	Среднесуточная температура воздуха, °С
X_6		ΣT_5	Сумма температур за предыдущие 5 суток, °С
X_7		$X_{сут}$	Суточная сумма осадков, мм
X_8		ΣX_{30}	Сумма осадков за предыдущий месяц, мм
X_9	Шымбулак	T	Среднесуточная температура воздуха, °С
X_{10}		ΣT_5	Сумма температур за предыдущие 5 суток, °С
X_{11}		$X_{сут}$	Суточная сумма осадков, мм
X_{12}		ΣX_{30}	Сумма осадков за предыдущий месяц, мм
X_{13}	–	H_0	Высота нулевой изотермы, м
Выходная переменная			
Y_1	Уровень селевой опасности		
Y_2	Факт прохождения селевого потока		
Y_3	Высотная зона формирования потока		

В результате работы был получен экспериментальный метод классификации уровней селевой опасности, высотных зон формирования и разделения дней с фактическим прохождением селевых потоков.

С учетом объема обучающей выборки для прогноза селевой опасности была выбрана оптимальная структура нейронной сети с количеством скрытых нейронов от 400 до 600 и количеством скрытых слоев: 2–3 [*Бишоп, 2020; Боровиков, 2018*]. Архитектура нейронной сети показана на рис. 1. Для классификации уровня селевой опасности: 8 входных переменных (сигналов) и 1 выходная переменная (сигнал). Для классификации высоты очагов зарождения селей: 8 входных переменных (сигналов) и 1 выходная переменная (сигнал).

В процессе эксперимента проводилось обучение нейронных сетей с различными наборами параметров и алгоритмов обучения. В результате были выбраны варианты с наименьшими ошибками обучения. Отрабатывались два варианта статистических задач – регрессия и классификация. При обучении закладывались механизмы активации нейронов, по умолчанию рекомендованные производителем программ [*StatSoft Russia, 2022*]. В режиме классификации при одинаковой обучающей выборке ошибки оказались ниже. Для дальнейшей работы будет использоваться нейросеть, которая дает наименьшие ошибки при обучении. На ее основе создается экспертная система оценки уровня селевой опасности.

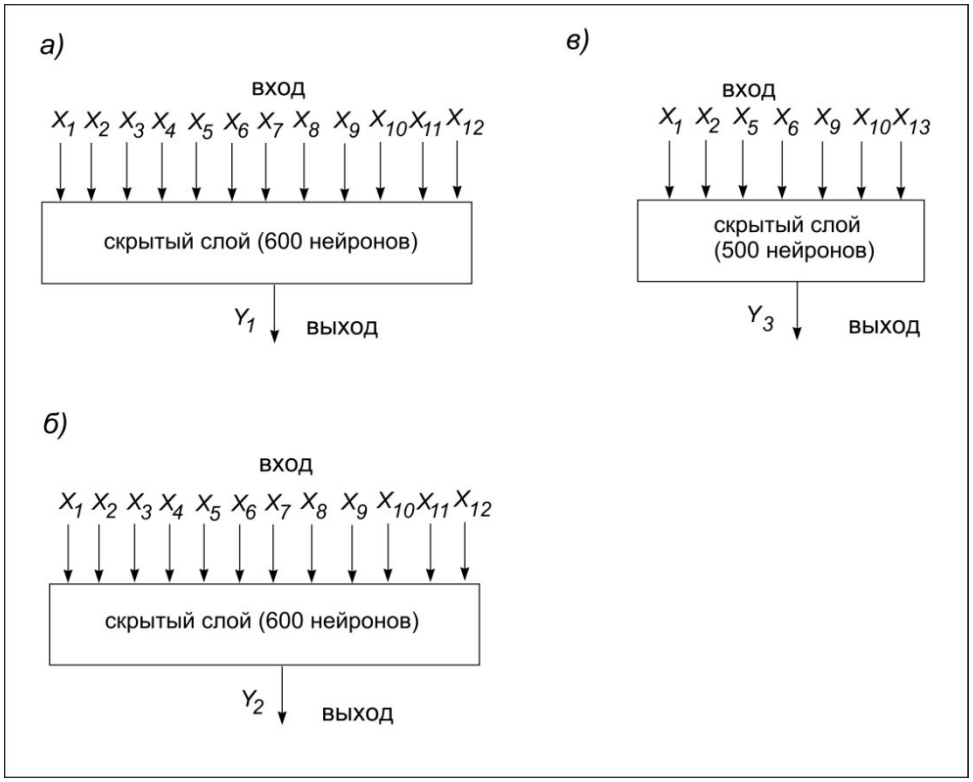


Рис. 1. Принципиальная схема искусственной нейронной сети. а) – классификация уровня селевой опасности. б) – классификация дней с прохождением селевых потоков. в) – классификация высотных зон зарождения селевых потоков

Качество работы полученного метода классификации селеопасных ситуаций было проверено на реальных данных о сходе селевых потоков в горах иле Алатау в селеопасный период с 30 мая по 31 августа 2024 г. полученных с сайтов Росгидромета и Казгидромета [*www.rp5.ru, 2024; архив Казгидромета 2024*]. Текущая селеопасная обстановка была классифицирована экспертами с учетом гидрометеорологических данных и сходом селевых потоков. Одновременно была проведена классификация обстановки с помощью полученной автоматизированной системы. Результаты соответствия точности классификации приведены в таблице 4.

Таблица 4. Проверка точности классификации на реальных данных

Метод оценки УСО	Процент точных оценок	Критерий Вилкоксона	Критерий Брайера	Корреляция Спирмена
Искусственный интеллект	93,6	2,2	0,026	0,74

Результаты классификации с помощью методов искусственного интеллекта показали хорошие результаты. Точность оценки составила 93,6%. Критерий Вилкоксона, используемый для сравнения результатов эксперимента оказался статистически значимым. Критерий Брайера для вероятностных прогнозов составил 0,026, что является хорошим показателем [*Sharma, 2024; Zhao, 2024; Rajabi, 2024*].

В селеопасный период июнь-август 2024 г. в горах Иле Алатау отмечалось несколько значимых селевых явлений [*селевой бюллетень 2024; сайт МЧС 2024*]. Большинство из них имели ливневой генезис – 30 июня, 08 и 17 июля. Причиной стали сильные ливни. Угроза возникновения селевого потока гляциального генезиса отмечалась 11 июля из-за обрушения части ледника в верховьях р. Есик. Но подобные явления трудно оценить, поскольку они возникают при малоизученных условиях в ледниковой зоне 50–51 [*Попов, 1987; Заппаров, 2023*].

30 июня отмечался локальный поток на р. Сарысай и рост уровня воды и мутности на горных реках. Причиной формирования стали осадки в количестве 10–15 мм. Модель показала 1 уровень опасности (Низкий), что близко к оценке экспертов по реальным данным.

8 июля отмечался селевой поток на р. Каскелен. В это время осадки выпадали в течение 2 дней, и суточная сумма соответствовала отсутствию селевой опасности. Модель занизила уровень по сравнению с реальными условиями. Это произошло из-за того, что осадки выпадают локально и используемые метеостанции в данном случае оказались нерепрезентативными.

10 июля модель показала повышение селевой опасности до 2 уровня (умеренного). Это связано с критическим увлажнением и осадками 18–20 мм в сутки. Однако, отмечался только повышение уровня и мутности воды, что соответствует 1 уровню опасности (низкому). Модель немного завысила уровень.

17 июля селевые потоки прошли по рекам Талгар, Улкен Алматы и Кумбельсу. Была повреждена автодорога. Причиной стали обильные осадки величиной 25–30 мм в сутки вместе с критической температурой воздуха и увлажненностью почвы. Модель показала 2 уровень (умеренный), что соответствует реальным данным.

Заключение

Разработанный нами метод классификации уровня селевой опасности, факта прохождения селевых потоков и высотных зон зарождения селей позволяет усовершенствовать методы прогноза этого катастрофического явления. Искусственный интеллект позволяет провести классификацию текущей метеорологической обстановки с точностью 93,6%. Это очень важно для составления экстренных оповещений для населения и государственных органов об ожидаемой чрезвычайной ситуации. Заблаговременные точные прогнозы необходимы для планирования работы спасательных служб и обеспечения безопасности населения в горных селеопасных районах. В дальнейшем планируется внедрение экспериментального метода в практическую работу РГП «Казгидромет» и ГУ «Казселезащита». Однако методы оценки текущей ситуации обладают нулевой заблаговременностью. Перспективным методом является применение результатов численных моделей прогноза погоды с целью увеличения заблаговременности предупреждений о селевой опасности. В качестве прогностических предикторов в отдаленных неизученных районах целесообразно брать результаты погодных реанализов из международных баз данных.

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

Akgun A. et al. An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm // Comput Geosci. 2012. № 38(1). P. 23–34.

Архив Казахстанской национальной метеорологической службы URL: https://meteo.kazhydromet.kz/database_meteo/. [Электронный ресурс]. (Дата обращения 30.09.2024).

Баймолдаев Т., Виноходов В.Н. Казселезащита – оперативные меры до и после стихии. Алматы: Изд-во Бастау, 2007, 284 с.

Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных и машинное обучение на Statistica. Москва: Изд-во Горячая линия – Телеком, 2018, 354 с.

Бишоп К.М. Распознавание образов и машинное обучение. / Перевод с английского Д.А. Клюшина. Москва; Санкт-Петербург: Изд-во Диалектика, 2020, 960 с.

Будагов Б.А., Сафаров С.Г. Селевые явления на южном склоне Большого Кавказа и гидрометеорологические факторы их формирования // Известия РАН. Серия географическая. Москва: Наука, 2008, № 2, с. 116–121.

Бурова О.А., Судакова А.А. Искусственный интеллект – помощник статистики будущего // Наука о данных: Материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 5–7 февраля 2020 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2020, с. 74–76.

Виноградов, Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Ленинград, Гидрометеоиздат, 1977, 55 с.

Виноградов Ю.Б., Земс А.Э., Хонин Р.В. Селевой поток 15 июля 1973 г. на Малой Алматинке // Селевые потоки, Изд-во КазНИГМИ. 1976, № 1, с. 60–72.

Ежедневный селевой бюллетень. URL: https://www.kazhydromet.kz/ru/selevedenie-str/ezhednevnyy-byulleten-selevoy-opasnosti-dozhdevogo-genezisa. [Электронный ресурс]. (Дата обращения 30.09.2024).

Информация о погоде и климате по данным метеостанций. URL: http://www.rp5.ru [Электрон. ресурс]. (дата обращения 10.10.2024).

Заппаров М.Р., Касенов М.К., Кулбекова Ш.А., Ауелхан Е.С., Бостаева А.К. Критерии прорывоопасности моренно-ледниковых озер: научно-методологическое обоснование. Алматы: Мектеп, 2023, 182 с.

Киренская Т.Л.; Данилина Н.А. О долгосрочных прогнозах селевых явлений ливневого происхождения // Селевые потоки. Изд-во КазНИГМИ. 1989. № 11. С. 27-35.

Киренская Т.Л. О прогнозировании ливневых селей в Заилийском Алатау // Селевые потоки. Москва Гидрометео издательство. 1985. № 9. С. 77–84.

Кутвал А. Рекомендации по предоставлению данных о неопределенности прогнозов. PWC-18 WMO/TD. 2008, № 1422. http://meteoinfo.ru/wmo-td-1422.

Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан. URL: https://www.gov.kz/memleket/entities/emer/press/article/1?lang=en [Электрон. ресурс] (дата обращения 10.10.2024).

Попов Н.В. Прорывные гляциальные сели и борьба с ними в горах Северного Тянь-Шаня. Материалы гляциологических исследований: Хроника, обсуждения. 1987, вып. 59, с. 189–195.

Руководящие указания ВМО по обслуживанию прогнозами и предупреждениями о многих опасных явлениях с учетом их возможных последствий. (Флеминг Д. и др.). 2015. ВМО 1150. 36 с. (www.wmo.int)

Степанов Б.С. Вклад национальной гидрометеорологической службы Республики Казахстан в селевую безопасность страны // Гидрометеорология и экология, 2023, 4: 113–123. doi: 10.54668/2789-6323-2023-111-4-113-123.

Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Сверхкраткосрочный прогноз дождевых селей и формирование селей в бассейнах рек Киши и Улкен Алматы 21 июля 2023 года // Гидрометеорология и экология, 2023, 4: 16−24.

Таланов Е.А. Технология краткосрочного вероятностного прогнозирования паводков и селевых потоков на основе прогноза количества осадков на 3 и 6 часов. // 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. 229–233.

Таланов Е.А. Селевые явления и зоны, подверженные их воздействию в бассейне реки Б. Алматинка. Современные проблемы геоэкологии и созологии: Доклады Международной научно-практической конференции 22–23 января 2001, Алматы / Под редакцией М.М. Буракова, Л.М. Павличенко, Е.А. Таланова. Алматы: изд-во Шартарап, 2001, 410 с.

Яфязова Р.К. Природа селей Заилийского Алатау. Проблемы адаптации. Алматы. 2007. С. 158.

Dash R.K., Falae P.O. Kanungo, D.P. Debris flow susceptibility zonation using statistical models in parts of Northwest Indian Himalayas-implementation, validation, and comparative evaluation. // Nat. Hazards, 2022, 111: 2011–2058.

Lutsenko E.V. Automated system-cognitive analysis of the level of consistency of natural numbers as systems of prime factors // Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University, 2022, 179: 96–177.

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.

Li C., Ma Y. Formation, mechanical characteristics and vulnerability of debris flow in Yaojiawan Gully, Wangmo County, Guizhou Province // Science, Technology and Engineering, 2019. 19(24): 62–67.

Huang H. et al. Debris-flow susceptibility assessment in China: A comparison between traditional statistical and machine learning methods // Remote Sens., 2022, No. 14, p. 4475.

Heckmann T. et al. Sample size matters: Investigating the effect of sample size on a logistic regression susceptibility model for debris flows // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2014, 14: 259–278.

Rajabi A.M., Edalat A., Abolghasemi Y., Khodaparast M. Using neural network modeling to improve the detection accuracy of land subsidence due to groundwater withdrawal. // J. Mt. Sci., 2024, 21: 2320–2333. doi: 10.1007/s11629-023-8470-2.

Sharma A., Sajjad H., Rahaman M.H., Saha T.K., Bhuyan N. Effectiveness of hybrid ensemble machine learning models for landslide susceptibility analysis: Evidence from Shimla district of North-west Indian Himalayan region // J. Mt. Sci., 2024, 21: 2368–2393. doi: 10.1007/s11629-024-8651-7

StatSoft. URL: https://statsoftai.ru/ [Электрон. ресурс]. (дата обращения 06.09.2025).

Zhao H., Wei A., Ma F., Dai F., Jiang Y., LiH. Comparison of debris flow susceptibility assessment methods: support vector machine, particle swarm optimization, and feature selection techniques // J. Mt. Sci., 2024, 21: 397–412. doi: 10.1007/s11629-023-8395-9.

Субаквальные сели на континентальном склоне в северо-восточной части Черного моря: анализ условий и причин образования

С.Г. Миронюк

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, mironyuksg@gmail.com

Аннотация. Выполнен анализ условий и основных причин формирования субаквальных селей вдоль трасс двух магистральных газопроводов в пределах континентального склона Восточно-Черноморской впадины. Дана подробная характеристика геологической среды их образования. Рассмотрены особенности рельефа, строения и состава осадочного чехла и коренных пород, склоновые процессы, предшествующие возникновению подводных селей, а также, в качестве, основной причины их развития на материковом склоне морей зон коллизии, параметры землетрясений. Дана характеристики сейсмических событий воздействующих на устойчивость осадков и горных пород в верхней части геологического разреза. Приведен пример, иллюстрирующий ситуацию, когда небольшое по силе землетрясение с M <5 вызвало смещение горных пород. Подробно описаны формы микро-и мезорельефа в полосе строительства газопроводов. Указана морфология подводных каньонов. Приведены примеры, доказывающие образование субаквальных плотностных потоков и в настоящее время. К их числу относятся: следы эрозии донной поверхности, экстремальные скорости течений, обрывы кабельных линий. Сравнительный анализ инженерно-геологической обстановки формирования субаквальных селей показал, что масштабы склоновых процессов, включая квазиселевые потоки, обусловлены в основном силой землетрясения, а их тип морфологией склона и составом слагающих его осадков и пород.

***Ключевые слова**: Черное море, континентальный склон, подводные каньоны, обвалы, оползни, субаквальные сели, генезис гравитационных потоков, опасность, трубопроводы*

Ссылка для цитирования: Миронюк С.Г. Субаквальные сели на континентальном склоне в северо-восточной части Черного моря: анализ условий и причин образования. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 316–327.

Subaqueous debris flows on the continental slope of the north-eastern part of the Black Sea: analysis of conditions and causes of formation

S.G. Mironyuk

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, mironyuksg@gmail.com

Abstract. The article presents the analysis of conditions and main causes of formation of subaqueous debris flows along the routes of two main gas pipelines within the continental slope of the East Black Sea Depression. A detailed description of the geological environment of their formation is given. The article considers the features of the relief, structure and composition of the sedimentary cover and bedrock, slope processes preceding the occurrence of underwater debris flows, as well as earthquake parameters as the main cause of their development on the continental slope of the seas of collision zones. The article presents the characteristics of seismic events affecting the stability of sediments and rocks in the upper part of the geological section. An example is given illustrating the situation when a small earthquake with M <5 caused a displacement of rocks. The forms

of micro- and mesorelief in the gas pipeline construction strip are described in detail. The morphology of underwater canyons is indicated. Examples are given proving the formation of subaqueous density flows at the present time. These include: traces of bottom surface erosion, extreme current velocities, and cable line breaks. A comparative analysis of the engineering and geological conditions of subaqueous debris flow formation showed that the scale of slope processes, including quasi-debris flows, are determined mainly by the strength of the earthquake, and their type by the slope morphology and composition of the sediments and rocks that make it up.

Key words: *Black Sea, continental slope, submarine canyons, collapses, landslides, subaqueous debris flows, genesis of gravity flows, danger, pipelines*

Cite of this article: Mironyuk S.G. Subaqueous debris flows on the continental slope of the north-eastern part of the Black Sea: analysis of conditions and causes of formation. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 316–327.

Введение

В начале статьи несколько замечаний относительно термина «субаквальные сели». Склоновые гравитационные процессы в водной (субаквальной) среде в научной литературе нередко обозначают терминами «субаквальные сели», «подводные сели», тем самым подчеркивая определенное сходство между селевыми потоками на суше и субаквальными перемещениями осадочного материала. Отмечается также, что отложения субаквальных селей являются аналогом пролювиальных отложений суши. В терминологическом словаре В.Ф. Перова дано развернутое определение термина «субаквальные сели» (submarine debris flows) в котором, путем перечисления ряда признаков, раскрывается его содержание [*Перов, 1996*]. В «целях упорядочения представлений о многообразии форм проявления селевого процесса на Земле» указанным автором разработана типология селевых и селеподобных потоков [*Перов, 2012*]. По составу и плотности в субаэральной среде (поверхность суши) в группе собственно селевых потоков выделены грязекаменный, водокаменный типы селей и селевой паводок. Им соответствуют два основных субаквальных типа гравитационных потоков, выделенных Дж. Кеннетом [*Кеннетт Дж., 1987*]: потоки высокой плотности (1,5–2,4 г/см³), включая грязекаменные (обломочные) (debris flow), зерновые потоки (grain flow) и разжиженного осадка (fluidized sediment flow) и потоки низкой плотности (1,03–1,30 г/см³), собственно турбулентные мутьевые потоки (турбидитные или суспензионные потоки). Подчеркивается, [*Перов, 2012*] что «двум главным типам селей на суше (грязе- и водокаменным) соответствуют два типа таковых в субаквальной среде», а «значения плотности соответствующих типов селей на суше и дне океана весьма близки». «Это свидетельствует, с одной стороны, о близости процессов рельефообразования на поверхности суши и дне моря и с другой – о глобальном характере селевого процесса» заключает автор. К аналогичному выводу, в свое время, пришел В.В. Лонгинов [*Лонгинов, 1973*], утверждая, что собственно гравитационные процессы в водах Мирового океана принципиально не отличаются по своему проявлению от соответствующих процессов на суше. Не радикально отличается от вышеописанных взгляд А.П. Лисицына на особенности развития подводных склоновых процессов [*Лисицын, 1988*]. К собственно подводным селям по мнению А.П. Лисицына следует относить потоки разжиженного осадочного материала с ламинарным течением (грязекаменные (обломочные), зерновые и др.), но не турбидитные. Первые несут грубый материал со значительной скоростью, плотность их достигает 2,0–2,5 г/см^3, они способны преодолевать расстояние в сотни километров, редко до 1000 км и более. Обладая большей разрушительной силой, именно эти потоки являются наиболее частой причиной обрывов подводных кабелей, эрозии подводных каньонов, переноса крупных и гигантских глыб [*Лисицын, 1988*]. Имеются участки склонов, генерирующие в

основном турбидиты и участки, порождающие преимущественно потоки типа селя. К последним относятся крутые склоны, с многочисленными обрывами, где за счет энергичного перемешивания с водой происходит трансформация оползня в разжиженную массу подводного селя [*Лисицын, 1988*].

Принято считать, что формирование подводных гравитационных потоков разного типа наиболее часто происходит в случае разрушения подводных обвальных масс и оползневых тел по мере их насыщения водой и продвижения вниз по склону. Следующие основные причины (триггеры) порождают обрушение или оползание склона, вызывающее, в свою очередь, образование обломочных потоков с ламинарным течением, а затем, при полной дезинтеграции оползневых или обвальных масс, и турбидных течений: 1) землетрясения и вторичные сейсмические эффекты (являются ключевым фактором возникновения подводных оползней в сейсмоактивных районах); 2) сейсмотектоническое или эрозионное увеличения крутизны склона; 3) перегрузка осадков на склоне с последующим увеличением порового давления и уменьшением эффективных напряжений; 4) рост соляных или глиняных диапиров; 5) сильное штормовое волнения, цунами, приливно-отливные течения; 6) разгрузка подземных вод (родниковый подмыв); 7) выход (выброс) газов на морском дне в очагах разгрузки флюидов; 8) деятельности придонных сверлящих организмов [*Ионов, 2012; Ионов, 2022; Миронюк и др.,, 2024; Мусаев и др., 2007; Селли, 1989; Чистяков и др., 1984; Щукин, 1974*].

Наземные оползни и обвалы, а также селевые потоки, экстремальные паводки и половодья, достигая водного объекта, могут при определенных условиях генерировать плотностные потоки (рис. 1).

Рис. 1. «Залповый» вынос взвешенного материала речными водами (устье р. Туапсе, июль 2007 г.). Речные воды могут трансформироваться в плотностные потоки (гиперпикнальные), когда их плотность в устье реки выше, чем плотность воды в морском бассейне

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 и др., 2015*].

К числу условий формирования оползней и субаквальных гравитационных потоков большинство авторов [*Ионов, 2012*; *Ионов и др., 2012; Москаленко и др., 2005; Чернявский, 2010; Шеко, 1980; Шуляков и др., 2015*], исходя из многолетнего опыта изучения субаэральных и морских гравитационных процессов, относят: геологическое строение склонов (петрографический состав горных пород, условия их залегания и трещиноватость), рельеф, современные и новейшие тектонические движения и сейсмические явления, гидрогеологические явления, гидрологическая обстановка, процессы седиментации (оползни типичны для районов лавинной седиментации), особенности свойств, состава и состояния (например, наличие многолетнемерзлых пород) осадков и горных пород, слагающих склон (в том числе и их газонасыщенность), развитие сопутствующих экзогенных геологических процессов и явлений. Со временем при благоприятном сочетании указанных условий возникает ситуация, когда склон

становится столь неустойчивым (состояние предельного равновесия), что любой триггер (например, землетрясение или шторм) способен привести грунты в движение (когда касательные напряжения, обусловленные действием силы тяжести, превышают силы сцепления, препятствующие сдвигу).

Под природными условиями, способствующими образованию склоновых геологических процессов, будем понимать всю совокупность природных факторов и предпосылок, которые увеличивают в склоне компоненту суммы сдвигающих сил, нарушающих устойчивость грунтов. Представляется целесообразным из всей совокупности условий, способствующих образованию склоновых процессов, выделить две категории – региональных и местных (локальных) условий. Необходимо отметить, что возникновение оползней всегда обусловлено совокупным действием группы факторов, которые формируют благоприятные условия для формирования оползневого тела, а причины непосредственно приводят к смещению (сползанию) масс осадков и/или горных пород вниз по склону. При этом одни группы факторов влияют на пространственное распространение оползней (например, сейсмичность территории, рельеф и др.), а другие – на их развитие во времени [*Шуляков и др., 2015*]. При прогнозе развития склоновых процессов для целей проектирования сооружений необходимы детальные данные инженерно-геологических изысканий, характеризующие как причины их образования, так и условия, способствующие развитию деляпсивных процессов. Не всегда этот принцип строго выполняется. Ниже представлены материалы, отражающие опыт комплексных инженерно-геодинамических исследований вдоль трасс двух трубопроводов, пересекающих континентальный склон в северо-восточной части Черного моря, с акцентом на изучение ведущих условий и причин формирования гравитационных потоков.

Оценивая их опасность, обычно на практике рассматривают два наиболее распространенных типа гравитационных потоков наносов: обломочные и турбидные. Если определить тип осадочных масс не представляется возможным, используют термин «плотностные потоки», «mass-transport deposit» (MTD) и др.

Методы и район исследований

Одной из важнейших задач региональной морской инженерной геодинамики является задача изучения закономерностей распространения геологических опасностей (геоопасностей) в различных морфологических зонах морского дна и их картирование. Особенно сложно, как в техническом, так и в методическом планах, эта проблема решается в морях котловинного типа, материковый склон которого изобилует подводными каньонами и крутыми уступами.

Первые специальные инженерно-геологические изыскания в северо-восточной части Черного моря, в том числе для обоснования трасс глубоководных выпусков промстоков курортов Абхазии и Краснодарского края, относятся к 70–80-х гг. [*Джанджгава, 1975*]. В 1997–1998 гг. в рамках реализации проекта строительства глубоководного газопровода Россия-Турция («Голубой поток»), на шельфе (район п. Джубга), континентальном склоне и в пределах субабиссальной равнины были выполнены обширные исследования геоопасностей с целью выбора наиболее безопасной трассы газопровода. Лишь часть обширного материала по проекту «Голубой поток», освещающая вопросы субаквальной геодинамики опубликована на русском языке [*Айбулатов, 2002*; *Лисицын, 2000; Лобковский и др., 2002; Осипов, 1999*].

Инженерно-геологические изыскания в глубоководной части Черного моря (континентальный склон, субабиссальная равнина) выполняли, в основном, зарубежные компании. В их состав входили следующие виды работ: геофизическая и инженерно-геологическая съемка (NESA, Fugro Engineers B.V.), сейсмическая съемка высокого разрешения (Fugro-Geoteam), оценка сейсмической опасности (EQE), устойчивости склонов (Delft Geotechnics). К изучению крупных оползней была привлечена компания Woodward Clyde Consultants. Функции супервайзера выполняла компания Fugro Engineers B.V. (FEBV), она же осуществляла пробоотбор, полевые (статическое

зондирование) и лабораторные испытания грунтов. Видеосъемка вдоль трассы выполнялась с помощью ТНПА “Low Fly”.

Маршрутные видеонаблюдения проводились с одновременно выполняемых батиметрической съемкой, записью данных гидролокатора бокового обзора (ГЛБО) и донного профилографа. ГЛБО работал на частоте 100 кГц, а профилограф на частоте от 2 до 7 кГц. Высота ТНПА над морским дном во время обследования составляла 10–25 м, а дальность действия ГЛБО в каждые стороны 90–125 м.

С точки зрения сложности инженерно-геологических условий, проектирования и строительства морской участок газопровода «Южный поток» находился в более неблагоприятных условиях по сравнению с построенным газопроводом «Голубой поток» [*Серебряков, 2020*].

Работы по выявлению геоопасностей вдоль трассы газопровода выполнялись в 3 этапа. На начальном этапе в рамках прединвестиционных исследований в результате выполненного анализа фондовых материалов предпочтительными в части минимизации геологических опасностей было намечено два варианта и несколько подвариантов трассы газопровода. В дальнейшем, по завершению данного этапа, дополнительный анализ имеющихся материалов позволил оптимизировать маршрут прохождения трассы и обосновать оптимальные объемы оценочных (рекогносцировочных) изысканий.

Оценочные изыскания на предварительно выбранной трассе выполнялись с применением многолучевого эхолота (МЛЭ) «Reson SeaBat 8160» и узколучевого параметрического профилографа «Innomar SES 2000 medium». Съёмка рельефа дна МЛЭ обеспечила построение цифровой модели рельефа (ЦМР). Основные технические характеристики профилографа следующие: первичная частота (высокочастотный канал) 100 кГц; вторичная частота (низкочастотный канал) 6–12 кГц. Для предварительного расчленения геологического разреза на отдельные слои и оценки свойств грунтов использовалась система статического зондирования Neptune 5000 и пробоотбор с помощью гравитационных трубок.

На этапе детальных комплексных изысканий (2010–2013 гг.) съёмка рельефа выполнялась с использованием автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). МЛЭ, гидролокация бокового обзора (ГЛБО) и непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП) регистрировались одновременно. Ширина участка съёмки – 1 км вдоль трассы трубопровода, расстояние между профилями – 200 м, высота хода АНПА – 45–50 м. НСП: полоса частот 1–6 кГц. Глубина проникновения – до 80 м, вертикальная разрешающая способность – 0,3 м. ГЛБО: частота – 100 кГц, полоса обзора – 295 м в каждую сторону. МЛЭ: Simrad EM 2000, частота излучения 2 кГц, количество лучей – 111, угол развертки – 150°. Размер ячейки матрицы – 5 х 5 м.

В рамках детальных изысканий на одной из площадок, расположенной в пределах конуса выноса пра-Кубани, с целью обнаружения геоопасностей была выполнена также 2D сейсморазведка. Работы выполнялись ООО «ПГС-Хазар» с применением специализированной системы сбора и регистрации сейсмической информации XZone DBS «Bottom Fish HR» производства компании «SI Technology» (Россия) и высокочастотных пневматических источников упругого сигнала BOLT 2800 LLX HR (USA). Съемка осуществлялась, в основном, по сетке профилей 2 км х 1 км.

Для отбора и изучения свойств грунтов верхней части разреза выполнялись: PCPT (пьезо-статическое зондирование) с помощью донной рамы (sea-bed mode), глубиной до 20 м; поршневой гравитационный пробоотбор (PGC) глубиной до 20 м; вибрационный пробоотбор (VC) глубиной до 6 м; коробчатый пробоотбор (BC) глубиной до 0,5 м.

Программа лабораторных исследований в судовой лаборатории включала определения природной влажности и плотности грунта, определения сопротивления недренированному сдвигу связных грунтов с помощью лабораторной крыльчатки (miniature vane / lab-vane), микрокрыльчатки (torvane) и микропенетрометра (pocket penetrometer).

Характеристика трасс газопроводов

Выполненные изыскания выявили следующие инженерно-геологические особенности трасс газопроводов в пределах континентального склона (рис. 1).

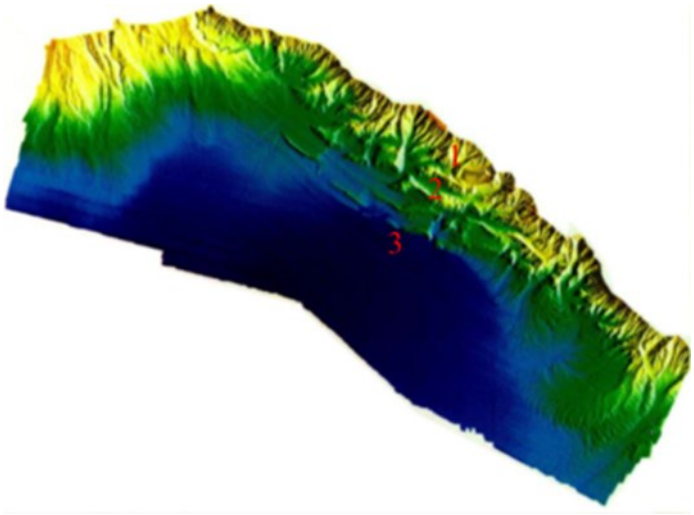


Рис. 1. Рельеф поверхности дна Восточно-Черноморской впадины по данным многолучевого эхолотирования. Цифры: 1 – континентальный склон; 2 – подножье; 3 – субабиссальная равнина (ГНЦ ФГУГП «Южморгеология», 1996–1997 гг. с дополнениями)

Характеристика инженерно-геологических районов трассы газопровода «Голубой поток»

Согласно критериям инженерно-геологического районирования, континентальный склон рассматриваемого участка трассы газопровода (между изобатами 105–1900 м) выделяется в ранге области. Инженерно-геологическая область – континентальный склон характеризуется крутыми уклонами морского дна с вогнутым (отступающим) профилем. Морфология морского дна характеризуется разветвленной системой каньонов, доходящих до конца шельфа, и малых каньонов, отходящих от крупных каньонов и заканчивающихся на склоне (слепые каньоны). Максимальный уклон донной поверхности в пределах склона (в среднем на 100 м) 27,0°. Сейсмичность средней силы, M_{max} = 5,75 [*Лобковский, 2002*], сейсмическая интенсивность (I) равна 8 баллам по шкале MSK-64 при периоде повторения (T) 475 лет. Континентальный склон, в свою очередь, подразделяется на отдельные районы (эрозионного и эрозионно-денудационного склона), в составе которых выделены подрайоны (верхней, средней и нижней его частей).

Верхняя часть континентального склона (подрайон А3). В рельефе доминируют глубокие, сильно разветвленные активные каньоны с очень крутыми боковыми стенками (уклон до 27°) и крутопадающими тальвегами, в которых могут возникнуть гравитационные потоки масс. Вершины каньонов находятся в стадии развития. В V-образной части каньонов с более крутыми стенками наблюдается регрессивная эрозия. Средняя ширина V-образных каньонов составляет 15–50 м. Средний уклон донной поверхности на отдельных участках достигает 24°. Развиты илы, перекрывающие в одних местах слой тугопластичной глины с включением обломков раковин, распространенной до глубины 7 м, а в других – коренные породы (аргиллиты, алевролиты, доломиты). В среднем мощность ила составляет около 0,5–2,0 м. Ниже по склону верхний слой представлен плотной глиной мощностью ~ 1,0–4,5 м, лежащей на твердой сцементированной глине. Возможны течения обломочного материала и суспензионное течение. Начало трассы расположено в пределах флексурно-разрывной зоны. Здесь отчетливо фиксируются циркообразные сбросы. Ширина зоны активных разрывных нарушений превышает 1 км. Возможны смещения по тектоническим

нарушениям. Широко развиты оползни слабоконсолидированных осадков. Возможны оползни и обрушения илов на крутых привершинных частях склонов каньонов. Активизацию движения слабых осадков следует ожидать вблизи бровки склона, где они залегают на более твердых глинах и алевролитах. Смещение осадков будет проявляться в виде мелких оплывин с глубиной захвата грунтов не более 3–5 м. В границах средней части континентального склона (подрайон Б1) каньоны, по которым проложена трасса, расширяются вниз по склону, переходя в U-образные широкие долины с плоским дном, выполненным плотной глиной. Каньоны, вдоль которых проложены трассы, сливаются в одно русло. Уклон тальвега составляет 1°–4°. На протяжении описываемого участка трассы морское дно усеяно многочисленными валунами и крупной галькой. В некоторых каньонах, на основании данных сейсмической съемки и батиметрии, были выявлены отложения из потоков обломков. Их мощность колеблется от 0,5 до 3,0 м. Осадки мутьевых течений (слой из обломков раковин мощностью 1 м) были выявлены на дне основного каньона (Голубого Потока (Вуланского). На глубинах более 1000 м скорости течений в основном не превышают 5–10 см/с.

Значительные экстремумы придонной скорости были отмечены приборами, установленными на автономной буйковой станции (АБС), расположенной на материковом склоне на глубине 885 м. В течение получаса наблюдалось усиление течений до 46 см/с, что для больших глубин является исключительным событием. Это событие совпало с длительным штормом. Весьма вероятно, что усиление течений было связано со сходом плотностного потока.

Возможны течение обломочного материала и суспензионное течение как вдоль каньона, по которому проложена трасса, так и под углом в пределах устьевых частей впадающих в него боковых каньонов. В средней части континентального склона возможны смещения по тектоническим нарушениям и формирование диапировых складок. На боковых бортах каньонов, по которым проложены трассы, выявлены оползневые тела. Слабые грунты могут терять устойчивость на глубину до 3 м и 5–6 м соответственно при 475- и 10000-летней повторяемости землетрясений. Можно ожидать развитие мелких оплывин почти повсеместно на неровностях дна с крутизной более 7,1° при 475-летней повторяемости землетрясений. Нижняя часть континентального склона (подрайон Б2). Долины двух канонов, по которым проложены трассы сливаются. Ширина U-образной долины с плоским дном в этом месте превышает 1000 м. Уклоны дна не превышают 1,3°–2,4°. В рельефе имеется уступ, контролируемый разрывным нарушением. Поверхность дна сложена мягкопластичной глиной мощностью до 5 м, часто с прослоями ракушек и ила. Местами дно приобретает пологоволнистый характер. Длина волн порядка 50 м, высота 0,5 м. Волны сложены преимущественно обломками ракушек и песком. Возможны перемещение обломочного материала и суспензионные течения. На нижней части континентального склона отмечено разрывное нарушение, подчеркнутое в рельефе дна уступом. Осадки дна характеризуются повышенной газонасыщенностью. Возможны смещения по разрывным нарушениям, формирование диапировых складок.

Характеристика инженерно-геологических районов трассы газопровода «Южный поток»

Бровка континентального склона на трассе газопровода находится на глубинах около 100 м. Часто граница шельфа и материкового склона имеет тектоническую природу. Нижнюю границу материкового склона проводят по его перегибу, проходящему на глубине около 1500 м (углы порядка 0,1°–0,6°) (рис. 2).

Участок исследований (континентальный склон мористее п-ва Абрау) находится в области сочленения морского продолжения складчатых флишевых образований Северо-Западного Кавказа и мезозойско-кайнозойских слабо или недислоцированных толщ Черноморской впадины и характеризуется высокой сейсмичностью (Анапский сейсмоактивный район). Изучение палеосейсмодислокаций в зоне прибрежного Утришского разлома показало, что нижний предел магнитуды здесь M_{max} = 6,7–6,8

[*Рогожин и др., 2014*]. В нашей работе [*Миронюк и др., 2021*] в качестве сейсмотектонической модели Черного моря была использована модель, построенная по проекту Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP). В этой модели учитывалось, что в районе Анапы (Анапский сейсмоактивный район, приуроченный к одноименному тектоническому блоку) возможны землетрясения с M_{max} = 6,5–7,0. Наряду с этим на основе статистических зависимостей между объемами сейсмогравитационных оползней и магнитудами землетрясений [*Агатова и др., 2008*] можно сказать, что максимальный объем сместившегося оползня на участке Утришский сейсмодислокаций (0,03 км^3) соотносится с сейсмическим событием с M ≈ 7,5. Как известно, наряду с крутизной склонов, вертикальным расчленением рельефа, литологическим составом пород и др., одним из основных факторов оползнеобразования является расстояние от активных сейсмогенерирущих разломов. Согласно [*Агатова и др., 2008; Палеосейсмология, 2011*] уже землетрясения M = 5,0–5,5 могут быть причиной оползневых процессов.

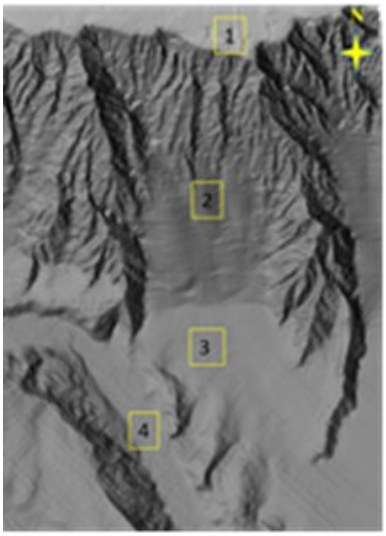


Рис. 2. Карта поверхности морского дна участка исследований. *Обозначения*: 1 – шельф, 2 – континентальный склон, 3 – подножье, 4 – Анапский каньон

Согласно выполненному ООО «ПитерГазИнжиниринг» (г. Геленджик) инженерно-геологическому районированию, трасса пересекает «район эрозионного склона». Этот район характеризуется большой расчленённостью рельефа дна, сложенного преимущественно скальными породами. Батиметрическая съемка, выполненная в пределах этого района, дает основание подразделить его на два подрайона: верхний в интервале глубин 110–900 м (район обнаженного коренного дна) и нижний с отметками дна 900–1500 м. Район граничит с внешней подзоной шельфа, где массивы рыхлых отложений в результате дополнительной нагрузки (например, сейсмического воздействия, шторма) могут преобразоваться в обломочные потоки [*Ионов и др., 2012*]. Траектории движения субаквальных селей будут приурочены к тальвегам подводных каньонов. При этом транзитными путями будут преимущественно каньоны, связанные с областью шельфа, так как максимальное количество осадочного материала будет поступать именно из этой области.

Подрайон верхней части континентального склона

Верхняя часть континентального склона крутая, сильно расчленена каньонами и характеризуется преобладанием эрозионных и обвально-оползневых процессов. В рельефе дна прослеживаются многочисленные оползневые цирки различного масштаба. Максимальные углы наклона дна в верхней части склона на отдельных участках составляют 30°–36°, достигая местами почти 50° (ниже бровки шельфа), но в основном

они изменяются в пределах 14°–18°. Коренными породами здесь служат главным образом флишевые и субфлишевые образования палеоцена, которые на крутых склонах и уступах, бортах каньонов и ложбин выходят на поверхность. Нижняя и средняя части палеоцена представлена флишевыми образованиями (мергели, алевролиты, известняки, аргиллиты, глины). Характерны скальные навесы крупных блоков известняков. Благодаря различной устойчивости указанных пород к подводному выветриванию, развитию обвально-оползневых процессов и эрозии, осуществляемой плотностными потоками, на склоне формируется резко расчлененный структурно-денудационный рельеф с грядами, сложенными коренными породами, протяженными вертикальными уступами, выступающими карнизами. Угол падения пластов коренных пород на отдельных участках склона в рассматриваемом подрайоне около 45°. Согласно видеозаписям, полученным с помощью ТНПА, коренные породы практически везде перекрыты маломощным (от 0,05 до 2,8 м) слоем связных (илы) и несвязных (песок, гравий) осадков. Доминирующими формами мезо- и микрорельефа здесь являются каньоны (в среднем шириной 100–200 м) и ложбины, скальные обрывы, ниши отрыва скальных пород, оползневые цирки. Подводными видеонаблюдениями на относительно пологих участках склона зафиксированы обвально-оползневые скопления (осыпи) и отдельные крупные глыбы (рис. 3).

Рис. 3. Скопление обвальных масс в верхней части склона. Типичный размер глыб 2,0×1,0×0,5 м [*Миронюк, 2020*]

Коэффициент обвально-оползневой пораженности (Kq) равен 0,3–0,6 (сильная интенсивность проявления процессов). Одной из причин возникновения склоновых гравитационных процессов, как указано выше, являются землетрясения. Нижний предел значений магнитуды для формирования скальных оползней составляет ~ 5, а для формирования в рыхлых грунтах ~ 4,5 [*Палеосейсмология, 2011*]. Траектории их движения, как правило, приурочены к тальвегам подводных каньонов. Гравитационные процессы, спровоцированные землетрясениями, происходят и в настоящее время. Свидетельство этому, зафиксированные нами подводной видеосъемкой сразу же после Су-Псехского землетрясения 10 декабря 2012 г., произошедшего в Анапском сейсмоактивном районе (M_W = 4,3 и I = 5–6 баллов [*Габсатарова и др., 2018*]), возникшее и долго не оседавшее облако взвеси, глыбы, припорошенные тонким нефелоидным материалом. Имеются и гидрологические признаки образования плотностных потоков в рассматриваемом подрайоне. Здесь придонным измерителем, установленным на АБС, было зарегистрировано резкое усиления скорости течения – до 50 см/с. Через 20 мин скорость снизилась до 9 см/с. Течение двигалось вдоль материкового склона и принесло с собой распресненную воду с верхних горизонтов морской толщи (что было видно из данных измерений электропроводимости морской воды).

Наибольшая интенсивность склоновых процессов зафиксирована в самой верхней части склона из-за больших уклонов дна, в основном за счет смещения массивов пород, прилегающих к бровке шельфа. Поверхность склона по данным МЛЭ прорезана густой

сетью верховьев каньонов с отвершками, которые, эродируя бровку шельфа, образуют рытвины с отвесными стенками в несколько метров. Останцовые гряды между отвершками каньонов узкие, гребневидные. Ниже этого участка на ЦМР четко прослеживаются участки транзита со следами эрозии донных осадков (рис. 4), а подводными видеонаблюдениями следы обрыва кабелей (рис. 5).

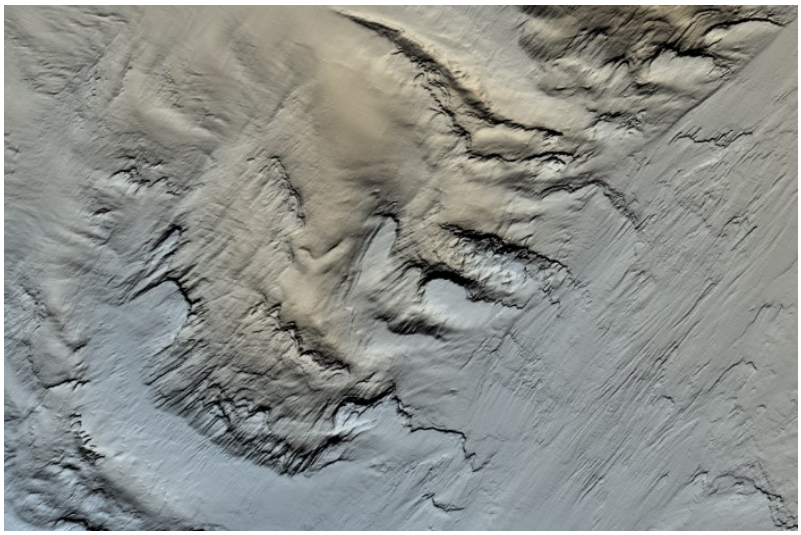


Рис. 4. Следы эродирующего воздействия на дно континентального склона обломочных потоков

Рис. 5. Обрыв кабеля в зоне транзита обломочного потока большой плотности

Подрайон нижней части континентального склона

Нижняя часть склона – более пологая и менее расчлененная (углы порядка 8°–12°), в ее пределах начинаются процессы аккумуляции терригенного материала, выносимого гравитационными потоками по каньонам. Мощность обломочных накоплений в нижней части склона достигает 15 м. Здесь, и в пределах подножья склона под четвертичными отложениями (песками, гравийно-галечниковыми отложениями) залегают породы верхнемелового флиша, представленного грубослоистыми мергелями с прослоями кварцево-глауконитовых песчаников. Необходимо отметить, что в данном подрайоне также отмечено большое количество валунно-глыбового материала, а по данным ГЛБО на границе с подножьем прослеживается серия осадочных волн. В границах подрайона было обнаружено большое количество глыб и валунов, часто в виде нагромождения в местах слияния «питающих» каньонов.

Валуны имеют диаметр от < 0,5 м до > 3 м, а отдельные блоки пород достигают размеров 15 х 5 х 1 м и массы 36 т. Происхождение их связывают с обрушением скальных навесов, формирующихся в верхней части склона за счет избирательной денудации, а большую дальность переноса с перемещением в теле обломочного потока благодаря эффекту гидропланирования (присутствия водного слоя под движущейся массой). Мощность обломочных накоплений в нижней части склона достигает 15 м. Для этого

подрайона характерны «глубокие» ротационные оползни слабоконсолидированных осадков и выветрелых пород. Ширина оползневых тел обычно составляет 25–50 м.

Далее материковый склон еще более выполаживается и переходит в материковое подножье – аккумулятивный шлейф, сформированный слившимися конусами выноса и шлейфами, образованными турбидитными потоками, обвалами и оползнями. Судя по мозаике ГЛБО, гравитационные отложения перекрыты маломощным слоем голоценовых илов.

Заключение

Таким образом, сравнение полученного в ходе инженерных изысканий материалов на двух трассах газопроводов показывает определенные различия в масштабах проявления гравитационных потоков наносов и в преобладающем их типе в пределах рассмотренной области морского дна. Учитывая, что региональные особенности двух участков трассы, в целом близки (находятся в районах эрозионного и эрозионно-денудационного склона) мы связываем эту разницу, прежде всего, с изменчивостью сейсмических условий вдоль основных разломно-блоковых структур Западного Кавказа, на что указывают данные Геофизической службы РАН (ГС РАН) [*http://eqru.gsras.ru/*]. Об этом свидетельствуют и материалы работ по уточнению исходной сейсмичности морских участков трасс газопроводов в пределах материкового склона выполненных ИО им. П.П. Ширшова РАН: M_{max} = 5,75 (проект «Голубой поток») и M_{max} = 6,5–7,0 (проект «Южный поток»). Как известно, интенсивность (энергия) землетрясений влияет на расположение, распределение и масштабы подводных оползней в морских районах. К настоящему времени получены многочисленные положительные корреляционные зависимости между моментной магнитудой землетрясения (M_w) и площадью областей, поражаемых косейсмическими оползнями, между M_w и расстоянием от эпицентра до наиболее удаленного проявления разжижения грунтов и др. [*Uri et al., 2008; Палеосейсмология, 2011*]. Приближенные оценки, выполненные нами с использованием одной из указанных корреляций, показали, что при M_w = 5,75 площадь обрушения склона составит ~ 2 км^2, а при M_w = 7 ~ от 10 до 25 км^2. Различие проявляется и в преобладающем типе гравитационных потоков наносов формирующихся по маршрутам упомянутых газопроводов в пределах склона. Прямые и косвенные признаки свидетельствуют, что более крутые участки материкового склона Анапского п-ова с многочисленными уступами, по сравнению с таковым в районе п. Джубга Анапского п-ова, генерируют преимущественно обломочные потоки высокой плотности (подводные сели согласно взглядам А.П. Лисицына [*Лисицын, 1988*].

Список литературы

Агатова А.Р., Непоп Р.К. Новый подход к оценке палеосейсмичности и сейсмогенных изменений рельефа горных районов с использованием параметров сейсмогравитационных дислокаций (на примере юго-восточного Алтая) // Геоморфология, 2008, 4: 55–64.

Айбулатов Н.А. Гравитационный перенос осадочного материала на континентальном склоне и безопасность строительства и эксплуатации газопровода Россия-Турция. // Обз. информ. Сер. Охрана окружающей среды и промышленная безопасность. М.: ИРЦ Газпром, 2002, 46 с.

Габсатарова И.П., Малянова Л.С., Селиванова Е.А., Якушева В.Н. Су-Псехское землетрясение 10 декабря 2012 г. с КР = 11.5, $M_{wpeг}$ = 4.3, I0 = 5–6 баллов (Анапский сейсмоактивный район) // Землетрясения Северной Евразии, 2018, 21: 420–432.

Джанджгава К.И. Инженерно-геологическая оценка слабых морских грунтов как оснований подводных трубопроводов // Строительство на слабых водонасыщенных грунтах. Тез. докл. Всесоюзного науч.-технич. совещания. Одесса, 1975, с. 63–65.

Ионов В.Ю. Опыт исследования подводных оползней для обоснования строительства морских нефтегазовых сооружений // Инженерные изыскания, 2012, 6: 52–63.

Ионов В. Особенности развития подводных склоновых процессов // Склоновые геологические процессы. / О.В. Зеркаль, Э.В. Калинин, О.С. Барыкина и др.: коллективная монография. МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет. М.: Изд-во Перо, 2022, с. 486–512.

Ионов В.Ю., Калинин Э.В., Фоменко И.К., Миронюк С.Г. Условия формирования подводных оползней в отложениях бровки континентального склона Чёрного моря в районе п. Архипо-Осиповка // Инженерная геология, 2012, 5: 36–46.

Кеннетт Дж. Морская геология: в 2-х т. Т. 2. Пер. с англ. М.: Мир, 1987, 384 с.

Лисицын А.П. Лавинная седиментация и перерывы в осадконакоплении в морях и океанах. М.: Наука, 1988, 309 с.

Лисицын А.П. Лавинная седиментация и развитие оползневых явлений на континентальном склоне Черного моря // Современные методы и средства океанологических исследований. Материалы VI Международной науч.-технич. конференции. Часть 1. М.: ИО РАН, 2000, с. 16–21.

Лобковский Л.И., Гарагаш И.А. 2002. Математический анализ устойчивости Кавказского склона Черного моря и развитие оползневых процессов при землетрясениях // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2000, с. 390–402.

Лобковский Л.И., Кузин И.П., Ковачев С.А. Детальные сейсмологические исследования с донными сейсмографами у кавказского побережья Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002, с. 373–380.

Лонгинов В.В. Очерки литодинамики океана. М.: Наука, 1973, 244 с.

Миронюк С.Г. Геолого-геоморфологические признаки обвалов на континентальном склоне Черного моря и оценка их опасности // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)». Том I (III). Тверь: ООО ПолиПРЕСС, 2020, с. 76–82.

Миронюк С.Г., Ефремов Ю.В. Особенности формирования селей в бассейне р. Шахе (Северо-Западный Кавказ) и оценка возможности их трансформирования в турбидные потоки в прибрежной зоне Черного моря // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. М.: Геомаркетинг, 2024, с. 338–348.

Миронюк С.Г., Ковачев С.А., Крылов А.А. Оценка сейсмической опасности для гидротехнических сооружений в дельте реки Кубань // ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях. 2021, с. 228–231.

Москаленко В.Н., Шимкус К.М. Оползневые образования и отложения турбititовых потоков на кавказском материковом склоне Черного моря // Бюлл. МОИП, Отд. геологич., 2005, 80(6): 33–38.

Мусаев В.К., Сущев С.П., Попов А.А., Федоров А.Л. Условия и причины образования оползней // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2007, 4: 73–76.

Осипов В.И. Геоэкологическая безопасность газопровода Россия-Турция (морской участок) // Материалы Международной науч.-практич. конференции (Сочи (Лазаревское), Россия, 21–24 апреля 1999 г., Москва, 1999, с. 109–111.

Палеосейсмология / Коллектив авторов под. редакцией Дж.П. Мак-Калпина. Том 1 (гл. 1–5). Пер. с англ. И.А. Басов, И.Ю. Лободенко, А.Л. Стром. М.: Научный мир, 2011, 560 с.

Перов В.Ф. Селевые явления: Терминологический словарь. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996, 34 с.

Перов В.Ф. Селеведение. М.: Географический факультет МГУ, 2012, 271 с.

Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатиков А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФ, 2014, 256 с.

Селли Р.Ч. Древние обстановки осадконакопления. М.: Недра, 1989, 294 с.

Серебряков А.М. «Южный поток»: новый подход к проведению экспертной оценки возможности строительства морских газопроводов // Вестник государственной экспертизы, 2020, 4: 28–36.

Чернявский А.С. Селевой морфолитогенез на Черноморском побережье Кавказа (в пределах Краснодарского края). Дисс. на соиск. уч. степ. канд. географ. наук. 25.00.25. Краснодар, 2010, 163 с.

Чистяков А.А., Щербаков Ф.А. Осадконакопление на подводных окраинах материков // Итоги науки и техники. Серия Общая геология. Т. 18, М.: ВИНИТИ, 1984, 134 с.

Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. М.: Недра, 1980, 296 с.

Шуляков Д.Ю., Чернявский А.С. Оползни и сели. Краснодар: Изд-во ООО «Просвещение-Юг», 2015, 230 с.

Щукин И.С. Общая геоморфология. Том 3. М.: Изд-во МГУ, 1974, 383 с.

Uri S., Lee H.J, Geist E.L., Twichell D. Assessment of tsunami hazard to the US East Coast using relationships between submarine landslides and earthquakes. // Marine Geology. 264(1–2): 65–73. doi: 10.1016/j.margeo.2008.05.011.

Применение ГИС для гранулометрического анализа селевых отложений

Л.Е. Музыченко, А.А. Музыченко

Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия, allixev@yandex.ru

Аннотация. В работе приводится описание примененной комбинированной методики гранулометрического анализа на примере исследования антропогенных селевых отложений. Определение гранулометрического состава крупных фракций выполнено с использованием ГИС, заполнителя – в ходе лабораторных исследований.

Ключевые слова: *гранулометрический состав, селевые отложения, селеформирующие грунты*

Ссылка для цитирования: Музыченко Л.Е., Музыченко А.А. Применение ГИС для гранулометрического анализа селевых отложений. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 328–333.

Debris flow deposits granulometric analysis by GIS application

L.E. Muzychenko, A.A. Muzychenko

Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, allixev@yandex.ru

Abstract. This paper describes a combined method applied for granulometric analysis of anthropogenic debris flow deposits. The analysis of large rock particles was conducted by GIS usage. The standard sieve method was used for fractions of less than 20 mm in laboratory.

Key words: *grain size analysis, debris flow deposits, sediment, debris flow-forming grounds*

Cite of this article: Muzychenko L.E., Muzychenko A.A. Debris flow deposits granulometric analysis by GIS application. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 328–333.

Введение

Достаточно часто при изучении селей упускают работы по исследованию гранулометрического состава грунтов, вовлеченных в селевой процесс. А между тем, этот показатель является одним из ключевых, и от него зависят многие характеристики, как самих движущихся селей, так и селевых отложений, которые могут быть вовлечены в потоки, формирующиеся в дальнейшем. Гранулометрический состав селевой массы определяет скорость селя [*Степанова, 1983*]. При преобладании в селевой смеси мелкозема движение потока подобно вязкопластическому течению. В данном случае скорость селя невысока. Если же содержание мелкозема относительно невелико, но достаточно для взвешивания более крупных частиц грунта, то скорость движения

селевого потока может достигать высоких значений. Также гранулометрический состав грунта, включенного в сель, обусловливает эродирующую способность потока [*Степанов, 1983*].

Для различного состава грунтов в соответствующих видах очагов характерен определенный тип селевых процессов [*Степанова, 1985*].

В дополнение ко всему гранулометрический состав является классификационным признаком для определения грунтов. Также, определение гранулометрического состава грунтов является одним из видов работ при выполнении инженерно-геологических изысканий.

Обзор проблемы

Проведение гранулометрического анализа осуществляется с последовательным применением ряда методов, выбор которых зависит от размера частиц грунта [*РД 52.30.238-90, 1990*].

Метод накидной сетки или фотометод применяется для наиболее крупных частиц селевых отложений, размер которых находится в пределах от 200 мм до 5000 мм и больше. В первом случае требуется достаточно громоздкое оборудование, включающее веревочную или проволочную сетку размером 5 × 5 м с ячейкой 1 × 1 м, а также шаблон размером 1 × 1 м, имеющий ячейку 100 × 100 мм. Рама шаблона может быть деревянной или металлической. В случае применения фотометода, на проведение гранулометрического анализа затрачиваются меньшие усилия. При его использовании основным требованием является получение качественного масштабированного фотоснимка, не имеющего искажений. Для определения размера частиц используется палетка, изготавливаемая из фотопленки. На данный момент этот метод, при использовании средств, описанных в руководстве селестоковым станциям и гидрографическим партиям, видится устаревшим.

Для частиц грунта размером от 200 до 20 мм применим метод грохочения. В данном случае требуется прохождение шурфа.

Ситовый, фракционный и пипеточный методы используются для определения процентного содержания частиц размером менее 20 мм (заполнителя) при проведении исследования грунта в специализированных лабораториях.

Все вышеперечисленные методы, кроме лабораторных, имеют ряд недостатков, приводящих к высоким затратам сил и времени в ходе проведения полевых исследований.

Авторы опробовали методику, основанную на комбинации элементов методов накидной сетки и фотометода для фракций грунта > 20 мм, но с применением современных компьютерных средств, дающих возможность упростить полевую часть исследования гранулометрического состава селевых отложений и проводить основной объем обработки материалов камерально. Для разделения на фракции заполнителя (< 20 мм) был применен стандартный ситовый метод в лабораторных условиях.

Методы

Для отбора проб антропогенных селевых отложений, с целью проведения гранулометрического анализа, был выбран «Северный» отвал карьера Лиственничный, на котором с 2009 г. регулярно формируются сели (рис. 1).

Вначале была отобрана проба заполнителя непосредственно из движущегося потока, что позволило получить максимально точные данные о составе грунта, взвешивающего более крупные частицы. Через несколько дней после схода селя, когда отложения были промыты осадками и, таким образом, отдельные частицы грунта стали хорошо видны, была выбрана ровная площадка с наиболее характерным распределением селевых отложений для их фотографирования. Надо заметить, что в настоящее время для получения качественного фотоснимка вполне достаточно применения смартфона с

фотокамерой, имеющей высокое разрешение. Масштабирование снимка было проведено путем размещения на площадке двух реек перпендикулярно друг другу.

Дальнейшая обработка материалов проводилась камерально. Основываясь на размерности реек, на полученной фотографии был выделен участок размером 1 × 1 м, после чего на него была нанесена сетка с ячейкой 10 × 10 см (рис. 2а). Для этого использовалась программа AutoCAD, дающая возможность точного построения сетки и ее привязки к размерности изображения.

Рис. 1. Конус выноса антропогенных селей с «Северного» отвала карьера Лиственничный

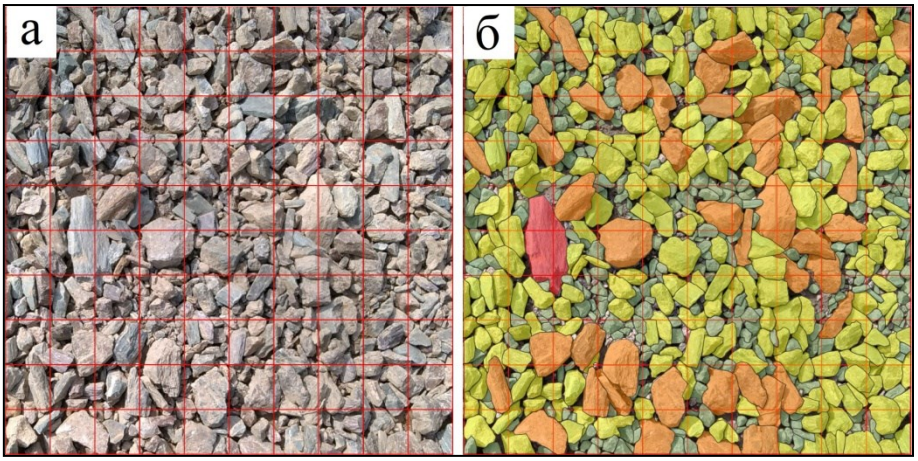


Рис. 2. Фотоснимок отложений антропогенного селя: а – с масштабной сеткой, б – с выделенными частицами различных фракций

Далее изображение было экспортировано в программу QGIS Desktop, с помощью которой проводилось разделение частиц грунта на фракции. Для оценки суммарной площади частиц каждой фракции был создан отдельный слой. Дополнительно был отведен слой для общей площади, занимаемой всеми фракциями. Выделение частиц грунта выполнялось с помощью создания в слоях соответствующих фракций полупрозрачных полигонов разного цвета, совпадающих с видимыми границами частиц (рис. 2б).

Частицы были разделены на фракции с размерами > 200, 200–100, 100–50, 50–20, < 20 мм (рис. 3).

Технически можно выделить и фракцию 20–10 мм, но она является частью заполнителя, все фракции которого определить по фотоснимку невозможно, т.к. частицы

размером меньше 10 мм различимы слабо. Поэтому выделение данной фракции фотометодом видится излишним.

Программа GIS содержит информацию о характеристиках полигонов, в том числе, и об их площадях. Значения площадей полигонов разных слоев копировались в программу Microsoft Excel, где вычислялась суммарная площадь элементов каждого слоя. Таким образом, были получены данные по процентному содержанию в отложениях частиц размером от 200 до 20 мм. Затем из общей площади отложений была вычтена площадь частиц всех выделенных фракций и, таким образом, была получена суммарная площадь, занимаемая заполнителем.

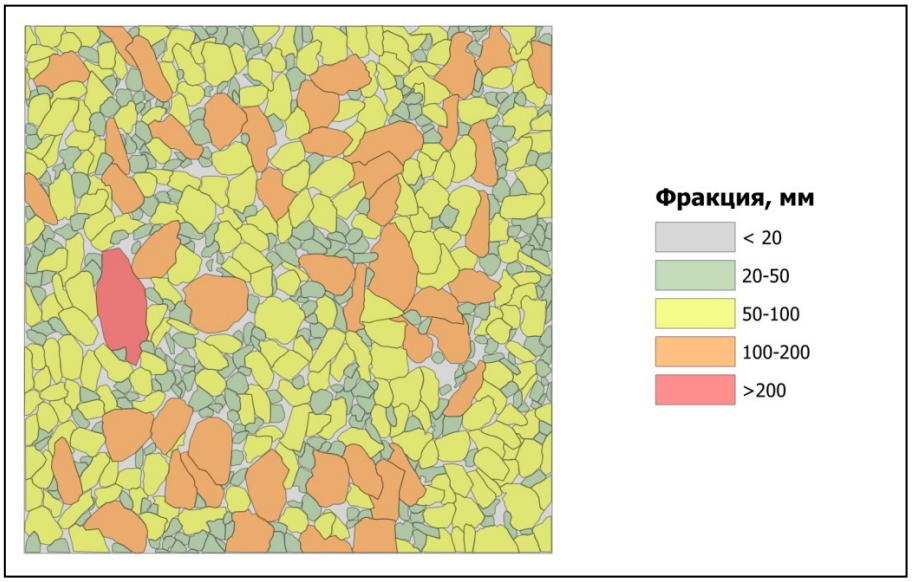


Рис. 3. Полигоны, отображающие все фракции селевых отложений

Для разделения заполнителя на фракции был применен метод просеивания пробы через сита размером 20, 10, 5 и 2 мм, чтобы определить процентное содержание частиц, исходя из веса фракций.

Исследования фракции меньше 2 мм (мелкозема) следует проводить в специализированных лабораториях.

Данные

Для опробования комбинированного метода определения гранулометрического состава была взята одна проба заполнителя, а также был использован один фотоснимок. Применение GIS показало процентное содержание фракций размером от 20 до 200 мм и больше. С помощью ситового метода были получены данные по гранулометрическому составу заполнителя (частиц размером < 20 мм). В таблице 1 представлены сводные данные по гранулометрическому составу антропогенных селевых отложений с «Северного» отвала карьера Лиственничный, полученные с применением двух перечисленных методов.

Таблица 1. Гранулометрический состав антропогенных селевых отложений «Северного» отвала карьера Лиственничный

Метод	Ситовый				Комбинированный			
Фракция, мм	0–2	2–5	5–10	10–20	20–50	50–100	100–200	>200
Содержание, %	3,1	1,5	3,9	1,9	17,8	46,7	23,6	1,5

На основе полученных табличных данных была построена гистограмма (рис. 4) распределения частиц селевых отложений по фракциям.

Отдельно отметим, что для полного исследования гранулометрического состава селеобразующих грунтов в селевом бассейне недостаточно одного фотоснимка и взятия одной пробы грунта. В данной работе были применены упрощенные условия лишь для опробования комбинированного метода. Количество точек для фотографирования и отбора проб грунта определяется программой работ на производство специализированных исследований.

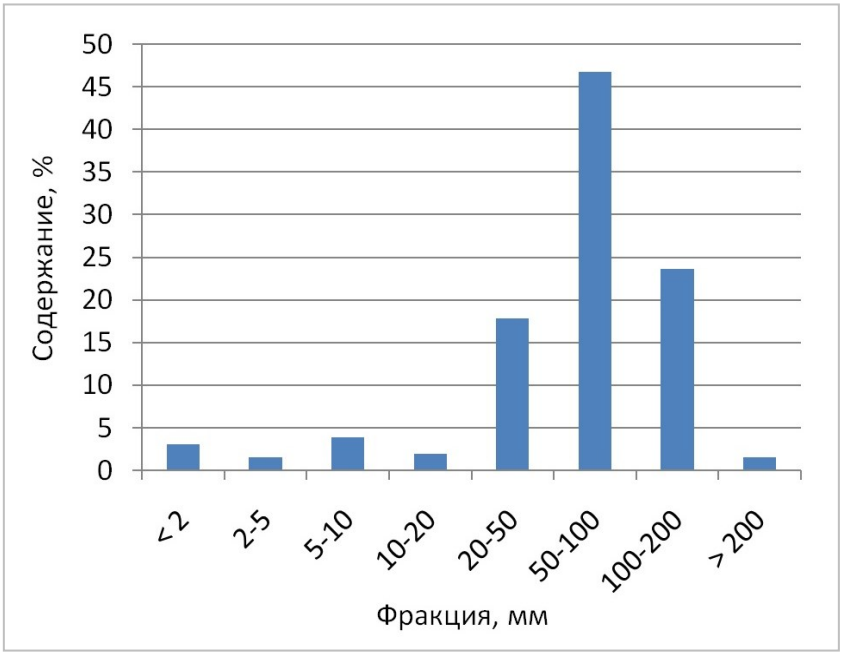


Рис. 4. Процентное содержание фракций антропогенных селевых отложений «Северного» отвала карьера Лиственничный

Сравнительный анализ данных гранулометрического состава грунтов в очаговой зоне, селевой массе и отложениях дает представление об эволюции селевой смеси на протяжении всего пути движения селя. По изменению доли мелкодисперсных частиц можно судить о степени турбулентности потока [*Вардугин, 1977*], о его эродирующей способности и т.д.

Выводы

Проведенная работа показала, что комбинированный метод гранулометрического анализа с применением GIS может быть использован наряду со стандартными. С его помощью можно определить гранулометрический состав селеформирующего грунта с размером частиц от 20 до 200 мм и более. Таким образом, данный метод может заменить метод грохочения, требующий проходки шурфов, и тем самым значительно уменьшить время проведения полевых работ и снизить затраты труда. При использовании БПЛА для фотосъемки, а также компьютерного распознавания изображений, процесс получения информации о гранулометрическом составе грунтов может быть значительно упрощен, а исследуемые площади увеличены.

Список литературы

Вардугин В.Н. Гранулометрический состав рыхлообломочных пород в селевых очагах и на конусах выноса // Селевые потоки. Сб. 2. КазНИГМИ. Москва: Гидрометеоиздат, 1977. С. 94–106.

РД 52.30.238-90 1990. Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям. Выпуск 1. Государственный комитет СССР по гидрометеорологии. М.: Гидрометеоиздат, 199 с.

Степанов Б.С., Цукерман И.Г. К модели эрозионно-сдвигового селевого процесса // Селевые потоки. Сб. 7. КазНИГМИ. Москва: Гидрометеоиздат, 1983. С. 39–46.

Степанова Т.С. Эскизная модель эрозионно-сдвигового селевого процесса // Селевые потоки. Сб. 7. КазНИГМИ. Москва: Гидрометеоиздат, 1983. С. 31–39.

Степанова Т.С. О роли дисперсности селеформирующих грунтов в образовании селей // Селевые потоки. Сб. 9. КазНИГМИ. Москва: Гидрометеоиздат, 1985. С. 23–32.

Influence of debris flows on channel processes in the foothill plains

A.A. Nuriyev[1], F.A. Imanov[1], M.Y. Asadov[2], A.R. Maharramova[1]

[1]Baku State University, Baku, Azerbaijan

[2]Azerbaijan State Water Resources Agency, Baku, Azerbaijan, anar_nuri@yahoo.com

Abstract. The most debris flow-prone rivers in the Republic of Azerbaijan are the left-bank tributaries of the Kura River, which originate on the southern slopes of the Greater Caucasus. The basins of these rivers are primarily composed of sedimentary rocks. In recent years, climate change has led to an increase in the frequency of short-duration, high-intensity rainfall events, resulting in a significant rise in the occurrence of floods and debris flows. These hydrometeorological hazards not only cause damage to infrastructure and agricultural lands along the river corridors but also substantially alter the morphometric parameters and morphological characteristics of the riverbeds. To investigate riverbed deformations in the foothill plains of the Shirvan region, field studies were conducted during different phases of the hydrological regime (four times per year) between 2013 and 2021. Representative river sections were selected on seven rivers for detailed monitoring. Temporary benchmarks were established, and their geographic coordinates were recorded using handheld GPS devices. Cross-sectional profiles of each river channel were developed, water velocity was measured, and river discharge was calculated. By comparing the cross-sectional profiles obtained during successive field campaigns, vertical channel deformations were quantitatively assessed. It was determined that the rate of vertical channel deformation across the studied rivers ranged from 6.25 to 42.00 cm per year during the 2013–2021 period. To analyze long-term channel deformations, a comparative study was conducted using historical topographic maps from 1970 and high-resolution (1.5 m) satellite imagery obtained from the Azersky satellite operated by the Azercosmos Agency.

Key words: *debris flow, channel deformation, river morphology, foothill region, Azerbaijan*

Cite of this article: Nuriyev A.A., Imanov F.A., Asadov M.Y., Maharramova A.R. Influence of debris flows on channel processes in the foothill plains. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 334–345.

Влияние селевых потоков на русловые процессы на предгорных равнинах

А.А. Нуриев[1], Ф.А. Иманов[1], М.И. Асадов[2], А.Р. Махаррамова[1]

[1]Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

[2]Государственное агентство водных ресурсов, Баку, Азербайджан, anar_nuri@yahoo.com

Аннотация. Наиболее селеопасными реками в Азербайджанской Республике являются левобережные притоки реки Кура, которые берут начало на южных склонах Большого Кавказа. Бассейны этих рек в основном сложены осадочными породами. В последние годы изменение климата привело к увеличению частоты кратковременных, интенсивных осадков, что привело к значительному росту возникновения наводнений и селей. Эти гидрометеорологические опасности не только наносят ущерб инфраструктуре и сельскохозяйственным угодьям вдоль речных коридоров, но и существенно изменяют морфометрические параметры и морфологические характеристики русел рек. Для изучения деформаций русла рек на предгорных равнинах Ширванского региона в период с 2013 по 2021 г. проводились

полевые исследования в разные фазы гидрологического режима (четыре раза в год). На семи реках были выбраны репрезентативные участки рек для детального мониторинга. Были установлены временные реперы, и их географические координаты были зафиксированы с помощью портативных GPS-устройств. Были разработаны поперечные профили каждого речного русла, измерена скорость воды и рассчитан расход реки. Сравнивая поперечные профили, полученные в ходе последовательных полевых кампаний, количественно оценивались вертикальные деформации русла. Было установлено, что скорость вертикальной деформации русла через исследуемые реки составляла от 6,25 до 42,00 см в год в период 2013–2021 гг. Для анализа долгосрочных деформаций русла было проведено сравнительное исследование с использованием исторических топографических карт 1970 г. и спутниковых снимков высокого разрешения (1,5 м), полученных со спутника Azersky, эксплуатируемого агентством «Азеркосмос».

Ключевые слова: *сель, деформация русла, морфология реки, предгорный район, Азербайджан*

Ссылка для цитирования: Нуриев А.А., Иманов Ф.А., Асадов М.И., Махаррамова А.Р. Влияние селевых потоков на русловые процессы на предгорных равнинах. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 334–345.

Introduction

Channel processes encompass the complex and dynamic interactions that govern the morphological development and evolution of river channels over time, primarily through mechanisms such as erosion, sediment transport, and deposition [*Knighton, 2014*]. Channel processes in river systems are fundamentally shaped by the interaction of hydrological, geological, and geomorphological factors. Among these, extreme hydrometeorological events such as debris flows represent a critical yet often underexplored factor influencing channel morphology, sediment transport, and floodplain dynamics, particularly in foothill plains. Foothill plains, situated at the transitional zone between highland source areas and lowland depositional zones, are especially susceptible to the geomorphic and hydrological impacts of such flows due to their geomorphic gradient, sediment availability, and hydrological connectivity with upstream mountainous terrains [*Smith et al., 2015; Johnson, 2020*].

Debris flows are water-saturated slurries of sediment, usually a heterogeneous blend of clay, silt, sand, gravel, and large clasts are moved downhill because of intense rainfall, rapid snowmelt, or glacial outburst events [*Jakob & Hungr, 2005*]. Intermittently or continuously, these flows may happen as part of a series of sediment-rich floods associated with high concentration of sediments and high energy available for transport. Similarly, when these flows reach the river channels of the foothills, they present uncontrolled deposition accompanied with aggregational evolution of the contours of the channel system, lateral shifts, and avulsions resulting from excessive sediment supply [*Marchi et al., 2009*]. Resulting from the interplay of all these factors, which serve as the main basis for such variability, the overall orientation of the network of channels is rearranged, improves the hydraulic geometry of the system and increases ratio of bank overtopping events and reconfiguration of the channel layout.

The foothill plains, which serve as a transition area for sediment transport from the mountains to the lowland basins, are critical to channel development under the influence of debris flows. The deposited sediment is highly bras for debris flows and is highly responsive to episodic sediment replenishment and quick morphological shifts [*Brierley & Fryirs, 2005*]. The severe overload of poorly graded sediment caused by debris flows shifts the equilibrium state of a system — in this case the balance between erosion and sediment accumulation — leading to more pronounced vertical and lateral changes. Transition alluvial fans and lobes are frequently produced along with other incoherent channel fills due to bank failure and increased

sediment deposition that meandering fine sediment flows create and are aggravated by cohesive fine cabin debris flows [*Costa & Williams, 1984*].

Multiple global studies have confirmed that debris flows can induce perpendicular and parallel changes to riverbeds impacting sediment transport, flow hydraulics, and channel equilibrium [*Jakob & Hungr, 2005; Rickenmann, 1999*]. In these regions, the shift from steep gradients to gentle ones increases the rate of sediment capture alongside channel aggradation [*Pierson, 2005*].

Dynamics of river morphology is influenced by destructive and rapid processes of mass wasting in the mountainous and hilly regions which incorporate debris flows. The study of these processes and their impact on channel dynamics has been done in many geoclimatic settings, including the south-east part of Greater Caucasus especially Shirvan zone river basins, where high topography, and easily erodible sedimentary rocks give abundant supply of sediments form ideal conditions for the occurrence of debris flows.

Studies in the Shirvan zone rivers have emphasized that sediment transport dynamics in foothill rivers are highly sensitive to external disturbances like debris flows, which alter cross-sectional geometry and increase the frequency of channel avulsions [*Jafarov & Ismayilov, 2015*]. The river basins on the southern slope of the Greater Caucasus are significantly influenced by debris flows. These rivers, formed in sedimentary rock basins, are highly susceptible to erosion and channel instability. In recent decades, climate change has led to an increase in short-duration, high-intensity rainfall events, causing a corresponding rise in flood and debris flow frequency. As a result, there has been growing concern regarding the impact of these processes on riverbed morphology, infrastructure, and agricultural productivity in the foothill plains.

This study seeks to address this research gap by examining the influence of debris flows on the channel processes of foothill plains. Specifically, it aims to identify and characterize the morphological changes induced by debris flows in foothill channel reaches, to analyze the spatial and temporal patterns of sediment deposition and channel migration, and to assess the implications for flood risk and channel management. Using a combination of field surveys, remote sensing data, and hydromorphological modeling, the research provides new insights into the role of episodic sediment-laden flows in reshaping alluvial environments at the mountain-front interface.

Understanding the influence of debris flows on foothill channel processes is vital for both scientific knowledge and practical applications. It informs sediment budget estimations, improves predictive modeling of channel evolution, and supports the design of resilient infrastructure and mitigation strategies in vulnerable foothill zones. As such, this investigation contributes to a more comprehensive framework for fluvial landscape management under conditions of increasing geomorphic instability [*Chalov, 2008*].

Channel processes encompass the dynamic morphological changes occurring within river channels because of both natural and anthropogenic influences. These processes include sediment transport and deposition, bank erosion, and the formation or alteration of various channel geomorphic features [*Chalov, 2016*]. The manifestation of channel processes varies seasonally, influenced by the river's hydrological regime, climatic conditions, geological structure of the riverbed, and environmental characteristics.

A key determinant of the temporal dynamics of channel processes is the seasonal variation in the phases of the river's water regime. During the spring-summer flood period, increased snowmelt and intense precipitation lead to a significant rise in river water levels. This rise, in turn, increases flow velocity, which accelerates bank erosion, intensifies sediment transport, and promotes the development of new channel features such as sandbars and islands. In contrast, during the low-water season, river discharge decreases markedly, resulting in lower flow velocities. These conditions favor the deposition of suspended sediments within the channel and significantly reduce the intensity of bank erosion [*Nuriyev et al., 2024*].

Channel processes occurring throughout the hydrological year result in progressive transformations of river morphology. Depending on hydrodynamic conditions, various forms of channel deformation can be observed, including changes in the longitudinal profile such as sediment deposition in the flow direction, formation of shallows, incision of the riverbed, or its

infilling with silt. Simultaneously, the cross-sectional profile of the river channel may also be altered. Lateral erosion of one riverbank can coincide with sediment accumulation on the opposite bank, resulting in lateral channel migration [*Chalov, 2011*]. Vertical channel deformations, such as incision due to increased flow velocity or aggradation resulting from sediment deposition under reduced flow conditions, also play a significant role in shaping river morphology.

Study area

The Shirvan rivers were selected as the focus of this study due to their significant hydrological and geomorphological characteristics. The study area encompasses a total of 53 rivers, comprising five main rivers and 48 tributaries. The Girdimanchay basin hosts the greatest number of rivers, totaling 12, while the Agsuchay basin contains the fewest, with six tributaries. The remaining main river basins each include approximately 10 tributaries [*Mammadov, 2012*]. Geomorphologically, the young mountainous terrain of the Greater Caucasus is characterized by the development of canyons and V-shaped valleys. Typically, upstream segments of rivers such as the Türyanchay, Goychay, and Girdymanchay are incised canyons, transitioning to V-shaped valleys closer to the Shirvan plain. These valley forms reflect the steep longitudinal gradients and high flow velocities prevalent in these areas, combined with the presence of relatively erodible sedimentary rocks in the basins. Consequently, vertical erosion predominates, resulting in narrow valley bottoms flanked by steep slopes. During spring and rain floods, alluvial sediments deposited within valley bottoms are transported downstream. Moving into the plains, river gradients decrease, and valley cross-sections typically widen into box-shaped forms. However, variations in local relief and geological structure occasionally disrupt this pattern. Such deviations are evident along sections of Shirvan rivers that traverse the Ajinohur foothills. Climatic data indicate that the annual precipitation in the region varies substantially, ranging from 250 to 1700 mm. Similar to other mountainous regions in Azerbaijan, precipitation exhibits a distinct altitudinal pattern: it increases from the lowland plains toward the mid-mountain zones before decreasing again at higher elevations. Specifically, potential evaporation rates vary accordingly, measuring approximately 800–1000 mm in the plains, 600–800 mm in the mid-mountain areas, 300–400 mm in the high mountainous regions, and decreasing further to around 200 mm near the highest mountain peaks [*Mahmudov, 2018*].

Precipitation is predominantly concentrated in the summer months, coinciding with the rainy season. In the Gabala and Oguz settlements, for instance, 32.3% and 33.1% of the annual precipitation occur during summer, respectively. Conversely, the lowest precipitation levels are observed during winter, accounting for 14.9% and 15% of the annual totals in these areas. Spring and autumn contribute differently, with spring accounting for 21.6% and 20.4%, and autumn 31.2% and 31.5% of the annual precipitation in Gabala and Oguz, respectively [*Nuriyev, 2021, Mammadov, 2012*].

The development of the river network within the Shirvan region is intimately linked to the area's relief dynamics, particularly the large-scale morphostructural formations. Geological analysis of Tertiary rock formations revealed that within the Greater Caucasus Uplift zone, rivers developed predominantly parallel drainage systems that correspond to the underlying morphostructural divisions of the mountain ranges. The tributaries of major rivers dissect the ascending mountain slopes. During the Neogene period, rapid tectonic uplift combined with river confluences in the Shirvan zone resulted in the establishment of the contemporary river network.

All rivers in the Shirvan region – namely Alijanchay, Turyanchay, Goychay, Girdimanchay, and Agsuchay – are left-bank tributaries of the Kura River. The principal morphometric characteristics of these rivers and their respective basins are summarized in Table 1.

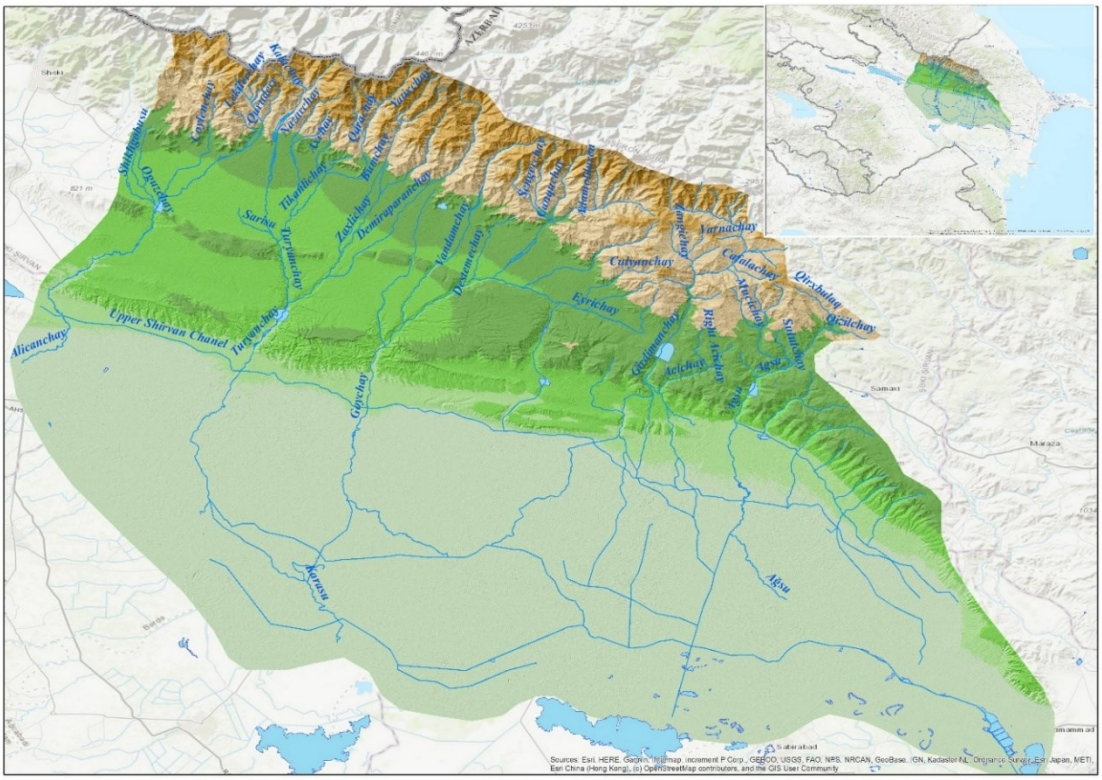


Fig. 1. Study area

Table 1. Main morphometric parameters of rivers and their basins

River name	Length, km	Catchment area, km^2	Source elevation, m	Month elevation, m	Average catchment elevation, m	Average river slope, ‰	River network density, km/km^2
Alijanchay	91	1010	3500	13	574	38.3	0.47
Türyanchay	170	1840	3680	-4	819	21.7	0.50
Goychay	113	1770	1980	-1	538	17.5	0.48
Girdimanchay	88	727	2900	15	810	32.8	0.48
Agsuchay	89	572	2100	-2	666	23.6	0.46

The average river network density within the Shirvan zone is 0.48 km/km², which exceeds the regional average for Azerbaijan (0.39 km/km²) by approximately 20% [*Museyibov, 1998*]. Among the rivers studied, river network density varies slightly, ranging from 0.46 km/km² in the Agsuchay basin to 0.50 km/km² in the Türyanchay basin [*Mammadov, 2012*]. The relatively short north-south extent and the steep gradients characteristic of the Greater Caucasus segment within the Shirvan zone contribute to an accelerated denudation process. This effect is especially pronounced in the Turyanchay basin, where the river network is subject to ongoing natural morphodynamic changes.

Materials and methods

To quantify the influence of debris flows on river channel deformation, comprehensive fieldwork was carried out from 2013 to 2021 in the Shirvan region. Seven rivers were selected for detailed study. Additionally, historical changes in river channel configuration were analyzed by comparing topographic maps from 1970 with modern high-resolution satellite imagery (1.5 m) obtained from the Azersky satellite, operated by the Azercosmos Agency.

Results and discussion

In recent times, anthropogenic influences have accelerated alterations within the natural hydrographic network. Although all Shirvan rivers are left-bank tributaries of the Kura River, historically, most did not discharge directly into the Kura's main channel. Instead, their waters were lost in the Garasu depressions — significant low-lying areas located south of the rivers' confluence. Two primary Garasu depressions exist in the study region: the Shirvan Garasu and the Zardab Garasu. The Shirvan Garasu, the larger of the two, formed within the ancient floodplain of the Kura River. It historically received substantial water inflows during spring floods and flood events, primarily due to breaches in the Kura's earthen banks. However, the construction of the Mingachevir reservoir, which regulates Kura River flows, effectively curtailed additional inflows to the Shirvan Garasu, resulting in its progressive drying. Stretching approximately 134 km, the Shirvan Garasu represents a continuation of the Goychay River. The Zardab Garasu, a direct extension of the Türyanchay, flows independently into the Kura near the city of Zardab. Presently, only the Alijanchay flows directly into the Kura River, whereas the other Shirvan rivers discharge into the Shirvan or Zardab Garasu depressions. Water accumulated in these depressions is subsequently channeled into the Kura River via artificial canals.

In the rivers of the Shirvan region, intensive channel processes have led to frequent channel migrations, flow bifurcations, and changes in the number and configuration of active channels. These dynamic conditions complicate the establishment of reliable stage-discharge relationships at hydrological observation stations. To address this challenge, an analysis of channel deformations in Shirvan rivers was conducted through the comparison of cross-sectional profiles obtained during field surveys.

Field investigations were carried out during four distinct phases of the water regime in 2013 — March, May, August, and December — across seven representative rivers. During each survey, characteristic cross-sections were selected for measurement. The reference points of each observation site were first established, and their geographical coordinates were determined using GPS technology (Garmin). Subsequently, detailed measurements were conducted to construct cross-sectional profiles of both the river valleys and their channels, using the temporary benchmarks as reference points.

Comprehensive information on the locations of the measured cross-sections, including the geographical coordinates and absolute elevations of the reference points, is presented in Table 2 [*Imanov, Nuriyev, 2012*].

Table 2. Geographic coordinates and absolute elevations of the reference points

No.	River – observation point	Geographic coordinates		Height of the reper, m
		Latitude	Longitude	
1	Aghsuchay – 3 km above the bridge	40°35.709'	48°24.347'	231
2	Girdimanchay – 100 m above the bridge	40°38.895'	48°14.387'	401
3	Goychay-Buynuz	40°55.717'	48°04.073'	791
4	Vandamchay – 30 m below the bridge	40°57.103'	47°55.932'	777
5	Demiraparanchay-Gabala	40°58.791'	47°51.863'	818
6	Tikanlychay-Tikanly	41°00.671'	47°45.221'	763
7	Bumchay-Bum	41°02.520'	47°46.981'	976

River discharge was determined using the velocity-area method [*Mammadov et al., 2000*], which involves calculating the product of the average flow velocity and the area of the cross-section. To measure flow velocity, GNSS-1 (Russian Federation) and PASCO (USA) flow meters were employed. Velocity measurements were conducted using both point-based and integration methods, with the arithmetic means of the obtained values used in the final calculations. The PASCO device offers a particular advantage due to its ability to account for

velocity fluctuations, thereby providing a more precise and reliable estimate of the mean flow velocity.

Field investigations demonstrate that these rivers exhibit either single-thread or multi-thread channel patterns depending on the prevailing hydrological regime. Furthermore, their morphometric characteristics fluctuate periodically in response to seasonal and interannual hydrological variations.

In the case of Girdimanchay, observations indicate that the river develops a multi-thread structure during spring, while in summer, a marked reduction in both the number of active channels and discharge leads to the intensification of intra-channel erosion and sedimentation processes. A comparative analysis of measurements from 2013 and August 2021 documented vertical channel incision reaching up to 2 meters, with an estimated average rate of vertical erosion of approximately 10 cm per year.

Goychay River exhibits similar seasonal variability, displaying 2 to 5 channels during spring, and predominantly a single-thread configuration in winter and summer. Between 2013 and 2021, channel deepening up to 2 meters was observed, accompanied by increased lateral erosion, particularly along the left bank (Fig. 2). The thickness of alluvial deposits accumulated in certain segments exceeded 1 meter. The annual rate of vertical erosion was estimated at 6.25 cm per year.

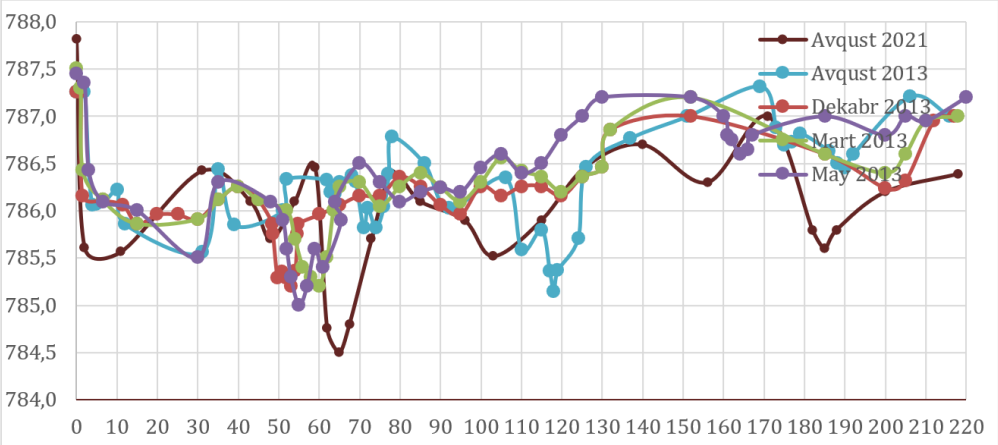


Fig. 2. Cross section of Goychay river

Damiraparanchay also demonstrates pronounced seasonal channel variability, with 2 to 3 branches present during spring and a single-thread configuration recorded in August and December. Over the eight-year period, bottom erosion amounted to 55 cm, corresponding to an average annual rate of 6.88 cm. Additionally, lateral migration of the channel was noted, with a discernible shift toward the left bank in certain sections.

In the Tikanlichay River, channel morphology appears to be strongly influenced by the hydrological regime. During the field surveys conducted in March and May 2013, the river exhibited a multi-thread structure comprising 2 to 3 branches. The height of sediment deposits accumulated between these branches reached up to 1.5 meters. Observations up to 2021 indicate that bed incision and sediment accumulation processes have continued to evolve in parallel.

Temporary monitoring of the Vandamchay River revealed that its channel morphology alternates between single- and double-branched configurations depending on the prevailing hydrological regime. During the spring and summer months of 2013, notable horizontal channel shifts and sediment accumulation were observed, whereas by August and December, the flow was confined to a single active channel. In contrast, observations from August 2021 indicated a return to a bifurcated channel pattern, accompanied by significant bed erosion measuring up to 140 cm, with an annual washout intensity estimated at 17.5 cm per year.

The Bumchay River is characterized by a V-shaped valley, where a single-branch flow was documented in 2013, transitioning to a double-branch flow by 2021. Intensive lateral erosion on the left bank led to a bottom deepening of 114 cm, corresponding to an annual

erosion rate of 14.3 cm per year. Additionally, the influence of an active ephemeral stream, responsible for episodic flood events and substantial sediment transport, was noted in this section of the river.

Seasonal variability in channel morphology was also evident in the Agsuchay River. In 2013, a single-channel flow was recorded, whereas by December of the same year, three distinct channels had developed. Although the river remained predominantly single-branched in August 2021, bed erosion was pronounced, reaching 3.40 meters with an exceptionally high annual erosion intensity of 42 cm per year. These pronounced morphological changes are primarily attributed to the impacts of a hydroelectric facility constructed in the upper reaches of the river, alongside the planned Agsuchay reservoir. While the facility mitigated horizontal channel deformation processes, it concurrently accelerated vertical erosion, thereby altering the sediment transport dynamics within the river system.

Overall, comparative analysis across all four rivers between 2013 and 2021 underscores the high degree of morphodynamic activity and variability in channel structure, closely tied to seasonal and hydrological fluctuations. In particular, the spring-summer period is characterized by elevated discharge resulting in increased incision and erosion, while the dry seasons promote sediment deposition and accumulation. These findings reflect the dynamic behavior of river systems in the region and the influence of both climatic variability and anthropogenic factors on channel evolution.

The comparative analysis of cross-sectional profiles from 2013 to 2021 revealed notable vertical channel deformations ranging from 6.25 to 42.00 cm per year. These variations are largely attributed to debris flow activity, which contributes to both erosion and sediment deposition in different river sections.

Satellite and map-based analysis of long-term river dynamics also indicated significant lateral migration and morphological alterations, particularly in areas repeatedly affected by debris flows. This demonstrates the dual impact of debris flows: they both excavate and aggrade channel segments, leading to increased channel instability and frequent shifts in river alignment.

The assessment of spatio-temporal changes in channel morphology plays a crucial role in the management of alluvial river systems [*Andrew et al., 2000, Brierley et al., 2008, Downs et al., 2013, Gregory, 2006*]. In the Shirvan river basins, rapid agricultural development, the construction of reservoirs and canals, and riverbank reinforcement have led to significant anthropogenic alterations in river channels. To analyze long-term channel deformations, a comparative study was conducted using topographic maps from the 1970s and high-resolution satellite imagery (1.5 m resolution) acquired from the Azersky satellite, as part of the Azercosmos Agency's project titled "Promotion of Remote Sensing Services of the Earth's Surface for the Sustainable Development of Azerbaijan."

Unlike traditional ground-based observation methods, remote sensing enables the rapid acquisition of extensive spatial information, facilitating the resolution of numerous large-scale environmental and hydrological issues. The ability to access and utilize aerospace-derived data directly for practical applications underscores its growing importance in river basin management.

This analysis encompasses the entire course of the Turyanchay River, from its source to its mouth. In the upper reaches, particularly along the Galachay (Aghchay) tributary up to the village of Filfili (elevation: 1146 m), no significant morphological changes were detected. However, the expansion of the village and the development of agricultural areas within the river's floodplain were observed. Additionally, bank stabilization measures have disrupted the natural connection between the riverbed and the floodplain. Although a multi-channel system persists in this section, the riverbed width has narrowed significantly — from approximately 600 meters to 240 meters.

Below the village of Khachmaz, the valleys of Agchay and Nazarchay become narrower, and the formerly braided channel transitions into a single-thread stream, resulting in more concentrated flow. Following the confluence of the Daimadera River with Sarisu and subsequently with Agchay, and then the merger of Sarisu with Nazarchay near the village of

Tarkesh, the river assumes the name Turyanchay. In this segment, water withdrawals and anthropogenic influences on the river's regime have historically been minimal.

The construction of the first hydraulic structure in this part of the Turyanchay — the water intake facility near the village of Garabulaq—began in 2019 and was commissioned in 2021 (see Fig. 3). The primary function of this facility is to pump water from the river (at an elevation of 300 m) to the Boyuk Soyudlu reservoir, which is located at an altitude of 520 m and has a storage capacity of 750,000 m³. The reservoir supplies irrigation water to approximately 3,000 hectares of walnut, hazelnut, and olive orchards in the vicinity of the village of Boyuk Soyudlu.

(a) (b)

Fig. 3. Satellite images of the river section before (a) and after (b) the construction of the Garabulaq intake structure. a – Satellite image from 2012; b – Satellite image from 2023

A comparison of satellite images reveals that 312 meters upstream of the Garabulaq intake structure, the width of the river increased from approximately 160 meters to 248 meters. Field observations confirm noticeable subsidence of the levees in the upstream section of the dam, indicating possible hydromorphological responses to the construction.

Approximately 10 km downstream from the confluence of the Turyanchay and Karachay (Demiraparanchay), the Turyanchay watershed operates. Upstream of this watershed, two aggregate extraction sites were active on the river's left bank in 2013, directly opposite the Turyanchay State Nature Reserve. These operations led to significant bottom erosion, with bank scouring ranging from 50 to 111 centimeters. The intensity of erosional processes increased further downstream of the watershed. In the lower reaches, extending to the confluence with the Garasu River, the valley progressively narrows, and vertical deformations of the riverbed become more pronounced.

In the 1970s, the lower reaches of the Shirvan rivers were characterized by a network of swamps and lakes forming part of the "Shirvan-Garasu" river-lake system. This system received inflow from smaller rivers – such as the Agsuchay, Girdimanchay, Goychay, and Turyanchay – originating from the southern slopes of the Greater Caucasus, ultimately discharging into Lake Hajigabul. At its peak, the Garasu river-lake system extended over 120 km and, prior to the regulation of the Kura River, would also receive floodwaters from its tributaries.

Following the construction and operation of the Mingachevir Reservoir, and the artificial diversion of the Turyanchay and Goychay rivers into the Garasu via man-made channels, floodwaters ceased to reach the Shirvan-Garasu system. Consequently, in line with the expansion of agricultural activities, the area was subjected to extensive drainage and land reclamation efforts.

A multi-year analysis of channel deformations indicates that horizontal channel shifts are largely absent in the upper reaches of the river. In these segments, the river maintains a relatively uniform flow pattern up to the upper boundary of the forest belt, suggesting a higher degree of channel stability.

In contrast, portions of the lower reaches exhibit limited meander migration, with most meanders showing a trend toward stabilization. This phenomenon can primarily be attributed to significant reductions in downstream flow, caused by the diversion and abstraction of river

water for irrigation in the upper reaches or through artificial channel modifications. As a result, the river often fails to deliver water to its terminus, particularly at its confluence with the Agsuchay.

In the mouth sections of the rivers, the active channel narrows to a width of approximately 3–5 meters, and the riverbed and banks are predominantly composed of fine-grained clayey-silty sediments. In these areas, the influence of anthropogenic activities – such as irrigation infrastructure, channel modifications, and flow regulation – on channel deformation processes is more pronounced than the effects of natural hydrological or geomorphological dynamics.

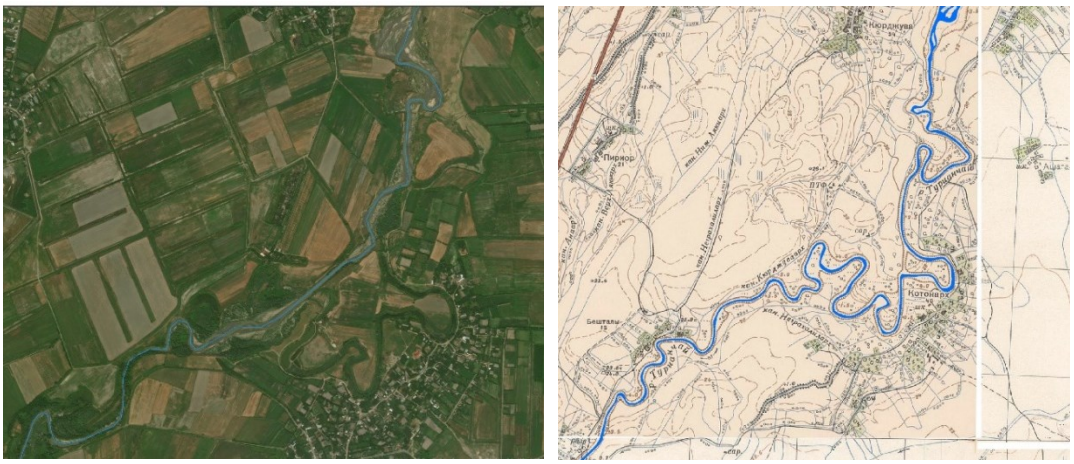


Fig. 4. Channel deformations in the lower reaches of the Turyanchay River

Conclusion

Recent anthropogenic activities have significantly altered the natural hydrographic network of the Shirvan region. Although all Shirvan rivers are left-bank tributaries of the Kura River, historically, most did not flow directly into the main Kura channel. Instead, their waters drained into two major low-lying depressions – the Shirvan Garasu and the Zardab Garasu. The Shirvan Garasu, located in the ancient floodplain of the Kura, historically received large inflows during spring floods, largely due to breaches in the Kura's earthen banks. However, after the construction of the Mingachevir reservoir, which regulates Kura flows, the inflows to the Shirvan Garasu diminished drastically, causing progressive drying. Currently, only the Alijanchay River flows directly into the Kura, while other rivers discharge into the Garasu depressions, with water from these areas channeled artificially back to the Kura River.

Field investigations in 2013 across seven key rivers documented complex channel dynamics characterized by seasonal shifts between single-thread and multi-thread channels. These rivers show pronounced morphometric variability driven by seasonal and interannual hydrological changes. For example, Girdimanchay transforms into a multi-thread river during spring floods but reverts to fewer channels with lower flow in summer, enhancing erosion and sediment deposition. Over eight years, significant vertical incision, up to 2 meters deep, has been observed in several rivers, with erosion rates ranging from approximately 6 to 42 centimeters per year depending on the river and location.

The Goychay River similarly exhibits seasonal variability, with up to five channels during spring and a single-thread channel in dry seasons. Intensive lateral erosion has been noted, especially along the left banks, accompanied by alluvial sediment accumulation. Damiraparanchay and Tikanlichay rivers show comparable patterns of channel branch reduction and erosion, with lateral migration shifting channels predominantly toward one bank. Vandamchay and Bumchay rivers demonstrate alternating channel patterns influenced by hydrological conditions and sediment transport, with high erosion rates linked to episodic flood events.

The Agsuchay River presents some of the most dramatic channel changes, with the channel incision reaching 3.4 meters over eight years. This intense vertical erosion is associated with hydroelectric developments and reservoir construction, which have modified sediment transport and reduced lateral channel shifts.

Long-term comparative analysis of cross-sectional profiles between 2013 and 2021 confirms high morphodynamic activity across all studied rivers. These changes reflect complex interactions between natural hydrological variability and human interventions such as reservoir construction, water withdrawals, and bank reinforcements. Remote sensing analysis of the Turyanchay River basin corroborates these findings, revealing significant riverbed narrowing, channel stability in upper reaches, and channel constriction with increased erosion in lower reaches. Additionally, hydraulic infrastructure development, like the Garabulaq water intake, has altered river morphology, causing localized channel widening upstream and levee subsidence.

Historically, the lower reaches of the Shirvan rivers featured extensive wetlands and lakes as part of the Shirvan-Garasu river-lake system, which disappeared after regulation of the Kura River and land reclamation for agriculture. Presently, artificial diversions and flow reductions have led to narrowing and channel instability in the rivers' lower courses, with some sections unable to deliver water to their natural endpoints.

Overall, these findings highlight the dynamic and fragile nature of the Shirvan river systems, where both natural and anthropogenic factors drive rapid morphological transformations, necessitating careful management to balance environmental sustainability and regional water resource needs.

References

Brierley G., Fryirs K. Geomorphology and river management: Applications of the River Styles framework. Blackwell Publishing, 2005.

Brierley G.J., Fryirs K.A., Boulton A., Cullum C. Working with change: The importance of evolutionary perspectives in framing the trajectory of river adjustment // In: River futures: An integrative scientific approach to river repair. Island Press. 2008, p. 65–84.

Chalov R.S. Channel studies: Theory, geography, practice. Vol. 1. Channel processes: Factors, mechanisms, forms of manifestation and conditions of formation of river channels. Moscow: LKI Publishing House, 2008, 608 p. (in Russian).

Chalov R.S. Channel studies: Theory, geography, practice. Vol. 2. Morphodynamics of river channels. Moscow: Krasand Publishing House, 2011, 960 p. (in Russian).

Chalov R.S. Channel processes (channel studies). INFRA-M, 2016. (in Russian).

Costa J.E., Williams G.P. (). Debris flows in small mountain stream channels // USGS Professional Paper 1281. U.S. Geological Survey, 1984.

Downs P.W., Dusterhoff S.R., Sears W.A. Reach-scale channel sensitivity to multiple human activities and natural events: Lower Santa Clara River, California, USA // Geomorphology, 2013, 189: 121–134. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.01.021.

Gregory K.J. The human role in changing river channels // Geomorphology, 2006, 79(3–4): 172–191. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.06.018.

Imanov F.A., Nuriyev A.A. Analysis of channel processes in the valleys of the Shirvan rivers // Collection of Scientific Papers of the Institute of Water Management of Georgia, 2012, 67: 94–99. (in Russian).

Jakob M., Hungr O. (Eds.) Debris-flow hazards and related phenomena. Springer. 2005. doi: 10.1007/3-540-27129-5

Jafarov A., Ismayilov Z. Morphodynamic impacts of debris flows on the river systems of central Azerbaijan // Proceedings of the National Academy of Sciences of Azerbaijan: Earth Sciences, 2015, 71(1): 22–30.

Johnson A.M. Influence of sediment-laden floods on alluvial plain dynamics // Earth Surface Processes and Landforms, 2020, 45(12): 1507–1523. doi: 10.1002/esp.4840

Knighton D. Fluvial forms and processes: A new perspective. Routledge, 2014.

Mahmudov R.N. Modern climate changes and dangerous hydrometeorological phenomena. National Academy of Sciences of Azerbaijan. 2018. (in Azerbaijani).

Mammadov M.A. Hydrography of Azerbaijan. Tehsil NPM, 2012. (in Azerbaijani).

Marchi L., Arattano M., Deganutti A.M. Characterization of debris flows in the Eastern Italian Alps // Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 2009. 91(1): 59–70. doi: 10.1111/j.1468-0459.2009.00361.x.

Mammadov M.A., Imanov F.A., Mahmudov R.N. (2000). Hidrometry (in Azerbaijani). NPM Nurlan.

Museyibov M.A. Physical geography of Azerbaijan. Maarif, 1998. (in Azerbaijani).

Nuriyev A. Perennial fluctuations in the flow of Shirvan rivers (in Azerbaijani). Water Problems, Science and Technologies: International Peer-Reviewed Scientific Journal, 2021, 1(17): 38–46.

Nuriyev A., Imanov F., Gojamanov M. Impact of anthropogenic activities on channel deformations of mountain rivers: A case study of the Turyanchay River, Azerbaijan // 5th International Conference on Environmental Design and Health (ICED2024), 6, 2024.

Pierson T.C. Hyperconcentrated flow – Transitional process between water flow and debris flow // In: M. Jakob & O. Hungr (Eds.), Debris-flow hazards and related phenomena. Springer, 2005, p. 159–202.

Simon A., Curini A., Darby S.E., Langendoen E.J. Bank and near-bank processes in an incised channel // Geomorphology, 2000, 35(3–4): 193–217. doi: 10.1016/S0169-555X(00)00036-2.

Smith D., Zhou X., Chen Y. Channel responses to sediment pulses in mountain-front rivers // Geomorphology, 2015, 238: 1–15. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.02.007.

Селевая и оползневая опасность для транспорта

Е.Г. Петрова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, epgeo@mail.ru

Аннотация. Сели и оползни входят в число наиболее опасных природных процессов, способных приводить к катастрофическим последствиям для населения и экономики. Особую опасность представляют селевые и оползневые процессы для транспортной инфраструктуры и других транспортных объектов, которые оказываются в зоне их активизации и на пути прохождения. Сход селевых потоков и оползней на автомобильные дороги или железнодорожные пути может стать непосредственной причиной аварии и повреждения транспортного средства при его попадании под ударное воздействие потока или в переносимую им грязекаменную массу и обломочный материал. Разрушение селями и оползнями дорожного полотна, мостов, тоннелей и других объектов транспортной инфраструктуры, заполнение их обломочным материалом делает невозможным дальнейшее использование затронутых участков дорог до полного устранения последствий стихийного бедствия, что приводит к прерыванию транспортного сообщения на более или менее продолжительное время. Масштабы создаваемых при этом чрезвычайных ситуаций (ЧС) могут выходить за рамки локальных или муниципальных и приобретать характер межмуниципальных, региональных, межрегиональных и даже межгосударственных, в зависимости от того, какое значение имеют повреждаемые транспортные пути. В данном исследовании использовались методы мониторинга аварийных событий на транспортных объектах, произошедших в результате воздействия селевых потоков и оползней, с последующей систематизацией собранной информации в авторской электронной базе данных; проведен анализ накопленных многолетних рядов наблюдений и оценка потенциального риска возникновения ЧС исследуемого типа с учетом их среднегодовой повторяемости. Наиболее велика среднемноголетняя повторяемость и риск возникновения рассматриваемых ЧС на территории Республики Дагестан, Краснодарского края, Сахалинской области и Республики Северная Осетия–Алания. В условиях наблюдаемых климатических изменений опасные селевые и оползневые воздействия на объекты транспорта будут нарастать, что делает проблему их изучения особенно актуальной.

Ключевые слова: *селевые потоки, оползни, объекты транспорта, транспортная инфраструктура, чрезвычайные ситуации, база данных*

Ссылка для цитирования: Петрова Е.Г. Селевая и оползневая опасность для транспорта. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 346–355.

Debris flow and landslide hazard for transport

E.G. Petrova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, epgeo@mail.ru

Abstract. Debris flows and landslides are among the most dangerous natural processes leading to catastrophic consequences for the population and economy. They pose a particular danger to transport facilities and infrastructure located in the area of their activation and along the path. Debris flows and landslides on roads or railways can directly cause an accident and damage to a vehicle hitting by the flow impact or getting into the mud and debris it carries. The destruction of roads, bridges, tunnels and other infrastructure

by debris flows and landslides, and their filling with debris, makes it impossible to use the affected sections of roads until eliminating consequences of natural disaster, which leads to disruption of the transport communication for a more or less extended period of time. The scale of the emergencies can go beyond the local or municipal and acquire the character of inter-municipal, regional, interregional and even interstate, depending on the importance of damaged transport routes. This study used methods for monitoring emergencies at transport facilities that occurred because of debris flows and landslides, followed by subsequent systematization of the collected information in the author's electronic database; analysis of accumulated long-term observation series and assessment of the potential risk of their occurrence, taking into account their average annual number. Republic of Dagestan, Krasnodar Krai, Sakhalin Region and Republic of North Ossetia-Alania have the highest average annual recurrence and risk. Under observed climate changes, hazardous natural impacts on transport facilities will increase, which makes the problem of studying them particularly relevant.

***Key words**: debris flows, landslides, transport facilities, transport infrastructure, accidents and emergencies, data base*

Cite of this article: Petrova E.G. Debris flow and landslide hazard for transport. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 346–355.

Введение

Селевые потоки и оползни могут оказывать на транспорт как прямое, механическое, так и косвенное воздействие. Соответственно, наносимый ими при этом фактический ущерб также может быть как прямым, так и косвенным. Прямое воздействие и прямой ущерб возникает в том случае, когда сход селевых потоков и оползней на автомобильные дороги или железнодорожные пути становится непосредственной причиной аварии, повреждения транспортного средства и транспортной инфраструктуры при их попадании под ударное воздействие потока, в переносимую грязекаменную массу или под оползающий обломочный материал. Вместе с тем, разрушение селями и оползнями дорожного полотна, опор и пролетов мостов, тоннелей и других объектов транспортной инфраструктуры, заполнение их грязевой массой и обломочным материалом делает невозможным дальнейшее использование затронутых участков дорог до полного устранения последствий стихийного бедствия. Это приводит к нарушению штатного режима функционирования транспортного сообщения на более или менее продолжительное время, в зависимости от объема причиненных разрушений. В результате возникающего перерыва в работе транспорта, необходимости организации реверсного движения или выбора альтернативных объездных участков дорог (при их наличии) образуется косвенный ущерб. Согласно оценкам, он может составлять от 50 до 200% от прямого ущерба [*Перов, 2012*]. В горных районах, где селевая и оползневая опасность наиболее велика, повреждаемые этими природными процессами дороги могут являться единственными транспортными коммуникациями. Масштабы создаваемых при этом чрезвычайных ситуаций (ЧС) могут выходить за рамки локальных или муниципальных и приобретать характер межмуниципальных, региональных, межрегиональных и даже межгосударственных, в зависимости от того, какое значение имеют нарушаемые транспортные пути, какие населенные пункты они связывают.

Предыдущими исследованиями было установлено, что на Северном Кавказе, который является одним из наиболее оползне- и селеопасных регионов России, только за период 2010–2019 гг. оползневое воздействие испытали 35,252 км участков автодорог с твердым покрытием и 46,095 км – без покрытия [*Разумов и др., 2021*]. Разные авторы использовали разную методику оценки селевого и оползневого риска для автомобильных дорог: от полуколичественной оценки [*Маций и др., 2019*] до

эпидемиологического [*Bíl et al., 2014*] и «агентного» подхода [*Schlögl et al., 2019*]. Первый предполагал расчет коэффициента риска на основе количества оползней вблизи дороги и ее длины, второй учитывал влияние перерывов в движении транспорта на местные сообщества.

Целями предлагаемого исследования является сбор и анализ информации о ЧС, произошедших на транспортных объектах России в результате селевого и оползневого воздействия, проведение оценки потенциального риска возникновения таких событий на основе расчета их среднемноголетней повторяемости и выявление регионов наибольшего уровня риска.

Методы и используемые данные

Для проведения оценки риска возникновения ЧС исследуемого типа, необходим мониторинг таких событий за предыдущий период времени с последующим анализом и экстраполяцией собранных данных. В данной работе осуществлялся мониторинг аварийных событий, произошедших в результате воздействия селевых потоков и оползней на транспортные объекты России, посредством фиксации доступной информации о них в авторской электронной базе данных по техногенным и природно-техногенным ЧС [*Петрова, 2021*]. Вся исходная информация накапливается и хранится в ней в систематизированном виде с использованием программы Microsoft Office Access. Таблица базы данных включает следующие столбцы (поля таблицы): номер, дата ЧС, страна, регион, локализация, тип ЧС, число погибших, число пострадавших, ущерб, описание ЧС, источник информации. Каждая строка таблицы содержит информацию об одном событии. Основным источником для наполнения базы данных являются оперативные сводки МЧС России, которые публикуются ежедневно в открытом доступе на сайте ведомства в сети Интернет [*https://mchs.gov.ru*], а также информация, публикуемая на сайтах главных управлений МЧС по отдельным субъектам РФ. Дополнительным источником служат новостные ленты ведущих российских информационных агентств [*РИА Новости, Интерфакс, ТАСС*].

В процессе исследования была проведена компьютерная обработка собранного массива информации при помощи основных рабочих инструментов программы: запросы, поиск и сортировка данных. Выполнены поисковые запросы по ключевым словам, позволившие отобрать в базе информацию по авариям или нарушениям в работе на автомобильном и железнодорожном транспорте, вызванным селями и оползнями. Результаты запросов были отсортированы по субъектам РФ, типам опасных природных процессов и типам транспортных объектов. Затем был проведен географический и статистический анализ полученных результатов. Географический анализ позволил выделить регионы, в которых были зафиксированы аварийные события и ЧС рассматриваемых типов; статистический анализ выявил среди них регионы, где такие события повторялись наиболее часто.

Результаты и их обсуждение

За период с 1992 по 2023 гг. в базе данных было зафиксировано 40 ЧС на автомобильном и 17 ЧС на железнодорожном транспорте, которые произошли на территории России в результате воздействия селевых потоков, а также 22 ЧС на автомобильном и 6 ЧС на железнодорожном транспорте, возникших из-за оползней. Вероятно, реальное количество происшествий, не достигших ранга ЧС, может быть больше, но поскольку в оперативные сводки МЧС они не попадают, то не все такие события могут быть включены и в базу данных за недостатком соответствующей информации.

По результатам анализа собранной информации о произошедших ЧС были выделены основные виды транспортных объектов и инфраструктуры, наиболее уязвимых к воздействию опасных природных процессов исследуемых типов. Выявлены также регионы России, в которых были зафиксированы аварии или нарушения режима

штатного функционирования автомобильного и железнодорожного транспорта из-за воздействия селей и оползней за рассматриваемый период. Результаты анализа отражены в таблице 1.

Таблица 1. Виды транспортных объектов и регионы возникновения ЧС под воздействием селевых потоков и оползней за 1992–2023 гг.

Виды транспортных объектов	Регионы возникновения ЧС
Автомобильные дороги, опоры и пролеты мостов, средства автотранспорта	Алтайский, Краснодарский и Приморский края, Сахалинская область, республики Дагестан, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Крым, Северная Осетия-Алания, Чеченская Республика
Железнодорожные пути, опоры и пролеты мостов, контактные сети, средства сигнализации, подвижной состав	Краснодарский, Приморский и Забайкальский края, Нижегородская, Орловская и Сахалинская области

Рис. 1. Железнодорожные пути над опорами моста у платформы Макопсе в Краснодарском крае, подмытыми селевым паводком 24 октября 2018 г. Фото с квадрокоптера 30 октября 2018 г. Снимок С.С. Черноморца.

Предложена следующая типологическая группировка ЧС на транспортных объектах, возникающих в результате селевых и оползневых воздействий:

- автомобильные аварии и нарушения автомобильного сообщения по причине попадания автомобилей в селевые потоки или под оползающий обломочный материал, повреждения и заполнения грязекаменным и обломочным материалом дорожного полотна, разрушения мостов, тоннелей и других объектов автотранспортной инфраструктуры;
- железнодорожные аварии и нарушения железнодорожного сообщения из-за повреждения и заполнения селевыми потоками или оползневыми массами полотна железных дорог, сдвигания и опрокидывания подвижного состава, разрушения опор мостов, контактных сетей, железнодорожной сигнализации и других объектов железнодорожной инфраструктуры.

В таблице 2 приведена информация по некоторым зафиксированным в базе данных ЧС, возникшим в результате воздействия на транспортные объекты селевых потоков и оползней за период с 1992 по 2023 гг.

Таблица 2. ЧС на транспорте, вызванные воздействием селей и оползней за 1992–2023 гг.

Дата ЧС	Место ЧС	Последствия ЧС
02–05.09.1992	Сахалинская обл., Макаровский р-н	В результате схода селей разрушены авто- и ж/д дороги, линии связи и ЛЭП, мосты, повреждены жилые дома
12–14.08.1993	Сахалинская обл., Макаровский р-н	В результате массового схода селей (ок. 70) от п. Восточный до г. Макаров разрушены авто- и ж/д дороги, линии связи и ЛЭП, мосты, повреждены жилые дома
12.07.1995	Республика Кабардино-Балкария, Черекский р-н (с. Безенги); Чегемский р-н (с. Булунгу)	Сход 3 селевых потоков в р-не с. Безенги, разрушены и повреждены автодороги, 2 моста, 350 м магистрального водопровода. Ущерб 0,8 млрд руб. В с. Булунгу разрушено и занесено селевыми отложениями 15 домов и множество хоз. построек, повреждены мост, линии связи и ЛЭП. Погибло 80 голов скота. Ущерб 6,5 млрд руб.
27.07.1996	Республика Северная Осетия-Алания, Алагирский и Ирафский р-ны	Селями повреждено несколько км автодорог, 2 моста
26.09.1996	Сахалинская обл., Макаровский р-н	Селевым потоком размыто ж/д полотно на участках Восточный – Макаров и Макаров – Вахрушев. Движение поездов остановлено
19.04.1999	Орловская обл., на 25 км железной дороги Орел – Елец	Из-за оползня произошла просадка участка ЖД пути длиной 50 м. Движение поездов временно прекращено. Из остановленного в районе оползня поезда Воронеж – Рига 170 пассажиров автобусами доставлены в г. Орел. Аварийный участок дороги перекрыт. Движение поездов организовано по объездным путям
08.06.2000	Краснодарский край, г. Сочи, строящаяся объездная автодорога	В результате оползня опрокинута и сгорела автомашина ГАЗ-53, поврежден экскаватор «Като»
22.07.2000	Сахалинская обл., Невельский, Томаринский, Холмский и Долинский районы, г. Холмск, Чехов	В результате сильного дождя и схода селей выведено из строя 8 км линий связи и 17 км ЛЭП; разрушено 6 мостов, повреждено 700 м ж/д полотна и 1,2 км автодорог. В зону подтопления попали 55 одноэтажных домов в 8 н.п. и 230 га с.-х. угодий
30.07.2000	Сахалинская обл., Холмск	В результате схода селей на 4 суток было прервано ж/д сообщение Холмск – Невельск; особенно пострадало оборотно-локомотивное депо станции Холмск; нарушена ж/д сигнализация
01.08.2000	Сахалинская обл., Томаринский р-н	Селевыми потоками повреждено 3,5 км автодорог
25.08.2000	Республика Сев. Осетия-Алания, Алагирский р-н	Селевым потоком разрушено ок. 200 м автодороги, повреждена ЛЭП
26.02.2001	Краснодарский край, г. Сочи, строящаяся объездная автодорога	Оползнем объемом до 800 тыс. $м^3$ разрушен мост путепровода, подпорные стены (170 п.м.), два одноэтажных жилых строения, две опоры ЛЭП
20.04.2001	Нижегородская обл., Кстово	В результате воздействия паводковых вод на склоне р. Ока сошел оползень. Повреждено 120 м ж/д полотна

Дата ЧС	Место ЧС	Последствия ЧС
13.07.2002	Сахалинская обл., Макаровский р-н	В р-не н.п. Заозерное сошли 5 грязевых потоков. Смыт автомобильный мост через р. Чегана, размыто ж/д полотно у станции Туманово
15.07.2002	Сахалинская обл., Невельский р-н	В Невельске грязевыми потоками забиты ливневые и канализационные коллекторы, сошли 3 селя общим объемом 750 м^3, смыто 2 пешеходных моста, на двух улицах снесены 2 подпорные стенки. В г. Горнозаводск смыт пешеходный мост. Сошедшими селями повреждены автодороги Невельск – Шебунино, Невельск – Холмск. Движение автотранспорта временно прекращено
02.09.2002	Сахалинская обл., Холмский р-н	Сошли оползни на автодороги общей протяженностью 122 км
01.10.2003	Сахалинская обл., Макаровский, Невельский, Холмский р-ны	В результате схода селей разрушены авто- и ж/д дороги, линии связи и ЛЭП, мосты, повреждены жилые дома
04.05.2005	Республика Дагестан, Цунтинский р-н	Легковой автомобиль попал в селевой поток
21.06.2005	Краснодарский край, Район Большого Сочи, между станциями Лазаревская и Аше	На участке федеральной автодороги в р-не н.п. Мамедова оползень (200 м^3) перекрыл трассу. Движение автотранспорта приостановлено. На участке ж/д от схода оползня пострадал товарный поезд: 4 вагона сошли с рельсов и 3 вагона упали под откос в сторону моря
27.07.2005	Республика Дагестан, Курахский р-н	В селевой поток попали автобус КАВЗ-685 с пассажирами и автомобиль «Жигули»
24.08.2005	Республика Дагестан, Сулейман-Стальский р-н	В результате схода селевых потоков, вызванных сильными дождями, повреждено 80 жилых домов, 1 км ЛЭП, 14 мостов, 5,6 км водопровода, 13,2 км газопровода, 23,5 км автодорог местного значения, разрушено 213 объектов с.-х. назначения
24.05.2006	Республика Карачаево-Черкесия, Ногайский р-н	В результате схода оползня (2 тыс. м^3) в ауле Адиль-Халк перекрыто движение транспорта на участке 70 м по автодороге «Черкесск – Кисловодск» (21-й км)
06.03.2007	Чеченская Республика, Итум-Калинский р-н, с. Бугарой	В результате активизации оползневых процессов в с. Бугарой полностью разрушено 6 и частично 8 домов. Скорость движения оползня – 5–6 м/ч. Повреждено 100 м дорожного полотна, около 300 м ЛЭП, 1,5 км водопровода. Пострадало 63 чел. Ущерб ~ 3397,2 тыс. руб.
28–29.06.2007	Республика Дагестан, Ботлихский р-н, с. Алак	В результате катастрофической активизации оползневых процессов разрушено 6 жилых домов, ЛЭП, 500 м автодороги
01–17.05.2008	Республика Дагестан, Тляратинский р-н, с. Саниорта	В результате оползневой подвижки (ок. 700 м^3) на 16-м км автодороги «Тлярата – Камилух» разрушено 350 м дорожного полотна и прервано транспортное сообщение с 16 н.п. и двумя погранзаставами. Погибло 3 чел.
22–23.06.2009	Сахалинская обл., г. Южно-Сахалинск, Анивский и Макаровский р-ны	В результате сильного проливного дождя (40 мм) в г. Южно-Сахалинск, Анивском и Макаровском районах нарушены системы жизнеобеспечения. Селевым потоком перекрыто движение на 5-ти участках ЖД Южно-Сахалинск-Ноглики (задержан выход 6 пассажирских поездов)
27.05.2010	Республика Карачаево-Черкесия, Зеленчукский р-н	В результате сползания глыб известняков (диаметром 8 м) было перекрыто 70 м автодороги «Сторожевая – Исправная» в 500 м южнее станицы Исправной

Дата ЧС	Место ЧС	Последствия ЧС
Март–апрель 2011	Республика Дагестан, Кайтагский р-н, с. Джибахни	В результате активизации трех крупных оползней (4,2 млн. м^3) повреждено 570 м внутрисельской дороги, разрушено 5, деформировано 76 жилых домов
Июнь 2011	Республика Дагестан, г. Махачкала, п.г.т. Кяхулай и мкр. Сепараторный	В результате активизации оползневых процессов (площадь 66 тыс. м^2, объем 330 тыс. м^3) пострадало 580 м автодорог и 600 м ЛЭП, разрушено 25, деформировано 103 жилых дома
18.06.2012	Республика Дагестан, Унцукульский р-н	В результате ливневых дождей в с. Гимры сошел селевой поток, который размыл участок автодороги республиканского значения «Буйнакск-Гимры» длиной 3 км
21.05.2014	Кабардино-Балкарская Республика, Черекский р-н; Чегемский р-н	В результате прохождения комплекса неблагоприятных метеорологических явлений сошедшими селевыми потоками перекрыты автодороги местного значения в Черекском районе к н.п. Верхняя Балкария, повреждено 50 м дорожного полотна; в Чегемском районе между н.п. Хушто-Сырт и Булунгу повреждено 30 м дорожного полотна
02.06.2014	Республика Карачаево-Черкесия, Урупский р-н	Сход селевого потока (ок. 910 м^3) на автодорогу «Псемен - Пхия». Нарушено дорожное сообщение с 5 н.п. (109 жилых домов, население 385 чел., 2 школы)
20.08.2014	(межгосударственный) Республика Грузия / Республика Северная Осетия-Алания, на участке г. Владикавказ – н.п. Ларс	В связи со сходом селя в районе н.п. Гвелетти Республики Грузия закрыто движение транзитных автотранспортных средств на участке г. Владикавказ – н.п. Ларс в обоих направлениях. В районе пункта пропуска «Верхний Ларс» находится 36 единиц техники (88 чел.), в районе н.п. Редант – 26 единиц техники (30 чел.), в районе пункта пропуска «Иран» – 9 единиц техники (15 чел.)
Апрель 2015	Краснодарский край, Адлерский р-н	04 и 08.04 на проезжую часть автомобильной дороги п. Аибга – с. Ермоловка сошло два селевых потока. Движение на автодороге в сторону п. Аибга было прекращено
06.06.2015	Республика Северная Осетия – Алания, Военно-Грузинская дорога	В связи с угрозой схода селевых потоков, невозможностью ночного мониторинга метеообстановки горных районов Республики Грузия и обеспечения безопасного проезда закрыто движение транзитных автотранспортных средств на участке Военно-Грузинской автодороги в обоих направлениях до особого распоряжения
05.08.2015	Республика Северная Осетия – Алания, Алагирский р-н	В связи со сходом селя закрыто движение транзитных автотранспортных средств на участке автодороги н.п. Бурон – Северный портал Рокского тоннеля в обоих направлениях
14.10.2015	Краснодарский край, г.о. Сочи	В результате схода селя объемом 350 м^3 грязекаменной массой на ЖД перегоне «Дагомыс – Лоо» Северо-Кавказской железной дороги перекрыто 100 м четного пути, 4 м нечетного пути, нарушена контактная сеть четного пути. Произошла задержка 5 пассажирских поездов
06.11.2015	Республика Северная Осетия–Алания, Алагирский р-н	В связи со сходом селевого потока (ок. 500 м^3) в 800 м севернее н.п. Бурон, невозможностью обеспечения безопасного проезда, движение автотранспортных средств на участке н.п. Бурон – Северный портал Рокского тоннеля в обоих направлениях закрыто. Проводятся работы по расчистке дорожного полотна
11.11.2015	Краснодарский край, г.о. Сочи	На перегоне «Сочи – Дагомыс» Северо-Кавказской ж/д произошел сход селя (6 м^3) на четный участок ж/д

Дата ЧС	Место ЧС	Последствия ЧС
		полотна, движение было организовано реверсивно по нечетному пути
02.06.2016	Республика Дагестан, Буйнакский р-н	В результате схода селевого потока разрушены два автомобильных моста в н.п. Апши и Нижний Дженгутай, автотранспортное сообщение не нарушено, имеются объездные пути
04.06.2016	Краснодарский край, Лазаревский р-н	В результате прохождения комплекса неблагоприятных метеоявлений (выпадение обильных осадков) на 113 км федеральной автодороги А-147 у н.п. Солоники Лазаревского р-на произошла просадка участка автомобильного моста через р. Цусхвадж; в результате схода селя на трое суток было нарушено дорожное сообщение и энергоснабжение
09.06.2016	Чеченская Республика, Шатойский р-н	В результате схода селя на сутки нарушено дорожное сообщение с 7 н.п.
22.06.2016	Чеченская Республика, Итум-Калинский и Шатойский районы	Горная порода после проливных дождей сошла на дорогу, ведущую в Шатойский и Итум-Калинский районы, перекрыт проезд автотранспорта. От внешнего мира оказались отрезаны 27 горных н.п. с населением ок. 16 тыс. чел. Оползень перекрыл участок дороги длиной ок. 50 м и шириной до 6 м
18.07.2016	Республика Северная Осетия – Алания, Алагирский р-н	В связи со сходом селевого потока запрещено движение автотранспортных средств в обоих направлениях на 69-м км Транскавказской автомагистрали, на участке н.п. Бурон – Северный портал Рокского тоннеля
20.06.2017	Республика Северная Осетия – Алания, н.п. Бирагзанг	В результате схода селевой массы поврежден низководный мост через р. Цахсадыком, отрезанными оказались 4 частных жилых дома
01.09.2017	Кабардино-Балкарская Республика, в 2 км западнее н.п. Эльбрус Эльбрусского района	В результате выпадения обильных осадков произошел подъем уровня воды в р. Баксан и сходы селей со склона ущелья Адыл-Су. Селевыми потоками снесены в реку 3 легковых автомобиля (5 чел.), 2 чел. спасены. Повреждены 8 участков дорожного полотна федеральной автодороги А-158 «Прохладный–Баксан–Эльбрус» (более 3 км), на 5 дней было нарушено дорожное сообщение с 5 н.п., 10 турбазами и пансионатами (более 7,7 тыс. жителей и отдыхающих)
05.07.2018	Республика Дагестан, Гунибский р-н	В результате прохождения комплекса неблагоприятных погодных условий на автодороге районного значения между н.п. Салта и Кудали автомобиль марки ВАЗ попал под селевой поток. Погибли 3 чел.
11.08.2018	Республика Дагестан, Ахтынский р-н	В результате схода селевого потока (протяженностью 20 м) на автодорогу районного значения «Ахты – Хнов» нарушено автотранспортное сообщение с 3 н.п.
09.09.2018	Сахалинская обл., Макаровский р-н	В результате схода селевых потоков и повреждения ж/д полотна на одном перегоне Дальневосточной железной дороги отменены 6 пассажирских поездов, нарушено автомобильное сообщение на участке региональной автодороги, подтоплен один мост
24.10.2018	Краснодарский край, Туапсинский район	Сильные ливни привели к сходу селевых потоков. На трассе Джубга – Сочи обрушился автодорожный мост через р. Макопсе, размыт мост на дороге Туапсе – Хадыженск через р. Цыпка. Селевые потоки подмыли опоры ж/д моста у платформы Макопсе (рис. 1–2);

Дата ЧС	Место ЧС	Последствия ЧС
		нарушили ж/д сообщение на станции Чилипси и перегоне Греческий–Кривенковское. Задержаны и отменены десятки поездов
24.12.2018	Краснодарский край, Туапсинский район, вблизи железнодорожной станции Навагинская	В связи с переувлажнением почвы в результате сильного дождя (до 58 мм за 24 ч) сошел сель на ж/д пути. В результате наезда пригородного электропоезда «Белореченск–Гойтх» на селевую массу произошел сход с рельсов 2 вагонов без опрокидывания. Имеются пострадавшие
26.12.2018	Краснодарский край, н.п. Дагомыс г.о. Сочи	На автодорогу краевого значения «Дагомыс – Барановка» произошел сход двух селей объемом 20 и 35 м^3. На время проведения работ по очистке дорожного полотна движение автотранспорта было организовано реверсивным способом
09.05.2019	Республика Дагестан, Гумбетовский р-н	В результате схода селя пострадали поселки Нижнее Инхо, Верхнее Инхо, Килятль и Читль. 12 автотранспортных средств унесены в р. Андийское Койсу. Селевые потоки повредили участки автодорог в нескольких районах
12.06.2019	Республика Дагестан, Курахский р-н	В Курахском районе между н.п. Кутул и Штул прошел селевой поток. Четыре участка дороги (от 100 до 200 м в длину) затопило грязевой массой, в зоне схода селя оказались 3 автомобиля
23.07.2020	Республика Дагестан, Чародинский р-н	В результате схода селевого потока и поднятия уровня р. Ресор по причине прошедших осадков в н.п. Хитаб поврежден мост (длина 15 м, ширина 3 м); в н.п. Хилих селевым потоком размыта внутрисельская дорога и в некоторые дворовые территории попала грязевая масса
01.08.2021	Кабардино-Балкарская Республика, Черекский р-н	За н.п. Безенги сошел селевой поток на участок дороги, ведущей к альплагерю Безенги (180 чел., из них 10 детей). Организована временная пешая переправа для туристов
22.08.2021	Республика Дагестан, Левашинский район	Сель унес две машины — грузовую «Газель» около с. Куппа (1 чел.), а также ВАЗ-2107 в с. Хаджалмахи (2 чел.). В Гунибском, Гергебильском, Левашинском, Лакском и Курахском районах селевыми потоками и обвалами повреждены автомобильные дороги
24.06.2022	Краснодарский край,	В результате выпадения интенсивных осадков в п. Каткова Щель произошел сход селевых масс на автомобильную дорогу «Джубга – Сочи». Сель перекрыл движение по одной полосе ЖД путь на станции Чемитоквадже. В месте схода селя проходит два ж/д пути. В районе с. Марьино произошло повреждение автомобильного моста через р. Псезуапсе
12.07.2023	Краснодарский край, Туапсинский район	Вследствие выпадения сильных осадков в виде дождя (282 мм за 12 ч), произошел подъем уровней рек Нечепсухо, Шапсухо и Дефань. В превентивных целях в темное время суток на несколько часов перекрывалось движение на двух участках федеральной трассы М-4 «ДОН». На автодороге А-147 в п. Новомихайловка сошел сель. Было организованно реверсивное движение
04.08.2023	Республика Дагестан, Чародинский р-н	В результате прохождения селевого потока и размытия дороги местного значения без транспортного сообщения остались 2 н.п. Алчуниб и Кубатль

Рис. 2. Опоры железнодорожного моста у платформы Макопсе в Краснодарском крае, подмытые селевым паводком 24 октября 2018 г. Фото С.С. Черноморца

Выводы

Наибольшее число зафиксированных аварий и ЧС на объектах автотранспортной и железнодорожной инфраструктуры под воздействием селевых потоков и оползней произошло на территории Республики Дагестан (Ахтынский, Ботлихский, Буйнакский, Гергебильский, Гумбетовский, Гунибский, Левашинский, Лакский, Кайтагский, Курахский, Сулейман-Стальский, Тляратинский, Унцукульский, Цунтинский, Чародинский районы), Краснодарского края (Адлерский, Лазаревский, Туапсинский районы, г.о. Сочи), Сахалинской области (Анивский, Макаровский, Невельский, Томаринский, Холмский и Долинский районы), республик Северная Осетия – Алания (Алагирский, Ирафский районы), Кабардино-Балкария (Чегемский, Черекский, Эльбрусский районы), Карачаево-Черкесия (Зеленчукский, Ногайский, Урупский районы) и Чеченская (Итум-Калинский и Шатойский районы). В этих регионах риск возникновения рассматриваемых типов ЧС наиболее велик, что требует осуществления мониторинга таких событий и принятия дополнительных мер по их предотвращению.

Благодарности

Работа выполнена по ГЗ по теме 1.7 121051300175-4 «Опасность и риск природных процессов и явлений».

The work was supported by Lomonosov Moscow State University (grant 1.7 121051300175-4 “Danger and risk of natural processes and phenomena”).

Список литературы

Маций С.И., Сухляева Л.А. Полуколичественная оценка селевого риска на автомобильных дорогах // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019, 10(4): 105–115. doi: 10.15593/2224-9826/2019.4.10.

Перов В.Ф. Селеведение. Учебное пособие. М.: Географический ф-т МГУ, 2012, 272 с.

Петрова Е.Г. Особенности мониторинга опасных природных воздействий с использованием базы данных // Экологические системы и приборы, 2021, 7: 11–16. doi: 10.25791/esip.07.2021.1237.

Разумов В.В., Богданова Н.Д., Разумова Н.В. Масштабы негативного воздействия оползневых процессов на населенные пункты и хозяйственные объекты Северного Кавказа // ГеоРиск, 2021, 15(2): 8–24.

Bíl M., Kubeček J., Andrášik R. An epidemiological approach to determining the risk of road damage due to landslides // Nat. Hazards, 2014, 73: 1323–1335. doi: 10.1007/s11069-014-1141-4.

Schlögl M., Richter G., Avian M., Thaler T., Heiss G., Lenz G., Fuchs S. On the nexus between landslide susceptibility and transport infrastructure – an agent-based approach // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2019, 19: 201–219. doi: 10.5194/nhess-19-201-2019.

Геоморфологическая реакция на селевой паводок, сформированный прорывом ледникового озера Башкара

В.С. Посаженникова[1], В.Н. Голосов[1,2], С.В. Харченко[1,2]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, vitaposazhennikova@gmail.com

[2]Институт географии РАН, Москва, Россия

Аннотация. 1 сентября 2017 г. произошел прорыв оз. Башкара, расположенного в верховьях р. Адыл-Су, крупного правого притока р. Баксан. Сошедший катастрофический паводок существенно изменил морфологию днища долины р. Баксан и спровоцировал разрушение объектов инфраструктуры. В условиях деградации оледенения Кавказа и активного антропогенного освоения днищ долин, вероятность повторного прорыва оз. Башкара или прорыва иных прорывоопасных ледниковых озер возрастает. Необходимо детальное изучение последствий подобных селевых событий. Объектом исследования стал участок днища долины р. Баксан от впадения р. Адыл-Су до г. Тырныауз. Для оценки селевой трансформации днища были использованы разновременные космические снимки: до и сразу после селевого события (2016 и 2017 гг.). Дешифрирование форм рельефа показало, что основной реакцией днища долины р. Баксан на селевой паводок было изменение морфологии флювиальных форм рельефа. Дальнейшее исследование заключалось в сегментации речной сети и анализе морфометрических характеристик. Результаты исследования свидетельствуют, что наиболее значимым геоморфологическим откликом на сформированный прорывом оз. Башкара селевой паводок в днище долины р. Баксан стало увеличение ширины русла, обусловленное боковой эрозией и размывом островов. В среднем ширина русла после прорыва увеличилась в 1,6 раз, для 15% от общей протяженности участков русла увеличение было многократным (в 2–5 раз). Определяющим фактором степени расширения русла был коэффициент стесненности.

Ключевые слова: *расширение русла, рельефомоделирующие процессы, селевой паводок, прорыв ледникового озера, Кавказ*

Ссылка для цитирования: Посаженникова В.С., Голосов В.Н., Харченко С.В. Геоморфологическая реакция на селевой паводок, сформированный прорывом ледникового озера Башкара. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 356–362.

Geomorphic response to the debris flow triggered by the Bashkara glacier lake outburst

V.S. Posazhennikova[1], V.N. Golosov[1,2], S.V. Kharchenko[1,2]

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, vitaposazhennikova@gmail.com

[2]Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The glacier lake Bashkara outburst occurred on 1 September 2017 in the headwaters of the Adyl-Su River valley. Subsequent catastrophic debris flow substantially reshaped the valley bottom of the Baksan River and caused extensive infrastructure damage. Such lake-outburst events seem to appear more frequently due to the Caucasus deglaciation and intensive anthropogenic impact. Hence, understanding the geomorphic response of valley bottoms owed by debris flows should be quantified. The study examines a 20-km reach of the Baksan River valley bottom from the Adyl-Su River confluence to Tyrnyauz town. To assess debris flow-induced transformations, multi-temporal satellite

imagery (2016, pre-event; 2017, post-event) was analyzed. Manual geomorphic mapping revealed that the primary response involved morphological changes in fluvial landforms. Subsequent river network segmentation and morphometric analysis demonstrated that the most significant geomorphic impact was substantial channel widening driven by lateral erosion and island removal. Mean channel width increased by a factor of 1.6, whilst 15% of the studied reaches exhibited a 2- to 5-fold increase. The degree of widening was strongly influenced by the confinement index.

Key words: *channel widening, geomorphic response, debris flow, glacial lake outburst, Caucasus*

Cite of this article: Posazhennikova V.S., Golosov V.N., Kharchenko S.V. Geomorphic response to the debris flow triggered by the Bashkara glacier lake outburst. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 356–362.

Введение

В последние десятилетия наблюдается значительное увеличение антропогенного воздействия на горные бассейны. Устойчивый тренд дегляциации [*Tielidze, Wheate, 2018*] и увеличение частоты экстремальных погодных явлений [*Coumou, Rahmstorf, 2012*] способствуют формированию мощных селевых паводков [*Brenna et al., 2023*], вызывающих кардинальные изменения морфологии днища горных долин. Это увеличивает риски, связанные с затоплением и процессами переноса наносов [*Buraas et al., 2014*]. Для эффективного снижения данных рисков необходимо выявление участков рек с наибольшими морфологическими изменениями, а также ясное понимание факторов, определяющих масштабы изменений русел вследствие селевых паводков. Северный Кавказ является одним из наиболее густонаселенных и развитых в сельскохозяйственном и рекреационном плане регионов Российской Федерации, при этом – одним из наиболее мощных очагов оледенения Кавказа, площади которого интенсивно сокращаются с последующей активизацией ряда опасных геоморфологических процессов (в частности, селевых). Так, в бассейне р. Баксан, на 16% покрытого ледниками, за последнее столетие было зафиксировано около двух десятков катастрофических селей [*Черноморец, 2005*]. Поэтому для решения исследовательских задач был выбран участок горной долины р. Баксан между устьем р. Адыл-Су, откуда сошёл катастрофический сель вследствие прорыва ледникового озера Башкара [*Черноморец и др., 2018; Крыленко и др., 2019; Kornilova et al., 2021*], и до створа г. Тырныауз. Цель данного исследования заключалась в определении селевой трансформации рельефа днища долины р. Баксан.

Методы

Для анализа селевой трансформации рельефа в результате прорыва оз. Башкара 1 сентября 2017 г. было использованы разновременные космические снимки. Базовым для анализа морфологии днища долины до селевого паводка был снимок SPOT 7, предоставленный правообладателем Airbus Defence and Space, с разрешением 1,5 м от 20.08.2016. Снимок считался репрезентативным в связи с отсутствием геоморфологически эффективных селевых событий в период с августа 2016 по сентябрь 2017 г. и пиковыми расходами воды не превышающих средних 60–70 м^3/с. Снимок после прорыва был сделан SPOT 7 14.09.2017 (разрешение 1,5 м).

Дешифрирование форм рельефа было выполнено вручную в программе ESRI ArcGIS 10.5. Отдельно выделялись контуры русла, островов и пойм. В данной работе под термином “русло” подразумевалась форма рельефа дна долины, по которой осуществляется речной сток при уровнях ниже бровки поймы, затопляемой в многоводную фазу режима [*Чалов, 2008*]. Под «поймой» понималась низкая

террасовидная поверхность, примыкающая к руслу, затапливаемая с периодичностью 1–3 года и покрытая преимущественно древесной растительностью [*Чалов, 2008*], тогда как под «островами» – участки поймы в пределах водотоков.

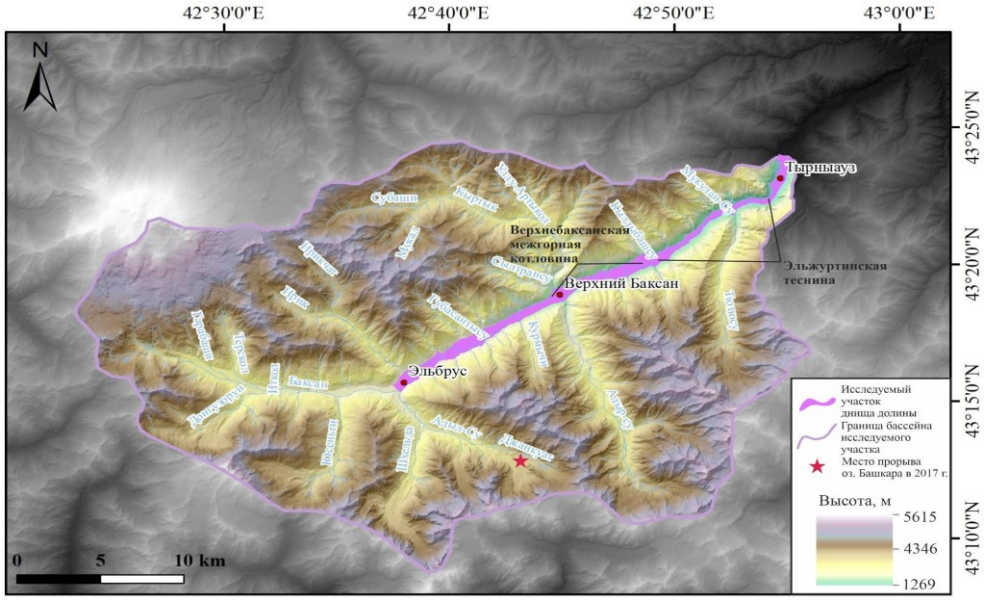


Рис. 1. Расположение исследуемого участка днища долины в пределах водосборного бассейна р. Баксан до створа Тырныауз

Дальнейшая работа заключалась в сегментации речной сети. Сначала исследуемый объект был разделен на относительно однородные участки с помощью ГИС-процедуры, предложенной Ferencevic, Ashmore [*2012*]. Из-за недостаточных данных о расходах, вместо мощности потока в работе использовался индекс мощности потока (stream power index, SPI), значение которого рассчитывается как произведение уклона русла реки на квадратный корень из площади водосборного бассейна. Для более точного анализа взаимосвязей между факторами и масштабом изменений русла были выделены дополнительные сегменты согласно методике, разработанной Brierley, Fryirs [*2005*] и усовершенствованной Rinaldi и соавторами [*2013*].

На основе космических снимков были определены средняя ширина русла, рассчитанная как отношение площади сегмента к длине русла, за 2016 и 2017 гг. (W_{16}, W_{17}), количество (nI_{16}, nI_{17}) и площадь островов (I_{16}, I_{17}), ширина поймы (F_{16}, F_{17}), коэффициент стесненности (confinement index), или отношение ширины днища долины к ширине русла, (Ci_{16}, Ci_{17}). Изменения формы русла, вызванные селевым паводком, были выражены в виде абсолютной разницы в ширине русла ($\Delta W_{17\text{-}16}$) и коэффициента ширины (width ratio, $Wr_{17\text{-}16}$), рассчитанного как отношение ширины русла после (2017) к ширине русла до (*2016*) прорыва оз. Башкара.

Речные русла были классифицированы на различные геоморфологические типы (G_{16}, G_{17}) на основе соотношения между шириной поймы и шириной русла. При $F/W \geq 3$ русла соответствовали широкопойменному типу (S), $F/W \leq 1$ – врезанному (V), промежуточные значения – адаптированному (A) [*Чалов, 1979*]. Для разделения на относительно прямолинейные (p) и меандрирующие (m) морфодинамические типы (M_{16}, M_{17}) была использована степень развитости излучин, рассчитываемая как отношение длины излучины (l) к её шагу (L). Пороговым значением для возникновения процесса меандрирования было значение $l/L = 1{,}15$ [*Чалов, 1979*]. Для выявления разветвленного типа (r) оценивалось наличие осередков и островов и суммарное увеличение ширины русла, являющееся показателем изменения структуры потока [*Чалов, 2008*]. На основе данных показателей было выделено 9 типов русел: Vp, Vm, Vr, Ap, Am, Ar, Sp, Sm, Sr.

Другие морфометрические параметры были извлечены из ЦМР FABDEM с помощью инструментов ГИС и расчетов в программном обеспечении Microsoft Excel

2021. Так, были рассчитаны средний уклон русла (перепад высот между соседними ячейками, деленный на расстояние между ними, S), площадь водосборного бассейна (DA), SPI, расстояние от источника селевого паводка (A-s). Для анализа факторов расширения для сегментов были рассчитаны средние значения нормализованного относительного вегетационного индекса (NDVI) за 28 августа 2017 г. (за 3 суток до селевого паводка) и фиктивные переменные для впадения притоков. Также использовались данные о наличии линеаментов (для анализа была использована геологическая карта ГГК К-38-I, VII [*Федеральная…, 2004*] и база данных активных разломов Евразии AFEAD [*Zelenin et al., 2022*]). Корреляционный анализ морфологических изменений, вызванных селевым паводком, и факторов, потенциально контролирующих масштаб этих изменений, был выполнен с помощью ранговой корреляции Спирмена.

Результаты

Морфологические изменения рельефа днища долины

В результате проведения сегментации русла было выделено 142 участка. Минимальная, средняя и максимальная длина участков составила 20, 228 и 775 м соответственно. Все участки характеризуются горным типом русловых процессов и включают в себя все геоморфологические типы условий формирования и морфодинамические типы русел по классификации МГУ [*Чалов, 1979, 2008*]. Уклон русла реки изменяется от 0,03% до 21,5%, среднее значение для всех участков составляет 2%. До селевого паводка максимальная ширина русла достигала 255,7 м, минимальная – 12 м, в среднем ширина русла равнялась 36,2 м.

Статистически значимое расширение русла (>5 м) в результате селевого паводка в сентябре 2017 г. произошло на 106 участках общей длиной 23 км из 31 (74,3%). Так, минимальная, средняя и максимальная ширина после паводка составила 19,8, 51,2 и 272 м соответственно. Наибольшее расширение в абсолютном выражении было зафиксировано на участке в 1,5 км вниз по течению от устья р. Адыл-Су и составило 99,2 м. В среднем коэффициент расширения достигал 1,6 (медиана 1,4). На 66 участках общей протяженностью 12,1 км коэффициент превысил 1,5, из которых на 28 участках (4,8 км) – $Wr_{17\text{-}16} > 2$. Пространственный анализ $Wr_{17\text{-}16}$ показал, что наиболее существенное расширение (>1,4) происходило в пределах 20 км вниз по течению от устья р. Адыл-Су, вплоть до Эльджуртинской теснины.

В результате селевого паводка значительно изменилась структура островов. На 21 участке протяженностью 4.8 км наблюдалось уменьшение площади островов на $2{,}1 \times 10^5$ м^2 (77,3%). На 32 участках было зафиксировано существенное увеличение площади островов на $3{,}1 \times 10^5$ м^2 (487%), из них 15 участков приурочены к Верхнебаксанской межгорной котловине, в пределах которой прирост площади составил 2,9х105 м^2, или 93,5% от всего прироста островов. Образование новых островов было связано с расчленением поймы по старым протокам. Соответственно, в остальной части днища долины, где преобладали относительно узкие участки русла, основным процессом была эрозия островов.

Расширение русла повлияло на изменения типов русел. Так, до селевого паводка преобладающими геоморфологическими типами русел были адаптированные (38,9%) и широкопойменные (36,4%), а врезанные русла составляли 24,8%. После селевого паводка доля адаптированных русел возросла до 48%, врезанных – до 38,1%, тогда как доля широкопойменных русел уменьшилась до 13,8%. Так, для 62,2% всего исследуемого участка геоморфологический тип остался прежним, на 22,8% наблюдался переход от широкопойменного типа к адаптированному и на 15% – от адаптированного к врезанному. Данная смена типов была обусловлена интенсивной боковой эрозией пойменных участков.

Изменения коснулись и морфодинамических типов русел: протяженность относительно прямолинейных русел сократилась с 53,3 до 42,1%, разветвленных –

незначительно увеличилась с 36,4 до 39,2%, тогда как меандрирующих – возросла с 10 до 18,7%. Только 25,2% от общей протяженности русла претерпели изменения, из которых 48,9% пришлось на смену относительно прямолинейного типа разветвленным, 22% – прямолинейного меандрирующим, что демонстрирует преобладающий тренд на усложнение структуры русла.

Факторы, влияющие на селевую трансформацию рельефа днища долины

Матрица корреляции Спирмена показывает, что наиболее значимую положительную корреляцию коэффициент ширины имеет с коэффициентом стесненности, рассчитанным как отношение ширины днища долины к ширине русла 2016 г., как при рассмотрении полного набора данных (0,56), так и участков выше Эльджуртинской теснины (0,49) (рис. 2). Умеренная положительная связь была выявлена в обоих случаях с уклоном и геоморфологическим типом русла (~ 0,4), поскольку расширение русла происходило за счёт поймы. Для остальных ландшафтно-геоморфологических факторов были выявлены существенные различия. Так, при рассмотрении участка между устьем р. Адыл-Су и Эльджуртинской тесниной значительно меньшую роль оказывает расстояние от источника селя (0,33 против 0,52), при этом начинают прослеживаться более сложные взаимосвязи между расширением русла и такими факторами, как количество и площадь островов и морфодинамический тип русла (~ –0,4). Примечательно, что возрастает значимость отрицательной связи с доселевой шириной русла (0,56 против 0,39) (рис. 2, А).

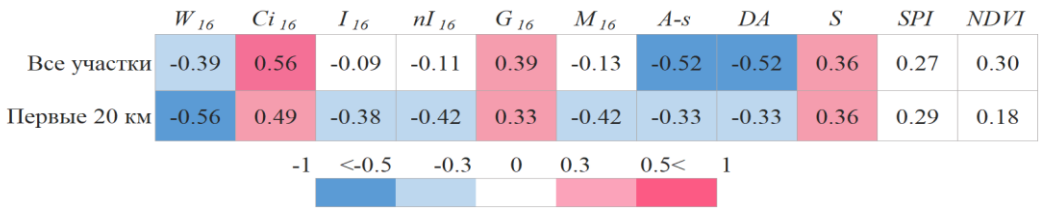


Рис. 2. Матрица ранговой корреляции Спирмена между коэффициентом расширения русла после селевого паводка (Wr) и ландшафтно-геоморфологическими факторами: W_{16} – ширина русла, Ci_{16} – коэффициент стесненности, I_{16} – площадь островов, nI_{16} – количество островов, G_{16} – геоморфологический тип русла, M_{16} – морфодинамический тип русла, A–s – расстояние от источника селевого паводка, DA – площадь водосборного бассейна, S – уклон русла, SPI – индекс мощности потока, NDVI – нормализованный относительный индекс растительности. Индекс 16 означает, что данные взяты за 2016 г.

Таким образом, предварительный анализ позволяет заключить, что наиболее интенсивное расширение происходило на более узких до селевого паводка участках русла (W < –0,5) с относительно прямолинейным морфодинамическим типом (I, nI & M < –0,4), с более высоким средним уклоном (S = ~0,4) и относительно широким днищем (Ci > 0,5). Определяющим фактором «дальности» воздействия селевого паводка, вероятно, являлось четковидное строение речной долины р. Баксан. Так, после прохождения крупной межгорной котловины происходило падение максимальных расходов потока и, соответственно, его эрозионно-транспортирующей способности.

Обсуждение

Данное исследование показывает, что основная реакция на селевой паводок в принимающей долине р. Баксан заключалась в расширении русла и изменении его морфодинамической структуры. Расширение в основном было связано с боковой эрозией берегов и размывом островов.

Наиболее интенсивно расширение протекало в пределах 20 км ниже впадения селевого притока, где произошёл прорыв. Для более отдаленных участков почти полное отсутствие

ярко выраженных изменений формы русла, вероятно, было обусловлено четковидным строением долины р. Баксан. Так, при прохождении Верхнебаксанской котловины расходы селевого паводка сократились на 10–15%, при этом наблюдалось выполаживание продольного профиля (среднее значение уклонов сокращается почти в 2,5 раза) и преобладание разветвленного морфодинамического типа русла со средней шириной около 80 м, что превышает средние значения для всего исследуемого участка в два раза. Данные условия являлись крайне благоприятными для потери энергии потока, его «распластывания» и аккумуляции наносов. В расположенной ниже по течению Эльжуртинской теснине средний коэффициент расширения не превышал 1,1. Данные результаты демонстрируют существенную роль стесненности долины в сдерживании расширения русла.

Стесненность долины оказывала значительное влияние и на русло выше по течению от Верхнебаксанской котловины: участки с расширением более чем в 1,5 раза обладали коэффициентом стесненности выше среднего, т.е. являлись относительно неограниченными. Также данные участки относились к крутым и характеризовались изначальным более узким поперечным профилем. Примечательно, что для них была характерна трансформация из адаптированного относительно прямолинейного типа русла во врезанное меандрирующее. Селевой паводок уничтожил прибрежный древесный и кустарниковый покров поймы, делая берега более чувствительными к размыву. С другой стороны, селевой паводок способствовал поступлению огромного количества твердых наносов большей размерности, чем способна перемещать р. Баксан при стандартной мощности потока, и, соответственно, неравномерной аккумуляции. Изменение морфологии дна русла, вероятно, повлекло за собой нарушение структуры потока и возникновение спиралевидных течений. Похожим механизмом можно объяснить доминирующий переход от относительно прямолинейного русла к разветвленному в ~ 50% случаях, когда происходило изменение морфодинамического типа русла.

Выводы

Наиболее значимым геоморфологическим откликом на сформированный прорывом оз. Башкара селевой паводок 1 сентября 2017 г. стало значительное увеличение ширины русла р. Баксан, обусловленное эрозией поймы и пойменных островов. В среднем ширина русла после прорыва увеличилась в 1,6 раз. Также был выявлен преобладающий тренд усложнения морфодинамических типов русел: 18% относительно прямолинейных русел стали меандрирующими (6%) и разветвленными (12%). Ключевыми факторами в пространственном распределении изменений русла были ширина русла до селевого паводка и стесненность долины. Четковидное строение долины р. Баксан определило дальность воздействия селевого паводка: после существенного расширения долины в районе с. Верхний Баксан в Эльжуртинской теснине морфология днища почти не изменилась (Wr 1,2).

Благодарности

Статья подготовлена в рамках выполнения мегагранта Правительства Российской Федерации, реализуемого в рамках Соглашения №075-15-2025-008 от 27.02 2025 г.

Список литературы

Крыленко И. В., Кидяева В. М., Сурков В. В. Причины и последствия прорыва 1 сентября 2017 г. горного приледникового озера башкара в приэльбрусье //Маккавеевские чтения-2018. – 2019. – С. 112-127.

Федеральная служба геологического картографирования России. Геологическая карта: K-38-I, VII (Кисловодск). Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Кавказская серия [Карта]. ФГУГП Кавказгеолсъемка. (Ред. Энна Н.Л.), 2004.

Чалов, Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979, 232 с.

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Том 1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: ЛКИ, 2008, 608 с.

Черноморец С.С. Селевые очаги до и после катастроф. М.: Научный мир, 2005, 184 с.

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидаева 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, 22(2): 70–80.

Brenna A., Marchi L., Borga M., Zaramella M., Surian N. What drives major channel widening in mountain rivers during floods? The role of debris floods during a high-magnitude event // Geomorphology, 2023, 430: 108650. doi: 10.1016/j.geomorph.2023.108650.

Brierley G.J., Fryirs K.A. Geomorphology and river management: Applications of the river styles framework. Wiley-Blackwell, 2013.

Buraas E.M., Renshaw C.E., Magilligan F.J., Dade W.B. Impact of reach geometry on stream channel sensitivity to extreme floods // Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39(13): 1778–1789.

Coumou D., Rahmstorf S. A decade of weather extremes // Nature Climate Change, 2012, 2(7): 491–496.

Ferencevic M.V., Ashmore P. Creating and evaluating digital elevation model-based stream-power map as a stream assessment tool. River Research and Applications, 2012, 28(9): 1394–1416.

Kornilova E.D. et al. Modeling of extreme hydrological events in the Baksan River basin, the Central Caucasus, Russia // Hydrology. – 2021. – Т. 8. – №. 1. – С. 24.

Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussettini M. A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (MQI) // Geomorphology, 2013, 180–181, 96–108.

Tielidze L.G., Wheate R.D. The Greater Caucasus Glacier Inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan) // The Cryosphere, 2018, 12(1): 81–94.

Zelenin E., Bachmanov D., Garipova S., Trifonov V., Kozhurin A., Ovsyuchenko A. The database of the active faults of Eurasia (AFEAD): Ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data, 2021, 13(6): 2739–2762.

Особенности морфодинамики размыва берегов на реках Удмуртии

И.И. Рысин, И.И. Григорьев

Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия, rysin.iwan@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования смещения русел за 2003–2024 гг. на 8 ключевых участках, расположенных на размываемых излучинах. Протяженность, средняя и максимальная ширина, площадь и объем размыва определялись с применением тахеометрической съемки и беспилотных авиационных систем. Наибольшие значения ширины размыва достигают 8,1 м/год, а высота размываемого берегового уступа изменяется от 2,5 м на р. Нылга до 8,8 м на р. Лумпун. Протяженность размываемых участков варьировала в пределах 55–533 м. В многолетней динамике размывов на реках Чепца и Кырыкмас отчетливо прослеживается положительный тренд. На р. Сива отмечается слабый положительный тренд, подтверждаемый высокими половодными расходами в последние годы. Установлена очень тесная связь между максимальной шириной размыва на р. Чепца и максимальными годовыми расходами реки за период с 2004 по 2015 г. (r = 0,899). Достаточно тесная связь получилась с площадью и объемом размывов за указанные годы (r = 0,787). На р. Сива корреляционная связь между максимальной шириной размыва и максимальными годовыми расходами за указанный период оказалась чуть ниже (r = 0,600). Показатель же связи с площадным и объемным размывами получился более значимым (r = 0,794). Корреляционный анализ максимальной ширины размывов на р. Кырыкмас за 2004–2021 гг. с максимальными годовыми расходами на реке аналоге также показал достаточно значимую связь (r = 0,617). Расположение размываемых участков в пределах различных типов излучин характеризуется локальными особенностями, но чаще приурочены к участкам с наибольшей кривизной или немного смещены ниже по течению.

Ключевые слова: *размыв берегов рек, мониторинг, тахеометрическая съемка, корреляционный анализ, Удмуртская Республика*

Ссылка для цитирования: Рысин И.И., Григорьев И.И. Особенности морфодинамики размыва берегов на реках Удмуртии. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 363–377.

Peculiarities of morphodynamics of bank erosion on rivers of Udmurtia

I.I. Rysin, I.I. Grigoriev

Udmurt State University, Izhevsk, Russia, rysin.iwan@yandex.ru

Abstract. The results of a study of channel displacement for 2003–2024 at 8 key sites located on erodible bends are presented. The length, average and maximum width, area and volume of scour were determined using total station surveys and unmanned aerial systems. The highest values of scour width reach 8.1 m/year, and the height of the eroding bank scarp varies from 2.5 m on the Nylga River to 8.8 m on the Lumpun River. The length of eroded sections varied between 55 and 533 m. The long-term dynamics of scouring on the Cheptsa and Kyrykmas Rivers clearly show a positive trend. There is a weak positive trend on the Siva River, confirmed by high flood discharges in recent years. A very close relationship was found between the maximum scour width on the Cheptsa River and the

maximum annual river discharge for the period from 2004 to 2015 (r = 0.899). A fairly close correlation was obtained with the area and volume of scour for these years (r = 0.787). On the Siwa River, the correlation between maximum scour width and maximum annual discharge for the period was slightly lower (r = 0.600). The correlation with area and volume scour was more significant (r = 0.794). Correlation analysis of the maximum scour width at Kyrykmas River for 2004–2021 with the maximum annual discharge at the analogue river also showed a significant relationship (r = 0.617). The location of eroded areas within the different types of bends is characterised by localised features, but more often confined to the areas of greatest curvature or slightly displaced downstream.

***Key words**: river bank erosion, monitoring, tacheometric survey, correlation analysis, Udmurt Republic*

Cite of this article: Rysin I.I., Grigoriev I.I. Peculiarities of morphodynamics of bank erosion on rivers of Udmurtia. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 363–377.

Введение

Селеподобные процессы на равнинных территориях обычно образуются при прорывах земляных плотин прудов, возникновении оползней, размыве берегов рек и др. Размывы берегов рек и наводнения во время аномальных половодий и паводков являются одним из опасных рельефообразующих процессов на низменных равнинах. Для их прогноза актуальными являются исследования морфодинамики русловых размывов на различных по водности реках в условиях современных климатических изменений. В дополнение к климатическим факторам, преобразование ландшафтов в результате хозяйственной деятельности оказывает еще более выраженное воздействие на изменения эрозионно-русловых систем [*Чалов, 2008, 2011*; *Robert A., 2003 и др.*]. Размыв берегов рек представляет собой наиболее заметное проявление русловых деформаций, что в свою очередь приводит к значительным потерям земельных угодий и инфраструктуры территории. Результаты этих исследований являются составной частью гидрологического обоснования проектов различных водохозяйственных мероприятий [*Антроповский, 2006; Беркович, 2001*; *Чернов, 2009; Эрозионно-русловые…, 2017* и др.]. Целью данной статьи является количественная оценка многолетней динамики размывов берегов на малых и средних реках Удмуртии, полученных путем тахеометрической съемки участков излучин, различающихся как расходами воды, так и ландшафтными особенностями их бассейнов.

Равнинная территория Удмуртской Республики (УР) расчленена многочисленными водотоками со средней густотой 0,71 км/км^2. Преобладающими являются широкопойменные реки с активным развитием процессов свободного меандрирования [*Рысин, Петухова, 2006*].

Впервые работы по изучению русловых размывов берегов на реках Удмуртии нами были начаты в 1999 г. по заданию Государственного комитета по недрам УР [*Петухова, Рысин, 2005*; *Rysin, Petukhova, 2004; Petukhova, Rysin, 2006 и др.*]. На территории соседних регионов исследования русловых процессов проводились также достаточно активно [*Назаров, Егоркина, 2004; Мозжерин, Курбанова, 2004 и др.*]. Полный обзор работ по размыву берегов рек на равнинных территориях Европейской части России представлен в работе [*Завадский и др., 2010*]. Детальный анализ проблемы русловых деформаций в отечественных и зарубежных публикациях содержится в многочисленных работах Р.С. Чалова с соавторами [*Чалов и др., 1998; Чалов, 2008, 2011 и др.*].

Материалы и методы исследований

Одним из надежных и доступных методов изучения динамики рельефа является метод стержней и марок. Детальное описание применяемой методики и анализ результатов представлен в нашей работе [*Рысин и др., 2024*]. Здесь же представлены

результаты относительно регулярной геодезической съемки размываемых береговых уступов на 8 участках рек, которые проводились в течение 2003–2024 гг. (рис. 1).

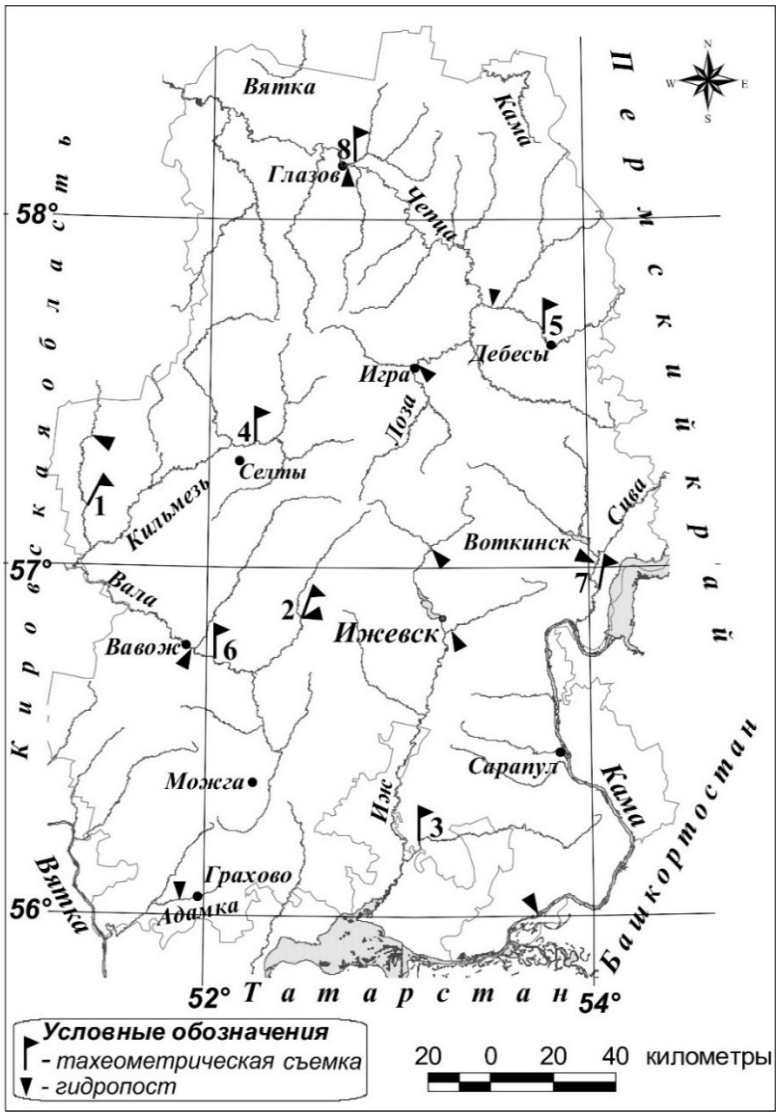


Рис. 1. Карта-схема расположения ключевых участков по изучению морфодинамики русел рек Удмуртии с применением инструментальных методов. Условные обозначения ключевых участков: 1 – р. Лумпун (д. Харламовская Пристань), 2 – р. Нылга (с. Нылга), 3 – р. Кырыкмас (д. Тавзямал), 4 – р. Кильмезь (д. Головизнин Язок), 5 – р. Чепца (д. Варни), 6 – р. Вала (д. Макарово), 7 – р. Сива (д. Метляки), 8 – р. Чепца (с. Адам)

Геодезическая съемка, как правило, проводилась на активно размываемых участках рек с помощью лазерных тахеометров: Trimble 3305, затем Nikon NPR-332. Тахеометрическая съемка позволяет рассчитать не только линейные параметры размыва, но также площадные и объемные показатели [*Гафуров и др., 2018; Григорьев, Рысин, 2008*].

С 2019 г. при инструментальной съемке иследуемых объектов нами применяется спутниковый приемник «EFT M1+» вместе с беспилотными авиационными системами (БАС): вначале DJI Phantom 4, позднее Autel Evo II PRO. Общая методика использования БАС для географических исследований обычно включает 6 этапов, в завершение которых создается цифровая модель местности и ортофотоплан [*Григорьев, Рысин, 2020*].

Обработка аэрофотоснимков проводится в отечественной программе Agisoft Metashape Professional. Подготовка топографических планов, расчет площадей и объемов размытого материала осуществляется с использованием программного комплекса «Кредо» [*Григорьев, Рысин, 2009*].

Результаты и обсуждение

Ниже впервые представлены к обсуждению количественные данные тахеометрических съемок на размываемых участках свободных излучин малых и средних рек УР за период 2003–2024 гг.

На р. Лумпун (пр. приток р. Кильмезь) у д. Харламовская Пристань (рис. 1) геодезическая съемка береговой линии осуществлялась на протяжении 110 м, здесь средняя высота размываемого берегового уступа равна 8,8 м. Как и в большинстве случаев, тахеометрическая съемка осуществлялась ежегодно с 2003 по 2014 г., в 2015–2022 г. съемка не проводилась. В эти годы осуществлялись только реперные наблюдения. Средний многолетний расход реки у д. Шмыки (23 км выше по течению от исследуемого участка) составляет 8,25 м^3/с [*Атлас…, 2020*].

Протяженность размываемого участка за рассматриваемый период изменялась от 48 м в 2012 г. до 110 м в 2005 г. В 2012 г. была отмечена и минимальная ширина размыва, составившая всего 0,18 м. Максимальные значения ширины размывов на участке зафиксированы в 2005 (2,26 м) и 2006 г. (1,85 м) (таблица 1). Самые низкие значения площадей размыва приурочены к 2012, 2013 и 2004 г., в эти же годы были зарегистрированы и минимальные значения объемов (таблица 2).

Максимальные значения площадей и объемов размыва не всегда совпадают по годам с максимальной шириной размывов, что вполне очевидно, поскольку максимальный размыв часто имеет локальный характер и может быть связан, например, с небольшим оползнем-обвалом или обрушением одиночного дерева вместе с обширной корневой системой. В данном случае максимальные значения площади (81,9 м^2) и объема размыва (737 м^3) были зафиксированы в 2006 г. (таблица 2), когда на реке в апреле был зафиксирован наивысший уровень (912 см) за весь рассматриваемый период.

Топографический план участков размыва по длине излучины выявил здесь особенности, существенно отличающиеся от ниже рассмотренных объектов (рис. 2). Анализ топографического плана и крупномасштабной карты исследуемого участка показывает, что излучина данной реки, согласно классификации МГУ [*Чалов, 2011*], в морфогенетическом плане относится к типу свободных, а по внешнему виду – к сегментным. Съемка осуществлялась в вершине излучины, которая характеризуется плавным уменьшением радиуса кривизны вниз по течению, соответственно наблюдается и аналогичное же возрастание ширины и площади размываемого участка вниз по течению. Участок выше по течению осложнен серией небольших оползней-обвалов.

Таблица 1. Средняя и максимальная ширина размывов на участках рек по данным тахеометрической съемки за 2004–2024 гг.

Годы наблюдений	Лум-пун	Нылга	Кырык-мас	Киль-мезь	Чепца/ Варни	Сива	Вала	Чепца/ Адам
2004	0,23/ 0,60*	0,66/ 1,26	0,75/2,76	0,38/ 1,10	0,35/ 0,97	0,87/ 1,86	0,72/ 1,70	0,25/ 1,53
2005	0,60/ 2,26	0,44/ 2,66	0,42/ 2,34	0,56/ 1,82	0,32/ 0,78	1,07/3, 40	0,96/ 2,60	0,62/ 2,90
2006	0,75/ 1,85	0,51/ 3,23	0,74/ 2,41	0,48/ 1,36	0,44/ 1,63	1,41/ 4,17	0,24/ 1,52	2,08/ 6,15
2007	0,40/ 1,02	0,39/ 1,97	0,71/ 3,82	0,38/ 1,66	0,42/ 2,20	0,53/ 2,59	0,64/ 1,64	0,49/ 2,13
2008	0,23/ 0,85	0,19/ 0,62	0,99/ 3,06	0,59/ 2,49	0,18/ 1,01	0,67/ 2,07	0,78/1, 82	0,39/ 1,30

Годы наблюдений	Лум-пун	Нылга	Кырык-мас	Киль-мезь	Чепца/ Варни	Сива	Вала	Чепца/ Адам
2009	0,32/ 0,84	0,36/ 1,37	0,46/ 1,52	0,24/ 0,93	0,33/ 1,08	0,64/ 2,59	0,25/0, 82	0,52/ 1,35
2010	0,45/ 1,44	0,19/ 0,50	2,34/ 4,74	0,54/ 1,77	0,32/ 1,05	1,99/ 3,50	0,27/0, 97	0,48/ 2,25
2011	0,41/ 1,07	0,18/ 0,69	1,24/ 3,08	0,33/ 0,76	0,48/1,46	1,29/2, 90	0,40/ 2,23	0,75/ 2,50
2012	0,18/ 0,52	0,48/ 1,24	1,50/ 5,01	1,11/ 2,46	0,68/2,23	1,54/ 5,96	0,60/ 1,91	2,02/ 5,42
2013	0,21/ 0,62	0,72/ 3,29	0,88/ 3,04	0,35/ 1,52	0,27/ 1,98	0,86/ 2,77	0,46/ 1,55	1,12/ 3,64
2014	0,23/ 0,69	0,54/ 1,43	0,71/1,98	1,13/ 1,73	0,53/1,63	0,86/ 2,90	0,28/ 1,14	0,86/ 3,13
2015	-	-	-	-	-	0,52/ 3,52	1,62/4, 15	-
2016	-	-	-	-	-	1,69/ 4,02	-	-
2017	-	-	**0,39/ 0,81**	-	-	-	-	-
2018	-	-	0,42/ 1,70	-	-	-	-	-
2019	-	-	0,75/ 3,59	-	-	-	-	-
2020	-	-	0,44/ 1,38	-	-	**0,12/ 0,41**	-	-
2021	-	**0,15/ 0,27**	2,44/ 8,14	-		0,58/ 2,65	**0,13/ 0,39**	-
2022	-	-	0,77/ 3,40	-	-	0,22/ 0,62	0,30/ 1,88	-
2023	**0,19/ 0,32**	**0.19/ 0.33**	2,12/ 5,16	**0,20/ 0,49**	**0,39/ 0,71**	0,23/0, 80	0,16/ 1,70	**0,82/ 1,52**
2024	0,73/ 2,88	0,46/ 1,60	0,99/ 2,88	0,21/ 0,70	0,25/ 1,62	0,80/2, 03	0,22/0, 65	0,98/ 3,98

*В числителе – средняя ширина, в знаменателе – максимальная ширина в метрах; полужирным шрифтом выделены средние многолетние значения

Таблица 2. Площади и объемы размывов на участках рек по данным тахеометрической съемки за 2004–2024 гг.

Годы наблю-дений	Лум-пун	Нылга	Кырык-мас	Киль-мезь	Чепца/ Варни	Сива	Вала	Чепца/ Адам
2004	13,4/ 121*	86,6/ 216	213,4/ 1088	51,7/ 114	61,3/ 264	182,9/ 640	212,6/ 891	92,6/ 500
2005	66/ 594	144,1/ 360	60,6/ 416	74,6/ 164	36,7/ 158	227,2/ 795	258,9/ 1085	211,7/ 1143
2006	81,9/ 737	127,3/ 318	94,8/ 646	65,1/ 143	65,2/ 280	258,6/ 1255	36,8/ 156	883,7/ 4772
2007	41,7/ 375	117,6/ 294	105/ 712	54,4/ 120	52,2/ 224	149,2/ 522	165,3/ 693	232,5/ 1256
2008	19,7/ 177	39,2/ 98	101,5/ 690	63,1/ 139	17,1/ 74	93,1/ 326	214,2/ 895	113,6/ 613
2009	25,9/ 233	84,5/ 211	84,1/ 570	17,2/ 19,0	36,8/ 158,0	148,2/ 519	51,4/ 216	187,2/ 1011
2010	46,4/ 418	42,5/ 106	348,8/ 2367	73,9/ 163	54,8/ 236	520,1/ 1820	47,5/ 199	152,4/ 823
2011	38,3/	32,8/	214,5/	50,5/	71,6/	342,3/	117,0/	274,7/

Годы наблю-дений	Лум-пун	Нылга	Кырык-мас	Киль-мезь	Чепца/ Варни	Сива	Вала	Чепца/ Адам
	345	82	1461	111	308	1198	494	1483
2012	8,9/ 80,0	100,1/ 250	313,9/ 2136	143,3/ 315	99,4/ 427	331,7/ 1161	143,8/ 601	977,1/ 5276
2013	12,9/ 116	137,7/ 344	149,6/ 1021	41,5/ 91	24,1/ 104	210,2/736	132,2/553	553,4/ 2988
2014	14,6/ 131	31,8/ 80	101/ 687	124,3/ 273	71,1/ 306	146,7/ 513	47,6/ 203	363,5/ 1963
2015	-	-	-	-	-	59,7/ 209	505,2/ 2120	-
2016	-	-	-	-	-	397,3/ 1391	-	-
2017	-	-	**74,1/ 506**	-	-	-	-	-
2018	-	-	54/ 369	-	-	-	-	-
2019	-	-	174,1/ 1184	-	-	-	-	-
2020	-	-	54,1/ 368	-	-	**15,4/ 54**	-	-
2021	-	**42,8/107**	596,8/ 4058	-	-	113,8/ 398	**41,1/ 173**	-
2022	-	-	212,2/ 1443	-	-	34,8/ 122	87,8/ 369	-
2023	**20,1/ 181**	**10,2/ 26**	402,1/ 2731	**35,8/ 79**	**71,3/ 306**	39/ 136	39,2/ 165	**439/ 2370**
2024	53,7/ 510	121,9/ 305	166,6/ 1133	27,1/ 60	36,6/ 157	86,7/ 303	55,3/ 232	367,3/ 1983

*В числителе – площадь размыва в м^2, в знаменателе – объем размыва в м^3; полужирным шрифтом выделены средние многолетние значения

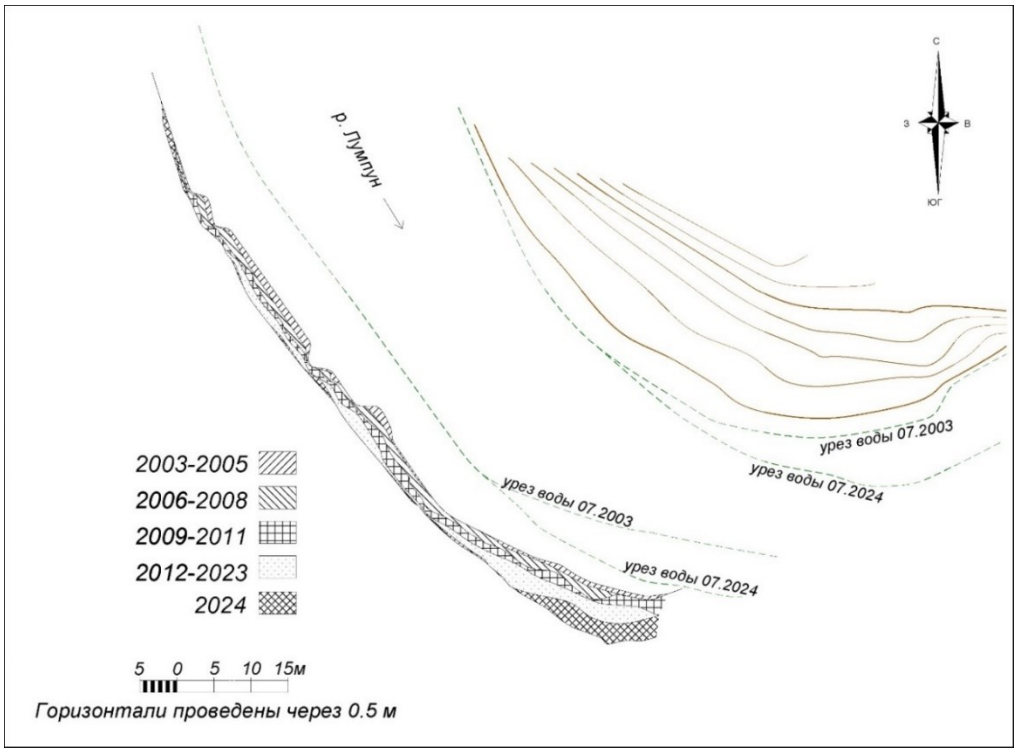


Рис. 2. Схема смещения размываемого берегового уступа на р. Лумпун за 2003–2024 гг.

Тахеометрическая съемка на р. Нылга (на юго-зпападной окраине с. Нылга), являющейся правым притоком р. Вала (рис. 1), осуществлялась с 2003 г. с 6-летним перерывом в 2015 г. С 2015 по 2020 гг. и в 2022 г. проводились наблюдения только с применением реперов. Средний многолетний расход реки у с. Нылга равен 6,28 м^3/с. Протяженность береговой линии, где осуществляется геодезическая съемка, составила в 2005 г. 330 м, а средняя высота размываемого берегового уступа – 2,5 м.

Анализ полученных данных показывает, что протяженность размываемого участка на реке изменялась в значительных пределах: от 55 м в 2023 до 329 м в 2005 г. Самые низкие значения ширины размывов отмечались за период с 2015 по 2021 гг. и составили всего 0,15 м. Наибольшие значения максимальной ширины размывов были зафиксированы в 2013 (3,29 м) и 2006 г. (3,23 м) (таблица 1). Максимальные же площади и объемы размывов расположились по годам в несколько ином порядке: здесь в лидерах оказался 2005 г., затем следует 2013 г. и на последнем месте оказался 2006 г. (таблица 2), что хорошо согласуется с высокими уровнями и расходами половодий.

По топографическому плану исследуемого участка видно, что излучина данной реки, в соответствии с вышеупомянутой классификацией, относится также к свободной, но по внешнему виду она – петлеобразная. Наименьший радиус кривизны излучины находится чуть ниже по течению от шейки петли, именно в этом месте фиксируются максимальные значения ширины размывов, достигающие в сумме до 15 м (рис. 3). На схеме отчетливо видно, что зона с максимальными размывами немного смещена вниз по течению от участка с наивысшей крутизной.

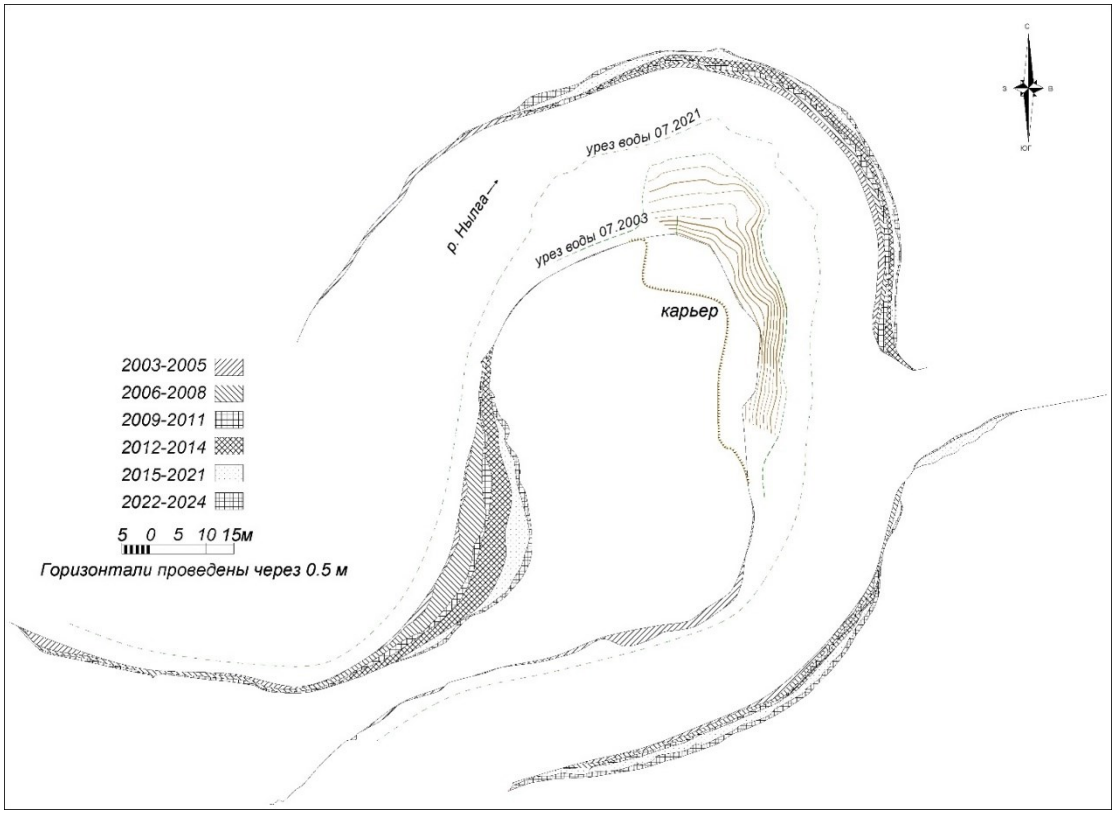


Рис. 3. Схема смещения размываемого берегового уступа на р. Нылга за 2003–2024 гг.

Наиболее продолжительный ряд непрерывных инструментальных наблюдений на малых реках в настоящее время имеется для реки Кырыкмас (лев. приток р. Иж) (рис. 1). Здесь геодезическая съемка около д. Тавзямал началась в 2003 г. и продолжается до настоящего времени. Перерывы в съемочных работах были только в 2015 и 2022 г. Протяженность береговой линии, где осуществляется тахеометрическая съемка составляет 290 м, средняя высота размываемого берегового уступа, соответственно 6,8 м.

Ключевой участок расположен около 10 км выше устья реки. Река по длине, площади водосбора, расходам и ландшафтным условиям близка к р. Позимь (лев. приток р. Иж). Поскольку на исследуемой реке отсутствует гидрологический пост, то для анализа динамики расходов мы использовали указанную реку в качестве аналога.

За 20-летний период наблюдений длина размываемой береговой линии здесь изменялась в значительных пределах: от 102 м в 2008 до 284 м в 2004 г. Среднегодовая ширина размывов на реке изменялась в небольших пределах: от 0,39 м до 2 м и более. Максимальные значения размывов варьировали более существенно: от 1,38 м до 3,5–8 м и более в 2012, 2019–2021 гг. (таблица 1). Наибольшие значения площадей и объемов размывов отмечались в 2021, 2016, 2010 и 2012 г. (таблица 2).

Представленные данные показывают, что в нижнем течении р. Кырыкмас наибольшие значения протяженности, ширины, площади и объемов размыва приурочены ко второй половине периода наблюдений, что свидетельствует о хорошо выраженной положительной тенденции во временной динамике исследуемого процесса. Положительный тренд подтверждается здесь и данными реперных наблюдений.

Корреляционный анализ максимальной ширины размывов на р. Кырыкмас за 2004–2021 гг. с максимальными годовыми расходами на р. Позимь за эти же годы показал достаточно значимую связь, о чем свидетельствуют значения коэффициентов корреляции (r = 0,617) и детерминации (R^2 = 0,381) (рис. 4). Достоверная положительная связь выявлена также между площадями (r = 0,58) и объемами (r = 0,59) размывов на р. Кырыкмас и максимальными годовыми расходами на р. Позимь за указанный период.

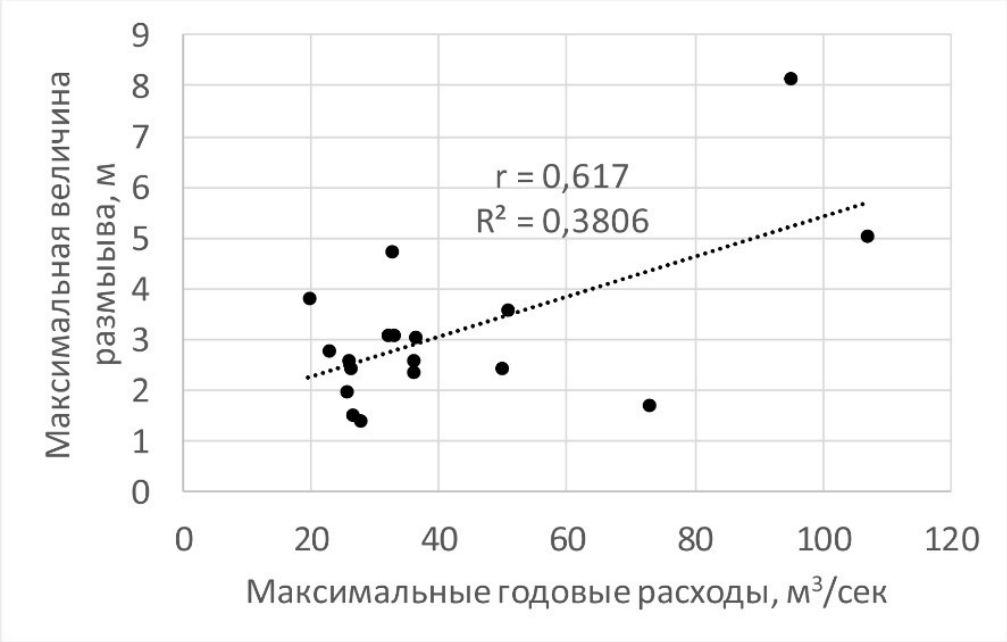


Рис. 4. График зависимости между максимальной величиной размыва на р. Кырыкмас и максимальными годовыми расходами на р. Позимь за 2004–2021 гг.

Пространственное распределение зон размыва представлено на топографическом плане участка (рис. 5). Согласно вышеупомянутой классификации, данную излучину можно охарактеризовать как развитую сегментную, исследуемый участок находится в ее нижнем крыле, где отчетливо выделяются 3 зоны размыва. Верхняя часть крыла соответствует зоне слабого размыва, достаточно протяженная центральная часть характеризуется максимальными размывами, достигающими суммарно 23–25 м. В самой нижней части крыла излучины расположена 3-я зона умеренного размыва с наибольшей кривизной со значениями размыва до 8–10 м, куда в последние годы смещается зона интенсивного размыва. В зоне слабого размыва имеется участок со значительной шириной размыва, который приурочен к мысовидному выступу.

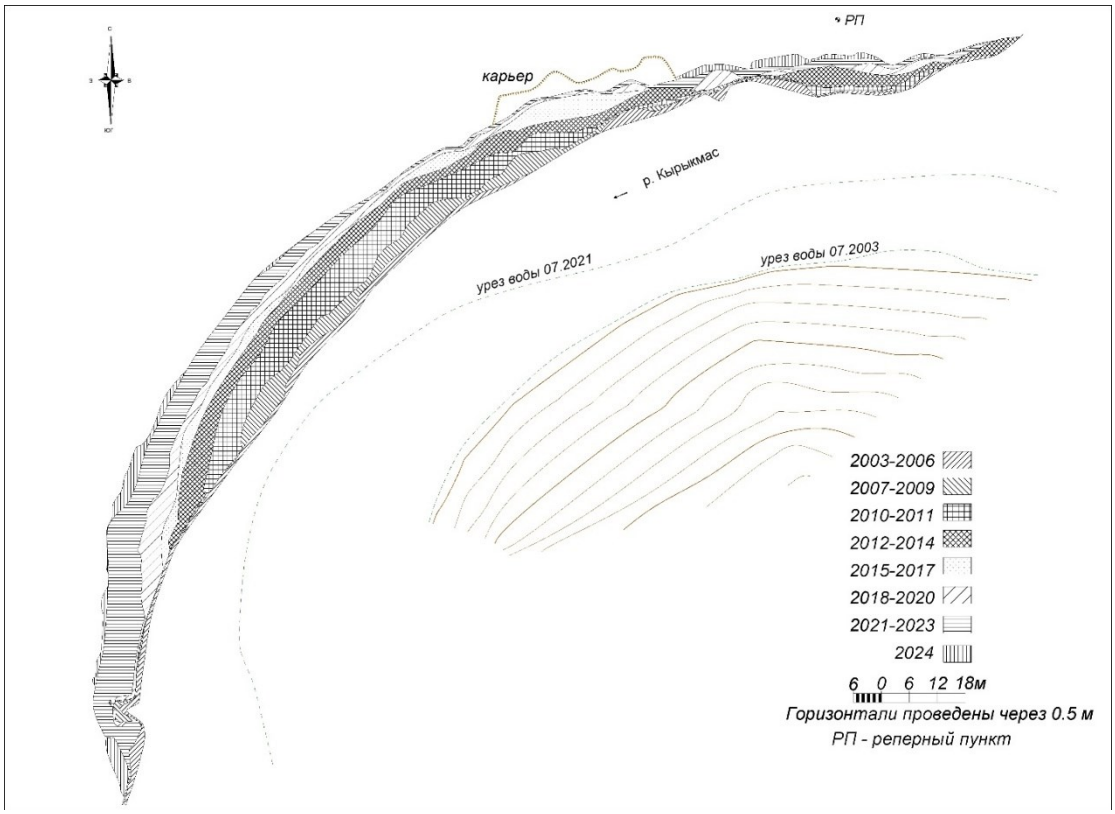


Рис. 5. Схема смещения размываемого берегового уступа на р. Кырыкмас за 2003–2024 гг.

Аналогичные исследования проводятся и в верхнем течении р. Кильмезь (лев. приток р. Вятка) в д. Головизнин Язок (рис. 1). Геодезическая съемка береговой линии здесь осуществляется на протяжении 176 м, средняя высота размываемого берегового уступа – 2,8 м. Тахеометрическая съемка на этом участке проводится с 2003 г. с 8-летним перерывом после 2015 г. Средний многолетний расход реки у с. Малые Сюмси (45 км ниже по течению от исследуемого участка) составляет 24,9 м^3/с.

Длина линии размываемого участка изменялась в небольших пределах: от 90 м в 2009 г., до 175 м в 2023 г. Максимальные линейные размывы были зафиксированы в 2008 (2,49 м) и 2012 г. (2,46 м) (таблица 1). Максимальные площадные размывы немного отличаются от линейных, они были зарегистрированы в 2012 и 2014 г. В эти же годы отмечались и рекордные для ключевого участка объемы размыва (таблица 2). Анализ пространственного распределения участков размыва по длине излучины не выявил существенных особенностей.

На реке Чепца (лев. приток р. Вятка) исследования русловых деформаций проводятся в ее верхнем (д. Варни) и среднем течении (с. Адам) (рис. 1). Длина береговой линии в д. Варни, где осуществляется съемка, составляет 190 м. Средняя высота размываемого берегового уступа на этом ключевом участке равна 3,9 м. Тахеометрическая съемка осуществлялась здесь с 2003 г. с 8-летним перерывом в 2015 г. Средний многолетний расход реки у с. Полом, расположенного в 28 км ниже по течению, равен 37,5 м^3/с.

Протяженность размываемого участка у д. Варни изменялась от 88 м в 2013 г. до 184 м в 2023 г. Высокие значения максимальной ширины размывов зарегистрированы в 2012, 2007, 2013 и 2014 г. (таблица 1), когда на реке были зарегистрированы наибольшие значения расходов половодья. Высокие значения максимальных площадей и объемов размывов были отмечены преимущественно в последние годы наблюдения (таблица 2). Таким образом, в верховьях р. Чепца максимальные значения ширины, площади и объемов размыва приурочены ко второй половине периода наблюдений, следовательно, здесь отчетливо выявляется положительный тренд в многолетней динамике размыва берегов.

Пространственное распределение зон размыва иллюстрирует топографический план исследуемого участка, полученный при тахеометрической съемке (рис. 6). На представленном рисунке показано нижнее крыло пологой сегментной излучины, имеющей сравнительно малую кривизну, где достаточно четко выделяются 3 неравномерные по протяженности зоны: зоны слабого размыва в самой верхней и самой нижней частях крыла, протяженностью не более 20–25 м каждая и центральная зона сильного размыва, где ширина размыва достигает 8–12 м.

На реке Вала (лев. приток р. Кильмезь) на участке у д. Макарово тахеометрическая съемка проводилась в течение 15 лет, начиная с 2003 г. В 2015–2019 гг. геодезическая съемка не проводилась, наблюдения осуществлялись с помощью реперов. Высота размываемого берегового уступа здесь составляет 4,2 м, а длина съемки береговой линии – 314 м. Средний многолетний расход реки у с. Вавож составляет 22,4 м^3/с.

Здесь протяженность размываемого участка излучины изменялась от 155 м (2006 г.) до более 300 м в 2020 и 2021 гг. Наибольшие значения средней ширины размывов отмечены в 2005, 2021 и 2011 г. (таблица 1). Наибольшие площади отступания береговых уступов здесь также не всегда совпадают по времени наибольшим линейным значениям. Так, существенные площади размыва отмечены в 2005, 2021, 2008 и 2004 г. (таблица 2).

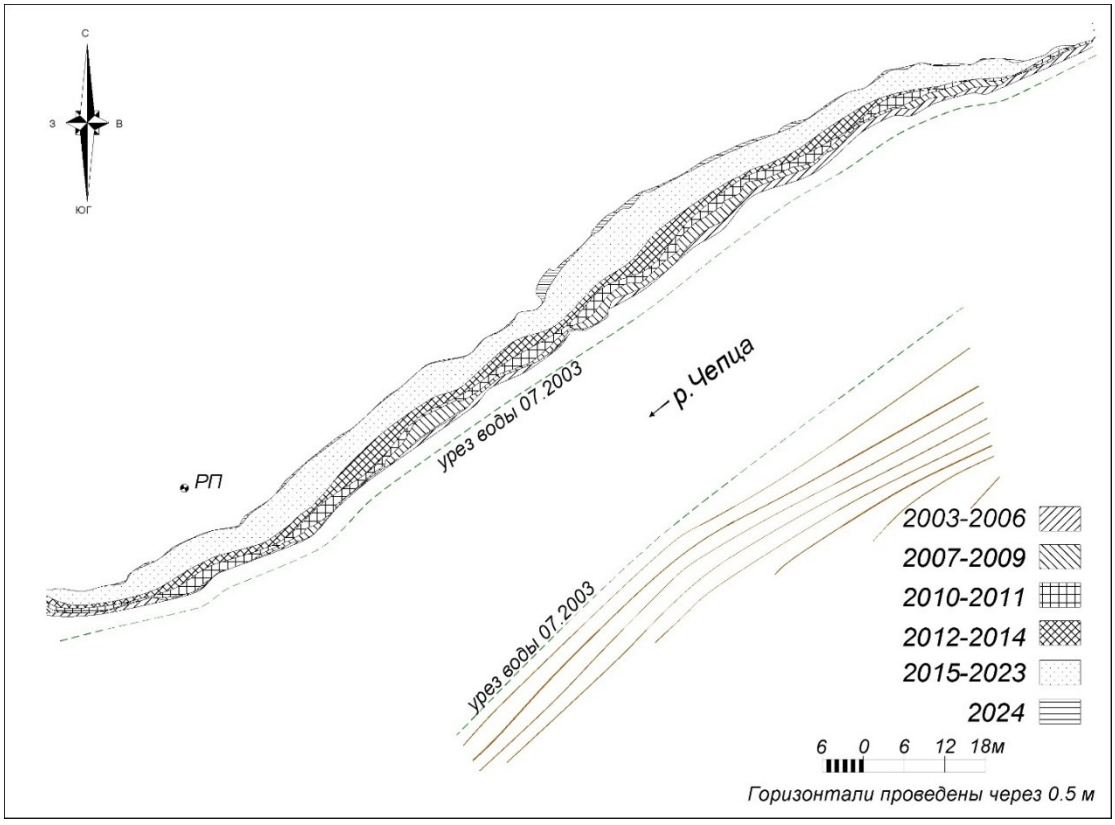


Рис. 6. Схема смещения размываемого берегового уступа на р. Чепца за 2003–2024 гг.

Максимальные величины линейного и площадного размывов по годам соответствуют высоким значениям максимальных годовых расходов, так в 2005 г. он составил 217 м^3/с, а в 2021 – 304 м^3/с, что лишь незначительно уступает расходу 2016 г. (319 м^3/с), он наивысший за весь период исследований на реке. К сожалению, в этот год инструментальные наблюдения не проводились, а по данных реперных замеров в 2016 г. здесь был зафиксирован второй по величине максимум среднегодового размыва за весь период наблюдений и один из высоких значений максимального размыва. Значительные вариации характерны и для объемов размыва. Наиболее высокие объемы размыва были зарегистрированы, как и в случае с площадями, в 2005, 2021 и 2008 г. (таблица 2).

Рассмотрим, как изменяются величины размывов в пределах исследуемой излучины, являющейся по типу свободной, а по внешнему виду сегментной (рис. 7). Для удобства анализа разделим исследуемый участок на 4 части с юга на север, затем на запад вниз по течению, при этом середина излучины (вершина) оказывается в том месте, где она имеет наибольшую кривизну. Максимальные значения ширины и площадей размыва располагаются ниже по течению от вершины излучины и в основном соответствуют третьей части излучины. Здесь суммарные размывы достигают 12–15 м. Вторая часть излучины, расположенная выше по течению, немного уступает по величине размывов от ниже расположенного участка. На 3-м месте по величине размыва находится нижняя (четвертая) часть излучины. Наименьшая зона размыва расположены в самой верхней части излучины, где прослеживаются локальные оползни-обвалы в береговых уступах.

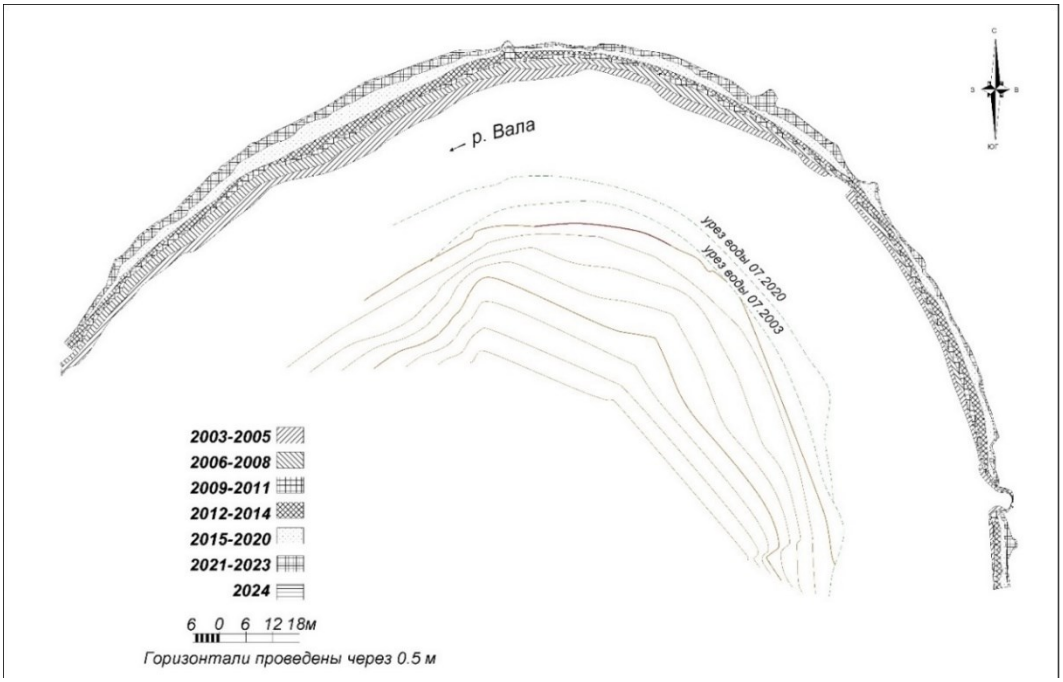


Рис. 7. Схема смещения размываемого берегового уступа на р. Вала (д. Макарово) за 2003–2024 гг.

О расположении максимальных участков размыва ближе к нижнему крылу излучины описывается также в исследованиях на р. Керженец в Нижегородском Заволжье [*Кораблева, Чернов, 2019*]. Механизм размыва излучин и отложения наносов в русловом потоке весьма дискутируемый и не до конца разработанный вопрос [*Матвеев, 1985; Knighton, 1977 и др.*].

На р. Сива (пр. приток р. Кама) у д. Метляки геодезическая съемка береговых размывов осуществляется на двух площадках. Здесь представлены данные лишь по первой площадке, расположенной в 500 м к западу от северной окраины деревни. Протяженность рассматриваемой площадки, где осуществляется тахеометрическая съемка составляет 300 м, средняя высота размываемого берегового уступа 3,5 м. Инструментальная съемка здесь проводится с 2003 г. с перерывом в 2017–2019 гг. Средний многолетний расход реки у с. Гавриловка, расположенного в 9 км выше по течению, равен 22,27 м^3/с.

За рассматриваемый период протяженность размываемого участка излучины варьировалась от 115 м в 2015 до 283 м в 2007 г. Величины средней ширины отступания береговых уступов изменялись от 0,22 м (2022 г.) до 1,99 м (2010 г.), при этом значительные показатели были получены также в 2006 и 2012 г. Высокие значения максимальной ширины размывов были зарегистрированы в 2012, 2006, 2015 и 2016 гг. (таблица 1). В эти же годы на реке были зарегистрированы наиболее высокие половодные расходы. Наибольшие значения площадей и объемов размывов были

зарегистрированы в 2006, 2010–2012 и 2016 г. (таблица 2), что свидетельствует о наличии слабо выраженной положительной тенденции в динамике развития береговых размывов на р. Сива.

Изучение топографического плана исследуемого участка показывает, что здесь представлена часть нижнего крыла развитой сегментной излучины свободного типа с достаточно выраженной кривизной в ее вершине, где и фиксируются максимальные значения ширины и площади размывов, суммарно достигающие 18–20 м (рис. 8). В зоне максимальной кривизны излучины находится активно растущий пойменный овраг и локальное оползневое обрушение берегового уступа, образовавшееся в 2014 г. Здесь отмечается классическое смещение максимальной зоны размыва к нижнему крылу излучины, о чем указывалось выше.

Тахеометрическая съемка в среднем течении р. Чепца у с. Адам проводилась в те же годы, что и на выше рассмотренном участке у д. Варни. Длина участка, где проводится геодезическая съемка наиболее протяженная и составляет 533 м. Средняя высота размываемого берегового уступа здесь 5,6 м. Протяженность размываемого участка изменялась от 291 м в 2008 г. до 533 м в 2023 г., при этом наиболее высокие значения отмечались в последние 12 лет. Средний многолетний расход реки у г. Глазов, расположенного в 10 км ниже по течению, равен 65,8 $м^3/с$.

Средняя ширина размыва на участке изменялась в небольших пределах: от 0,25 м в 2004 г. до более 2 м в 2006 и 2012 гг. Наибольшие значения максимальной ширины размывов были зафиксированы в 2006, 2012, 2013 и 2014 г. (таблица 1). Наиболее высокие значения площадей и объемов размывов отмечены в 2012, 2006, 2013, 2014 и 2015–2023 гг. (таблица 2). В указанные годы были зарегистрированы и высокие расходы половодий. Приведенные данные показывают, что и в среднем течении р. Чепца максимальные значения ширины, площади и объемов размыва приурочены ко второй половине периода наблюдений, следовательно, на этом участке отчетливо выявляется положительный тренд в динамике размыва берегов.

Анализ топографического плана исследуемого участка показывает, что здесь представлено нижнее крыло пологой сегментной излучины с очень малой кривизной. В верхней части крыла наблюдаются 2 мысовидных выступа, к которым приурочены локальные максимумы размывов, достигающие 25 м и более. На большей части излучины зоны размыва относительно однородные, за исключением самой верхней и нижней частей крыла, где ширина размыва заметно уменьшается.

Поскольку для выше рассмотренных участков на реках имеются гидрологические посты с данными о среднегодовых и максимальных (половодных) расходах, включая период с 2004 по 2015 г., то нами был проведен корреляционный анализ между максимальной шириной размыва и максимальными расходами. Корреляционная связь между максимальной шириной размыва и с максимальными годовыми расходами на р. Чепца получилась очень высокой (r = 0,899), а для р. Сива высокой (r = 0,600) (рис. 9). На р. Чепца для участка у с. Адам связь между площадью и объемом размыва с одной стороны и максимальными годовыми расходами с другой, также оказалась высокой и получилась равной для обеих показателей (r = 0,787). Аналогичная ситуация возникла и для р. Сива на участке Метляки, где зависимость площадей и объемов размыва от максимальных годовых расходов также высокая (r = 0,794).

Анализ размывов на трех реках показал, что главным фактором, обеспечивающим размыв береговых уступов в условиях свободного развития излучин, являются максимальные годовые расходы, наблюдающиеся в период весеннего половодья. Участки с наибольшими размывами часто приурочены к нижнему крылу излучины и немного смещены вниз по течению от точек с наибольшей кривизной.

В литературе приводятся сведения в основном о средних многолетних размывах береговых уступов для крупных и крупнейших равнинных рек России, достигающих 10–15 м/год [*Махинов, Ким, 2018; Попов, Кондитерева, 1974; Чалов и др., 2016 и др.*]. По данным стационарных наблюдений на малых и средних реках Европейской части России среднегодовые величины смещения береговых уступов редко превышают 2–4 м, в основном они варьируют в пределах 0,2–1,5 м [*Завадский и др., 2010*].

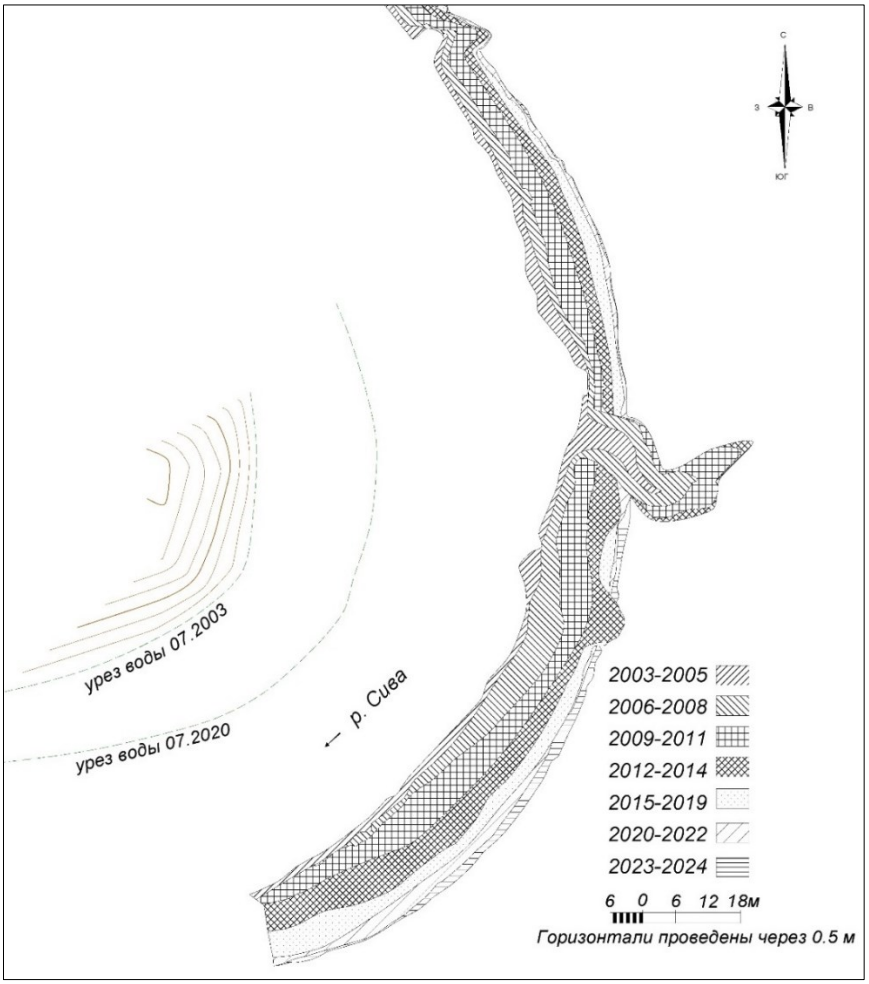


Рис. 8. Схема смещения размываемого берегового уступа на р. Сива за 2003–2024 гг.

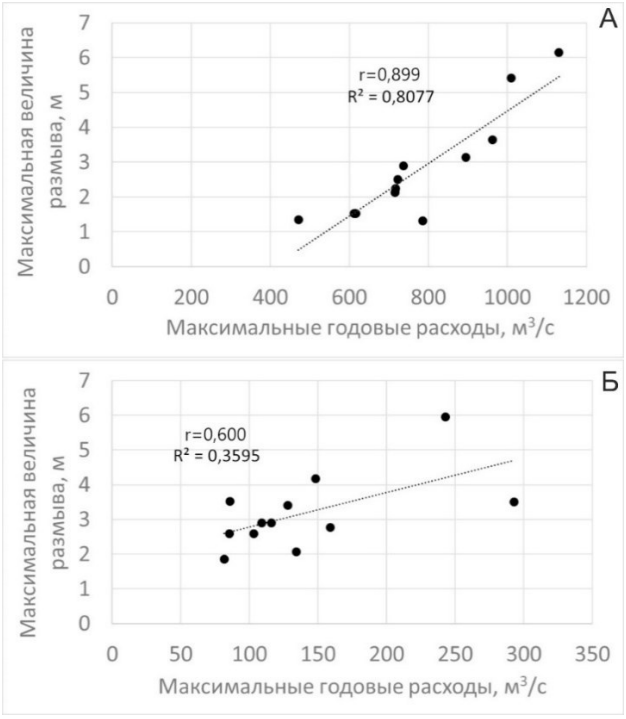


Рис. 9. Зависимости между максимальной шириной размыва на р. Чепца у с. Адам (А) и р. Сива у д. Метляки (Б) и их максимальными годовыми расходами за 2004–2015 гг.

Выводы

Анализ многолетних инструментальных наблюдений показал, что для исследуемых рек УР наибольшие значения ширины размыва достигают 8,1 м/год, а высота размываемого берегового уступа изменяется от 2,5 м на р. Нылга до 8,8 м на р. Лумпун. В пространственном отношении размываемые участки приурочены к участкам излучин с наибольшей кривизной или смещены ниже по течению. В многолетней динамике размывов на рр. Чепца и Кырыкмас отчетливо прослеживается положительный тренд. Для других рек из-за больших перерывов в съемках после 2015 г. о каких-либо тенденциях в динамике судить невозможно. На р. Сива в отношении многолетней динамики размывов отмечается слабая положительная тенденция, подтверждаемая высокими половодными расходами в последние годы.

Установлена очень тесная связь между максимальной шириной размыва на р. Чепца (с. Адам) и максимальными годовыми расходами реки за период с 2004 по 2015 г., о чем свидетельствуют очень высокие коэффициенты корреляции (r = 0.899). Достаточно тесная связь получилась с площадью и объемом размывов за указанные годы (r = 0,787). На р. Сива корреляционная связь между максимальной шириной размыва и максимальными годовыми расходами за указанный период оказалась чуть ниже (r = 0,600), но тоже существенная. Показатель же связи с площадным и объемным размывами получился более значимым (r = 0,794). Корреляционный анализ максимальной ширины размывов на р. Кырыкмас за 2004–2021 гг. с максимальными годовыми расходами на реке аналоге также показал достаточно значимую связь (r = 0,617).

Полученные результаты могут быть использованы как для аналогичных рек Удмуртии, так и рек равнинных территорий Европейской части РФ. Необходимость многолетних полевых исследований размывов береговых уступов рек с применением современных инструментальных методов определяется важностью выявления закономерностей русловых процессов для составления надежных прогнозов их развития в конкретных ландшафтно-геоморфологических условиях с целью предотвращения опасных геоэкологических ситуаций.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 25-27-20003.

Список литературы

Антроповский В.И. Гидролого-морфологические закономерности и фоновые прогнозы переформирования русел рек. СПб, 2006, 216 с.

Атлас Удмуртской Республики / под общей ред. И.И. Рысина. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Феория; Ижевск: Удмуртия, 2020, 288 с.

Беркович К.К. Географический анализ антропогенных изменений русловых процессов. М.: ГЕОС, 2001, 164 с.

Гафуров А.М., Рысин И.И., Голосов В.Н., Григорьев И.И., Шарифуллин А.Г. Оценка современного роста вершин оврагов южного мегасклона Восточно-Европейской равнины с применением набора инструментальных методов // Вестник Моск. ун-та, Сер. 5, География, 2018, 5: 61–71.

Григорьев И.И., Рысин И.И. Исследования техногенных и сельскохозяйственных оврагов в Удмуртии с применением ГИС-технологий // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле, 2008, 1: 49–58.

Григорьев И.И., Рысин И.И. Применение геоинформационных систем при исследованиях техногенных и сельскохозяйственных оврагов в Удмуртии // Геоморфология, 2009, 1: 69–75.

Григорьев И.И., Рысин И.И. Использование беспилотного летательного аппарата (квадрокоптера) с применением цифровых технологий в географических исследованиях // В сб.: Цифровая география - материалы Всерос. науч.-практ. конференции с междунар. участием (г. Пермь, 16–18 сентября 2020 г.): в 2 т. Т. 1: Цифровые и геоинформационные технологии в изучении природных процессов в экологии, природопользовании и гидрометеорологии. Пермь, 2020, с. 54–57.

Завадский А.С., Лобанов Г.В., Петухова Л.Н., Серебренникова И.А., Смирнова Е.А., Чернов А.В. Результаты стационарных исследований русловых процессов на реках ЕТР // В сб.: Эрозионные и русловые процессы: Сборник трудов. М.: МАКС Пресс, 2010, 5: 58–87.

Кораблева О.В., Чернов А.В. Современная динамика пойменно-русловых комплексов средней реки Керженец (по мониторинговым наблюдениям 2001-2018 гг.) // В сб.: Научные проблемы оздоровления Российских рек и пути их решения. М.: ИВП РАН, 2019, с. 172–176.

Матвеев Б.В. Влияние геолого-геоморфологических факторов на образование и морфологию речных излучин // Геоморфология, 1985, 3: 51–57.

Махинов А.Н., Ким В.И., Аношкин А.В., Лю Ш., Махинова А.Ф., Дугаева Я.Ю. Преобразование локальных пойменно-русловых систем рек Амур и Уссури как фактор возникновения трансграничных проблем // Региональные проблемы, 2018, 21(2): 61–68.

Мозжерин В.И., Курбанова С.Г. Деятельность человека и эрозионно-русловые системы Среднего Поволжья. Казань: Арт. Дизайн, 2004, 128 с.

Назаров Н.Н., Егоркина С.С. Реки Пермского Прикамья: Горизонтальные русловые деформации. Пермь: ИПК «Звезда», 2004, 155 с.

Петухова Л.Н., Рысин И.И. О факторах развития горизонтальных русловых деформаций на реках Удмуртии // Вестник Удмуртского университета, № 11, спец. вып. Науки о Земле, с. 153–168.

Петухова Л. Н., Рысин И.И. Факторы русловых процессов и их влияние на морфодинамику русел рек Удмуртии // Геоморфология, 2006, 4: 70–78.

Попов И.В., Кондитерева Э.А. Прогноз русловых деформаций Волги на участке Саралёвского водного узла в связи с проектированием улучшения его судоходных условий // Труды ГГИ, 1974, 216: 65–93.

Рысин И.И., Петухова Л.Н. Русловые процессы на реках Удмуртии. Ижевск: Ассоциация «Научная книга», 2006, 176 с.

Рысин И.И., Григорьев И.И., Петухова Л.Н., Перевощиков А.А. Многолетняя динамика скоростей горизонтальных русловых размывов на реках Удмуртии // Геоморфология и палеогеография, 2024, 55(1): 26–39.

Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В. Морфодинамика русел равнинных рек. / Под ред. Р.С. Чалова. М.: ГЕОС, 1998, 288 с.

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Том 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008, 608 с.

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Том 2. Морфодинамика речных русел. М.: Красанд, 2011, 960 с.

Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н. и др. Морфология, деформации, современные изменения русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска // Геоморфология, 2016, 3: 22–35.

Чернов А.В. География и геоэкологическое состояние русел и пойм рек Северной Евразии. М.: ООО «Крона», 2009. 614 с.

Эрозионно-русловые системы: монография / Под ред. Р.С. Чалова, В.Н. Голосова, А.Ю. Сидорчука. М.: ИНФРА-М., 2017, 702 с.

Knighton A.D. The meander problem // Geography, 1977, 2(275): 106–111.

Petukhova, L.N., Rysin I.I. Patterns in the development of horizontal river channel transformations in the Republic of Udmurtia, Russian Federation // In: Channel processes in the rivers of mountains, foothills and plains / edited by R. S. Chalov, M. Kamykowska, K. Krzemien. Cracow, 2006, p. 119–131.

Robert A. River processes: an introduction to fluvial dynamics. London: Arnold, 2003, 214 p.

Rysin I., Petukhova L. Monitoring of channel processes on the interfluve between the Kama and the Vyatka rivers // Sediment Transfer through the Fluvial System: [Proceedings of the International Symposium held at Moscow, Russia from 2 to 6 August 2004] / V. Golosov, V. Belyaev, E. Walling. – [Wallingford], 2004, p. 261–268.

Мониторинг современного состояния оледенения, ледниковых озёр и связанных с ними опасных природных явлений (Памир, Таджикистан)

М.С. Сафаров[1,2], А.Р. Фазылов[3], Ц. Ли[1]

[1]Синьцзянский институт экологии и географии Китайской академии наук, Урумчи, Китай

[2]Научно-исследовательский Центр экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе), Душанбе, Таджикистан, mustafo-2010@mail.ru

[3]Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан, alifazilov53@gmail.com

Аннотация. В современных условиях глобального изменения климата, высокогорные районы Таджикистана испытывают значительные трансформации, ведущие к возникновению опасных природных явлений – движение ледников, прорыв ледниковых озер, лавины, оползни, наводнения, сели. Постоянный мониторинг, с использованием современных средств и методов, позволяет оценить их воздействие, разработать рекомендации по предотвращению и снижению риска возможных чрезвычайных ситуаций, применению современных систем раннего оповещения и предупреждения в высокогорных труднодоступных зонах. В данной статье представлены результаты анализа, оценки и обоснования применения современных подходов мониторинга криосферных опасностей на Памире, с акцентом на ключевые водосборы хребта Петра I, отличающиеся значительными изменениями в динамике ледников. В рамках реализованного исследования, для детальной оценки состояния ледников и связанных с ними опасностей, осуществлена интеграция данных, полученных с использованием спутниковых систем и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), позволившие установить значительное увеличение площади озер и частоту их прорывов, а также другие опасные гляциальные процессы, свидетельствующие о влиянии климатических изменений, на устойчивость исследуемых ледниковых систем. Установлено, что скоротечное образование и расширение ледниковых озер, сопровождающиеся обрушением льда на хребте Петра I, являются дополнительными факторами усугубляющие риск их прорыва. Каменно-ледяные лавины, возникающие в этом районе, также могут способствовать увеличению опасности для окружающей территории. Обоснована, целесообразность применения технологий дистанционного зондирования для детального мониторинга ледников и связанных с ними опасностей, в качестве приоритетного комплексного управления рисками стихийных бедствий в горных регионах Таджикистана, обеспечивающие эффективную оценку, прогнозирования и минимизации социально-экономических угроз для местных сообществ.

Ключевые слова: *Таджикистан, криосферные опасности, ледниковые озера, прорыв, мониторинг, дистанционное зондирование, беспилотные летательные аппараты, спутниковые данные*

Ссылка для цитирования: Сафаров М.С., Фазылов А.Р., Ли Ц. Мониторинг современного состояния оледенения, ледниковых озёр и связанных с ними опасных природных явлений (Памир, Таджикистан). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 378–387.

Monitoring the current state of glaciation, glacial lakes, and associated natural hazards in the Pamirs, Tajikistan

M.S. Safarov[1,2], A.R. Fazylov[3], J. Li[1]

[1]Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, China

[2]Research Center for Ecology and Environment of Central Asia (Dushanbe), Dushanbe, Tajikistan, mustafo-2010@mail.ru

[3]Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, alifazilov53@gmail.com

Abstract. Under current global climate change conditions, the high-mountain regions of Tajikistan are undergoing significant transformations that contribute to the emergence of hazardous natural phenomena, including glacier surges, glacial lake outburst floods (GLOFs), avalanches, landslides, floods, and debris flows. Continuous monitoring using advanced technologies and methodologies enables the assessment of their impacts, the development of recommendations for disaster risk reduction, and the implementation of modern early warning systems in remote mountainous areas. This study presents the results of the analysis and evaluation of cryospheric hazards in Pamir, with a particular focus on the key watersheds of the Peter I Range, which have exhibited substantial changes in glacier dynamics. To assess glacier conditions and associated hazards in detail, an integrated approach using satellite remote sensing and unmanned aerial vehicles (UAVs) was applied. The findings indicate a marked increase in the surface area of glacial lakes and the frequency of their outburst events, along with other hazardous glacial processes that reflect the impact of climate change on the stability of glacial systems. Rapid formation and expansion of glacial lakes, often accompanied by ice collapses on the Peter I Ridge, have been identified as additional factors intensifying the risk of lake outbursts. Furthermore, rock-ice avalanches in the region pose an increased threat to surrounding areas. This study substantiates the effectiveness and necessity of remote sensing technologies for comprehensive glacier monitoring and hazard assessment. Such approaches should be prioritized in disaster risk management strategies for the mountainous regions of Tajikistan, facilitating accurate forecasting and mitigation of socio-economic threats to vulnerable local communities.

Key words: *Tajikistan, cryospheric hazards, glacial lakes, breakthrough, monitoring, remote sensing, unmanned aerial vehicles, satellite data*

Cite of this article: Safarov M.S., Fazylov A.R., Li J. Monitoring the current state of glaciation, glacial lakes, and associated natural hazards in the Pamirs, Tajikistan. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 378–387.

Введение

В последнее годы в Таджикистане фиксируются сотни природных катастроф, наносящие значительный материальный ущерб и ведущие к многочисленным человеческим жертвам [*Пятый национальный доклад 2014; Медеу и др., 2020*]. Региональные и глобальные изменения климата оказывают значительное влияние на гидрологические процессы, требующие срочных действий для обеспечения устойчивости территорий и их адаптации [*Фазылов, 2017; Сафаров и Фазылов, 2020; Аннамухаммедов и др. 2023*]. В частности, динамика формирования селей варьируется от нескольких раз в год до одного раза в несколько десятилетий, зависящие в основном от гидрометеорологических условий [*Казаков и др., 2013; Шварев и др., 2020*]. В то же

время потепление климата также ускоряет таяние ледников и снега, являющиеся основными факторами увеличения криосферных опасностей, к которым отнесены сход лавин, каменно-ледяные лавины, прорыв ледниковых озер сопровождающиеся грязекаменным селевыми потоками, представляющие особую катастрофичность для населения Центральной Азии, в том числе и Таджикистана [*Сафаров и Фазылов, 2022; Черноморец и др., 2018*].

Горы Таджикистана, характерны присутствием многочисленных ледников, существенно влияющие на местную гидрологию и климат. Следует отметить, что ледники, в последние десятилетия, в условиях изменения климата, становятся все более уязвимыми и характеризуются ускоренным таянием, отступлением и образованием ледниковых озер [*Mergili and Schneider; 2011*]. Исследования и понимание динамики подобных изменений имеют важное значение для оценки возможных последствий не только для формирования водных ресурсов, но также и возникновения связанных с этими процессами опасностей, в том числе, прорывов ледниковых озер, представляющие значительные риски для сообществ, расположенных ниже по течению [*Пирмамадов, 2012; Murodov et al., 2024; Safarov et al., 2024*].

В формировании водных ресурсов Центральной Азии важную роль играет Памирский регион, являющийся основным источником водных ресурсов бассейна Амударьи. Основная часть стока Амударьи формируется на территории Таджикистана [*Абдушукуров и др. 2013*], особенно за счет водных ресурсов рек Вахш и Пяндж. Бассейн реки Вахш, расположенный в верховьях бассейна реки Амударья, характерен именно наличием вышеприведенных процессов и представляет собой уникальный объект для комплексного его изучения. Исследуемый регион характеризуется разнообразными геологическими особенностями, тектонической активностью и континентальным климатом со значительными колебаниями температуры и осадков, играющие решающую роль в формировании динамики ледников и гидрологических процессов. Следует констатировать, что река Вахш в качестве водного объекта, является составным элеменотом различных секторов местной экономики, в том числе способствующая развитию сельского хозяйства и производства электроэнергии.

Исследования повышения температуры, ведущие к изменению стабильности ледников и частоты связанных с ними опасностей, является актуальной задачей. Изучение вышеизложенных факторов должно сопровождаться применением современных методов, технологий и технических средств мониторинга.

На наш взгляд, одним из наиболее эффективных методов изучения, в частности ледниковых высокогорных озер, учитывая их труднодоступность, является использование технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Интеграция картографических методов и технологии ДЗЗ в рамках геоинформационных систем (ГИС) лежит в основе картографического мониторинга природных процессов в том числе ледниковых опасностей, которые являются необходимыми на региональном уровне [*Ступин, 2020*]. Использование БПЛА предоставляет возможность получения аэрофотоснимков высокой пространственной детализации, позволяющее проводить углубленный анализ природной среды с заданных высот. Очевидно, что преимуществом применения БПЛА по сравнению с традиционными наземными методами является возможность получения достоверных научных данных об изменении ледников и ледниковых озер и связанных с ними опасностей при минимальных затратах времени и физических ресурсов, а также с исключением риска для исследователей, в процессе полевых изысканий.

Материалы и методы исследований

На территории бассейна реки Вахш присутствуют ледники и образовавшиеся ледниковые озера, разных генетических типов являющиеся непременным элементом нивально-гляциальной зоны горных хребтов Памира и Памиро-Алая. В большинстве своем они являются источником формирования селевых потоков, представляющих значительную угрозу для местных сообществ. В частности, такие явления характерны для зон вдоль

притоков реки Вахш, в том числе суббассейна Сурхоб (Хребет Петра 1) подвергающиеся особому их воздействию (рис. 1). Следует отметить, что крутые и расчлененный рельеф с уклонами от 7° до 22° являются благоприятными условиями для формирования селевых потоков, транспортирующие значительные объемы рыхлого обломочного материала, еще больше усугубляющие последствия риск таких стихийных бедствий.

Реализация целей и задач исследований позволила выявить два критических участка на территории хребта Петра Первого – Шураки Капали и Арчакала (от таджикского Арчақалъа) где были зарегистрированы повторяющиеся прорывы озер и образования значительных каменно-ледяных лавин. Водосбор Шураки Капали, также называемый Восточным Шураком, расположен на левом берегу реки Сурхоб. В верховьях долины несколько небольших безымянных ледников каталогизированы под номерами 504, 505 и 506, каждый из которых ориентирован соответственно на северо-запад, север и северо-восток. Далее вниз по течению лежит самый большой ледник в этой группе под номером 507 и ледник № 503, расположенный отдельно, справа. Примечательно, что ледник № 503 в своих нижних участках содержит несоединенное ледниковое озеро. Река Восточный Шурак сливается с рекой Сурхоб в западной части районного центра Таджикабад.

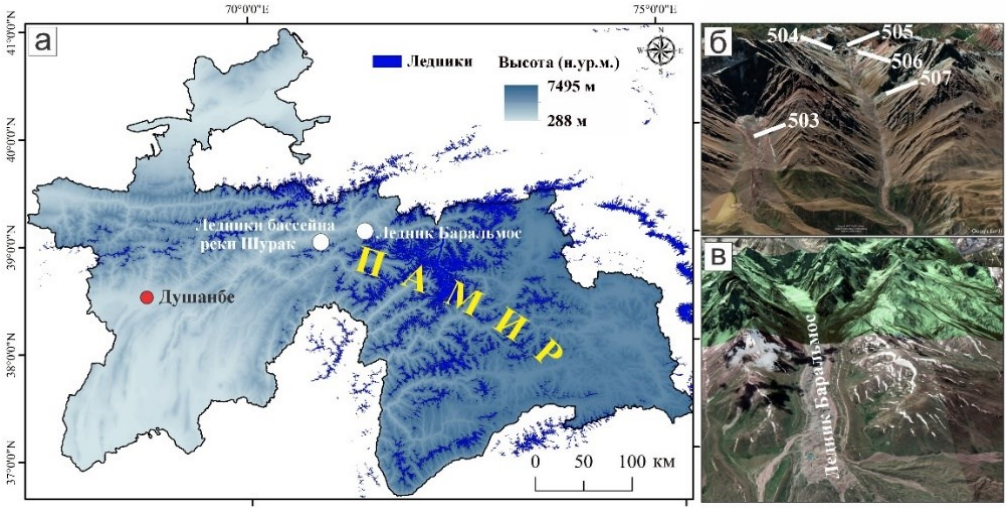


Рис. 1. Местоположение исследуемой территории: а) схема - карта Таджикистана; б) исследуемые ледники на снимках Google Earth

В процессе полевых исследований были использованы БПЛА самолетного типа QC-2 Микро и квадрокоптер DJI Phantom Научно-исследовательского центра экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе). Реализация целей и задач работы с использованием современных методов и технологий мониторинга (аэрофотосъемка труднодоступных участков, создание высокоточных цифровых моделей рельефа и т.д.) зон с рисками стихийных бедствий, а также способы её обработки позволили получить оперативные, актуальные данные о состоянии исследуемых ледников и опасностей связанными с ними за короткое время.

Для оценки точности полученных индексов и сравнения с существующими наборами данных использовались методы валидации, обеспечивший надежный и всесторонний анализ селеопасных районов с использованием спутниковых снимков и снимков с БПЛА. При этом, для обеспечения корректности и точности анализа, снимки БПЛА были подвергнуты предварительной обработке, включая геометрическую коррекцию и перекрестную проверку с изображениями Google Earth [*Safarov et al., 2025*] (рис. 2).

С целью выявления и детализации зон, подверженных селям на территории исследуемых участков, использованы спутниковые снимки Google Earth, полученные до событий. Они сравнивались с аэрофотоснимками, сделанными с помощью БПЛА после событий.

Рис. 2. Рабочий процесс анализа ледниковых опасностей в Таджикистане

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты позволили установить, что в 2016 и 2017 г. в бассейне реки Шураки-Капали наблюдались каменно-ледяные лавины, спровоцировавшие возникновения селей, нанесшие значительный ущерб местному населению и инфраструктуре (рис. 3–5). Выявлено также, что за последние годы из-за резкого изменения климата, в том числе из-за более жаркого лета и общего потепления, наметился процесс заметного увеличения скорости таяния ледников, способствующие значительному росту природных опасностей, связанных с ледниками. В частности, последствием вышеизложенного, были селепроявления в Шураки-Капали, нанесшие серьезный ущерб общинам, проживающим ниже по течению. Катастрофический селевой поток был зафиксирован, в регионе, летом 2016 г., а также, в период с 21 по 23 июня 2019 г., сопровождавшиеся сходом каменно-ледяной лавины. Установленные риски стихийных бедствий подтверждают тезис о существенной динамке ледников и востребованности систематического мониторинга и разработки мер по управлению рисками стихийных бедствий.

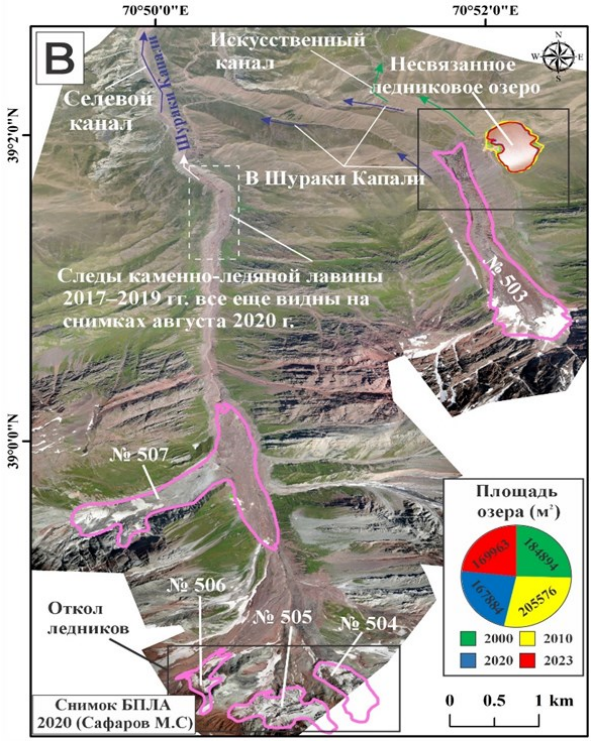


Рис. 3. Обзорная схема каменно-ледовых лавин, приводящих к опасностям на участке Шураки-Капали. Снимок с помощью БПЛА (2020 г., М.С. Сафаров)

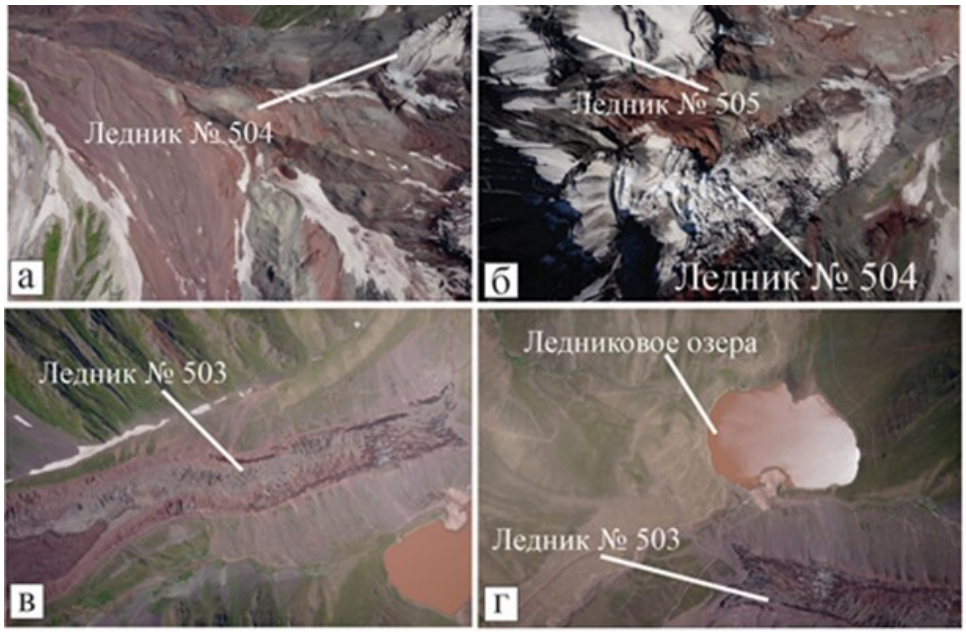


Рис. 4. Аэрофотосъемка ледников в верховьях реки Шурак с помощью БПЛА с высоты 5050 м над уровнем моря. Август 2020 (фото М.С. Сафарова)

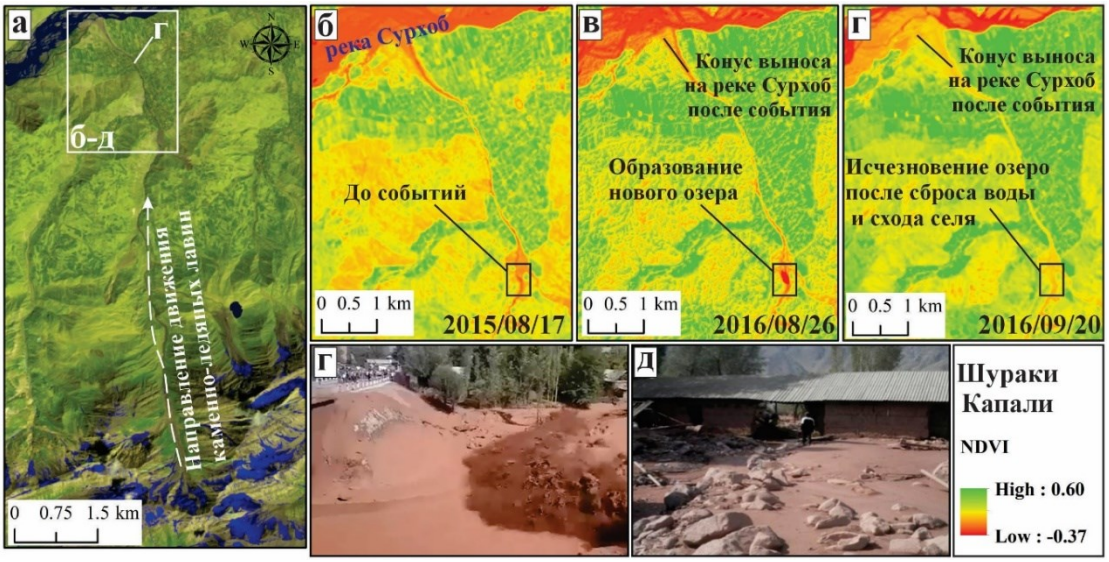


Рис. 5. Каменно-ледяные лавины как фактор формирования селевых потоков на участке Шураки-Капали: а) спутниковое изображение Landsat (2015 г.) с указанием направления движения каменно-ледяных лавин; б–г) изменения в исследуемой области до (17.08.2015) и после (26.08.2016 и 20.09.2016) события по данным Landsat с использованием NDVI, отражающие образование временного озера и его прорыв, приведший к формированию селевого потока и конуса выноса на р. Сурхоб; г) разрушение дороги и моста в момент прохождения селя (кадр из видеоматериалов в интернете); д) селевые отложения в населённом пункте Шураки-Капали (фото Б.А. Сатторова, 31.08.2016).

Чрезвычайные события, характеризующиеся откалыванием массивных ледяных глыб от ледников и быстрым их спуском по долине, не являются уникальными только для этой области. Установлено, что последние 2 км до впадения в реку Сурхоб, река Восточный Шурак протекает среди полей сельскохозяйственной окраины районного центра Таджикабад. При этом ледово-каменный сель в верховьях долины привел к выбросу значительных объемов воды, оказавшие разрушительные воздействия на берега реки. Сравнение снимков до и после описываемых событий, показывает, что русло реки

Восточный Шурак в устьевой зоне расширилось более чем вдвое, сопровождавшееся смывом 20,5 га плодородных земель и несколько построек.

Наличие подтверждённых гляциологических рисков указывает на высокую динамичность ледниковых процессов [*Саидов и др., 2019; Зарипов и др., 2020*] и востребованность систематического мониторинга, а также разработки и внедрения эффективных мер по управлению природными рисками.

К концу лета 2020 г. язык, спускавшийся по речному каньону ниже ледника № 507, сильно деградировал, нижний край которого отступил на 1300 м от своего положения в июле 2017 г. Вместе с тем, в период с 21 по 23 июня 2019 г. на этой территории произошел еще один каменно-ледовый обвал, подтвердивший прогноз, сохраняющийся опасностей, связанные с изменением ледника в этом районе. На наш взгляд, в ближайшие 2–3 года — это единое тело распадется на отдельные части и скорее всего исчезнет.

На участке Арчакала (левый приток реки Сурхоб) расположен ледник Баральмос, представляющий собой значительную угрозу из-за нескольких надледниковых озер или так называемых прудов на его поверхности (рис. 6а), повышающие риск расширения и дальнейшего их катастрофического прорыва, которые могут стать источником внезапного выброса объема воды, вызывающие сели, серьезно угрожающие реке Арчакала – левому притоку реки Сурхоб, и как следствие наносящие ущерб инфраструктуре, а к полному или частичному перекрытию русла реки Сурхоб (рис. 6б).

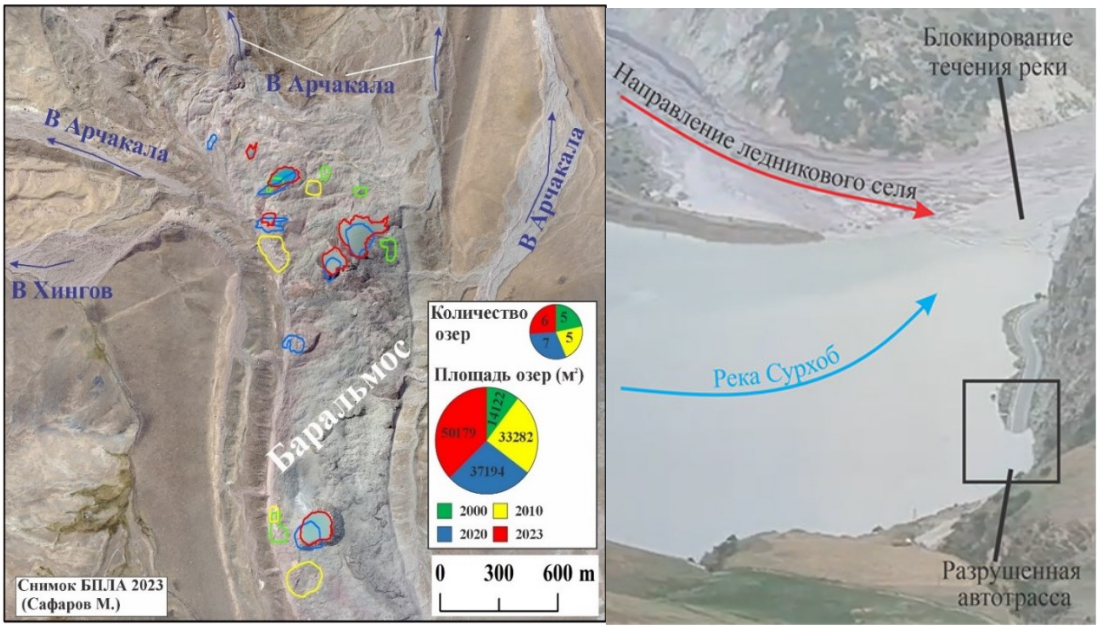


Рис. 6. Распределение и изменения озёр ледника Баральмос, приводящих к опасностям на участке Арчакала. Снимок с помощью БПЛА (2023 г., М.С. Сафаров)

Интенсивное таяние ледников, расширение площади и количества ледниковых озер, способствуют увеличению количества гляциальных селей. По результатам исследований ледника Баральмос (хребет Петра Первого) установлено, что с 2000 по 2023 г. площадь ледниковых озер троекратно увеличились, с 14 122 м² до 50 179 ± 21 м², что привело к прорыву надледниковых озер, вызвавшие селевые потоки на реке Сурхоб, с частичным перекрытием русла реки, значительным разрушением автодороги международного назначения, пешеходного моста и линии электропередачи в нижнем течении.

Результаты исследований позволили подтвердить факт влияния климатических изменений на ледниковые системы и прорывы озер, способствующие к увеличению частоты их прорыва. Следует также отметить, что скоротечное образование и расширение надледниковых озер может спровоцировать дополнительные прорывы. На

основе анализа изображений до и после катастрофических природных явлений выявлены значительные изменения в надледниковых озерах, а также в прибрежных участках реки Сурхоб. Установлено, что в период с 11 по 16 августа 2020 г. из-за значительного сброса воды из озер ледника Баральмос, площадь последней уменьшилась с 20 859 м² до 8946 м². Анализ снимков за периоды до и после селепроявлений позволил выявить значительные трансформацию ледниковых озер и русла реки Сурхоб, связанное с периодической активизацией селевых потоков (рис. 6, 7), способствовавшие также изменения морфологии русла реки и накоплению разнотипных отложений.

Рис. 7. Повреждение автодороги и частичное перекрытие русла реки Сурхоб вследствие очередного прорыва озёр на участке Арчакала. На фото зафиксированы последствия повышения уровня воды и отложений после селевого события, вызванного прорывом озера. Снимки М.С. Сафарова (июль 2023 г.)

В рамках настоящего исследования с использованием БПЛА были выявлены значительные потери льда, сопровождавшиеся обрушением льда на прибрежной стене, между крупными озерами, указывающие на продолжающиеся процессы дестабилизации, провоцирующие откалывание ледника и попадание их в озеро. Установлено, что исследуемый регион пережил несколько каменно-ледяных лавин и прорывов ледниковых озер сопровождавшиеся грязекаменным селевыми потоками, включая разрушение дорог, жилых домов, линии электропередач и блокирование русла реки ниже по течению.

Исследования позволили, выявить резкое увеличение региональных ледниковых озер и надледниковых прудов вместе с их потенциальным воздействием на местные сообщества, инфраструктуру и экосистемы в высокогорных регионах [*Richardson, 2000; Zhang et al., 2015; Zhou et al., 2018*]. Всестороннее изучение опасностей, позволить разработать систему управления земельными ресурсами и рисками стихийных бедствий, позволяющие уменьшить ущерб сельскохозяйственным угодьям и инфраструктуре [*Safarov et al., 2024*].

Следует отметить, что, расширение озер в горизонтальной проекции может привести к более быстрому таянию ледников и как следствие к усилению откола, которые в свою очередь приводят к дестабилизации поверхности ледника и увеличению объема воды, доступной для потенциальных прорывов озёр [*Kirkbride et al., 1999; Otto et al., 2019*]. Дополнительным фактором ускорения скорости таяния ледника, могут стать образование трещин, часто заполняемые накапливающейся водой [*Röhl K, 2008*].

Таким образом, для устранения потенциальных опасностей, связанных с образованием озер, необходимы скоординированные усилия, чего недостаточно, в особенности на Памире. Тем не менее, непрерывный мониторинг и локальные системы раннего оповещения в совокупности эффективны для минимизации потенциальных опасностей, связанных с пульсациями ледников и прорывами озер. Анализ комплекса сопутствующих природных угроз позволил установить, что значительный ущерб от каменно-ледяных лавин и прорывами озер характерен для участков Шураки Капали и Арчакала, отличающиеся близким расположением к населенным пунктам и важнейшим объектам инфраструктуры, в отличие от других ледников и озер, расположенные в дали от этих объектов и не представляющие сравнительно серьёзной угрозы для них (рис. 8).

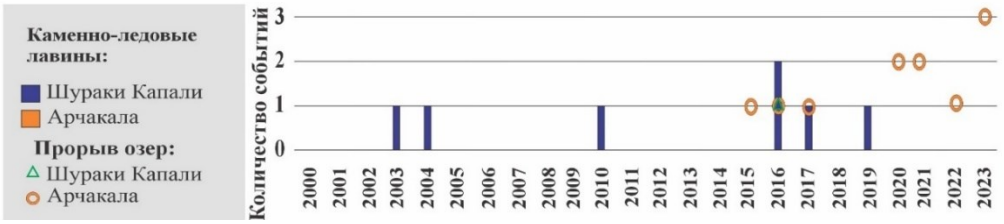


Рис. 8. Количество зарегистрированных каменно-ледовых лавин и прорывов озёр на участках Шураки-Капали и Арчакала в 2000–2023 гг.

Выводы

Таким образом, полученные результаты исследований позволяют утверждать, что реализация в полевых условиях исследований с применением БПЛА технологий, а также спутниковых снимков, для получения актуальных данных о состоянии ледников и связанных с ними опасностей в горных регионах является актуальным и целесообразным подходом. Для выявления изменения на ледниках и их озерах, а также следов предыдущих стихийных бедствий и масштабов ущерба, были использованы аэрофотосъемка труднодоступных районов, созданы ортофотомозаики и осуществлен сравнительный анализ космических снимков.

Установлено, увеличение частоты прорывов озер, указывающая на влияние климатических изменений на ледниковые системы. Подтверждено, что быстрое образование и расширение ледниковых озер и каменно-ледяных лавин на хребте Петра I ведут к возникновению новых прорывов, приводящие к образованию селей и, как следствие увеличению нестабильности как ледниковой среды, так и окружающего ландшафта. Полученные результаты станут основой разработки рекомендации по дальнейшему использованию технологий ДЗЗ для мониторинга современного состояния оледенения, ледниковых озёр и связанные с ними опасные природные явления, в том числе оценки гляциологических рисков и селевой опасности в горно-предгорных зонах Таджикистана.

Список литературы

Абдушукуров, Д.А., Кобулиев З.В., Салибаева З.Н. Изучение состава и качества воды в притоках реки Амударья // Наука и новые технологии, 2013, 7: 47–51.

Аннамухаммедов О., Овезов Г., Хоммадов М. Управление водными ресурсами в условиях изменения климата: вызовы и возможности адаптации. // Символ науки, 2023, (11-1-1): 17–19.

Зарипов Р.Г., Имомназаров Ф.С., Тагойбеков А.С. Оценка селевых потоков бассейна реки Шураки Капали (левый приток реки Сурхоб, Таджикистан) и разработка мер по снижению риска // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе – Хорог, Таджикистан), т.1. Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 342–350.

Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В., Казакова Е.Н., Морозов Г.Л. Селевые процессы в бассейне р. Мзымта (Красная Поляна) и их влияние на территорию строительства объектов Олимпийского комплекса // Геоэкология, 2013, 6: 516–529.

Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Касаткин Н.Е., Капица В.П., Касенов М.К., Раймбекова Ж.Т. Гляциальные сели в Заилийском Алатау за последние 120 лет // Лёд и Снег, 2020, 60(2): 213-224. doi: 10.31857/S2076673420020035.

Пирмамадов У. Селевые потоки, вызванные прорывом гляциальных высокогорных озер на территории Таджикистана // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Тр. Второй конференции, посвященной 100-летию С.М. Флейшмана. 2012, с. 72–73.

Пятый национальный доклад по сохранению биоразнообразия Республики Таджикистан / Правительство Республики Таджикистан. Душанбе, 2014. https://www.cbd.int/doc/world/tj/tj-nr-05-ru.pdf.

Сафаров М.С., Фазылов А.Р. Применение современных технологий дистанционного зондирования для мониторинга селеопасных районов горных территорий // ГеоРиск, 2020, XIV(2): 32–41. doi: 10.25296/1997-8669-2020-14-2-32-41.

Сафаров, М.С., Фазылов А.Р. Селевая активность в бассейне реки Арчакапа // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. 2022, 2(187): 125–135.

Ступин В.П. Данные дистанционного зондирования для картографирования селевой опасности станового участка Бама // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2020, 1(2): 28–40.

Фазылов А.Р. Влияние изменения климата на гидроэкологическую безопасность // Материалы Центрально-Азиатской международной научно-практической конференции «25 лет водному сотрудничеству государств Центральной Азии: опыт пройдённого, задачи будущего». – Ташкент, 23–24 ноября 2017, с. 212–219. http://www.icwc-aral.uz/25years/pdf/25_icwc_conference_abstracts.pdf.

Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Бобов Р. и др. Селевые потоки в долине реки Барсемдара в июле 2015 г. и подпрудное озеро Барсемкуль на реке Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан) // Междунар. науч. конф. Вторые Виноградовские чтения. Искусство гидрологии (Санкт-Петербург, 18–22 нояб. 2015 г): сб. докл. СПб.: С.-Петерб. гос. ун-т, 2015, с. 261–264.

Шварев С.В., Харченко С.В., Голосов В.Н., Успенский М.И. Причины и последствия техногенной активизации селей в 2006–2019 гг. на водосборе притока руч. Сулимовский (район пос. Красная Поляна, Западный Кавказ) // ГеоРиск, 2020, XIV(2): 66–76. doi: 10.25296/1997-8669-2020-14-2-66-76.

Kirkbride M.P., Warren C.R. Tasman Glacier, New Zealand: 20th-century thinning and predicted calving retreat // Glob Planet Change, 2020, 22(1–4): 11–28. doi: 10.1016/S0921-8181(99)00021-1.

Mergili M., Schneider J.F. Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2011, 11: 1447–1462. doi: 10.5194/tc-7-1565-2013.

Murodov M., Li L., Safarov M., Lv M., Murodov A., Gulakhmadov A., Khusrav K., Qiu Y. A Comprehensive Examination of the Medvezhiy Glacier's Surges in West Pamir (1968–2023) // Remote Sensing, 2024, 16(10): 1730. doi: 10.3390/rs16101730

Otto J.C. Proglacial lakes in high mountain environments // In: Heckmann T, Morche D, (eds) Geomorphology of proglacial systems. Geography of the physical environment. Springer, Cham, 2019, p. 231–247. doi: 10.1007/978-3-319-94184-4_14.

Richardson S.D., Reynolds J.M. An overview of glacial hazards in the Himalayas // Quat. Int., 2000, 65–66: 31–47. doi: 10.1016/S1040-6182(99)00035-X

Röhl K. Characteristics and evolution of supraglacial ponds on debris-covered Tasman glacier, New Zealand. // J. Glaciol., 2008, 54(188): 867–880. doi: 10.3189/002214308787779861

Safarov M., Kang S.C., Fazylov A., Gulayozov M., BanerjeeA., Navruzshoev H., Chen P., Xue Y., Murodov M. (2024) Estimating glacier dynamics and supraglacial lakes together with associated regional hazards using high-resolution datasets in Pamir // Journal of Mountain Science, 2024, 21(11): 3767–3788. doi: 10.1007/s11629-024-8936-x

Safarov M., Kang S., Fazylov A., Gulayozov M., Navruzshoev H., Banerjee A., Mamadjanov Y. Mapping the territories of the mountain-foothill zone of Tajikistan exposed to debris flows // Journal of Mountain Science, 2025, 22: 16–30. doi: 10.1007/s11629-024-9020-2.

Zhang G., Yao T., Xie H., Wang W., Yang W. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming // Global and Planetary Change, 2015, 131: 148–157. doi: 10.1016/j.gloplacha.2015.05.013.

Zhou Y., Li Z., Li J., Zhao R., Ding X. Glacier mass balance in the Qinghai–Tibet Plateau and its surroundings from the mid-1970s to 2000 based on Hexagon KH-9 and SRTM DEMs. // Remote Sensing of Environment, 2018, 210: 96-112. doi: 10.1016/j.rse.2018.03.020.

Развитие селевых процессов в бассейне реки Кутарха (Западный Кавказ, Сочинский гидрологический район)

К.Г. Самаркин-Джарский[1], Е.В. Дзагания[2], Л.М. Дзагания[2], Г.Н. Сухаржевский[3]

[1]ООО «ГК «Инжзащита», Сочи, Россия, samarkin@bk.ru

[2]ГОО «Сочинское географическое общество», Сочи, Россия, krylenka@gmail.com, dzagluba@gmail.com

[3]Географическое общество Израиля, Иерусалим, Израиль, gleb.dzag@gmail.com

Аннотация. Наблюдения за селевыми процессами на р. Кутарха, левом притоке р. Сочи бассейна Черного моря, проводятся авторами с 2006 г. Малая горная река находится во влажном субтропическом поясе, в зоне широколиственных лесов, в условиях низкогорно-лесного ландшафта и сильно пересеченного рельефа. При наличии признаков селевых процессов: заросших деревьями селевых валов и промоин, крупных отложений селевого материала в русле, крутых оползневых бортов русла, за последние два десятилетия сходов селей и значительных переформирований русла реки не происходило. В январе 2024 г. в среднем течении, в 2,2 км от устья, произошел сход крупного оползня на правом берегу, перекрывший долину р. Кутарха, с образованием запрудного озера. Помимо оползня, перекрывшего русло, в бассейне р. Кутарха в 2024 г. образовались и другие крупные селевые очаги. Так, в декабре 2024 г. сошел оползень с левого склона долины реки Кутарха, разрушив 30 дачных участков. В это же время произошел прорыв запрудного озера с заметными русловыми деформациями и накоплением материала в русле. Целью данного исследования является выявление причин активизации селевых процессов в бассейне реки Кутарха, оценка селевой опасности и возможных последствий для расположенных ниже по течению районов города-курорта Сочи.

Ключевые слова: *селевые процессы, горная река, запрудное озеро, селевой очаг, город Сочи, субтропический пояс*

Ссылка для цитирования: Самаркин-Джарский К.Г., Дзагания Е.В., Дзагания Л.М., Сухаржевский Г.Н. Развитие селевых процессов в бассейне реки Кутарха (Западный Кавказ, Сочинский гидрологический район). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 388–397.

Dynamics of debris flow processes in the Kutarkha River basin (Western Caucasus, Sochi hydrological region)

K.G. Samarkin-Dzharskii[1], E.V. Dzaganiia[2], L.M. Dzaganiia[2], G.N. Sukharzhevskii[3]

[1]LLC "GK "Inzhzashchita", Sochi, Russia, samarkin@bk.ru

[2]CPO "Sochi Geographical Society", Sochi, Russia, krylenka@gmail.com, dzagluba@gmail.com

[3]Israeli Geographical Association, Jerusalem, Israel, gleb.dzag@gmail.com

Abstract. The authors have been monitoring debris flow processes on the Kutarkha River, a left tributary of the Sochi River in the Black Sea basin, since 2006. The small mountain river is located in the humid subtropical zone, in the zone of broad-leaved forests, in the conditions of a low-mountain forest landscape and highly rugged relief. In the presence of signs of debris flow processes: debris flow banks and gullies overgrown with trees, large deposits of debris flow material in the riverbed, steep landslide sides of the riverbed, over the past two decades, debris flows and significant reshaping of the riverbed have not

occurred. In January 2024, in the middle stream, 2.2 km from the mouth, a large landslide occurred on the right bank, blocking the valley of the Kutarkha River, forming a dammed lake. In addition to the landslide that blocked the riverbed, other large mudslides formed in the Kutarkha River basin in 2024. So, in December 2024, a landslide descended from the left slope of the Kutarkha River valley, destroying 30 suburban areas. At the same time, there was a breakthrough of the dammed lake with noticeable riverine deformations and accumulation of material in the riverbed. The purpose of this study is to identify the causes of the intensification of debris flow processes in the Kutarkha River basin, assess the debris flow hazard and possible consequences for the downstream areas of the resort city of Sochi. The purpose of this study is to identify the causes of the sudden intensification of debris flow processes in the Kutarkha River basin, assess the debris flow hazard and possible consequences for the downstream areas of the resort city of Sochi.

Key words: *debris flow processes, mountain river, dammed lake, debris flow hearth, Sochi city, subtropical zone*

Cite of this article: Samarkin-Dzharskii K.G., Dzaganiia E.V., Dzaganiia L.M., Sukharzhevskii G.N. Dynamics of debris flow processes in the Kutarkha River basin (Western Caucasus, Sochi hydrological region). In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 388–397.

Введение

Современные глобальные климатические изменения отражаются на атмосферных процессах субтропического пояса Кавказа [*Яицкая и др., 2023*]. Произошла смена направления преобладающего движения атмосферных масс с субширотного на субмеридиональное, уменьшилось смягчающее воздействие на климат морей. В умеренном и субтропическом поясах увеличились амплитуды перепадов температур, вызывающие атмосферные вихри и выпадение интенсивных осадков, особенно на склонах Кавказских хребтов, обращенных к Черному морю. При перемещении холодных воздушных масс над более теплыми водами Черного моря достаточно часто образуются смерчи, иногда выходящие на сушу по долинам рек. Выпадение интенсивных осадков в долинах горных рек вблизи побережья может вызывать стремительный подъем воды в реках, оползни, обвалы в русла рек и, как следствие, сход селевых потоков.

За последние годы интенсивность опасных процессов во влажном субтропическом поясе Кавказа в области побережья Черного моря резко возросла по сравнению с предшествующими десятилетиями. Примером этого может динамика массового образования селевых очагов с запрудным озером в бассейне малой горной реки Кутарха в 2024 г., увеличение выноса твердого стока притоками.

Целями и задачами данной работы является исследование развития селевых процессов на малой горной реке Кутарха с использованием комплексной характеристики природных условий с точки зрения влияния на селевые процессы [*Дзагания и др., 2024а*].

В настоящей работе представлены результаты наблюдений в долине р. Кутарха, произведен анализ факторов, вызвавших активизацию опасных процессов.

Актуальность проблемы заключается в обоснованной оценке рисков при принятии градостроительных решений, хозяйственном и рекреационном освоении территорий для предотвращения чрезвычайных ситуаций и защиты от опасных селевых потоков.

Физико-географические условия бассейна р. Кутарха

Одноименная с названием города Сочи горная река берет начало под вершиной Чура (1813 м н.у.м) Главного Кавказского хребта в Хостинском районе МО Сочи и впадает в Черное море в самом густонаселенном Центральном районе. Площадь бассейна р. Сочи – 296 км кв. Длина реки – 45 км. Основные притоки: Ушха, Ац, Агва, Ажек, Кутарха и более 80 притоков длиной до 10 км (рис.1).

Река Кутарха является левым притоком реки Сочи и впадает на 11-м км от ее устья, в черте с. Пластунка Хостинского района. Бассейн р. Кутарха находится к югу от хребта Алек (1003,9 м над уровнем моря), являющегося водораздельным с рекой Ац (левый приток р.Сочи на 25 км от устья). Превышение гребня хребта Алек над днищем долины р. Кутарха составляет около 700 м (рис. 2). На рис. 2 показаны крупные оползни в бассейне реки Кутарха, которые размываются рекой и являются источниками селевого материала.

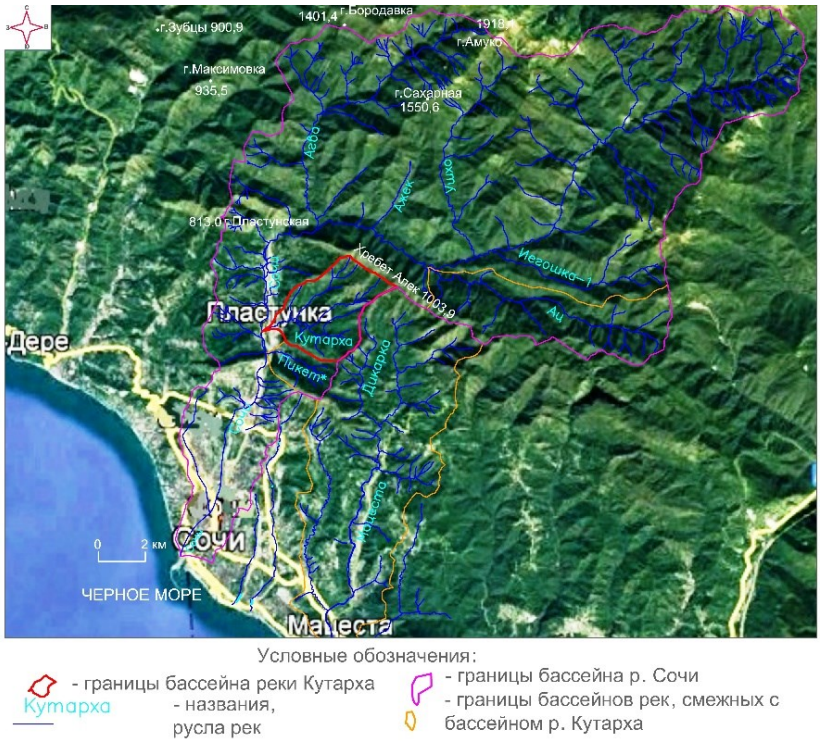


Рис. 1. Схема бассейна р. Кутарха и ее смежных бассейнов Источник: Google Earth 10.69.01.1. Поставщики данных: Airbus, Landsat/Copernicus,Maxar Technologies,2024. Дата обращения: 20.05.2025

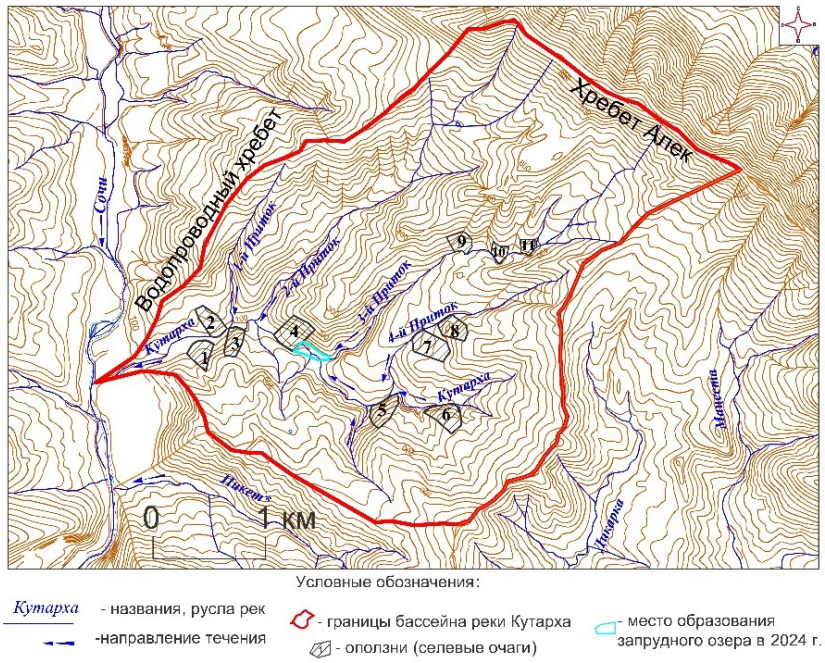


Рис. 2. Схема селевых очагов в бассейне р. Кутарха (составлена авторами)

Длина р. Кутарха – 6,5 км, площадь водосбора – 12,7 км², средняя высота водосбора – 282 м, 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 колхидским лесом, за исключением южного и западного водораздельных гребней и нижнего течения, где находятся дачные участки и сельская низкоплотная застройка. 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, в бассейнах рек Кутарха и Мацеста. С хребта Алек стекают 4 основных правых притока р. Кутарха, которые так и называются: 1-й Приток, 2-й Приток, 3-й Приток, 4-й Приток. Реки текут в узких каньонах, русла водопадные, местами непроходимые, склоны сложены легко размываемыми породами, сечения долин V-образные, на расширениях долин – трапециевидные.

Бассейн реки Кутарха находится в Чвежипсинском гидрогеологическом подрайоне Западно-Кавказского района Большекавказской складчатой области. Все стратиграфические комплексы подрайона отличаются водоносностью и содержат подземные воды [*Лизогубова, 2007*]. В долинах рек Кутарха и смежных бассейнов имеются многочисленные выходы подземных вод. Вблизи от устья реки Кутарха, в долинах рек Сочи и Мацеста находятся эксплуатируемые источники минеральной воды, которые используются как лечебные [*Крыленко и др., 2024*]. Водопроводный хребет является западным водоразделом р. Кутарха с р. Сочи, по нему проходит водовод от источника водоснабжения на правом склоне долины р. Кутарха. Южные склоны водораздельного хребта Алек являются наветренными со стороны Черного моря. Горный массив Алек является карстовым районом с многочисленными протяженными и глубокими обводненными пещерами: Осенняя (глубина 512 м), ТЭП, Примусная, Назаровская, Заблудших, Октябрьская, Школьная, Географическая, Величественная, Кин-Дза-Дза, Гигантов, пещера-источник в долине р. Ац с подземным озером Соколова, Градовая, Девичья, Дворцовая, Медвежья и др. Наличие множественных водопроявлений подземных вод способствует высокой обводненности грунтов, слагающих склоны бассейна.

Следует отметить, что бассейн р. Кутарха находится преимущественно в Сочинском национальном парке и пока незначительно подвержен антропогенному воздействию. К техногенному влиянию можно отнести застройку садовых товариществ, размещенных ближе к гребням западного и южного водоразделов, вырубку на охранных полосах ЛЭП, а также два фермерских хозяйства на правобережной террасе р. Кутарха возле 1 и 2-го Притоков. В устьевой части через реку имеется капитальный автомобильный мост. Еще в 2-х местах выше по течению сельские жители сами сооружают мостовые переходы для проезда к фермам и садовым участкам, которые периодически разрушаются паводками. В устье реки Кутарха и в долине реки Сочи расположено село Пластунка с населением 2270 человек. Ниже по течению реки Сочи находится самый густонаселенный Центральный городской район города Сочи.

Образование крупных селевых очагов, запрудных озер в бассейне р. Кутарха с возможным выходом водокаменных потоков на земли близко расположенных населенных пунктов, потенциально опасно и требует проведения регулярных обследований для оценки селевой опасности и выполнения мероприятий, направленных на защиту населения от опасных процессов.

Развитие селевых процессов в бассейне р. Кутарха

Мониторинг селеопасных процессов в бассейне горной р. Кутарха производился с 2006 г. до настоящего времени. За период наблюдений до начала 2024 г. селевые паводки не происходили. Возраст деревьев, выросших на селевых валах, растительность и замшелость глыб вблизи русла позволяли предположить, что и задолго до начала

наблюдений в 2006 г. (примерно за 25–30 лет) в среднем и нижнем течении сходов селей не было (рис. 3). Тем не менее, в русле имеется множество признаков прохождения селевых потоков в прошлом: мощные эрозионные врезы, борозды, заполненные рыхлообломочным материалом, русло и террасы, выполненные мощными отложениями рыхлых материалов, с неустойчивыми оползневыми крутыми склонами, подрезаемыми при проходе высоких вод [*Крыленко и др., 2024*] (рис. 4).

Рис. 3. Многолетние деревья у р. Кутарха, выросшие на селевых отложениях. 2009 г.

Рис. 4. Русло и берега р. Кутарха с мощными отложениями рыхлых материалов, Фото Дзагания Е.В., 2017 г.

В конце января 2024 г., после снежных осадков, половодья при потеплении и последующих дождевых осадков в русло р. Кутарха сошел крупный оползень (рис. 5, селевой очаг 4 по рис. 2) с образованием подпрудного озера с длиной около 200 м, шириной до 50 м и глубиной – до 3 м (рис. 6, 7). После прорыва запруды вместо широкого русла до 50 м осталась стесненная оползневыми массами узкая протока (рис. 5).

Длина оползня (селевой очаг 4) по направлению сползания составила 380 м, протяженность вдоль реки – до 220 метров [*Крыленко и др., 2024*]. Зона срыва отмечалась на абсолютных отметках борта долины 280 м. До оползня высотная отметка русла составляла 130 м. При общей площади пораженного участка около 9,5 га, объем тела оползня оценивался величиной примерно 160 тыс. м^3.

Рис. 5. Правобережный оползень с сохранившимися на нем деревьями, перекрывший русло р. Кутарха (селевой очаг 4 по рис. 2). Вид вверх по течению.

Рис. 6. Запрудное озеро на р. Кутарха выше селевого очага 4. Февраль 2024 г.

Рис. 7. Русло р. Кутарха после прорыва на месте запрудного озера. Вид вверх по течению, примерно с того же пункта съемки, как на фото 6. 2025 г.

До схода оползня (селевой очаг 4) под крутым склоном на правом берегу р. Кутарха находился родник, который не пересыхал круглый год (рис. 8).

На месте образования мощных селевых очагов 5, 6 на левом склоне долины р. Кутарха в декабре 2024 г. (рис. 9) также существовал родник, о чем сообщается в репортаже [*Дидарчук, 2024*].

Об активизации селевых процессов на 3-ем Притоке (в долине находятся селевые очаги 9–11) свидетельствует количество селевых отложений в устье водотока, расширение русла и повреждение многолетних деревьев на пойме (рис. 10).

Рис. 8. Родник на правобережной пойме р. Кутарха, ныне погребенный под оползнем (селевой очаг 4). 2018 г. Фото Е.В. Дзагания

Рис. 9. Селевой очаг 5, образовавшийся в декабре 2024 г. Вид вверх по течению, 2025 г.

Рис. 10. Селевой материал в устье на 3-его Притока. Вид вверх по течению, 2025 г.

Препятствием для водокаменных потоков стал переезд через р. Кутарха в 1 км от устья ниже 1-го Притока, представляющий собой насыпь поверх двух металлических труб диаметром 2 м. Выше этого сооружения произошло отложение селевого материала (рис. 11, 12).

Рис. 11. Скопление селевого материала выше переезда через р. Кутарха. Вид вверх по течению. Март 2025 г. Фото Е.В. Дзагания

Ниже переезда на левом берегу складирован материал от расчистки отверстий моста, скопления селевого материала отсутствуют. Правый борт поражен активным оползнем (рис. 12, селевой очаг 2). Еще один оползень (селевой очаг 1) на левом склоне) периодически сползает на грунтовую дорогу вдоль реки и расчищается местными жителями.

Таким образом, представленные выше данные свидетельствуют о наличии в долине р. Кутарха крупных селевых очагов и значительного количества селевого материала, скопившегося в русле. При неблагоприятном стечении гидрометеорологических условий и новом образовании запруд селевой паводок может снести ненадежную преграду в виде дамбы переезда и нанести ущерб населенным пунктам ниже по течению.

Рис. 12. Переезд через р. Кутарха, удерживающий селевой материал во время паводков. Вид с левого берега. Фото Е.В. Дзагания

Оценка селевой опасности в бассейне р. Кутарха

В работах [*Яицкая, 2023; Дзагания и др., 2024b*] производилась оценка влияния климатический изменений на опасные геоэкологические процессы, в том числе селевые. Было установлено, что МО Сочи относится к типу изменения климата 1 и подтипу 1а в

зоне влажного субтропического климата в области Черноморского побережья Кавказа. За период с 2012 по 2024 гг. для этого подтипа характерно умеренное потепление (0,09°С/год) с сокращением разности среднегодовой температуры ($T_{год}$) и температуры января ($T_{янв}$) с величиной тренда -0,12° С/год и сильное увеличение годового количества осадков (тренд +57 мм/год). При этом также растет число дней с осадками в году (тренд +7 дней/год) и число дней с осадками за холодный период (тренд +3 дня/год).

За период 2021–2024 гг. среднее годовое количество осадков составило 1737 мм, что на 39% больше среднего количества осадков в 2017–2020 гг. (1244 мм) и на 40% больше среднего количества осадков за период 2013–2016 гг. (1228 мм) [*Электронный…, 2025*].

При увеличении количества осадков в теплом субтропическом климате создаются благоприятные условия для роста и распространения растительности, в результате чего сокращается поверхностная эрозия склонов. При увеличении количества осадков обвальные и оползневые процессы, русловые деформации с обрушением береговых откосов усиливаются. Рост атмосферной неустойчивости приводит к увеличению количества смерчей в Черноморской области, со значительным увеличением опасности формирования паводка в селеопасных руслах.

Динамика селевой опасности, вызванная колебаниями климата, оценивается для бассейна р. Кутарха как «средний рост» по шкале от 0 до 4 баллов (0 баллов – без увеличения, 4 балла – чрезвычайно сильное воздействие) [*Дзагания и др., 2024b*].

Приведенная выше оценка влияния климатических изменений не учитывает комплекс признаков возможного образования крупных селевых очагов и высокой селевой опасности бассейнов, выделенных в работе [*Крыленко и др., 2024*].

Комплекс признаков возможного образования крупных селевых очагов и высокой селевой опасности бассейнов:

1. Фрагменты склонов, лишенные древесного покрова при наличии такового на смежных участках, выявляемые по материалам дистанционных наблюдений. При пеших обследованиях активизировавшиеся оползневые блоки выделяются по наличию леса с многочисленными наклонёнными и изогнутыми стволами деревьев («пьяный лес»).
2. Расположение участка на пересечениях водоподводящих разломов, на границах водоупорных и водоносных горизонтов и гидрогеологических формаций.
3. Близкое наличие месторождений или выходов подземных вод, близкое расположение обводненных карстовых пещер (полостей).
4. Участки глубоко врезанных V-образные долин, склоны которых сложены легко разрушающимися рыхлыми обломочными щебнисто-глыбовыми и глинисто-дресвяными отложениями.
5. Средние уклоны водосборных бассейнов более 350‰.
6. Отношение длины бассейна к ширине водосбора – менее 4.
7. Южная и юго-западная экспозиция бассейнов, их открытость для воздушных масс, идущих со стороны Черного моря.

Все вышеперечисленные признаки имеются в бассейне р. Кутарха.

Категория селевой опасности исследуемого бассейна может быть оценена по ландшафтному методу, предложенному в работе [*Дзагания и др., 2024a*] по ряду критериев балльной системы частных показателей и комплексной оценке территории с разными ландшафтами.

В бассейне реки Кутарха выделено 3 ландшафтных зоны: нижнегорно-лесная – 70% от общей площади бассейна, интразональная – 18,1%, сельская – 11,8%. Для каждого ландшафта, как устоявшегося природного комплекса, определен присущий ему обобщенный показатель категории опасности (от 0 до 1, где 0 – катастрофическая опасность,1 – опасность отсутствует), с учетом условий и ландшафтов бассейна р. Кутарха:

- низкогорно-лесная зона – 0,70;
- интразональная – 0,30;
- сельская – 0,60.

Для бассейна реки Кутарха расчетное значение комплексной категории селевой опасности К = 0,61, что означает среднюю степень селевой опасности.

Выводы

За четырехлетний период 2021–2024 г. количество осадков, выпавших за год по данным метеостанции Сочи, увеличилось на 40% по сравнению с двумя предыдущими 4-летними периодами [*Электронный…, 2025*]. Так как в бассейне р. Кутарха имеются все факторы высокой вероятности образования крупных селевых очагов [*Крыленко и др., 2024*], указанные в разделе 4, при неблагоприятных гидрометеорологических условиях произошла активизация 11 крупных селевых очагов с возрастанием степени селевой опасности, которая оценивается как средняя.

Учитывая, что река находится выше жилых районов МО Сочи, рекомендуются мероприятия по защите жилых домов с. Пластунка, расположенных в пойме р. Кутарха от возможного селевого воздействия. Строительство мостов к садоводческим товариществам и фермам должно выполняться с учетом селеопасности русла р. Кутарха.

Рекомендуется продолжение научных исследований развития селевых процессов в бассейне р. Кутарха и аналогичных водотоков в пределах территории Большого Сочи.

Список литературы

Дзагания Е.В., Самаркин-Джарский К.Г., Самаркина-Джарская Л.М. Методика оценки селевой опасности на примере Западного Кавказа, Сочинский район // 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», 2024a, с. 104–114.

Дзагания Л.М., Дзагания Е.В., Сухаржевский Г.Н., Бригида В.С. Тенденции изменения селевой опасности, обусловленные климатическими изменениями в субтропическом поясе Кавказа // 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», 2024b, с. 580–590.

Дидарчук С. Мегаоползень в селе Пластунка. Видеорепортаж 27.12.2024 г.: Канал «Сочи24.TV. Время новостей». Электронный ресурс: https://rutube.ru/video/7b96f1a099e33557c3cdc6e604da8dcf/ (дата обращения 20.03.2025 г.)

Крыленко Вас.И., Крыленко И.В., Дзагания Е.В., Дзагания М.Ю. Общие закономерности формирования природных селевых потоков на Западном Кавказе в районе г. Сочи // ГеоРиск, 2024, 18(1): 26-39. doi: 10.25296/1997-8669-2024-18-1-26-39.

Лизогубова Р.Н. 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.). М.: ОАО «Росстройизыскания», «ОАО «Кавказгидрогеология», 2007.

Яицкая Н.А., Дзагания Л.М., Бригида В.С. Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений территорий субтропической зоны Кавказа // Геология и геофизика Юга России, 2023, 13(2): 118–132. doi: 10.46698/VNC.2023.54.85.010.

Электронный ресурс: Архив погоды Rp5: https://rp5.ru/ (дата обращения 20.04.2025).

MAMODIS – a universal, cost-effective debris flow detection system based on infrasound and seismic signals

A. Schimmel

Andreas Schimmel – Alpine Monitoring Systems, Markt Piesting, Austria, andreas.schimmel@almosys.at

Abstract. The automatic detection of sediment related disasters like landslides, debris flows and debris floods, gets increasing importance for hazard mitigation and early warning. Past studies showed that such processes induce characteristic seismic signals and acoustic signals in the infrasonic spectrum which can be used for event detection. The presented system MAMODIS (MAss MOvement Detection and Identification System) is a detection system for debris flows, debris floods and avalanches based on a combination of infrasound and seismic signals. The detection system consists of one infrasound sensor, one geophone and a microcontroller, where a specially designed detection algorithm is executed. This algorithm reliably detects events in real time directly at the sensor site. The setup can be easily installed beside a torrent or an avalanche path and therefore can be used as a low-cost and practicable solution for early warning. In addition, this system offers first information of the process-type and a rough estimation of the peak discharge and the total volume for debris flows and debris floods. These values are calculated from the infrasound and seismic signals. Currently the system is installed on several sites in Austria, Switzerland and Italy.

Key words: *debris flows, avalanches, detection system; infrasound; seismic signals*

Cite of this article: Schimmel A. MAMODIS – a universal, cost-effective debris flow detection system based on infrasound and seismic signals. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 398–406.

MAMODIS – универсальная, экономически эффективная система обнаружения селевых потоков на основе инфразвуковых и сейсмических сигналов

А. Шиммель

«Андреас Шиммель – Альпийские системы мониторинга», Маркт-Пистинг, Австрия, andreas.schimmel@almosys.at

Аннотация. Автоматическое обнаружение бедствий, связанных с осадками, таких как оползни, селевые потоки и селевые потоки, приобретает все большее значение для смягчения последствий опасностей и раннего оповещения. Прошлые исследования показали, что такие процессы вызывают характерные сейсмические сигналы и акустические сигналы в инфразвуковом спектре, которые могут использоваться для обнаружения событий. Представленная система MAMODIS (MAss MOvement Detection and Identification System) представляет собой систему обнаружения селевых потоков, селевых потоков и лавин, основанную на сочетании инфразвуковых и сейсмических сигналов. Система обнаружения состоит из одного инфразвукового датчика, одного геофона и микроконтроллера, в котором выполняется специально разработанный алгоритм обнаружения. Этот алгоритм надежно обнаруживает события в реальном времени непосредственно на месте расположения датчика. Установка может быть легко установлена рядом с потоком или траекторией схода лавины и, следовательно, может использоваться в качестве недорогого и практичного решения для раннего оповещения. Кроме того, эта система предоставляет первую информацию о типе процесса и грубую оценку

пикового расхода и общего объема селевых потоков и селевых потоков. Эти значения рассчитываются на основе инфразвуковых и сейсмических сигналов. В настоящее время система установлена на нескольких объектах в Австрии, Швейцарии и Италии.

Ключевые слова: *селевые потоки, лавины, система обнаружения; инфразвук; сейсмические сигналы*

Ссылка для цитирования: Шиммель А. MAMODIS – универсальная, экономически эффективная система обнаружения селевых потоков на основе инфразвуковых и сейсмических сигналов. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 398–406.

Introduction

Automatic detection of alpine mass movements is an important tool for protecting people and property in the fast socio-economic developing mountain areas. Although different warning systems like wire sensors, radar, ultrasonic sensors (flow depth) etc. already exist, most of the present methods need sensors placed in or above the process itself, which leads to expensive structures and continuous maintenance to ensure steadiness and stability.

Alpine mass movements like debris flows and debris floods or avalanches induce waves in the low-frequency infrasonic spectrum (e.g. [*Kogelnig et al., 2014*]) and characteristically seismic waves (e.g. [*Burtin et al., 2016*]). These infrasound and seismic waves produced by the mass movement can be used for detecting events before a surge passes the sensor location and to monitor mass movements from a remote location unaffected by the process.

There have already been several approaches for automatic detection of debris flows based on seismic signals (e.g. [*Walter et al., 2017*]) and also infrasound signals are commonly used for detecting avalanches or debris flows (e.g. [*Marchetti et al., 2019*]). Seismic and infrasound waves have different advantages and disadvantages, so a combination of both technologies can increase detection probability and reduce false alarms (e.g. [*Hübl et al., 2013*]).

However, up to date no system has been designed which uses a combination of low-cost seismic and infrasound sensors for an automatic detection of sediment related disasters of different types. So, this work aims to develop a reliable universal detection system for alpine mass movements, which is based on one infrasound and one seismic sensor and can detect different processes in real time directly at the sensor site [*Schimmel et al. 2017, 2018*]. The benefits of these methods include independence from weather conditions regarding visibility, no structural need for sustainability, same system for different kinds of mass movements and monitoring from a remote location unaffected by the process. Further, this approach can also offer a first estimate of the peak discharge, and the total volume of debris flows and debris floods based on the infrasound and seismic signals.

Methods

System setup

The MAMODIS system (MAss MOvement Detection and Identification System) is based on a modular setup to offer an inexpensive and practical solution for different applications.

The infrasound sensor used for the MAMODIS system is a modified differential pressure sensor with a measurement range from -50 to 500 Pa. As seismic sensors, we use the SM-6 with a sensitivity of 28.8 V/m/s and a natural frequency of 4.5 Hz. The system offers the possibility for a second geophone input, which can be used for estimation of the mass

movement velocity. The process velocity is calculated via cross-correlation of booth seismic signals [*Schimmel et al. 2022*].

The sensor signals have to be adapted for the input of the microcontroller, which is done by a non-inverting OPV circuit and band pass filtering. These input signals are sampled by the microcontroller ADC (analog-to-digital converter) with a sample rate of 100 Hz.

A STMicroelectronics development board with the microcontroller STM32L4R9AI (former version: Texas Instruments, TM4C129X) is used for data processing and as data-logger. The software for the microcontroller is based on the open-source runtime system FreeRTOS. The development board has a 12-bit ADC module, five UARTs (Universal Asynchronous Receiver Transmitters), several GPIOs (General Purpose Input/output), which can be used as alarm outputs, and a 1.2" AMOLED display with touch-screen function. The data can be stored on a micro-SD card where sizes of 8 GB, 16 GB or 32 GB can be used, and up to eight months (32 GB, one geophone) of data can be recorded continuously.

Besides the input of the sensor signals, the free ADC channels offer the possibility to log the flow height measured by a radar or ultrasonic gauge (input 4–20 mA), which can be used for event verification. In addition, the power supply voltage is monitored to check for low power and an input for a second infrasound sensor is available. Communication of the system can be conducted via a GSM module or a WIFI module. The system is designed to send a status message to a server every hour using MQTT. In case of an event a MQTT message is sent at detection and at the end of the event a summary including detection time, duration, type, and magnitude estimation is sent to the server. This server creates e-mail alerts and summaries in case of an event. The status and event data of all stations can be viewed on a Grafan platform and additional on a webserver (http://mamodis.ddns.net/).

The time synchronization of the station is done by either a connection with a time server via GSM or WIFI module, or by a GPS module, which is also connected via UART. The alarm output can be done by Relays or via a radio link with a LoRA RF-Module. An overview of the hardware components and the inputs and outputs of the system is given in Fig. 1.

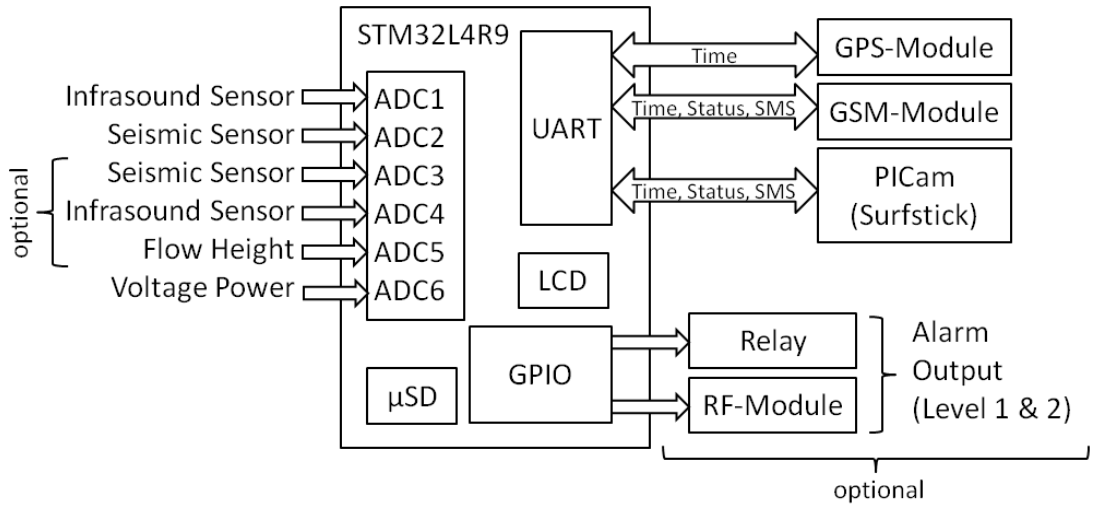


Fig. 1. Overview system setup and components

The system operates at a voltage of 5 V, provided by a DC–DC converter, which needs a power connection at a voltage range from 6.5 to 32 V. The system has power consumption between 0.6 to 1 W (depending on the equipment), which makes this system very suitable for stand-alone stations using a solar power supply, as is typically used. A typical system setup is shown in Fig. 2.

The MAMODIS System is currently installed on 11 sites in the Alps (Fig. 3; blue dots: snow avalanches, red dots: debris flow). Data and further information on these sites are available at: http://mamodis.ddns.net.

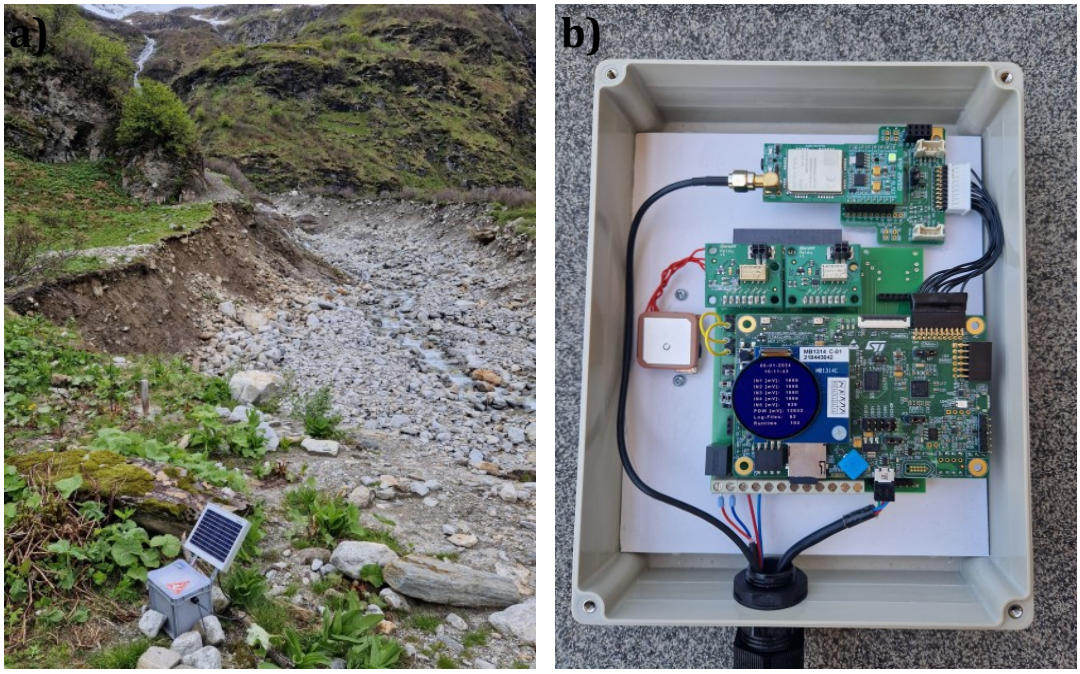


Fig. 2. System setup at the site Pilatuskar (a) and closer view of the microcontroller unit (b)

Fig. 3. Systems installed in 2025 (blue dots: snow avalanches, red dots: debris flow).

Detection algorithm

The principle of the detection algorithm is already presented in [*Schimmel et al., 2018*] so only a short summary is given below. For the automatic detection of debris flows based on seismic and infrasound data, a detection algorithm had to be developed, which identifies events as early as possible, without false alarms, in a simple way, so that the algorithm can be used in real time directly at the sensor location without extensive requirements on computing effort (on a resource limited microcontroller).

The developed detection algorithm analyses the evolution in time of the frequency content from the infrasonic and seismic mass movement signals. Different frequency bands are used to analyse the infrasound signal, whereby a 3 to 15 Hz band characterises debris flows, and a 15 to 45 Hz band is used for debris floods. For snow avalanches a 2 to10 Hz band is used

for powder avalanches and a band from 11 to 40 Hz is used for wet snow avalanches. For the seismic signals a frequency band from 10 to 30 Hz is used for sediment related mass movements and a frequency band from 5 to 25 Hz is used for avalanches [*Kogelnig et al. 2012*]. Three criteria must be fulfilled for a specified Detection-Time (20 s for debris flow and debris flood; 8 s for snow avalanches) to identify events:

1. The average infrasound and seismic amplitudes of the debris flow/debris flood or avalanche frequency bands must exceed a certain threshold (to distinguish between different event sizes, two limits are used: Level 1 (L1) and Level 2 (L2)).
2. The average infrasound amplitudes of the debris flow/debris flood or avalanche frequency band have to be at least above a third (for debris flows and powder avalanches) or a fourth (for debris floods or wet snow avalanches) of the amplitudes of the frequency band below. These criteria can avoid false alarms due to wind that dominates this low-frequency band.
3. The variance of the seismic and infrasound amplitudes has to be under a limit (to avoid false alarms from artificial sources, since this variance in the amplitudes of the broad-banded debris flow or debris flood signals is low, compared to narrow-banded signals from artificial sources).
4. Because bedload transport processes as well as debris flows and debris floods can be detected, a further criterion is needed to enable identification of event type. For debris flow/debris flood detection, the seismic amplitude must rise at least beyond the threshold used for the amplitude criterion during the detection time.

Using the combination of seismic and infrasound signals, we achieve a high detection ratio and a strong reduction in the frequency of false alarms.

Results and discussion

Detection example

Since 2015 the system is installed at the Illgraben, near Leuk in the canton Vallis in Switzerland. The catchment area of 9.5 km^2 extends from the summit of the Illhorn at 2716 m a.s.l. down to the Rhône valley at 610 m a.s.l. and is one of the most active debris flow catchments in the Alps. The debris flow used as detection example was recorded on 07.08.2021 with a peak discharge of 41 m^3/s and a total volume of 39.738 m^3 [*de Haas et al., 2022*].

The event was detected at sec. 2337 for Level 1 and at 2479 s for Level 2. So, the time between detection and passing of the first surge at the sensor site (2561 s) was 224 s for Level 1 and 82 s for Level 2 which is an adequate time for early warning. The total volume calculated based on the infrasound and seismic signal was 15.445 m^3 which underestimate the measured total volume, but the estimation of the peak discharge of 50 m^3/s fits very well with the measured peak discharge.

In total, 43 Level 1 events and 77 Level 2 events (debris flows, debris floods as well as high discharge with sediment transport) have been detected since 2015 on all debris flow sites listed in the map at Fig. 2. A total of 22 events were not detected on the Illgraben and Gadria sites because there were temporary problems with the power supply or with the infrasound sensor and a broken geophone cable. At the stations Gadria and Lattenbach a series of false alarms occurred, which were all caused by construction work in the channel close to the station (construction of riprap, work on protection structures or clearing of retention basins). However, since this work can be delimited in time, it is possible to clearly identify these false alarms, and they can be avoided by temporarily increasing the threshold values of the detection algorithm. No false alarms occurred at the other stations during the entire runtime.

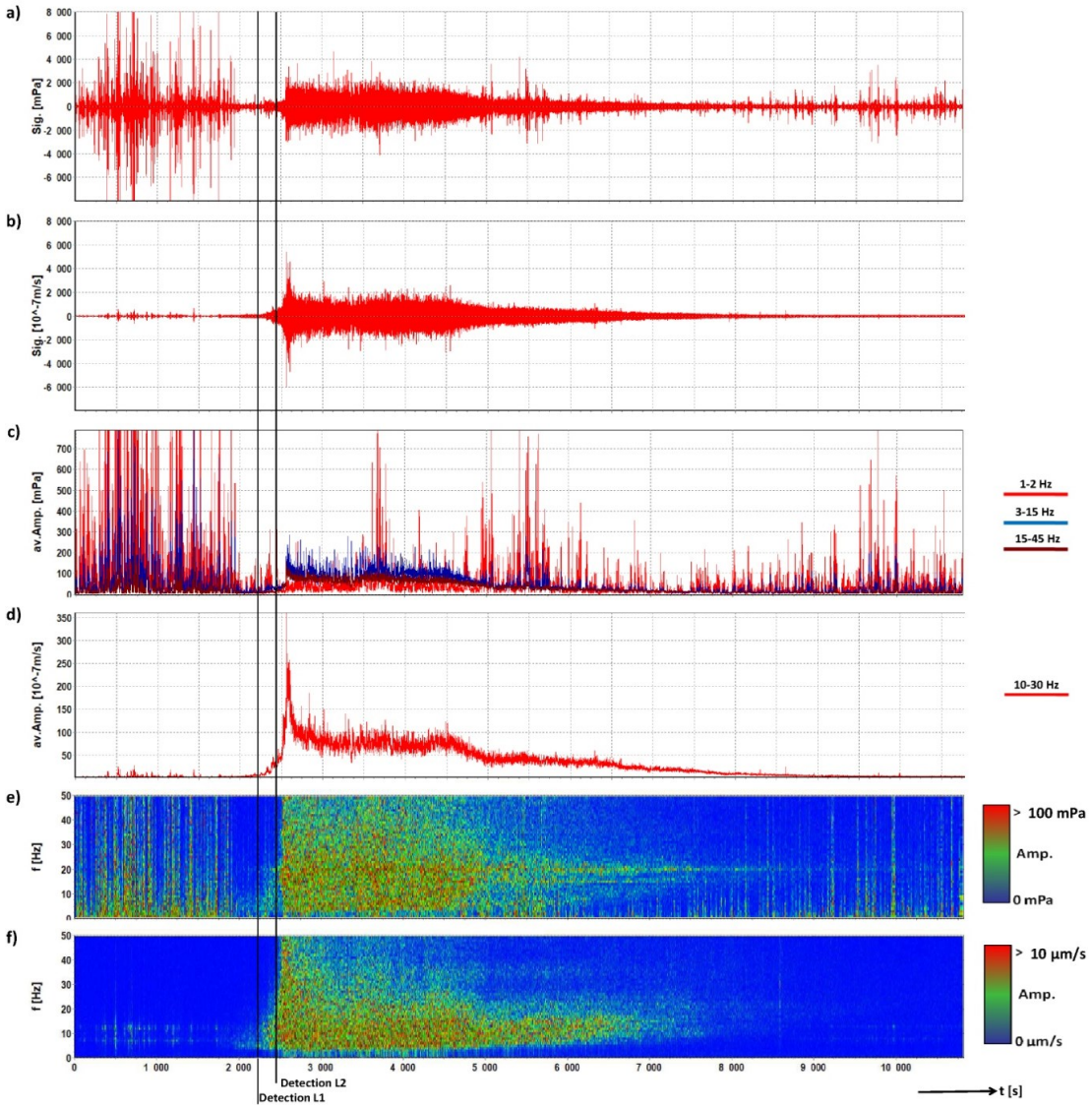


Fig. 1. Debris Flow at Illgraben (07.08.2021): (a) Infrasound time series; (b) Seismogram; (c) Average amplitude of the three frequency bands of the infrasound signal; (d) Average amplitude of the frequency band of the seismic signal; (e) Running spectrum of the infrasound signal; (f) Running spectrum of the seismic signal; Lines: time of detection for Level 1 and Level 2. Signals are represented with a common base of time.

Magnitude estimation

The system also offers a first estimation of the event size of debris flows or debris floods based on the infrasound and seismic data. The infrasound and seismic energy correlates passably with the discharge of an event (e.g., [*Coviello et al., 2019*]), so we compared the maximum infrasound and seismic amplitudes with the peak discharge of an event (Fig. 5).

The values for peak discharge and total volume used for this analysis are from Level 2 events at the Lattenbach, Gadria and Illgraben test sites (Table 1) and are calculated based on flow height measurements and velocity estimations. Since all monitoring stations used for this study are rather close to the channel (between 10 and 20 m) and the distances are nearly the same at every test site, we neglected attenuation of the signals in the air or in the ground, geometric spreading and the influence of topography or geology.

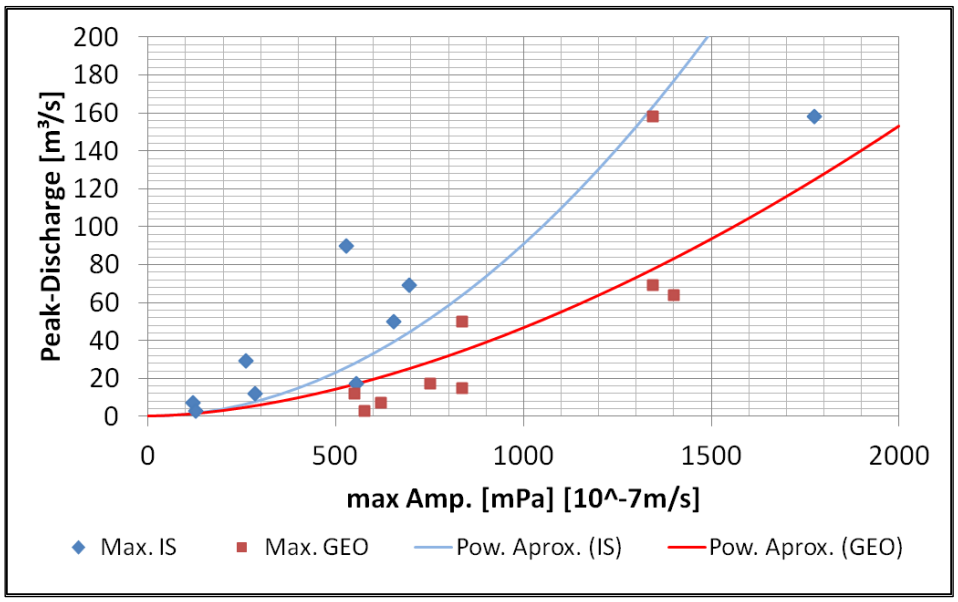


Fig. 5. Peak discharge over maximum seismic (Max GEO) and infrasound amplitudes (Max IS) and the approximation based on infrasound data (Pow. Approx. (IS)) and seismic data (Pow. Approx. (GEO))

Table 1. Peak discharge and total volume of used events.

Site	Event-Date	Peak discharge [m^3/s]	Total volume [m^3]
Lattenbach	09.08.2015 10.08.2015 16.08.2015 10.09.2016	50 69 12 158	11500 18500 5000 46000
Gadria	15.07.2014 08.06.2015 12.07.2016	na na na	10500 9850 1500
Illgraben	22.07.2015 10.08.2015 14.08.2015 15.08.2015 12.07.2016 22.07.2016 09.08.2016	17 7 7 3 15 50-90 29	8700 6100 25000 2000 10000 >10000 <10000

This analysis shows that, for peak discharge, a power curve fitting offers a good approach to find an initial relationship between the recorded signals and this event parameter. This curve fitting provides a R^2 of 0.76 for peak discharge based on infrasound data and a R^2 of 0.65 for the seismic data. The approximation for peak discharge Q_{peak} (in m^3/s) can be calculated based on the maximum infrasound amplitudes $A_{IS(max)}$ (in mPa) and the maximum seismic amplitudes $A_{GEO(max)}$ (in 10^{-7} m/s) according to Equation (1).

$$Q_{peak} = \frac{1}{2}\left(0.0001019598\, A_{IS(max)}^{1.982999} + 0.000332\, A_{GEO(max)}^{1.715603}\right) \quad (1)$$

The peak discharge is calculated as the means of both relations, and this overall calculation offers a R^2 of 0.967. For an estimation of the total volume, we integrate the discharge calculated with the relationship for peak discharge (equation (1)) over the entire detection time of an event. Fig. 6 compares the calculated values (vertical axis) for peak discharge and total volume to the observed values (horizontal axis). The line represents the one-to-one relationship.

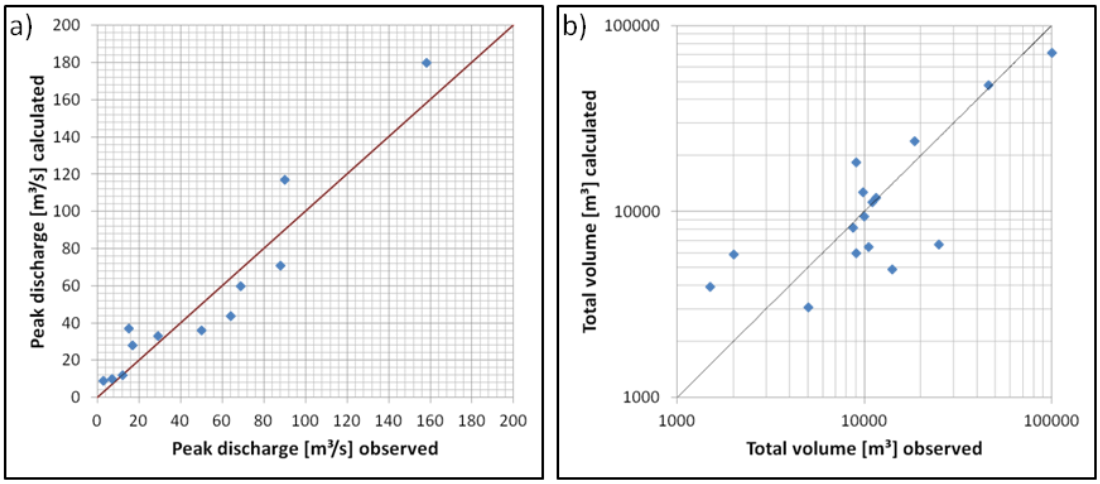


Fig. 6. Comparison of the calculated peak discharge to the observed values (a); comparison of the calculated total volume to the observed volume (b)

Both diagrams suggest that it is possible to obtain first-order estimates of the peak discharge and the total volume for debris flows and debris floods at different sites based on the infrasound and seismic amplitudes. The calculation of the peak discharge based on a combination of infrasound and seismic data offers a good approximation ($R^2 = 0.912$), for the total volume, this method shows a larger variance ($R^2 = 0.880$).

In fact, beside the magnitude, flow velocity and the sediment concentration have also a large influence on the seismic and infrasound amplitudes of a debris flow, so including them in a next step in the magnitude estimation could lead to more accurate results.

Conclusions

This paper presents an approach of a debris flow/debris flood and avalanche detection system based on a combination of seismic and infrasound sensors. The combination of both sensor technologies increases the detection probability and minimizes false alarms. So with these complementary technologies it is possible to build up a reliable warning system which can detect avalanches as well as debris flows/debris floods in real time directly at the sensor site and comes along with only one seismic and one infrasound sensor (co-located). The use of a microcontroller for the calculation of the detection algorithm makes the system very flexible, low energy consuming and cost-efficient and opens the possibility for several applications. So applications of this system are protection of infrastructure like traffic lines by controlling a traffic light, information about events to check the status of technical protection measure (e.g. fill level of a retention basin or debris-flow net), protection of construction sites inside the channel (e.g. for cleaning up a basin after an event), or at regions where a temporary protection is sufficient. Since the material cost of such a system is low and the installation is very easy, this setup may be used especially at sites, where the necessary founding for expensive torrent and avalanche barriers are not available, or where immediate protection measure are necessary.

However, the application of seismic and infrasound sensors for monitoring and detection of alpine mass movements is not a straightforward task. Understanding the propagation and attenuation mechanisms of seismic and infrasonic waves and the background noise characteristics in the study conditions is crucial for the interpretation of the recorded seismic and infrasonic signals and the development of a detection algorithm. The equipment and the placement of the sensors have to be chosen carefully.

In summary this work shows that the combination of one infrasound and one seismic sensor and the use of a microcontroller can offer a good basis for an easy to install, and inexpensive warning system for different kind of alpine mass movements.

References

Burtin, A., Hovius, N., Turowski, J.M. Seismic monitoring of torrential and fluvial processes // Earth Surf. Dynam., 2016, 4: 285–307

Coviello V., Arattano M., Comiti F., Macconi P., Marchi L. Seismic characterization of debris Flows: Insights into energy radiation and implications for warning // J. Geophys. Res.-Earth, 2019, 124.

de Haas T., McArdell B.W., Nijland W., Åberg A.S., Hirschberg J., Huguenin P. Flow and bed conditions jointly control debris-flow erosion and bulking // Geophysical Research Letters, 2022, 49, e2021GL097611. doi: 10.1029/2021GL097611.

Hübl J., Schimmel A., Kogelnig A., Suriñach E., Vilajosana I., McArdell B.W. A review on acoustic monitoring of debris flow // Int. J. Saf. Secur. Eng., 2013, 3.

Kogelnig A. Development of acoustic monitoring for alpine mass movements, PhD Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Vienna, Institute of Mountain Risk Engineering, 2009.

Kogelnig A., Hübl J., Suriñach E., Vilajosana I., McArdell B.W. (2014), Infrasound produced by debris flow: Propagation and frequency content evolution // Nat. Hazards, 2014, 70(3): 1713–1733, doi: 10.1007/s11069-011-9741-8.

Marchetti E., Walter F., Barfucci G., Genco R., Wenner M., Ripepe M., McArdell B., Price C. Infrasound array analysis of debris flow activity and implication for early warning // J. Geophys. Res.-Earth, 2019, 124.

Schimmel A., Hübl J., Koschuch R., Reiweger I. Automatic detection of avalanches: evaluation of three different approaches // Natural Hazards, 2017, 87(1): 83–102, doi: 10.1007/s11069-017-2754-1.

Schimmel A., Hübl J., McArdell B.W., Walter F. Automatic Identification of Alpine Mass Movements by a Combination of Seismic and Infrasound Sensors // In: Sensors, 2018, 18(5): 1658. ISSN 1424-8220, doi: 10.3390/s18051658.

Schimmel A., Coviello V., Comiti F. Debris flow velocity and volume estimations based on seismic data // Nat. Hazards and Earth Sys. Sci., 2022, 22.

Walter F., Burtin A., McArdell B.W., Hovius N., Weder B., Turowski J.M. Testing seismic amplitude source location for fast debris-flow detection at Illgraben, Switzerland // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2017, 17.

Данные инструментального контроля аварийных зон хвостохранилища Тырныаузского горно-обогатительного комбината

А.Х. Шерхов

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, fff.ddd.11@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты сопоставительного анализа данных разновременных обследований потенциально опасных объектов Тырныаузского хвостохранилища, полученных с применением беспилотного летательного аппарата в 2021–2024 гг. Определяется динамика пространственно-временных изменений аварийного участка комплекса гидротехнических сооружений за указанный период. Представлены общие выводы, даны соответствующие рекомендации.

Ключевые слова: *хвостохранилище, беспилотный летательный аппарат, селевой поток, оползень, ортофотоплан, плотина*

Ссылка для цитирования: Шерхов А.Х. Данные инструментального контроля аварийных зон хвостохранилища Тырныаузского горно-обогатительного комбината. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 407–413.

Instrumental monitoring data of the emergency zones of the tailings dam of the Tyrnyauz mining and processing plant

A.Kh. Sherhov

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, fff.ddd.11@mail.ru

Annotation. The article presents the results of a comparative analysis of data from multi-time surveys of potentially dangerous objects of the Tyrnyauz tailings dam obtained using an unmanned aerial vehicle in 2021–2024. The dynamics of spatial and temporal changes in the emergency section of the complex of hydraulic structures for the specified period is determined. General conclusions are presented, and relevant recommendations are given.

Key words: *tailings dump, unmanned aerial vehicle, debris flow, landslide, orthophotoplan, dam*

Cite of this article: Sherhov A.Kh. Instrumental monitoring data of the emergency zones of the tailings dam of the Tyrnyauz mining and processing plant. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 407–413.

Ведение

На сегодняшний день, в горной и высокогорной зонах, неуклонно растет количество природных явлений, представляющих явную или потенциальную опасность для селитебных территорий. К таковым можно отнести все многообразие негативных склоновых и русловых процессов: нежелательные отложения морены на языках отступающих ледников, новообразованные селевые очаги, оползни и т.п. Ухудшение ситуации вызвано нарушением устоявшегося баланса температуры и влажности, что, в свою очередь, связано, по-видимому, с климатическими изменениями. В этой связи

возникают проблемы с, расположенными в горах, промышленными объектами второй половины прошлого столетия рассчитывавшимися исходя из актуальных, на тот момент, природно-климатических условий. Так, источником повышенного техногенного риска стало заброшенное хвостохранилище Тырныаузского горно-обогатительного комбината (ТГОК), запроектированное в 1960-х гг. в устье реки Гижгит, не являвшейся на тот момент селеносной. Однако с начала 2000-х гг. в русле данной реки фиксируются неоднократные значительные селепроявления, что в корне меняет ситуацию, поскольку и без того обветшавшие и по большей части не работающие гидротехнические сооружения (ГТС) хвостохранилища могут оказаться не способны обеспечить безопасное хранение 118 млн м^3 высокотоксичных отходов. Обстановка, сложившаяся в текущий момент, на хвостохранилище ТГОК детально описана многими авторами [*Боритников, 2013; Гегиев, 2018; Запорожченко, 2004; Запорожченко и др., 2019а, 2019б; Запорожченко и Докукин, 2019; Голосов, 2024; Шерхов, 2022*], здесь же отметим лишь что развитие событий по негативному сценарию грозит катастрофическими последствиями колоссальных масштабов. Таким образом, постоянный мониторинг объектов повышенной угрозы техногенного, а равно и природного характера, несомненно, является актуальной задачей. Целью настоящей работы являлось определение количественных значений пространственно-временных изменений морфометрических параметров сегментов ландшафта ГТС ТГОК, характеризующихся очевидными предпосылками возникновения чрезвычайных ситуаций, с применением современных технических средств. Представленная работа проводилась в рамках выполнения НИТР 6.3.2 Росгидромета «Разработка и совершенствование методов мониторинга селей и горных ледников в предгорной и высокогорной зонах»

Краткий обзор проблемы

Уже более 20 лет комплекс ГТС Тырныаузского хвостохранилища является объектом пристального наблюдения специалистов ФГБУ «ВГИ» и других профильных государственных структур. Основной проблемой данного объекта, помимо крайней степени запущенности всех элементов хвостохранилища, является адаптация системы водоотводных сооружений к изменившимся условиям, т.е. обеспечение безопасного пропуска реки Гижгит в селевом режиме. С этой целью в 2003 г., по проекту «Севкавгипроводхоз» было предпринято строительство открытого водоотводного канала справа от тела основной плотины и отсечной дамбы для отвода воды в случае аварийного переполнения основного водоёма – отстойника которое не было завершено. Некоторые участки данных объектов выполнены с огрехами, последствия которых вызывают опасения в плане реализации сооружениями своего предназначения [*Запорожченко и др., 2019а, 2019б; Запорожченко и Докукин, 2019; Шерхов, 2022*]. В данной работе приводится сопоставительный анализ результатов высокоточной сьемки БПЛА этих компонентов ГТС ТГОК в 2021 и 2024 г.

Методы

Принимая во внимание удаленность и труднодоступность территорий наблюдения, комплексный мониторинг горных и высокогорных ландшафтов, помимо натурных обследований, подразумевает использование данных космоснимков различной степени разрешения и результатов аэрофотосъёмки вертолетных облетов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [*Ерофеев, 2018; Коновалова, 2010*]. Поскольку в современных реалиях многие международные сервисы доступа к спутниковой информации закрыты для российского пользователя, получение космоснимков необходимого разрешения и частоты не всегда возможно и в целом все более затруднительно. Наиболее соответствующим решению поставленных задач, в нашем случае, представляется аэрофотосъемка с применением БПЛА. Высокоточная съемка ландшафта исследуемого участка поверхности позволяет получить, созданное на основе перекрывающихся снимков с БПЛА, цифровое ортотрансформированное

изображение местности – ортофотоплан. Подобные цифровые изображения местности, с точной привязкой объектов в заданной системе координат, практически лишены искажений и могут быть выполнены с высоким пространственным разрешением. Таким образом, достигается уровень детализации, достаточный для проведения сопоставительного анализа разновременных снимков с целью получения максимально достоверных данных о текущей динамике развития опасных склоновых и русловых процессов [*Бляхарский, 2019; Воскресенский, 2018*]. Съемка производилась БПЛА «DJI Mavic Air 2», дальнейшая цифровая обработка натурных материалов проводилась с использованием программного обеспечения Agisoft Metashape Professional.

Данные

В силу того, что пропускная способность водоотводного тоннеля хвостохранилища изначально не была рассчитана на пропуск потока в селевом режиме, наиболее эффективным решением проблемы безопасного пропуска селепроявлений р. Гижгит, по мнению ведущих специалистов [*Запорожченко и др., 2019а, 2019б; Запорожченко и Докукин, 2019; Шерхов, 2022*], являлось сооружение аварийного открытого водоотводного канала, входной створ которого расположен по правому борту плотины, на выходе с пляжа водоема-отстойника. Такой канал, протяженностью 1,6 км. и с расчетным расходом 0,1% обеспеченности 245 м^3/с, был построен в 2003 г. В настоящей работе представлены результаты инструментального мониторинга проблемных участков данного гидротехнического сооружения по результатам сьемки БПЛА в 2021–2024 гг.

По материалам обработки цифровой съемки потенциально аварийных участков ГТС хвостохранилища, выявлено, что на участке пляжа перелив с озера в сторону аварийного водосброса по глубине отличается от направления дороги всего на 1 м. То есть поток, с большой долей вероятности может выйти на плотину хвостохранилища по дороге. Тем более, что пригребневой рельеф имеет небольшой выступ и на этом месте вода равномерно будет течь как в сторону канала, так и в сторону дороги. Такое положение, в том числе, обусловлено и тем, что рассматриваемый участок целенаправленно разравнивался под строительство объектов туристического сервиса, поскольку территория, прилегающая к водоему-отстойнику, несмотря на все предупреждения, в последние годы активно осваивается.

Ситуация усугубляется отсутствием участка отсечной дамбы, построенной в 2003 г. для отвода воды в случае аварийного переполнения основного водоёма – отстойника, справа, при выходе на пляж хвостохранилища, обеспечивающего основательное сопряжение дамбы и русла канала. Очевидно, что при разработке вариантов отвода потока в сторону от плотины необходимо провести работы на участке пляжа.

Вследствие подрезки склона при его строительстве, в верхней части канала образовался оползневой массив, сползающий в русло с угрозой его полного перекрытия на протяжении 75 м (рис. 1, 2).

Более детальное рассмотрение параметров данного оползня и вариантов последствий перекрытия им аварийного водоотводного канала приводится в предыдущих работах авторов [*Шерхов, 2022*] В данном же исследовании ставилась задача определения динамики подвижек тела оползневого массива за период 2021–2024 гг. Сопоставление результатов обработки материалов, полученных в ходе разновременной съемки этого участка с применением БПЛА, показывает практически полную их идентичность, что свидетельствует об отсутствии пространственно-временных изменений за указанный период. Это, в свою очередь, позволяет обоснованно характеризовать нынешнее состояние оползневого массива как стабильное в данный момент.

Рис. 1. Оползневой массив в русле аварийного водоотводного канала. Ракурс снизу-вверх от автодорожного моста, 2021 г.

Рис. 2. Оползневой массив в русле аварийного водоотводного канала. Ракурс сверху-вниз, выше автодорожного моста, 2024 г.

Существенной причиной нарушения равновесия горных пород также является значительная крутизна склона. Вычисленная, по цифровой модели рельефа исследуемого участка, крутизна оползневого склона равна 19°, что по некоторым данным [*Бевз, 2015*] соответствует коэффициенту устойчивости примерно равному единице, т. е. является пороговым значением предельного равновесия склона.

С целью оценки его работоспособности ведется мониторинг открытого аварийного водоотводного канала на всем протяжении русла, которое во многих местах частично завалено грунтом и скальными обломками (рис. 3, 4).

Постепенное заполнение русла канала осыпающимися обломками, помимо снижения его пропускной способности, ведет к накоплению селеобразующего материала. Сопоставление цифровых моделей местности в границах аварийного водосброса (полигонах) позволяет сравнить изменения объемов накоплений в русле канала и численно оценить динамику его засорения (таблица 1).

Рис. 3. Русло аварийного водоотводного канала ниже оползневого участка, 2024 г.

Рис. 4. Основной сегмент русла аварийного водоотводного канала. Фото с БПЛА, 2024 г. (Акаев А.Р.)

Таблица 1. Внутренние объемы русла открытого аварийного канала в границах обозначенного полигона

Внутренний объем русла аварийного канала	
2021 г.	2024 г.
92 622 м³	93 293 м³

Согласно результатам расчетов, в русле водоотводного канала, за период 2021–2024 гг. не произошло сколь-нибудь существенных изменений объема. Разница значений внутреннего объема русла канала едва превышает 1%, причем в сторону увеличения со временем. Данное расхождение в значениях безусловно укладывается в диапазон погрешностей и скорее всего вызвано разницей в объеме растительности в русле на

моменты проведения съемок, поскольку при съемке, обработке данных и оцифровке, поросль принимается программой за рельеф [*Ерофеев, 2018; Бляхарский, 2019*].

Анализ

Чтобы обеспечить, безопасный пропуск воды в стороне от тела плотины аварийным водосбросом и предотвращении выхода потока на пляж хвостохранилища, необходимо организовать полноценный прием потока входным оголовком канала. В настоящий момент возможность аварийного водосброса сработать должным образом вызывает сомнения, так как сечение входного створа канала не имеет явно выраженной конфигурации, а разница по высоте рельефа с уровнем грунтовой дороги ведущей на пляж, составляет всего 1 м. т.е. минимальна. Такое положение чревато выходом потока на поверхность пляжа отходов, размывом и переувлажнением складированной массы с дальнейшим размывом каскада дамб, составляющих тело основной плотины.

Анализ пространственно-временных изменений, по результатам профильной обработки материалов разновременной сьемки БПЛА 2021–2024 гг. показывает отсутствие каких-либо подвижек оползневого массива в верхней части открытого аварийного водоотводного канала. Однако, это ни в коей мере не умаляет опасности сложившегося положения, ибо значительная часть русла канала по-прежнему завалена оползшим грунтом на протяжении 75 м., к тому же остается высокая вероятность дальнейшего схода оползня в случае переувлажнения грунта, вследствие продолжительных обильных осадков, или минимальной сейсмической активности. Перекрытие канала в этом месте грозит выходом потока влево, на правую оконечность каскада плотины. По результатам аналитической обработки материалов разновременной сьемки за указанный период, накопления грунтово-осыпных и осколочных масс в русле открытого аварийного водоотводного канала, на всем его протяжении, не выявлено. Незначительные расхождения значений внутреннего объема русла за 4 года, являются, по всей видимости, погрешностью, относимой за счет некоторых технических аспектов процесса съемки и компьютерной обработки получаемых данных. Необходима расчистка русла и проведение противооползневых мероприятий.

Выводы

В силу запущенности и не соответствия складывающейся, на сегодняшний день, природно-климатической обстановке, комплекс гидротехнических сооружений заброшенного Тырныаузского хвостохранилища нуждается в постоянном наблюдении специалистов. В нынешней ситуации, открытый аварийный водоотводный канал является единственным элементом ГТС хвостохранилища способным, в теории, предотвратить катастрофу колоссальных масштабов в случае развития событий по негативному сценарию.

По итогам работы следует отметить высокую эффективность данной методики ведения мониторинга. Проведение разновременных рекогносцировочных обследований небольших (несколько квадратных километров) территорий с применением БПЛА позволяет в оперативном режиме и с высокой точностью отслеживать динамику различных геоморфологических и гидрологических явлений. Результаты обработки полученных данных позволяют количественно оценить динамику пространственно-временных изменений объектов мониторинга, вплоть до расчета объема наносов, оползневого тела или объема вынесенного грунта в результате эрозионных или селевых процессов. На их основе возможна разработка адекватных оперативных мероприятий, проектирование защитных сооружений и др., в целях предотвращения или минимизации негативного воздействия опасных природных процессов на обследуемой территории.

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. Захороненные промышленные отходы Тырныаузского вольфрамово-молибденового комбината // Вестник Владикавказского научного центра, 2013, 13(1): 41–53.

Бляхарский Д.П., Волгушева Н.Э., Казаков Э.Э. Мониторинг ледников в сезон абляции с использованием беспилотных аэрофотосъемочных систем на примере ледников Потанина и Александры (массив Табын-Богдо-ола, Монголия) // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019, 63(2): 168–179.

Бевз В.Н., Горбунов А.С. Динамическая геоморфология: Оползневые процессы и их региональные особенности. Учебно-методическое пособие для вузов. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2015, 43 с.

Воскресенский И.С., Сучилин А.А., Ушакова Л.А., Шафоростов В.М., Энтин А.Л. Применение БПЛА для мониторинга оползневых и эрозийных процессов (на примере центра русской равнины) // Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 2018, с. 42–47.

Гегиев К.А., Шерхов А.Х., Гергокова З.Ж., Анахаев К.К., Экологические проблемы Тырныаузского хвостохранилища на реке Гижгит // Вестник МГСУ, 2018, 13(11): 1386–1394.

Голосов В. Н., Деркачева А. А., Гуринов А.Л., Юдина В.А. Бассейн р. Гижгит (Северный Кавказ): селевая опасность и риски для хвостохранилища ТГОК. Отчет о НИР. 2024, 73 с.

Ерофеев А.А., Ябаркин А.Ю., Еремеев В.Ф. Первые результаты аэрофотосъемки горно-ледникового бассейна Актру с использованием БПЛА // В сб.: Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. Материалы Всероссийской научно-практической конференции (Иркутск, 22–23 мая 2018 г.). Иркутск, 2018, с. 68–70.

Запорожченко Э.В. Река Гижгит — источник паводковой опасности для сооружений Тырныаузского горно-обогатительного комбината (ТГОК) // Вопросы повышения эффективности строительства. Сборник трудов конференции. Нальчик, вып. 2, 2004, с. 159–169.

Запорожченко Э.В., Докукин М.Д. Об угрозе разрушения Тырныаузского хвостохранилища на р. Гижгит в Кабардино-Балкарской Республике // ГеоРиск, 2019а, XIII(1): 72–85.

Запорожченко Э.В., Докукин М.Д. 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: 2019б, p. 301–310.

Запорожченко Э.В., Докукин М.Д. Тырныаузское хвостохранилище – объект повышенного экологического риска. Устойчивое развитие горных территорий Кавказа. Коллективная монография. Том II. РАН. Москва, 2019, с. 224–237.

Коновалова Т.И. Геосистемное картографирование. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010, 186 с.

Шерхов А.Х., Гергокова З.Ж. Оценка актуального состояния некоторых компонентов комплекса гидротехнических сооружений хвостохранилища Тырныаузского горно-обогатительного комбината // Природообустройство, 2022, 4: 100–106.

Реконструкция катастрофического селевого события ≈ 1200 лет назад в бассейне р. Мзымта

С.В. Шварев[1,2], С.В. Харченко[1,3]

[1]Институт географии РАН, Москва, Россия, shvarev@igras.ru

[2]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, shvarev@ifz.ru

[3]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. В бассейне среднего течения р. Мзымта изучены следы грандиозного селя, отложения которого сформировали днище долины р. Бешенка и террасовидную поверхность по правому борту р. Мзымта, ныне занимаемые пос. Красная Поляна. По результатам анализа материалов воздушного лазерного сканирования, крупномасштабных топографических карт и глобальных цифровых моделей рельефа реконструирована поверхность селевой террасы, конуса выноса в устье р. Бешенка и контуры подпрудного озера выше по течению р. Мзымта протяженностью около 6–8 км. С использованием методов картографического моделирования и морфометрического анализа выполнена реконструкция доселевых долин рр. Бешенка и Мзымта и получен диапазон оценок объемов селевых отложений и осадков подпрудного озера, мощности конуса выноса. Объем селевого конуса в устье р. Бешенка и шлейфа ниже по долине р. Мзымта оценен в 90,2 млн м^3 (из них непосредственно в границах конуса выноса – 50–55 млн м^3), при площади заполнения 2,6 км^2 и средней мощности 34 м. Сравнение фактического профиля русла р. Мзымта с реконструированным доселевым на основе нелинейной аппроксимации показывает аномалии высот на протяжении 5 км вниз по течению от селевой плотины, где они связаны непосредственно с селевым шлейфом, и 8 км вверх, где их происхождение объясняется аллювиально-озерными осадками подпрудного озера. Максимальное отклонение расчетных отметок высот для экспоненциального профиля от фактического русла р. Мзымта составляет 75 м на пересечении с осевой частью конуса выноса, что в совокупности с видимой высотой конуса определяет максимальную мощность селевых отложений более 100 м. Возраст катастрофического события устанавливается по захороненной в селевой матрице органике (1200 ± 60 кал. л. н.).

Ключевые слова: *гигантский сель, конус выноса, подпрудное озеро, палеореконструкция, морфометрический анализ*

Ссылка для цитирования: Шварев С.В., Харченко С.В. Реконструкция катастрофического селевого события ≈ 1200 лет назад в бассейне р. Мзымта. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 414–425.

Reconstruction of a catastrophic debris flow event ≈ 1200 years ago in the Mzymta River basin

S.V. Shvarev[1,2], S.V. Kharchenko[1,3]

[1]Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, shvarev@igras.ru

[2]Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, shvarev@ifz.ru

[3]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. This study investigates evidence of a major debris flow in the middle reaches of the Mzymta River basin. The deposits from this event formed the valley floor of the Beshenka River and a terrace-like surface on the right bank of the Mzymta River, which is now the site of the Krasnaya Polyana settlement. By analyzing airborne laser scanning (LiDAR) data, large-scale topographic maps, and global digital elevation models, we reconstructed the surface of the debris-flow terrace, the alluvial fan at the mouth of the Beshenka River, and the outline of an approximately 6–8 km long dammed lake that formed upstream on the Mzymta River. Using cartographic modeling and morphometric analysis, we reconstructed the pre-event topography of the Beshenka and Mzymta river valleys. This allowed us to estimate the volume of the debris flow deposits and the sediments of the dammed lake, as well as the thickness of the alluvial fan. The total volume of the debris flow fan at the mouth of the Beshenka River and the downstream deposit trail in the Mzymta valley is estimated at 90.2 million m³. Of this total, 50–55 million m³ are contained within the fan itself. These deposits cover an area of 2.6 km² with an average thickness of 34 m. A comparison of the modern channel profile of the Mzymta River with the reconstructed pre-event profile, based on non-linear approximation, reveals elevation anomalies extending 5 km downstream from the debris flow dam. These anomalies are directly linked to the debris flow trail. Upstream, over a distance of 8 km, the anomalies are attributed to the alluvial-lacustrine sediments of the dammed lake. The maximum deviation of the calculated exponential profile from the actual riverbed reaches 75 m at the intersection with the axial part of the alluvial fan. This deviation, combined with the fan's visible height, indicates a maximum thickness of the debris flow deposits exceeding 100 m. The age of this catastrophic event, determined from organic material buried within the debris flow matrix, is 1200 ± 60 cal. yr BP.

Key words: *giant debris flow, alluvial fan, dammed lake, paleoreconstruction, morphometric analysis*

Cite of this article: Shvarev S.V., Kharchenko S.V. Reconstruction of a catastrophic debris flow event ≈ 1200 years ago in the Mzymta River basin. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 414–425.

Введение

Долина р. Мзымта характеризуется весьма активным развитием современной селевой и оползневой деятельности [*Казаков и др., 2013; Осипов и др., 2013а*]. Интенсификация процессов до уровня, в несколько раз превышающего природный фон, в настоящее время связана с масштабным освоением территории [*Шварев и др., 2021; Derkacheva et al., 2024*]. Очевидна и природная предрасположенность территории к интенсивным гравитационным, флювиально-гравитационным, флювиальным процессам и их парагенезу. Этому способствуют «благоприятные» геоморфологические, гидрометеорологические, геологические и гидрогеологические условия [*Осипов и др., 2013б*] и, прежде всего, сочетание структурно-литологических факторов – податливого коренного субстрата переслаивающихся, тектонически смятых и раздробленных осадочных образований с существенной глинистой составляющей, с набором способствующих развитию процессов морфометрических характеристик [*Харченко, Шварев, 2020*].

Помимо «нормального», хотя и интенсифицированного фона природно-антропогенного морфогенеза на территории исследований и в соседних районах наблюдаются аномальные по величине проявления экзогенных процессов, прежде всего, оползней и селей, в качестве триггера которых «работает» сильная сейсмичность территории, потенциально достигающая 9 баллов и связанная с развитием здесь активных сейсмогенерирующих разломов. К северу от хр. Аибга в районе субширотного отрезка долины реки расположен так называемый Мзымтинский тектонический узел [*Осипов и др., 2013а*], образованный несколькими пересекающимися активными разломами (с востока на запад): Бекишейским и Аибгинским, обрамляющими северный

и южный борта долины на субширотном отрезке и Мзымтинским северо-восточного простирания, определяющим соответствующий разворот долины Мзымты в антикавказском направлении к югу [*Овсюченко и др., 2016*]. К этому узлу приурочен, например, аномально крупный оползень (2,5 х 1,7 км, мощностью до 200 м) на склоне хр. Аибга, сформированный в позднем плейстоцене и резко выделяющийся на фоне множества прочих оползней, группирующихся в 5 генераций, четыре из которых отнесены к голоцену по морфологическим признакам [*Осипов и др., 2013б*]. Инструментальное датирование как самих оползневых образований, так и, непосредственно, сейсмогенерирующих разломов, позволило выделить уточнить возраст двух последних генераций в интервалах 4,0–3,1 кал. тыс. л.н. 3,3–0,6 кал. тыс. л.н. и вполне определенно соотнести их с сейсмическими событиями [*Овсюченко и др., 2016*]. Этот факт определяет сейсмичность в качестве основного триггера оползневой деятельности, как аномальных величин, так и массового развития. При этом, группировки дат оставляют вполне вероятной возможность четырех отдельных эпизодов сейсмогенной активизации в рамках этих двух интервалов: 1) 4,0–3,6; 2) 3,3–3,1; 3) 1,3–0,8 и 4) 0,8–0,6 кал. тыс. л.н. Закономерная приуроченность крупных оползневых, обвально-оползневых образований к отдельным активным разломам наблюдается не только в Мзымтинском узле, но и в других частях бассейна р. Мзымта, где наиболее крупные образования полностью или частично перекрывали долины, как, к примеру, крупный оползне-обвал в районе пос. Монастырь на пересечении с долиной р. Мзымта Кепшинского хребта и Монастырского активного разлома [*Овсюченко и др., 2013*].

Кроме крупных оползней и оползней-обвалов пространственной приуроченностью к активным разломам Мзымтинского узла обладают и селевые образования, отчасти непосредственно пространственно совпадающие с разломами [*Осипов и др., 2013б*], отчасти вызванные сильными сотрясениями и только тяготеющие к сейсмическим очагам. Крупнейшие из них имеют смешанный генезис, как, к примеру, гигантский оползень, сопряженный с глыбово-грунтовым потоком (селем) в долинах ручья Пслушонок и р. Пслух. Общая протяженность этого образования достигает 7,4 км, а расчетная мощность – 70 м [*Шварев, 2015*]. Сингенетичное образование, сформированное за счет трансформации оползня в мощный сель, вобрало в себя материал множества относительно небольших оползней и селей синхронно сошедших с бортов долин ручья и реки. Судя по захороненной в селевом шлейфе р. Пслух органике (датировки растительного детрита с глубины 7 и 12 м (1120+/-60 л.н. (ИГАН 3607) и 1280+/-60 л.н. (ИГАН 3612) [*Шварев, 2015*] в калиброванном исчислении, соответственно, 1155–926 и 1174–1298 кал. л.н.) его образование можно соотнести с эпизодом сейсмогенной активизации 1,3–0,8 кал. тыс. л.н. [*Овсюченко и др., 2016*].

Ключевой интерес для палеогеографических и палеосейсмических реконструкций исследуемой территории представляют крупнейшие гравитационные и флювиально-гравитационные образования, перекрывавшие днища долин рек Мзымтинского бассейна с образованием подпрудных бассейнов и резким изменением гидрологического режима и интенсивности морфогенеза. Эти образования являются свидетельствами наиболее сильных сейсмических событий, являясь частью катастрофических перестроек рельефа, синхронных с землетрясениями и провоцирующими последующие катастрофы уже экзогенного характера из-за прорыва подпрудных бассейнов. Анализ материалов геоморфологического картографирования разных лет [*Кочетов, 1970; Шварев, 2009*] и специальных сейсмотектонических, палеосейсмических и инженерно-геологических исследований [*Овсюченко и др., 2013; Осипов и др., 2013а,б; Шварев, 2015*] обнаруживает в бассейне р. Мзымта 10 потенциальных участков оползневых и селевых запруд (таблица 1, рис. 1).

Два крупнейших образования из этого перечня связаны с гигантскими селями и обладают пространственной близостью и сходной морфологией. Эти участки морфологически выражены протяженными, более 4–5 км, селевыми террасами в днищах относительно крупных долин (ручьев Пслушонок и Бешенка), замыкающимися в дистальной части конусами выноса – шлейфами, вытягивающимися по приемным долинам (рек Пслух и Мзымта, соответственно), заведомо свидетельствуя о перекрытии речного стока в момент формирования.

Таблица 1. Потенциальные участки развития подпрудных бассейнов в бассейне р. Мзымта.

№ участка	Экзогенный агент формирования запруды	Высота русла перекрытого водотока (н.у.м.)	Высота плотины, м	№ потенциального седиментационного бассейна	Высота зеркала подпрудного озера (н.у.м.)	Площадь бассейна (км^2)
1	Оползневое тело	120	20–30	1	140–150	0,7–0,8
2	Обвалы с участием оползней, отседания и селей	170	20–30	2	190–200	2300–2400
3	Селевые шлейфы, оползневое тело	230	5–10	3	235–240	0,5–0,6
4	Селевые шлейфы	470	40–50	4	510–520	2100–2200
5	Селевой шлейф	1200	5–10	5	1205–1210	0,4–0,5
6	Оползневое тело	280	10–20	6	290–300	0,1–0,2
7	Оползневые тела	380	50–100	7	420–480	0,08–0,09
8	Селевой шлейф	500	40–50	8	540–550	0,07–0,08
9	Селевой шлейф	700	40–50	9	740–750	0,08–0,09
10	Селевой шлейф	990	20–30	10	1010–1020	0,3–0,4

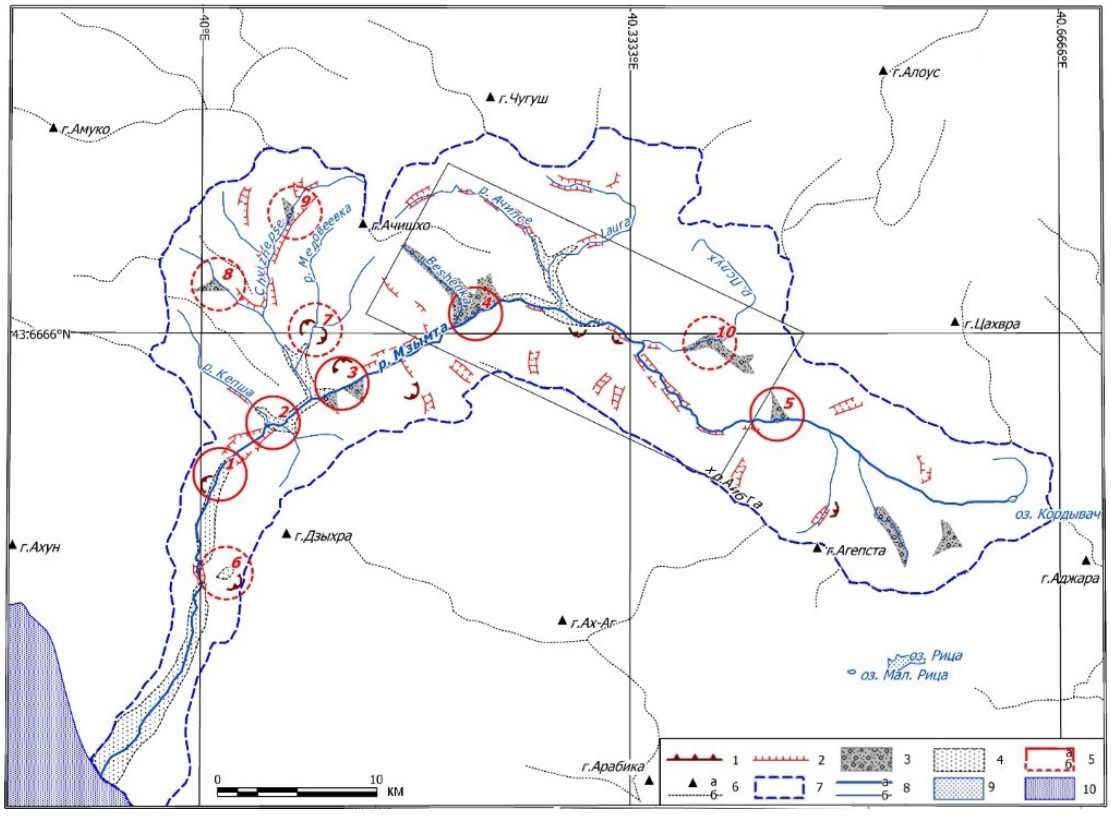


Рис. 1. Потенциальные участки оползневых и селевых плотин и подпрудных бассейнов. Основные зоны катастрофических проявлений экзогенных процессов в бассейне р. Мзымты (с использованием [*Кочетов, 1970*]: 1 – оползневые уступы; 2 – эрозионные уступы; 3 – пролювиально-селевые шлейфы и конусы; 4 – аккумулятивные террасы; 5 – потенциальные участки запруд: а – в русле р. Мзымты; б – в руслах притоков; 6 – элементы орографии: а – горные вершины; б – хребты; 7 – границы бассейна р. Мзымты; 8 – элементы речной сети: а – русло р. Мзымта; б – русла основных притоков; 9 – озера; 10 – Черное море

Возникает закономерный вопрос, не являются ли эти два крупнейших образования следами единого, сильнейшего в бассейне р. Мзымта флювиально-гравитационного катастрофического события, спровоцированного мощным землетрясением? Поскольку один из этих гигантских оползне-селевых комплексов в долине р. Пслух был охарактеризован ранее [*Шварев, 2015*], то задачей исследования явилась реконструкция комплекса в долине руч. Бешенка: детальное исследование морфологии комплекса, реконструкция порогов стока и параметров потенциального подпрудного озера – уровня, глубины, объема; оценка перемещенных масс и объемов с учетом видимых аккумулятивных и денудационных форм; расчет доселевых параметров рельефа и соответствующих им объемов заполнения; оценка современного вреза р. Мзымта в аккумулятивные образования селевого шлейфа и озерных осадков; определение возраста катастрофического события.

Методы и материалы

Современное состояние шлейфа и конуса выноса, построение 3D-моделей, продольных и поперечных профилей выполнено с использованием материалов воздушного лазерного сканирования, осуществленного НИПИ «ИнжГео» (г. Краснодар) в 2006 г. Реконструкция подпрудно-селевого комплекса осуществлено с использованием данных топографических карт, цифровой модели рельефа на базе данных SRTM и космических снимков высокого разрешения (сервисы GOOGLE и Яндекс). Для расчетов доселевого рельефа использовано программное обеспечение SAGA GIS. Оценка возраста проведена на основе анализа образцов захороненной органики в теле конуса выноса, отобранных в результате полевых исследований и расчисток в эрозионном врезе р. Мзымта в осевой части конуса выноса. Возраст образцов установлен по стандартной методике в лаборатории СПбГУ.

Результаты

Строение конуса выноса

Анализ материалов воздушного лазерного сканирования, полученного перед строительством объектов Олимпиады-2014, позволил установить основные параметры дистальной части конуса выноса и соотношение его с долинными формами р. Мзымта (рис. 2).

Строение продольных профилей дистальной части конуса выноса позволяет утверждать, что конус выноса полностью перекрывал днище долины р. Мзымта с расположением дистальной части первичной поверхности на высотах от 485 м в наиболее верхней по течению р. Мзымта точке (профиль 1–2), до 475 м в центральной части (профиль 1–1) и 465 м в нижней части (профиль 1–3). Фрагменты отчленных руслом р. Мзымта частей конуса по левому борту долины р. Мзымта местами прослеживаются в виде ступеней со слабозапрокинутой в сторону левого борта поверхностью (профиль 1–3). Врез долины р. Мзымта в пределах конуса выноса имеет трапециевидную форму поперечного профиля с плоским днищем шириной 70–90 м и крутыми бортами, симметричными по уклонам и осложненными сегментами ступеней, расположенных на высоте 10–20 м над днищем долины фрагментарно по обоим бортам, закономерно снижающимся вниз по течению. Глубина вреза р. Мзымта в конус выноса нарастает от 40 м в верхней по течению части до 55–60 м вниз по течению.

На поперечных профилях также наблюдается врез долины р. Мзымта с плоским днищем и единственной ступенью, фрагментарно выраженной на бортах и выработанной в эрозионном уступе дистальной части конуса. Продольный уклон днища долины р. Мзымта устойчиво сохраняется на протяжении всего участка пересечения конуса выноса. Его прямолинейность косвенно указывает на неполную выработанность продольного профиля.

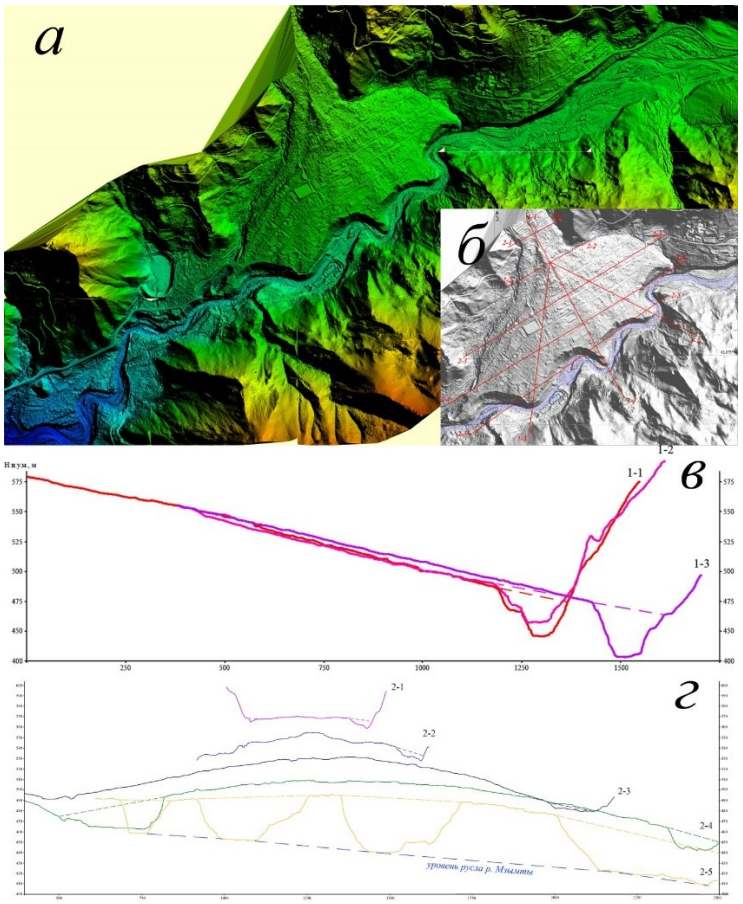


Рис. 2. а – Цифровая модель рельефа селевого конуса выноса на участке № 4; б – расположение профилей в пределах конуса выноса; в – продольные профили; г – поперечные профили

Реконструкция подпрудного бассейна

Высота сформированного порога стока для р. Мзымта при перекрытии русла конусом определяется в 485 м н.у.м., а максимальная глубина вреза, образовавшегося при переливе подпрудного озера – в 60 м. По-видимому, глубинное врезание р. Мзымта было неравномерным и разделяется на 2 этапа, граница которых маркируется террасовидной эрозионной ступенью на бортах долины и выработанной в отложениях конуса выноса.

Исходя из приведенных параметров можно реконструировать ситуацию с максимальным развитием подпрудного бассейна (рис. 3). Реконструируемый подпрудный бассейн имел протяженность около 6 км и, по-видимому, замыкался в районе устья р. Ачипсе (Лаура). Ширина озера достигала 700–900 м, а максимальная глубина в момент прорыва 30–35 м (вблизи подпрудной дамбы). В период существования озерного бассейна в его верхней части происходило накопление аллювиальных осадков, выносимых из долин Мзымта и Лауры. Об этом можно судить по характерной веерообразной форме и пологому уклону террасовидной поверхности по правому борту р. Мзымта, сохраняющейся на протяжении около 1,5 км нижа устья р. Ачипсе.

Реконструкция доселевого рельефа и объемов селевых отложений

Объем полой формы долины р. Бешенка рассчитывался по следующему принципу. Для верхней точки селевого конуса (место сочленения долины Бешенки и Мзымты) был оконтурен водосбор, с которого потенциально могло поступать твердое вещество во время катастрофических селей / селя. Площадь водосбора составила 18,2 км^2. Из ЦМР

по линии водосбора были извлечены отметки гребней, по которым простой триангуляцией восстановлена условная поверхности прямого юго-восточного склона г. Ачишхо. Затем для той части площади бассейна, где современные высоты по ЦМР ниже реконструированной поверхности, подсчитывались объемы удаленного вещества. Безусловно, этот подход груб, он предполагает отсутствие отрицательных форм любого генезиса, осложняющих склон, но позволяет получить максимальную, верхнюю оценку комплексной денудации в границах водосбора (если принять, что водоразделы понижаются несоизмеримо медленнее склонов и днища долины). Средний слой сноса по площади бассейна Бешенки составил 246 м, а общий объем – 4,46 км^3.

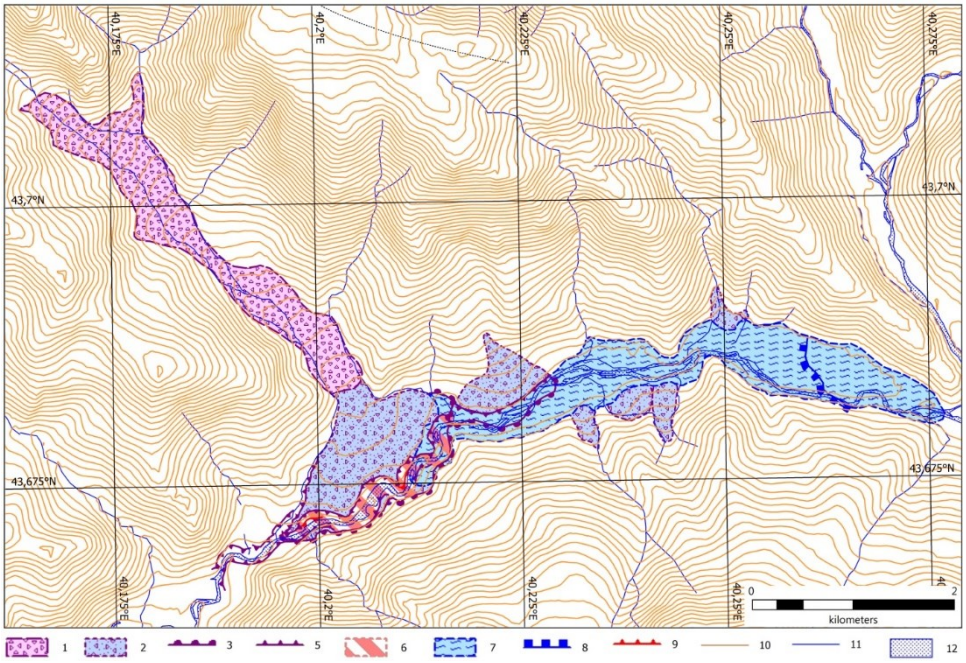


Рис. 3. Схема озерно-селевого комплекса в районе пос. Красная Поляна: 1 – селевая терраса; 2 – пролювиально-селевые конусы выноса; 3 – реконструируемая фронтальная часть конуса; 5 – эрозионный уступ в теле конуса выноса, относящийся к первому этапу врезания; 6 – врез р. Мзымта в конус выноса; 7 – реконструируемый подпрудный бассейн; 8 – фронтальная часть аллювиального конуса выноса, предположительно развивавшегося в период существования подпрудного озера; 9 – эрозионный уступ р. Мзымта, относящийся ко 2-му этапу врезания; 10 – изогипсы (по данным SRTM); 11 – ручьи; 12 – крупные реки

С подсчетом объемов селевых аккумулятивных тел ситуация обстоит сложнее, т.к. не известно положение их ложа. Этот подсчет можно осуществить сценарно, при разных вводных характеристиках и получить, тем самым, набор оценок.

Сценарий с минимальной оценкой объема аккумуляции базируется на допущении (недоказанном, а скорее всего и неверном), что после формирования селевого конуса, перекрывшего все днище долины, река «пропилила» всю его толщу и достигла прежнего состояния равновесия продольного профиля. Тогда для оценки положения доселевой поверхности проводятся следующие операции: 1) ручным дешифрированием определяются границы фрагментов конуса выноса, 2) по этим границам из ЦМР удаляется поверхность, отвечающая конусу, но оставляются отметки вдоль тальвега реки, 3) получившая пустота заполняется каким-либо методом интерполяции (расчеты проведены нами в SAGA GIS и R). В силу того, что ни один метод интерполяции не в состоянии строго воспроизвести географически правдоподобную доселевую поверхность, нами применялись разные методы, в итоге был получен диапазон оценок: B-сплайны – 16,3 млн м^3, пошаговый ресемплинг (stepwise resampling) – 17,8 млн м^3, триангуляция – 12,7 млн м^3, сплайны тонких пластин (thin plates splines) – 21,9 млн м^3. Таким образом, оценки аккумуляции 12,7–21,9 млн м^3. В то же время данная оценка не

учитывает, как минимум, объем постселевого эрозионного вреза на конусе. Потенциально возможно до интерполяции маскирование не только сохранившихся фрагментов конуса, но и контура вреза. Однако, при таком подходе теряется информация об отметках тальвега, и интерполяция не может корректно восстановить поверхность.

Разумно предположить, что Мзымта, вероятно, не успела за постселевое время врезаться до прежних уровней и восстановить форму продольного профиля. Для участка русла Мзымты выше и ниже конуса выноса Бешенки (примерно 10–12 км в обе стороны, суммарная длина отрезка русла – 23 км) был построен продольный профиль. Профиль (рис. 4) ясно свидетельствует, что характер его – невыработанный. Ясной связи выпуклых переломов профиля со структурными условиями – не прослеживается. Вероятно, такая форма профиля – следствие заполнения днища селевыми наносами (в створе устья Бешенки, несколько выше и значительно ниже его). По минимумам (низшие отрицательные значения) кривизны профиля определены точки его вогнутых перегибов, т.е. перехода от положительной аномалии высот к нормальной форме профиля. Для части профиля за пределами этой аномалии нелинейной аппроксимацией получено экспоненциальное уравнение формы профиля (достоверность $R^2 > 0{,}99$):

$$Z = -231 + 468 * \exp(2{,}6 \times 10^{-5} \times X), \quad (1)$$

где Z (м) – абсолютная высота; X (м) – длина профиля от нижнего створа; калибруемые коэффициенты:

-231 (м) – абсолютная высота, к которой профиль стремится асимптотически, в случае удачно подобного уравнения аппроксимации и идеализированного выработанного профиля – это базис эрозии;

468 (м) – амплитуда высот по профилю, при его фиксированной длине отвечающая осредненному наклону линии;

$2{,}6\times10^{-5}$ (1/м) – коэффициент, отвечающий кривизне профиля, мера его прогиба.

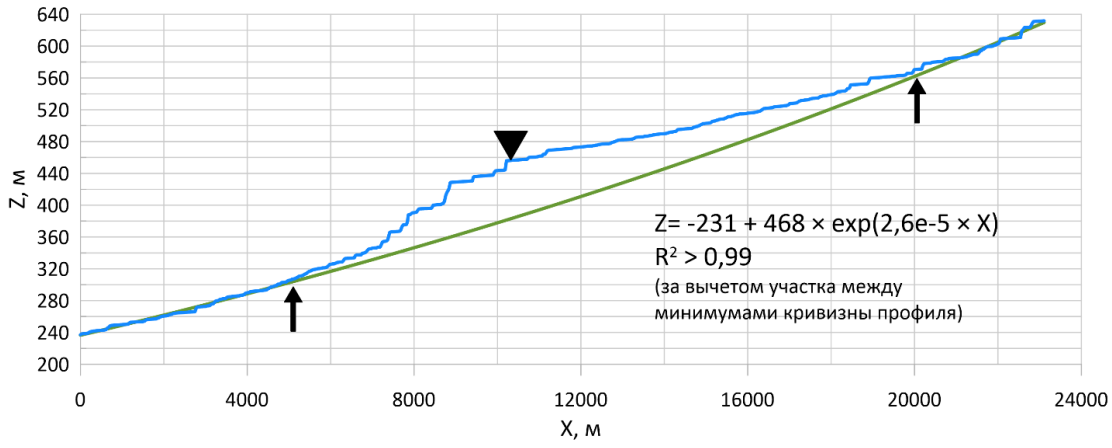


Рис. 4. Продольный профиль тальвега долины р. Мзымты. Синий – современный, зеленый – идеализированный выработанный. Стрелки показывают границы положительных аномалий отметок тальвега. Треугольник – место с наибольшей разницей отметок на двух профилях (положение селевого конуса Бешенки).

Все рассчитанные коэффициенты – статистически значимы, вероятность их случайного характера почти неотличима от нуля ($< 2\times10^{-16}$). Получившаяся отметка базиса эрозии обусловлена тем, что на всем протяжении русла Мзымты (а не на выбранном коротком отрезке) проявляются структурно-геологические отличия, выражающиеся в серии смен генерализованной формы продольного профиля, в частности, резких падениях его уклона вниз по течению.

Сравнивая реконструированный, близкий к экспоненциальному (насколько возможно для рек тектонически активных горных систем) профиль с фактическим, можно оценить аномалии высот днища долины. Они прослеживаются почти на 5 км вниз

по течению. Наибольшая разница между фактическим урезом Мзымты и ожидаемым положением профиля – составляет 75 метров, такие величины характерны как раз для положения селевого конуса (координаты точки 43,67433° с.ш., 40,20667° в.д.). Разумеется, аномалии отметок продольного профиля прослеживаются и вверх по течению, причем почти на 8 км. Мы предполагаем, что небольшая часть этого заполнения долины – селевые наносы Бешенки, но львиная доля – безусловно, озерно-аллювиальные осадки, заполнившие днище в результате подпора долины селевым конусом. Определить конкретные пропорции крайне трудно, а без проведения дополнительных изысканий – вряд ли возможно. Поэтому будем считать, что селевое заполнение днища долины – распространяется от верхней (по течению Мзымты) части конуса и далее вниз по долине.

Расчет объема заполнения осуществляется по тому же принципу, что был описан ранее – из ЦМР удаляется днище долины в границах тыловых швов. На освободившееся место помещаются точки, маркирующие современное положение русла (допущение, не влияющее значительно на итоговые расчетные показатели), с присовокупленными отметками реконструированного профиля. Затем производится интерполяция отметок высот от современных тыловых швов до реконструированного тальвега. Применение триангуляции позволяет получить оценку объема конуса и заполнения ниже по долины в 90,2 млн м^3 (из них непосредственно в границах конуса выноса Бешенки – 50–55 млн м^3), при площади заполнения 2,6 км^2 и средней мощности 34 м. Наибольшая разница между современной и реконструированной поверхностью превышает 100 м у бровки селевого конуса, подрезанного Мзымтой. Общая схема предполагаемого селевого заполнения днища долины Мзымты приведена на рис. 5.

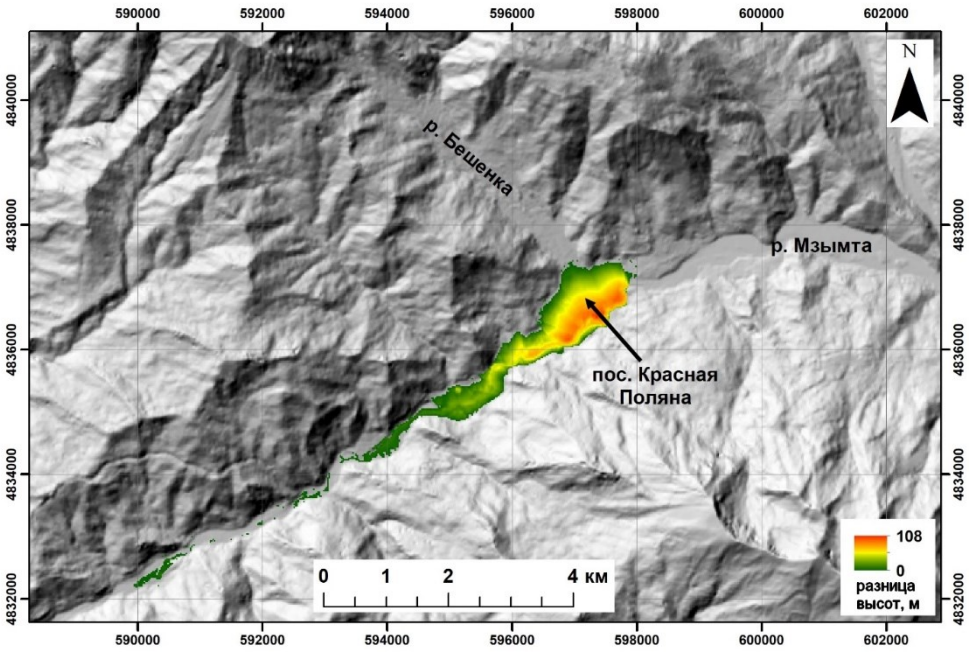


Рис. 5. Схема мощностей заполнения днища долины Мзымты селевыми отложениями, поставляемыми из долины Бешенки. Рельеф по SRTM. Координатная система – UTM 37N.

Возраст события

В дистальной части конуса выноса по правому борту долины р. Мзымта выполнен разрез на бровке эрозионной ступени высотой около 6 м над уровнем реки. Поверхность ступени пологовогнутая, вблизи бровки крутизной 3–5º, выше постепенно увеличивающая крутизну с достижением в верхней части уступа крутизны 30–60º. Террасовидная поверхность сильно обводнена и перекрыта многочисленными оползнями, преимущественно потокового типа.

В разрезе вскрывается трехчленная толща (рис. 6):

А – верхняя часть (0,0–0,9 м) несортированные галька, щебень, гравий в темно-коричневом среднем суглинке, опесчаненном;

Б – средняя часть (0,9–1,3 м) торф, хорошо разложившийся, выдержанной мощностью около 0,5 м, пронизанный корнями растений, темно-коричневого цвета, слабо наклонный к руслу р. Мзымта (3–5º);

В – нижняя часть (1,3–2,4 м (видимая)) несортированный щебень, валуны, дресва в тяжелосуглинистой матрице серого цвета, сильно обводненной, местами палевого, в верхней части рыжего со следами ожелезнения. По разрезу местами встречаются фрагменты растительности.

Рис. 6. Разрез на уступе селевого конуса выноса по правому борту долины р. Мзымта в районе пос. Красная Поляна (участок № 4)

В толще отобраны три образца для радиоуглеродного датирования – в кровле и подошве торфяного горизонта на глубинах 1,2–1,3 м и 1,5–1,6 м и растительный детрит в нижнем слое на глубине около 2,3 м, обработанные в лаборатории СПбГУ (таблица 2).

Таблица 2. Возраст захороненной органики в отложениях селевого шлейфа.

Лаб. номер	Описание	Радиоуглеродный возраст, лет	Калиброваный возраст (календарный), кал.лет*
LU-11199	№ 100-3. Красная Поляна, долина р. Мзымта, терраса высотой 6–7 м. гл. 1,2–1,3 см. кровля торфа	310±70	360±100
LU-11200	№ 100-2. Красная Поляна, долина р. Мзымта, терраса высотой 6–7 м. гл. 1,5–1,6 см. подошва торфа	470±50	500±50
LU-11201	№ 100-1. Красная Поляна, долина р. Мзымта, терраса высотой 6–7 м. гл. 2,3 см. Обводненный глинистый горизонт с органикой в селевой матрице	1290±60	1200±60

Полученные датировки позволяют сделать заключение о некоторых временных этапах развития подпружного бассейна. Нижняя часть разреза (слой В) – селевые отложения конуса выноса, перекрывшего долину р. Мзымта в результате катастрофического события, произошедшего в интервале 1140–1260 л.н. Последующий врез р. Мзымта до уровня около 6 м над современным урезом продолжался в течение

около 700 лет, а до современного уровня еще около 500 лет. В период от 500 до 360 лет на правом борту р. Мзымта существовала заболоченная терраса (слой Б), которая на последнем этапе оказалась захороненной оползневыми массами (слой А).

Выводы

Полученные данные свидетельствуют о том, что в результате катастрофического селевого события в долине руч. Бешенка сформировалась селевая терраса в устьевой части ручья переходящая в конус выноса, полностью перекрывавший долину р. Мзымта, в результате чего было образовано подпрудное озеро протяженностью около 6–8 км. Ширина озера достигала 700–900 м, а максимальная глубина в момент прорыва 30–35 м. С использованием методов картографического моделирования и морфометрического анализа выполнена реконструкция доселевых долин рр. Бешенка и Мзымта и получен диапазон оценок объемов селевых отложений и осадков подпрудного озера, мощности конуса выноса.

Применение триангуляции позволяет получить оценку объема селевого конуса в устье р. Бешенка и шлейфа ниже по долине р. Мзымта в 90,2 млн м^3 (из них непосредственно в границах конуса выноса – 50–55 млн м^3), при площади заполнения 2,6 км^2 и средней мощности 34 м. Сравнение фактического профиля русла р. Мзымта с реконструированным доселевым на основе нелинейной аппроксимации показывает аномалии высот на протяжении 5 км вниз по течению от селевой плотины, где они связаны непосредственно с селевым шлейфом, и 8 км вверх, где их происхождение объясняется аллювиально-озерными осадками подпрудного озера. Максимальное отклонение расчетных величин экспоненциального профиля от фактического русла р. Мзымта составляет 75 м на пересечении с осевой частью конуса выноса, что в совокупности с видимой высотой конуса определяет максимальную мощность селевых отложений более 100 м.

Возраст катастрофического события устанавливается по захороненной в селевой матрице органике (1200 ± 60 кал. л.н.). С учетом результатов датирования аналогичного гигантского селевого комплекса Пслушонок/Пслух по наиболее молодым органическим осадкам (1155–926 кал. л.н.) можно утверждать единый возраст для обоих комплексов в интервале 1140–1155 кал. л.н. Этот возраст отвечает одному из эпизодов голоценовой сейсмогенной активизации, определяя его как наиболее мощный.

Финансирование

Работа выполнена в рамках госзаданий ИГ РАН FMWS-2024-0005 (реконструкции палеорельефа) и ИФЗ РАН FMWU-2025-0038 (оценка палеосейсмичности)

Список литературы

Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В., Казакова Е.Н., Морозов Г.Л. Селевые процессы в бассейне р. Мзымта (Красная Поляна) и их влияние на территорию строительства объектов Олимпийского комплекса // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2013, 6: 516–529.

Кочетов Н.И. К геоморфологии долины р. Мзымта (Западный Кавказ) // Известия ВУЗов. Геология и разведка, 1970, 6: 21–27.

Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А. Условия развития опасных геологических процессов на территории строительства горно-спортивных сооружений в Краснополянском районе г. Сочи // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2013а, 4: 291–302.

Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А. Оценка и ранжирование по степени оползневой опасности участков строительства олимпийских объектов в г. Сочи // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2013б, 6: 530–537.

Харченко С.В., Шварев С.В. Прогнозирование оползневой опасности в окрестностях Красной Поляны на основе линейного дискриминантного анализа // Вестник Московского университета, Серия 5, География, 2020, 3: 22–33.

Шварев С. В. Детальное геоморфологическое картографирование в верховьях реки Мзымты // Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт: Материалы международной конференции ИнтерКарто – ИнтерГИС 15. Пермь, 2009 с. 462–464.

Шварев С.В., Харченко С.В., Голосов В.Н., Успенский М.И. Количественная оценка факторов активизации селей в 2006–2019 годах на склоне хребта Аибга (Западный Кавказ) // География и природные ресурсы, 2021, 2: 41–50.

Derkacheva A., Golosov V., Shvarev S. Hazardous exogenous geological processes in the mountains under the pressure of human activity: 15-year observations from a natural landscape to a large ski resort // Natural Hazards, 2024, 120: 2847-2868. doi: 10.1007/s11069-023-06309-y.

Потепление климата и новый механизм формирования селей

Б.С. Степанов, Р.К. Яфязова

РГП «Казгидромет», Алматы, Казахстан, yafyazova@gmail.com

Аннотация. Потепление климата ведет к деградации оледенения, тем самым увеличивая вероятность формирования катастрофических селей дождевого генезиса. С потеплением климата увеличится продолжительность селеопасного периода, повышение положения климатической снеговой линии приведет к увеличению площади водосбора, участвующей в формировании селей дождевого генезиса. Следствием потепления климата будет выпадение дождей в высокогорной зоне, где в настоящее время осадки выпадают в виде снега, что приведет к активизации селей дождевого генезиса. Увеличится повторяемость и катастрофичность селей дождевого генезиса. В высокогорной зоне накоплены огромные запасы рыхлообломочных пород, которые могут быть вынесены селями на предгорную равнину. Существуют различные механизмы формирования селей дождевого генезиса. Исследования, проведенные в Национальной гидрометеорологической службе Казахстана, выявили иной механизм формирования селей в рытвинах в Иле Алатау. Для предотвращения формирования селей дождевого генезиса в рытвинах необходимо проводить их мелиорацию.

Ключевые слова: *потепление климата, сель, сель дождевого генезиса, селевой очаг, мелиорация*

Ссылка для цитирования: Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Потепление климата и новый механизм формирования селей. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 426–432.

Climate warming and a new mechanism for formatting debris flows

B.S. Stepanov, R.K. Yafyazova

RSE "Kazhydromet", Almaty, Kazakhstan, yafyazova@gmail.com

Annotation. Climate warming leads to degradation of glaciation, thereby increasing the probability of formation of catastrophic rain-induced debris flows. With climate warming, the duration of the debris flow-hazardous period will increase, the rise in the position of the climatic snow line will lead to an increase in the catchment area involved in the formation of rain-induced debris flows. A consequence of climate warming will be rainfall in the high-mountain zone, where precipitation currently falls in the form of snow, which will lead to the activation of rain-induced debris flows. The frequency and catastrophic nature of rain-induced debris flows will increase. Huge reserves of loose debris have accumulated in the high-mountain zone, which can be carried out by debris flows to the foothill plain. There are various mechanisms for the formation of rain-induced debris flows. Research conducted by the National Hydrometeorological Service of Kazakhstan has shown that another mechanism for the formatting debris flows in the debris flow origination sites in Ile Alatau is possible. To prevent the formation of rain-induced debris flows in debris flow origination sites, it is necessary to carry out their reclamation.

Key words: *global warming, debris flow, rain-induced debris flow, debris flow origination site, reclamation*

Cite of this article: Stepanov B.S., Yafyazova R.K. Climate warming and a new mechanism for formatting debris flows. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 426–432.

Введение

Сели дождевого генезиса на северном склоне Иле Алатау – явление ординарное. Подавляющее большинство из них, при соблюдении техники безопасности пребывания в горной местности, не представляют угрозы для жизни и здоровья человека. Ущерб, наносимый имуществу и хозяйственной деятельности такими селями небольшой. Однако один раз в несколько десятилетий в условиях климата 20 века создавались метеорологические условия, приводившие к формированию катастрофических селей дождевого генезиса. Такие сели разрушали жилые и производственные сооружения, дороги, мосты, линии электропередач и связи и т.д. не только в горных долинах, но и на конусах выноса, расположенных на предгорной равнине. Изучение механизмов формирования селей, разработка методов их прогноза и активного воздействия на характеристики селей – задача государственной важности. Катастрофические сели дождевого генезиса в Иле Алатау формируются при выпадении интенсивных продолжительных жидких осадков, охватывающих все высотные зоны селевого бассейна, особенно высокогорную зону, где имеются наиболее благоприятные условия для формирования селей высокой плотности. Такие условия создаются на фоне относительно высокой температуры воздуха. Катастрофические сели дождевого генезиса в Иле Алатау, в условиях климата 20 века, формировались в 1921, 1947, 1950, 1999, 2006 г. [*Яфязова, 2007*].

Краткий обзор проблемы

Анализ сценариев изменения климата в Казахстане свидетельствует о том, что к 2050 г. следует ожидать увеличения температуры приземного воздуха на 2,5–3,3 °С, осадки увеличатся на 6,9–8,1 %; к 2090 г. следует ожидать увеличения температуры приземного воздуха на 3,6–6,8 °С, осадки увеличатся на 11,2–13,8 % [*8-е Национальное сообщение, 2022*]. Несмотря на то, что количество осадков увеличится мало, но их интенсивность и фазовое состояние определяются температурой воздуха, необходимой для формирования катастрофических селей дождевого генезиса.

Дальнейшая деградация оледенения приведет к практически полному исчезновению ледников на северном склоне Иле Алатау к концу 21 века [*Вилесов, 1997*]. В высокогорной зоне большое скопление рыхлообломочных пород, многочисленные осыпи, крутые склоны, сложенные скальными грунтами и лишенные растительности, могут служит очагами зарождения селей дождевого генезиса.

Материалы и методы

Материал, положенный в основу статьи, получен авторами в полевых исследованиях с 1988 по 2023 гг. Изыскания проводились в высокогорной зоне бассейна р. Киши Алматы (р. Малая Алматинка), расположенной в центральной части северного склона Иле Алатау. Оценивались морфометрические и морфологические особенности, и метеорологические условия изучаемой территории. В ходе полевых исследований были получены данные, которые позволили прийти к важным выводам относительно процессов, происходящих в рытвинах. В качестве исходных метеорологических данных использовались данные государственной наблюдательной сети РГП «Казгидромет». В частности, данные высокогорной метеорологической станции Мынжилки, аэрологической станции Алматы.

Условия формирования селей в рытвинах

В условиях климата 20 века наивысшие отметки водосборов, участвующих в селеформировании, близки к 3600 м. На рис. 1 показана типичная картина высокогорной зоны Иле Алатау после выпадения осадков в летний период времени. Выпадение осадков в твердом виде не приводит к формированию селей дождевого генезиса.

Потепление климата на 2–3 ºС приведет к повышению положения климатической снеговой линии и увеличению площади водосбора, участвующей в формировании селей дождевого генезиса. В высотной зоне 3600–4000 м в летнее время осадки будут выпадать преимущественно в виде дождей, т.е. практически вся высокогорная зона примет участие в селеобразовании, где находятся большие запасы рыхлообломочных пород, представленных частицами, размеры которых от менее 0,001 до 10 000 мм и более. Высокогорная зона Иле Алатау обладает большой энергией рельефа, благоприятствующей зарождению и развитию селевых процессов. Продолжительность селеопасного периода, а также повторяемость и катастрофичность селей дождевого генезиса увеличится [*Яфязова, 2009*]. Изменится механизм формирования селей дождевого генезиса.

Рис. 1. Типичная картина высокогорной зоны Иле Алатау после выпадения осадков в летний период времени в настоящее время. Фото Б.С. Степанова

К механизму формирования селей в рытвинах и конусах выноса

Существуют различные механизмы формирования селей дождевого генезиса. Один из наиболее известных механизмов – дождевой сток поступает в основное русло реки. При достаточном уклоне и расходе воды происходит эрозионное углубление русла, и как следствие, формируется грязекаменный поток.

При другом механизме формирования селя, когда дождь, выпадая на легко эродируемую поверхность, образует микросели на склонах селевого очага, которые сливаясь образуют более крупные сели. Они сливаются в основном русле (рис. 2), где продолжается эрозионное углубление, увеличение плотности селевой массы и расхода селя.

Рис. 2. Очаг рассредоточенного селеобразования в бассейне р. Кокчека. Перспективное изображение с сервиса Google Earth

Исследования, проведенные в Национальной гидрометеорологической службе Казахстана, показали, что возможен и иной механизм формирования грязекаменных селей в рытвинах. Крутые склоны высокогорной зоны испещрены рытвинами. После очередного срабатывания рытвин со временем они заполняются полидисперсными рыхлообломочными породами. В начальной стадии процесса заполнения рытвины рыхлообломочными породами, небольшие водные потоки, образующиеся вследствие выпадения дождей или таяния снега, выносят мелкие фракции. Так продолжается до тех пор, пока не образуется пористый каркас (структура с множеством пор, проницаемая для воды) из относительно крупных фракций, способный пропускать «бытовой» расход воды. В зависимости от размеров рытвины и гранулометрического состава горных пород высота каркаса может колебаться от долей метра до нескольких метров.

При дальнейшем заполнении рытвины (выше пористого каркаса) все фракции рыхлообломочных пород сохраняются до тех пор, пока пористый каркас способен пропускать «бытовой» расход воды. При выпадении интенсивных продолжительных осадков в жидком виде в высокогорной зоне, водный поток может не помещаться в пористом каркасе, тогда он движется в напорном режиме. Это приводит к тому, что давление рыхлообломочных пород на дно рытвины уменьшается, а сдвигающая сила увеличивается. В результате вышерасположенная толща рыхлообломочных пород насыщается водой и может произойти одновременное смещение всех рыхлообломочных пород в рытвине под действием силы тяжести, так формируется селевой поток.

Рытвины заканчиваются конусами выноса (рис. 3). Если конусы выноса имеют большой уклон (20–25 градусов) и происходит их увлажнение, они могут прийти в движение. Увлажнение происходит практически также, как в рытвинах. Это подтверждается результатами проходки шурфа на конусе выноса (рис. 4).

Рис. 3. Рытвины в высокогорной зоне в бассейне р. Киши Алматы. Перспективное изображение с сервиса Google Earth. 1, 2 и 3 – рытвины, сработавшие в 2023 г.; 4 – место проходки шурфа. Снимок сделан до селя 2023 г.

На рис. 3 показаны рытвины, сработавшие в 2023 г. Рытвина под номером 3 регулярно срабатывает один раз в 15−20 лет. Сели в этой рытвине формировались в 1988, 2006, 2023 гг. Это свидетельствует об активизации селей дождевого генезиса, вызванной увеличением температуры воздуха. В 1988 г. сель, сформировавшийся в этой рытвине, разрушил производственные помещения, расположенные на конусе выноса. В 2023 г. на фоне высокой температуры воздуха выпали интенсивные продолжительные осадки в жидком виде в высокогорной зоне. Рытвины на правом склоне долины р. Киши Алматы сработали. Сформировались сели, которые повредили тракторную дорогу на протяжении около 1 км, высота селевых отложений на протяжении 300 м достигала 2 м (рис. 5). Для этих отложений характерно незначительное содержание мелких фракций [*Степанов, 2023*].

Рис. 4. Пористый каркас, вскрытый шурфом в конусе выноса рытвины. Фото А.Х. Хайдарова

Рис. 5. Селевые отложения на тракторной дороге. Фото В.П. Мишенина

Для предотвращения формирования селей в рытвинах необходимо проводить их мелиорацию. В качестве превентивной меры борьбы с зарождением селей предлагается создание в рытвинах, «готовых» к селеобразованию, своеобразных «окон разгрузки» (рис. 6). Эти «окна» переводят подземный сток в поверхностный, предотвращая обводнение рыхлообломочных пород в рытвине. Поиски подземных каналов стока (пористых каркасов) могут вестись с помощью технических средств [*Степанов и др., 2001; Степанов, 2014*].

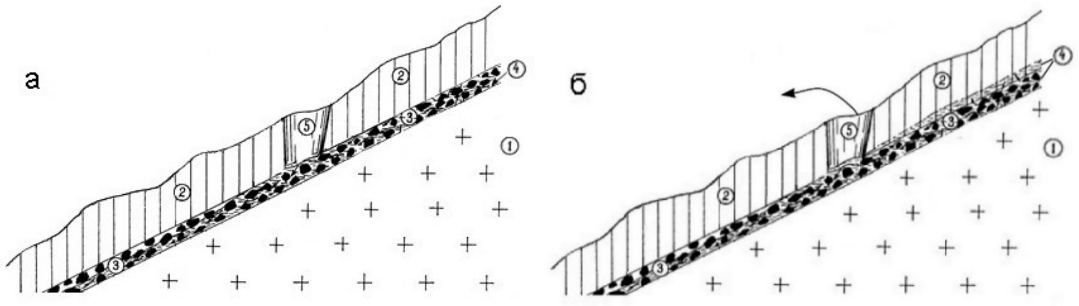


Рис. 6. Вода в подземном канале стока: а – в безнапорном режиме; б – в ограниченном напорном режиме. 1 – породы коренной основы; 2 – рыхлообломочные породы, заполняющие рытвину; 3 – пористый каркас; 4 – водный поток; 5 – шурф, вскрывающий подземный канал стока («окно разгрузки»)

Выводы

Повышение температуры воздуха на 2–3 °С приведет к увеличению повторяемости и катастрофичности селей, вызванных выпадением жидких осадков в высокогорной зоне. Для предотвращения формирования селей дождевого генезиса в рытвинах, расположенных в высокогорной зоне, необходимо проводить их мелиорацию.

Превентивные мероприятия по предотвращению селей дождевого генезиса в условиях потепления климата будут иметь особую значимость, когда защита от селей путем создания селехранилищ станет не только экономически не целесообразной, но и опасной, поскольку заполнение селехранилищ становиться потенциальным очагом селеобразования [*Степанов, 2006*].

Исключение возможности формирования напорного движения воды в пористом каркасе рытвины, путем трансформации подземного стока в поверхностный, не активизирует селевые процессы в нижележащих селевых врезах и руслах рек [*Степанов, 2014*].

Одним из превентивных мероприятий с целью уменьшения ущерба, наносимого селями дождевого генезиса, является их прогнозирование. Дальнейшее усовершенствование численных методов прогноза погоды для горных территорий, установка автоматических метеорологических станций в селеопасных бассейнах вблизи очагов селеформирования во всех высотных зонах позволят повысить качество прогнозов селей дождевого генезиса, приближая (по времени) предупреждение к прогнозируемому явлению. Наложение фактических и прогнозируемых осадков в горной местности на интерактивную карту селеопасных районов в реальном времени сделает прогноз селей дождевого генезиса более точным и конкретным [*Степанов, 2023*].

Список литературы

8-е Национальное сообщение и 5-й двухгодичный доклад Республики Казахстан Рамочной Конвенции ООН об Изменении Климата. Астана, 2022, 514 с.

Вилесов Е.Н. Эволюция внутриконтинентальной ледниковой системы в XX веке (на примере северного склона Заилийского Алатау): Автореф. на соиск. уч. степ. доктора геогр. наук. – Алматы, 1997, 47 с.

Степанов Б.С. Вклад Национальной гидрометеорологической службы Республики Казахстан в селевую безопасность страны // Гидрометеорология и экология, 2023, 4: 113−123. doi: 10.54668/2789-6323-2023-111-4-113-123.

Степанов Б.С., Хайдаров А.Х., Яфязова Р.К. Механизмы, приводящие к формированию селей дождевого генезиса в высокогорной зоне Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология, 2001, 1–2: 74–81.

Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Концепция защиты от селей г. Алматы в условиях изменяющегося климата // Гидрометеорология и экология, 2006, 1: 67–79.

Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Сверхкраткосрочный прогноз дождевых селей и формирование селей в бассейнах рек Киши и Улкен Алматы 21 июля 2023 года // Гидрометеорология и экология, 2023, 4: 16−24. doi: 10.54668/2789-6323-2023-111-4-16-24.

Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана. Том 3. Селевые процессы и селетехнические сооружения. Алматы: Изд-во Института географии, 2014, 434 с.

Яфязова Р.К. Оценка селевой активности и прогнозирование ее изменения в условиях глобального потепления климата: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. доктора техн. наук. Алматы, 2009, 36 с.

Яфязова Р.К. Природа селей Заилийского Алатау. Проблемы адаптации. Алматы: Изд-во ТОО «Полиграфкомбинат» корпорации Атамұра, 2007, 158 с.

Проблемы управления селевым риском в Кыргызстане

И.А. Торгоев

Научно-инженерный центр «Геоприбор» Национальной Академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика, isakbektor@mail.ru

Аннотация. В последние годы в Кыргызстане наблюдается стремительное нарастание количества климатически обусловленных катастроф, среди которых по величине экономического и экологического ущерба на первое место выдвинулись сели. За период 1990–2024 гг. на территории Кыргызстана по данным МЧС КР зарегистрировано 1876 чрезвычайных ситуаций (ЧС), связанных с селевыми потоками различного генезиса, что составляет 42,5% от общего числа ЧС природного характера. За этот же период от селевых потоков погибло 72 человека. В этом отношении наиболее рекордным стал 2024 г.: только с апреля по август в Кыргызстане зарегистрирован 331 селевой поток, 22 человека погибли, разрушено более 400 км автомобильных дорог и около 30 км каналов, затоплены 5354 домохозяйств. В целом только экономический ущерб от селей в 2024 г. оценивается в 15 млн долларов. В настоящей статье представлены некоторые результаты анализа рекордной селевой активности, зафиксированной в 2024 г. Статья нацелена на разработку и реализацию комплекса первоочередных мер, направленных на предотвращение и/или снижение нарастающей селевой опасности и риска в условиях происходящих климатических и социально-экономических изменений

Ключевые слова: *селевые потоки и селевые паводки, изменение климата, предотвращение и/или снижение селевых рисков*

Ссылка для цитирования: Торгоев И.А. Проблемы управления селевым риском в Кыргызстане. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 433–443.

Problems of debris flow risk management in Kyrgyzstan

I.A. Torgoev

Scientific and Engineering Center "Geopribor" of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic, isakbektor@mail.ru

Abstract. In recent years, Kyrgyzstan has seen a rapid increase in the number of climate-related disasters, among which debris flows have come out on top in terms of economic and environmental damage. According to the Ministry of Emergency Situations of the Kyrgyz Republic, 1,876 emergencies related to debris flows of various origins were registered in Kyrgyzstan in the period 1990–2024, which is 42.5% of the total number of natural emergencies. During the same period, 72 people died from debris flows. In this regard, 2024 was the most record-breaking year: from April to August alone, 331 debris flows were registered in Kyrgyzstan, 22 people died, more than 400 km of roads and about 30 km of canals were destroyed. In general, the economic damage from debris flows in 2024 alone is estimated at $15 million. This article presents some results of the analysis of record debris flow activity recorded in 2024. The article is aimed at developing and implementing a set of priority measures aimed at preventing and/or reducing the increasing debris flow danger and risk in the context of ongoing climatic and socio-economic changes.

Key words*: debris flows and debris flow floods, climate change, prevention and/or reduction of debris flow risks*

Cite of this article: Torgoev I.A. Problems of debris flow risk management in Kyrgyzstan. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 433–443.

Краткий обзор проблемы

Территория Кыргызской Республики в значительной мере подвержена воздействию селевых потоков и паводков. Селевые потоки фиксируются по всей горной и предгорной части Кыргызстана. Практически вся территория страны является селеопасной – всего насчитывается 3103 селеопасных бассейнов. Набольшее количество селеопасных русел имеется в бассейнах р. Чу – 479, Талас – 254, Нарын – 789, Карадарья – 666, озеро Иссык-Куль – 375 [*Атлас, 2025*].

На рис. 1 представлена карта селевой опасности территории Кыргызстана, составленная на основе карты С.С. Кубрушко, на которой представлены результаты расчетов по категориям селевой опасности [*Кубрушко, 1990*]. Следует обратить внимание на то, что рассматриваемая карта селевой опасности была разработана в 1982 г. и, поэтому не учитывает изменение климатических условий за последние 40 лет, а также изменения, вызванные человеческой деятельностью (антропогенный фактор). По указанным причинам по сравнению с 1982 г. существенно возросла подверженность территории страны селевым процессам и явлениям, причём селеопасными стали не только сельские районы, но и города Ош, Чолпон-Ата, Раззаков, Кызыл-Кия, Кок-Жангак, Кочкор-Ата, Базар-Коргон, Майлуу-Суу, Сулюкта и другие крупные населённые пункты Арстанбап, Сумсар, Самаркандек, Чаувай.

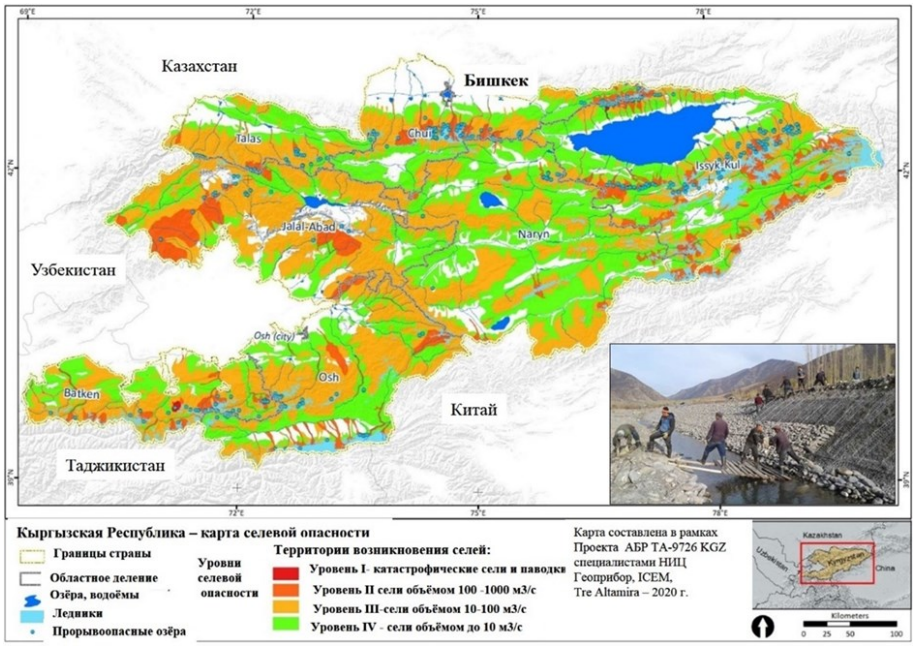


Рис. 1. Карта селевой опасности территории Кыргызстана, составленная на основе карты С.С. Кубрушко. На врезке внизу справа – укрепление габионами и каменной наброской селеопасного русла реки.

В этой связи для эффективного управления селевыми рисками давно назрела необходимость в уточнении пространственной оценки селевой опасности и риска (карт) в контексте происходящих климатических и социально-экономических изменений, которые должны учитываться в прогностических моделях, базирующихся в основном на статистическом понимании прошлого опыта. В результате необходимо получить перспективную карту селевой опасности, учитывающую все эти факторы и процессы вместе с оценкой их эволюции в среднесрочной и долгосрочной перспективе с учетом условий изменения климата. Точная информация о том, где и когда произошли сели, а

также понимание ключевых факторов, вызывающих селевые потоки различного генезиса, имеет важное значение для смягчения будущих воздействий селей на общество.

Природные факторы формирования селей

Селевые потоки на территории Кыргызстана обусловлены сочетанием многих природных (физико-географических, геологических, геоморфологических, гидрометеорологических) факторов. Геоморфологические факторы, такие как крутизна склонов, уклоны русел горных рек, площади водосборов, наличие рыхлообломочных материалов из года в год меняются мало. Поэтому основное влияние на возникновение селевых потоков оказывают гидрометеорологические характеристики и климатические факторы: ливневые дожди, резкие повышения температуры воздуха (волны жары) в высокогорных районах, увлажнённость почвы, мощность снежного покрова.

Существуют сложные взаимосвязи между гидрометеорологическими факторами, изменением климата, связанными с ними селевыми потоками. Недавние исследования показывают ощутимое влияние изменения климата на количество и частоту селевых потоков как в целом по Кыргызстану (рис. 2), так и в отдельных районах [*Загинаев, 2022; Торгоев, 2023*]. Как показано на рис. 2 в последние годы из-за изменения климата наблюдается стремительный рост селевых ЧС, характеризующийся экспоненциальным трендом их возрастания. Помимо устойчивой закономерности роста количества селей отмечается их расширяющаяся география.

Наглядный пример селевых потоков, обусловленных экстремальными осадками, это сели, вызванные необычными режимами выпадения осадков в Иссык-Кульском районе от города Чолпон-Аты до села Темировка. Так, 11 августа 2024 г. по данным автоматической метеорологической станции МЧС, установленной выше, г. Чолпон-Ата, только за один час с 20:00 до 21:00 выпало 167 мм осадков при среднегодовой норме 157 мм, причем интенсивность локального дождя достигла в 20:50 небывалого значения 8 мм/мин. Как известно, количество осадков и их распределение во времени являются ключевыми параметрами, которые напрямую влияют на масштабы селевого потока и сценарии селевого паводка. Сочетание рекордного количества осадков с их небывалой интенсивностью стало причиной мощных селевых потоков в указанном районе. Отметим, что средняя интенсивность осадков, вызывающая селевые потоки в горах Тянь-Шаня, составляет 22–28 мм/день, в зависимости от водосбора.

Рис. 2. Статистика селевых чрезвычайных ситуаций в Кыргызстане за период 1990–2024 гг.

Буквально через неделю, 18 августа в 11:30 был поставлен новый рекорд интенсивности локального ливня, составивший 10,9 мм/мин и в итоге впервые за много лет наблюдений в районе г. Чолпон-Аты селевые потоки возникали в период с 6 по 18 августа три раза – также своеобразный рекорд. Описываемые экстремальные

ливневые события в Иссык-Кульском районе, ставшие причиной и триггерным механизмом разрушительных селей, безусловно представляют собой последствия всё более усиливающегося изменения климата.

В ледниковых бассейнах действуют дополнительные природные факторы селевой активности, такие как интенсивное таяние снега, ледников и подповерхностного льда и, что важно, расширение ледниковых озер. Усиливающееся потепление климата приводит не только возникновению волн жары на больших высотах, но и к увеличению доли жидких осадков весной и осенью, что продлевает селеопасный сезон и смещает зону возникновения селевых потоков в нивально-гляциальный пояс гор.

К числу опасных событий, вызванных сочетанием аномальных осадков и волн жары (рис. 3), относится прорыв (опорожнение) высокогорного озера Акпай, который произошёл 2 августа 2021 г. в Сокулукском районе Чуйской области [*Торгоев, 2023*]. Прорыв этого моренно-ледникового озера вызвал разрушительный селевой паводок по рекам Акпай и Сокулук. На графиках, представленных рис. 3, наглядно показано, что за две недели с 1 по 14 июня 2021 г. на северном склоне хребта Киргизский Ала-Тоо выпало большое количество атмосферных осадков (75,6 мм) в виде дождя и снега, а начиная с 13 июня было зафиксировано устойчивое увеличение максимальной температуры воздуха с 5,3°С до 12°С (волна жары) к 29 июня 2021 г. Сочетание большого количества жидких и твёрдых осадков, выпавших на площади водосбора ледника Акпай (5,2 км^2), с устойчивым ростом температуры вызвали интенсивное таяние снежного покрова и постепенное наполнение чаши озера ливневыми дождями и талыми водами.

С 1 по 20 июля 2021 г. количество выпавших осадков составило 30,7 мм, что в сочетании с относительно высокой температурой воздуха способствовало дальнейшему росту площади и объёма воды в озере за счёт жидких осадков и таяния ледника. За сутки 21–22 июля 2021 г., то есть за 10 дней до опорожнения озера выпало аномально большое количество осадков (28,4 мм) в виде дождя и снега, и после этого было вновь зафиксировано резкое повышение максимальной температуры воздуха с 3,4 °С до 18,2 °С к 25 июля (волна жары). Это вызвало ещё более сильное таяние снега и льда с дальнейшим увеличением объёма воды в озере до критического уровня.

За сутки 30–31 июля вновь выпало большое количество осадков (16 мм) в виде дождя и снега. При достижении критического объема оз. Акпай опорожнилось по внутриледниковым каналам, вызвав мощный селевой поток вниз по рекам Акпай и Сокулук с расходом до 20 м^3/с, который разрушил 400 метров дорожного полотна на 37 км дороги Сокулук — Тёш-Булак, а также мост-путепровод выше села Сокулук.

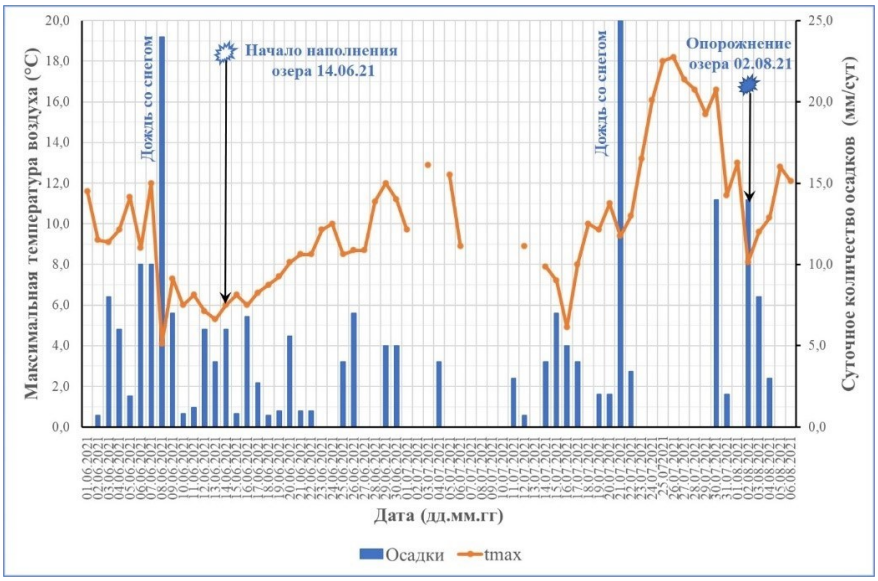


Рис. 3. Характер изменения максимальной температуры воздуха и количества осадков в высокогорной зоне Киргизского хребта, где расположены ледник и озеро Акпай (по данным ГМС «Тёо-Ашу», высота 3800 м)

Анализ эволюции и опорожнения озера Акпай в 2017–2021 гг., сделанный на основе космоснимков, позволил вовремя предупредить население и местные органы власти об угрозе прорыва и селевом риске, что позволило предотвратить человеческие жертвы. Незадолго до прорыва озера Акпай была закрыта автодорога Сокулук-Шаркыратма, проведена эвакуация 8 семей чабанов и поэтому жертв при прохождении волны прорыва не было.

Рассмотренные примеры возникновения дождевых селей в августе 2024 г., прорыва оз. Акпай с селевым потоком в августе 2021 г. показывают, как важно получать своевременную информацию для мониторинга селевых процессов различными методами, включая дистанционное зондирование Земли [*Загинаев, 2022*] и мониторинг гидрометеорологической обстановки (климатических характеристик), имеющими важное значение для заблаговременного выявления экстремальных погодных условий, которые могут вызвать возникновение разрушительных селевых потоков.

К числу прочих природных факторов, вызывающих возникновение селей, относятся землетрясения, оползни, длительные засухи и лесные пожары.

Землетрясение является природной опасностью, которая может повлиять на возникновение селевых потоков. Во время землетрясений образуется большое количество рыхлых осадочных пород в результате камнепадов, каменных лавин и оползней, происходящих одновременно Повышенная доступность наносов, подверженных переносу в результате выпадения осадков, и широко распространенная нестабильность в горных водосборах увеличивают вероятность селевых потоков в первые годы сразу после землетрясения. Действительно, порог осадков для инициирования селевого потока, по-видимому, значительно снижается по сравнению с порогом, наблюдавшимся до землетрясения. Наряду с этим землетрясения могут выступать в качестве триггеров (спусковых механизмов) прорывов ледниковых и завальных озёр, сопровождающихся формированием гидродинамической волны прорыва, трансформирующейся в селевой поток.

Оползни

Во многих исследованиях экзогенных геологических процессов (ЭГП) показано, что оползни могут вызывать селевые потоки [*Торгоев, 2023*]. В большинстве случаев сели и оползни проявляются независимо друг от друга. Однако иногда, как например, в бассейне р. Майлы-Суу, между ним возникает парагенетическая связь, предопределяющая дальнейший ход ЭГП. В этом случае нередко источником возникновения селей являются оползневые массы, которые попадая в русло рек, служат источником питания селей (твёрдой составляющей). Оползни часто изменяют морфологию русла и увеличивают количество рыхлообломочных отложений. Кроме того, оползневые отложения могут внезапно обрушиться или разжижаться, увеличивая общую магнитуду селевого события или создавая серьезный нагонную волну, чреватую прорывом искусственных и естественных плотин. Подобные сценарии возможны при продолжительных ливнях, которые доводят до насыщения рыхлые оползневые отложения, затем разжижают их и создают условия для текучести селевой массы.

Многократное повторение процессов перекрытия русла р. Майлы-Суу на участке оползней Тектоник, Кой-Таш, в долинах р. Ашваз, Бедре-Сай сопровождалось возникновением временных подпрудных озёр (водоёмов). При переполнении этих водоёмов происходил размыв оползневых запруд, сложенных рыхлыми отложениями оползней, с трансформацией волны прорыва в наносоводные и грязевые селевые потоки [*Торгоев, 2023*].

Деградация лесного покрова и вырубка леса

Участившиеся в последние годы из-за потепления климата и волн жары лесные пожары, приводят к полной или частичной утрате лесного покрова и подстилки, отложению золы, изменению свойств почвы и горных пород, образованию

водоотталкивающих почв. В результате пожаров гидрологические условия водосборного бассейна претерпевают глубокие изменения. Гидрологическая реакция на изменения водосборного бассейна обусловлена снижением инфильтрационной способности почвы к атмосферным осадкам. Потеря органического вещества в приповерхностном почвенно-растительном слое может привести к снижению стабильности почвы и её более легкой эрозии. Следовательно, поверхностный и русловый сток увеличится, что повысит скорость поверхностной эрозии и объём влекомых наносов. Инициирование селевых потоков, связанных с пожарами, вызвано в основном эрозией и уносом материала поверхностным стоком.

Потепление климата наблюдается по всей Центральной Азии, увеличиваясь с высотой [*Shahgedanova, 2018*], причём будущее потепление и продление безморозного периода прогнозируются по климатическому сценарию CMIP6 и региональным климатическим моделям. Неопределенность в прогнозах осадков весьма значительна, но для гор прогнозируется увеличение осадков в теплый сезон и доли жидких осадков [*Jang, 2020*]. В этой связи необходимы более подробные оценки для успешного управления селевыми рисками как в целом по стране, так и по областям, но они требуют понимания изменений климатических условий, способствующих нарастанию селевой активности. Назрела настоятельная необходимость разработки порогов атмосферных осадков, которые предопределяют наиболее важные предшествующие условия селевых потоков в сочетании с анализом приближающихся ливней. Это, в свою очередь, требует всеобъемлющих наборов гидрометеорологических данных по селеопасным бассейнам с расширением наблюдательной сети метеостанций и гидрологических постов Кыргызгидромета. Особую значимость для прогнозирования селей приобретает внедрение радар-мониторинга осадков

Согласно Докладу о глобальных рисках, сделанном на Всемирном экономическом форуме 2024 г. в Давосе, экстремальные погодные явления в настоящее время считаются вторым по значимости глобальным риском для общества, и, по прогнозам, они будут представлять собой главный глобальный риск в течение следующих 10–15 лет, увеличивая частоту ливневых и гибридных селей (сочетание осадков со снеготаянием) на территории Кыргызстана.

Антропогенные и техногенные факторы активизации селей

Изменение климата — не единственный фактор, увеличивающий угрозу, создаваемую селями. Изменения, вызванные человеческой деятельностью, рассматриваются как фактор, имеющий такую же, если не большую, важность, чем изменение климата, в воздействии на возникновение оползней и селей. Антропогенная деятельность, быстрая урбанизация и другие социально-демографические изменения являются ключевыми факторами в изменении временных и пространственных закономерностей возникновения селей и числа людей, объектов экономики и инфраструктуры, подверженных селевому риску. Подробный анализ основных антропогенных факторов, вызывающих возникновение оползней и селей в Кыргызстане был дан нами ранее [*Торгоев, 2023*]. Здесь лишь перечислим основные антропогенные причины активизации селей: перевыпас чрезмерного количества скота с нарастающей эрозией горных склонов вблизи населённых пунктов; распашка склонов и водоразделов под сельскохозяйственные культуры с обустройством арычной сети и чрезмерным поливом сельхозугодий; неконтролируемая урбанизация и всё возрастающие масштабы строительства (зачастую незаконного) жилых, туристических (горнолыжных) и рекреационных объектов в предгорной зоне и в бассейнах рек; прокладка местных автодорог и других объектов локальной инфраструктуры; добыча грунтов и инертных материалов (песка, гравия, галечника) в руслах и поймах селеопасных рек; вырубка пойменных лесов и сведение растительности на склонах; выжигание травы и кустарников и т.п.

Возникновение селевых потоков на высотах свыше 2500 м над уровнем моря мало зависит от антропогенной деятельности человека, однако техногенные факторы,

связанные с добычей в высокогорных районах полезных ископаемых, строительством транспортных коммуникаций и гидротехнических сооружений может изменить сложный горный рельеф, а также нарушить пути поверхностных потоков и тем самым увеличить восприимчивость к селям, а следовательно, и селевой риск.

В Кыргызстане сели техногенного генезиса вызывались неадекватной эксплуатацией различного рода промышленных накопителей, в первую очередь отвалов и хвостохранилищ на горнорудных предприятиях. Сели подобного типа отличаются катастрофичностью проявления и масштабностью последствий, включающих, помимо всего, возможность загрязнения водосборных территорий и сельскохозяйственных угодий в низовьях горных рек. Примерами таких селей могут служить радиоактивный сель 16 апреля 1958 г., образовавшийся в результате прорыва дамбы уранового хвостохранилища № 7, расположенного выше г. Майлуу-Суу [*Торгоев, 2024*], а также токсичный сель, возникший при обрушении дамбы хвостохранилища № 2 в Ак-Тюзе, содержавшего тяжёлые металлы и радиоактивный торий.

Этапы и процесс управления селевым риском

Проблемы, влияющие на процесс управления рисками селей в эпоху быстрых изменений климата, социально-экономических изменений и меняющихся общественных приоритетов, представлены в виде схемы оценки и управления рисками, представленной на рис. 4. Процесс управления селевым риском, можно разделить на пять этапов, причём каждый последующий этап включает в себя предыдущие, а все вместе они образуют интегрированную структуру, схематически проиллюстрированную на рис. 4.

Схема эффективного управления риском селей включает:

- анализ подверженности территории селевым процессам является первым шагом в рабочем процессе управления риском селей путем разработки (создания) карт подверженности селям для последующего анализа по категориям селевой опасности (рис. 1). Как правило, карты подверженности представляют собой статические изображения, отражающие потенциал того или иного бассейна к селям с учётом инициирующих условий. Один из классических подходов при анализе подверженности к селям заключается в том, что «прошлое — это ключ к будущему». Однако такой подход не учитывает изменение климатических условий, а также причинно-следственные связи селевых потоков, вызванные последовательными природными событиями (например, оползнями, лесными пожарами, речной эрозией и т.д.) и/или деятельностью человека (например, изменения в землепользовании, новые здания, сооружения и объекты инфраструктуры;
- анализ селевой опасности, включающий характеристики селевого потока (тип, размер и масштабы, скорость, механику, зону поражения) и соответствующую частоту (годовую вероятность) возникновения;
- анализ селевых рисков предусматривает анализ опасностей и анализ последствий. Анализ последствий включает выявление и количественную оценку элементов риска (имущество, люди), их временную пространственную вероятность, их уязвимость либо как условную вероятность ущерба для условной вероятности ущерба имуществу, либо как условную вероятность потери жизни или травмы;
- оценка рисков селей предусматривает синтез (объединение) данных, полученных при анализе рисков и оценивает их по оценочным суждениям и критериям принятия риска;
- управление рисками включает совместный анализ результатов оценки рисков и предусматривает разработку комплекса мер и плана по смягчению селевых рисков, включая восприятие риска, снижение вероятности, сокращение последствий, например путем разработки планов мониторинга, оповещения и эвакуации или передачи риска (например, страхованию). Эффективное управление риском включает также мониторинг результатов риска, обратную связь и итерацию при необходимости.

Весь процесс является интерактивным в рамках любого одного исследования и должен периодически обновляться по мере поступления результатов мониторинга.

Управление селевым риском включает ряд заинтересованных сторон, включая владельцев, арендаторов, затронутую общественность, уполномоченные и регулирующие органы, а также специалистов по гидрологии и аналитиков риска.

Неотъемлемой частью управления рисками является сравнение оцененных рисков с критериями приемлемости (количественными или качественными). Специалисты по гидрологии и гидрографии, скорее всего, будут задействованы в качестве аналитиков рисков и должны помочь в оценке и процессе принятия решений, но в конечном итоге именно владельцы, правительственные и регулирующие органы должны решить, являются ли рассчитанные риски приемлемыми или требуется их снижение.

Рис. 4. Схематизация этапов и процесса управления рисками селей и, связанных с этим проблем в условиях климатических, демографических изменений и социально-экономических изменений, и меняющихся социальных приоритетов

Современные технологии мониторинга и раннего оповещения об угрозе селей

Опыт ряда альпийских стран, Казахстана, Узбекистана, США и Японии однозначно свидетельствует о том, что радикальным способом предупреждения потерь людей и снижения экономического ущерба является создание эффективной системы мониторинга селевой активности (обстановки). Основная задача такой системы, которая должна быть создана в Кыргызстане при МЧС КР, – точное фиксирование всех случаев движения селевых потоков, ранее предупреждение и быстрое оповещение об угрозе их распространения.

Основу системы селевого мониторинга должны составлять станции слежения**,** которые фиксируют количество, интенсивность и продолжительность атмосферных осадков, температуру воздуха, расход водотоков во многих местах бассейнов селеопасных рек, а также контролируют перемещение селевой массы. Все приборы, включая автоматические метеостанции (рис. 5а), должны быть связаны между собой системой телеметрии. Данные измерений и наблюдений передаются с помощью сотовой связи и дублируются абонентской линией. Наряду с этим в селеопасный период целесообразно организовать службу непосредственного контроля с размещением гидропостов в верховьях бассейнов (рис. 5б)

Рис. 5. Гидрометеорологическая станция Майдантал (MTAL) в Узбекистане: а) общий вид площадки метеостанции с установленной спутниковой системой VSAT; б) автоматизированный гидропост, включающий датчик скорости воды и датчик уровня воды в реке типа Sommer RQ-24

Очевидно, что осуществление такой стратегии мониторинга потребует времени и средств на реализацию подобного проекта в Кыргызстане. А до той поры для контроля перемещения селевых масс необходимо широко применять простейшую аппаратуру (устройства), например, так называемые радиооповестители селя (РОС). Они представляют собой автоматизированную аппаратуру, передающую сигнал при прохождении селевого потока. Действие РОС основано на срабатывании датчиков при значительном подъёме уровня водотока и/или геофонов (сейсмоприемников), регистрирующих шум приближающегося селя. РОС – один из элементов системы предупреждения о надвигающейся селевой угрозе, устанавливаемый выше населённых пунктов, на расстоянии, достаточном для того, чтобы после получения тревожного сигнала хватило времени на эвакуацию населения из зоны возможного селевого поражения. Если системы раннего оповещения об угрозе селей хорошо спроектированы, внедрены, управляемы и проверены, оперативный прогноз селей, вызванных ливнями, осуществим, и он может помочь снизить риск селей.

К вопросу о краткосрочном прогнозировании селей

Реализация задач по прогнозированию селей возможна только в системе их мониторинга – системы регулярных наблюдений за режимом селей и прогноза их активности под воздействием природных и техногенных факторов. Один из основных подходов к прогнозированию, направленному на заблаговременное предупреждение об угрозе селей, состоит в том, что для краткосрочных прогнозов и предсказаний используются пороговые гидрометеорологические значения, т.е. численные характеристики количества, интенсивности и продолжительности атмосферных осадков, превышение которых свидетельствует о повышенной вероятности возникновения селей.

Исследователи и специалисты во многих странах определили критическое солеобразующее количество осадков, необходимое для возникновения селевых потоков Выявление эмпирических пороговых значений количества атмосферных осадков, после накопления которых начинаются движения селевых потоков, может играть важную роль в предотвращении или смягчении селевых рисков. Для селей, вызванных осадками (ливнями), порог определяет количество осадков и гидрологические условия, при достижении или превышении которого инициируются селевые потоки. Основная проблема заключается в том, чтобы определить пороговые значения, которые являются надежными и эффективными. Например, для Кыргызстана в целом было установлено, что нижним порогом суточных норм осадков, приводящим к селям, является 30 мм [*Кубрушко, 1990*]. Верхним порогом суточных норм осадков, при котором сели имеют место практически всегда – 80 мм. Основной задачей Кыргызгидромета в сотрудничестве с научно-исследовательскими учреждениями является определение

эмпирических порогов по основным селеопасным бассейнам. Выявленные пороговые значения могут быть использованы в перспективе для улучшения прогноза селевых потоков в сочетании с новыми методами прогноза осадков на сложной местности, которые в настоящее время внедряются в регионе Центральной Азии.

Превентивные меры предотвращения и снижения селевого риска

Следует отметить, что масштабы борьбы с селевыми явлениями и горной эрозией почв в Кыргызстане пока не отвечают сегодняшним запросам. Во многом это объясняется экономическими трудностями, отсутствуют научно обоснованные рекомендации по проектированию противоселевых сооружений. Слабо используется опыт уже осуществленных в республике противоселевых мероприятий и сооружений, например, укрепление берегов рек с помощью габионов и каменной наброски, а самое главное, практически прекращены исследования и разработки по управлению селевыми процессами, включая мониторинг селевых бассейнов.

Так, для защиты от негативного действия селевых и наносоводных потоков автодороги Бишкек-Торугарт в Боомском ущелье свою рациональность и эффективность показали селехранилища, типа Кургактерекского, менее эффективны защитные стенки и селесбросные каналы, так как они быстро заполняются рыхлообломочными материалами и теряют свои защитные качества. Поэтому рекомендации на данном этапе могут быть сведены к одному положению: строительство селехранилищ с водосбросами высокой пропускной способности.

Кардинальным решением защиты от селевых потоков являются так называемые дамбы САБО (SABO dam), представляющие собой инженерное решение, разработанное и внедрённое в Японии. Дамбы SABO обычно сооружаютмся в верховьях рек с крутым уклоном и быстрым течением. Они предназначены для задержания селевых потоков, камней, древесины и предотвращения разрушений в нижнем течении. На сегодняшний день, помимо более чем 64 тыс. дамб САБО различного типа и масштаба, построенных в Японии, инженерия САБО также широко применяется в Южной Корее, на Тайване, Северной Америке и других странах. Основное предназначение этих дамб состоит в следующем: уменьшение эрозии русел и берегов рек; улавливание и контроль сбрасываемых речных отложений и осадков; сортировка осадочного материала; снижение энергии селевых потоков.

Выводы и рекомендации

Сели причиняют огромный экономический ущерб населённым пунктам, объектам экономики и инфраструктуры Кыргызстана: вызывают гибель людей, смывают посевы, разрушают ирригационные каналы, скотомогильники, хранилища с токсичными материалами, сносят мосты, размывают автомобильные и железные дороги.

Из-за происходящего изменения климата в ближайшие годы количество и интенсивность атмосферных осадков в горных районах будет нарастать, вызывая рост частоты и распространённости селей.

Создание системы мониторинга за развитием селевых процессов является эффективным и надежным инструментом управления рисками и смягчения последствий селей, обеспечивающим низкое воздействие на население, объекты экономики и инфраструктуры за счёт использования критических значений факторов (порогов), обуславливающих формирование селевых потоков.

Главными прикладными задачами научно-исследовательских учреждений исследований Кыргызстана по селевой проблеме являются: выявление эмпирических порогов количества и интенсивности атмосферных осадков по селеопасным бассейнам.

В целях расширения сети гидрометеорологических наблюдений Кыргызгидромета в горных районах и селевых очагах необходимо обустроить свыше 60 гидропостов с обязательным оснащением их радиооповестителями селей. В последние годы в Кыргызстане по разным проектам установлено около 100 автоматических

гидрометеостанций, которые должны стать станциями слежения, объединёнными в единую систему мониторинга селевой обстановки.

Список литературы

Атлас селе-паводковой опасности на территории Кыргызской Республики. Бишкек: МЧС КР, 2025, 164 с.

Загинаев В.В., Ерохин С.А., Аманова М.Т. Использование методов дистанционного зондирования для мониторинга участков проявления опасных экзогенных гидрогеологических процессов // Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики (Изд. 19-е с изм. и доп.), Бишкек: МЧС КР, 2022, с. 720–721.

Кубрушко С.С. Географические особенности проявления и распространения селей в Киргизии // В сб.: Исследование гидрометеорологических факторов, методика расчета их параметров для целей районирования и прогнозирования природоохранных мероприятий. Фрунзе, «Илим», 1990, с. 74–85.

Торгоев И.А. Ледниковые катастрофы, вызванные волнами жары в высокогорных районах // Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики (Изд. 20-е с изм. и доп.), Бишкек: МЧС КР, 2023, с. 769–773.

Торгоев И.А. Оползневые процессы и риски на территории Кыргызстана. Бишкек: ОсОО Oreta Group, 2023, 548 с.

Торгоев И.А., Алешин Ю.Г. Радиоактивные сели в долине реки Майлуу-Суу (Кыргызстан) // 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, с. 500–510.

Чуб В.Ю., Трофимов Г.Н., Меркушкин А.С. Селевые потоки в Узбекистане. Узгидромет, Ташкент, 2007.

Jiang J., Zhou T., Chen X., Zhang L. Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections // Environ. Res. Lett, 2020, 15: 054009.

Shahgedanova M.M., Afzal M., Severskiy I., Usmanova Z., Saidaliyeva Z., Kapitsa V., Kasatkin N., Dolgikh S. Changes in the mountain river discharge in the northern Tien Shan since the mid-20th Century: Results from the analysis of a homogeneous daily streamflow data set from seven catchments // J. Hydrol. (Amst.), 2018, 564: 1133–1152.

Экономические методы повышения эффективности противоселевых защитных сооружений

М. Вартанов, Э. Кухалашвили

Институт водного хозяйства им. Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Тбилиси, Грузия, v.martin.hm@mailcom

Аннотация. Осуществлен расчет экономической эффективности противоселевой защиты территории, приведены формулы определения социально-экономического ущерба, возникающего при сходе селя. В качестве критериальных показателей эффективности выбран чистый приведённый доход (NPV) и внутренняя норма доходности (IRR). Результаты расчетов чистого приведенного дохода (NPV) и внутренней нормы доходности инвестиций в строительство защитного сооружения (IRR), выявили их зависимость от времени схода селя. Так, значение NPV достигает своего максимума при прохождении селя в течении первого года после завершения строительства защитного сооружения. На удовлетворительном уровне эффективность находится при прохождении селя через пять лет после завершения строительства, но уже через десять лет, величина внутренней нормы доходности инвестиций становится ниже стоимости авансированного капитала.

***Ключевые слова**: селевой поток, виды экономического и социального ущерба, селезащитные сооружения, экономическая эффективность, время прохождения, эффективность капиталовложений*

Ссылка для цитирования: Вартанов М., Кухалашвили Э. Экономические методы повышения эффективности противоселевых защитных сооружений. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 444–448.

Economic methods of increasing the efficiency of debris-flow mitigation constructions

M. Vartanov, E. Kuhalashvili

Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia

Abstract. The calculation of economic efficiency of debris flow protection of the territory is carried out, formulas for determining the socio-economic damage arising from debris flow are given. Net present value (NPV) and internal rate of return (IRR) are chosen as criterion indicators of efficiency. The results of calculations of net present value (NPV) and internal rate of return (IRR) of investments in the construction of a protective structure revealed their dependence on the time of debris flow. Thus, the NPV value reaches its maximum at the debris flow during the first year after the completion of the protective structure construction. At a satisfactory level of efficiency is at the debris flow five years after the completion of construction, but after ten years, the value of the internal rate of return on investment becomes lower than the cost of advanced capital.

***Key words:** debris flow, types of economic and social damage, debris flow mitigation constructions, economic efficiency, time of passage, efficiency of capital investments*

Cite this article: Vartanov M., Kuhalashvili E. Economic methods of increasing the efficiency of debris-flow mitigation constructions. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 444–448.

Основная часть

Природно-климатические условия Грузии, в том числе ее рельеф, наличие водотоков, формирующихся в высокогорье, во многом определяют возможность возникновения селевых потоков – одного из грозных проявлений природы. Селевой поток, образовавшись высоко в горах, со скоростью курьерского поезда несется по руслу селеносной реки, разрушая на своем пути мосты, дороги и другие инфраструктурные сооружения. Вырываясь из ущелья на открытое пространство долины, поток наносит значительный ущерб сельскохозяйственным угодьям, жилым постройкам, различным социальным объектам, подвергает серьезной опасности жизнь и здоровье населения [*Гавардашвили, 2010; Гагошидзе, 1970*]. Одним из возможных путей решения этой проблемы является строительство инженерных сооружений, обеспечивающих защиту как населения, проживающего на территории, подверженной риску прохождения селевого потока, так и созданных трудом человека материальных ценностей. При этом возникает объективная необходимость оценки экономической эффективности работы этих сооружений, а также исследование такого мало изученного вопроса, как управление денежными потоками, направляемыми в эту достаточно капиталоемкую сферу [*Вартанов, 2014*].

При определении экономической эффективности строительства селезащитных сооружений необходимо иметь в виду прогнозную величину ущерба, возникающего при прохождении селя. При этом величина ущерба складывается из потерь, возникающих в промышленности, в сельском и лесном хозяйстве, жилищно-коммунальном хозяйстве.

Величина **ущерба в промышленности** определяется по формуле:

$$У_{пр}=\sum y_i, \quad (1)$$

где y_i – ущерб на i –том объекте, который равен:

$$y_i = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6, \quad (2)$$

гдеy_1 – ущерб от потери производственного оборудования; y_2 – ущерб от разрушения производственных и непроизводственных зданий и сооружений; y_3 – затраты, связанные с ремонтом производственного оборудования, зданий и сооружений; y_4 – затраты, связанные с ремонтом непроизводственного оборудования, зданий и сооружений; y_5 – потери производственных запасов сырья и материалов, а также готовой продукции на складах; y_6 – потери, связанные с падением производительности труда.

Величина **ущерба в сельском, лесном и рыбном хозяйстве** определяется по формуле:

$$y_{сх} = \sum(y_п + y_ж + y_{лх}), \quad (3)$$

где $y_п$ – ущерб в полеводстве; $y_ж$– ущерб в животноводстве и рыбном хозяйстве; $y_{лх}$ – ущерб в лесном хозяйстве.

Ущерб полеводства включает в себя потери урожая как однолетних, так и многолетних сельскохозяйственных культур, затраты на восстановление продуктивности сельскохозяйственных угодий, затраты на восстановление и ремонт производственных фондов полеводства.

Ущерб животноводства включает в себя потери, связанные с гибелью животных, затраты на восстановление стада, затраты на восстановление и ремонт сооружений и механизмов животноводческих комплексов, затраты на восстановление и ремонт прудов рыбного хозяйства, затраты на проведение санитарно-эпидемиологических мероприятий.

Ущерб в лесном хозяйстве возникает за счет вымывания лесных массивов, снижения их продуктивности, затрат на восстановление леса.

Ущерб, наносимый жилищно-коммунальному хозяйству – это сумма дополнительных затрат на уборку территорий (y_1), содержание городского общественного транспорта (y_2), содержание зданий и сооружений, (y_3) посадку зеленых насаждений и уход за ними (y_4), очистку питьевой воды (y_5):

$$y_x = \sum (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5). \quad (4)$$

Таким образом, ущерб, возникающий при катастрофическом прохождении селя, выражается суммой ущербов, возникающих в промышленности, в сельском, лесном и рыбном хозяйстве, ущербе жилищно-коммунального хозяйства и других отраслях народного хозяйства.

При расчете эффективности инвестиций в строительство противоселевых сооружений исходим из того, что предотвращенный ущерб по своей экономической сути является положительным эффектом, возникающим в результате функционирования сооружения. Также следует отметить, что сели, как правило, образуются достаточно редко, а инвестиции в строительство защитных сооружений осуществляются в текущем периоде, при этом эксплуатация сооружения и, соответственно, эксплуатационные расходы производятся ежегодно. Денежные потоки, возникающие при строительстве и эксплуатации противоселевых сооружений, имеют следующий вид (таблица 1).

Таблица 1. Денежные потоки, возникающие при строительстве и эксплуатации противоселевых сооружений

№	Денежный поток	Годы					
		1	2	3	…	t_{n-1}	t_n
1	Капитальные затраты	K					
2	Годовые эксплуатационные затраты	C_1	C_2	C_3	…	C_{n-1}	C_n
3	Предотвращенный ущерб						P

Учитывая вышеизложенное, чистый приведенный доход от работы построенного и функционирующего противоселевого сооружения можно рассчитать по формуле (5):

$$\mathrm{NPV} = \frac{\mathrm{P}}{(1+\alpha)^{\mathrm{n}}} - \mathrm{K} - \sum_1^{\mathrm{n}} \frac{\mathrm{C_i}}{(1+\alpha)^{\mathrm{i}}}, \quad (5)$$

где P — предотвращенный ущерб в году n; K — затраты на капитальное строительство в нулевом году; C_i — эксплуатационные затраты в i-м году; $(1+\alpha)^i$ коэффициент дисконтирования [*Ковалев, 1998*].

В целом, для любого инвестиционного проекта формула расчета внутренней нормы доходности *IRR* выглядит следующим образом:

$$0 = \sum_0^{\mathrm{n}} \frac{\mathrm{CF_t}}{(1+\mathrm{IRR})^{\mathrm{t}}}, \quad (6)$$

где CF_t — величина денежного потока в момент t; n — количество временных периодов; *IRR* — внутренняя норма доходности.

Как известно, сели переносят в низовья реки десятки и сотни тысяч, а в отдельных случаях и миллионы кубометров грязекаменной массы. При этом интенсивность разрушительных процессов в селевом бассейне зависит в основном от состояния растительного и почвенного покрова, климата, геологического строения бассейна, тектонической активности отдельных его участков [*Гагошидзе, 1970*]. О силе разрушительного воздействия селя можно судить по следующим данным. Так, только в 2017 г. сход селя на Филиппинах стал причиной гибели около 90 человек. Жертвами селя, сошедшего с гор в районе Лос-Лагос в Чили, стали не менее 15 человек. В

Кабардино-Балкарии со склонов хребта Адыл-Су сошел мощный сель. В горах оказались отрезанными 27 туристических баз и 49 зарегистрированных туристических групп, в составе которых было более 500 человек. Жертвами селя стали три человека. Сразу несколько селей обрушились на Кадамжайский район Киргизии, были затоплены 84 дома, размыты 25 км дорог, разрушены 12 мостов, погибли 5 человек. В районе Военно-Грузинской дороги сход селя повредил 2 км трассы, вызвав остановку автомобильного движения в Дарьяльском ущелье.

Из вышеизложенного видно, что физическое разрушение природной инфраструктуры приводит к значительному социально-экономическому ущербу, величина которого обычно колеблется от 0,2 до 2,0 и более млн. долларов США. В целях защиты от разрушительного воздействия селя, сохранения устойчивого состояния природной инфраструктуры водосборных бассейнов предлагается вариант инженерной защиты системы Института водного хозяйства Грузинского технического университета. Конструкция представляет собой противоселевое полуконическое сооружение [*Гавардашвили, 2010*]. При ширине водотока 10 м высота сооружения определена 5 м, а длина составила 26,5 м. Расход материалов на возведение сооружения составляет: выбывшие железнодорожные рельсы — 500 м, железобетонные работы — 17,0 м^3, земляные работы — 14,13 м^3. Для условий, когда коэффициент проницаемости равен 0,56, количество сооружений, необходимых для эффективной защиты прилегающей территории, составляет 2.

Таким образом, стоимость создания двух противоселевых сооружений в ценах 2019 г. достигает 24,7 тыс. долл. США. Эксплуатационные расходы, необходимые для защиты и поддержания сооружений в исправном состоянии, составляют примерно 3,0 тыс. долл. США/год. Значения чистой приведенной стоимости (*NPV*), а также внутренней нормы доходности инвестиций в строительство противоселевых сооружений (*IRR*) в зависимости от частоты прохождения селя приведены в таблице 2.

Таблица 2. Величина чистого приведенного дохода (NPV) и внутренняя норма доходности инвестиций в строительство противоселевых сооружений (IRR)

Прохождение селя после завершения строительства защитного сооружения, лет	Ущерб до 200,0 тыс. долл. США		Ущерб до 1000,0 тыс. долл. США		Ущерб до 2000,0 тыс. долл. США	
	Чистый приведенный доход тыс. долл. США (*NPV*)	Внутренняя норма доходности инвестиций, % (*IRR*)	Чистый приведенный доход тыс. долл. США (*NPV*)	Внутренняя норма доходности инвестиций, % (*IRR*)	Чистый приведенный доход тыс. долл. США (*NPV*)	Внутренняя норма доходности инвестиций, % (*IRR*)
3	112,8	135	680,85	431	1390	654
5	81,5	41	537,25	115	1107,2	157
10	25,13	7	281,13	30	601,1	41
15	-6,35		137,65	13	317,6	19
20			55,67	5	155,67	9

Результаты расчетов *NPV* и *IRR*, приведенные в таблице 2, при ожидаемом ущербе от разрушительного воздействия селя до 200,0 тыс. долл. США показывают, что наибольший эффект от строительства защитного сооружения наблюдается при прохождении потока через первые три года после завершения строительства сооружения. На удовлетворительном уровне эффективность находится при прохождении селя после пяти лет после завершения строительства, но уже при прохождении селя через десять лет несмотря на то, что чистый приведенный доход составляет 25,13 тыс. долл. США, величина внутренней нормы доходности инвестиций становится ниже стоимости авансированного в данную деятельность капитала.

Примерно аналогичная картина наблюдается в группах, где ущерб от прохождения селя достигает 1,0 и 2,0 млн долл. США.

Выводы

Природно-климатические условия Грузии, в том числе ее рельеф, наличие водотоков, формирующихся в высокогорье, во многом определяют возможность возникновения селевых потоков – одного из грозных проявлений природы. Селевой поток, образовавшись высоко в горах, со скоростью курьерского поезда несется по руслу соленосной реки, разрушая на своем пути мосты, дороги и другие инфраструктурные сооружения. Вырываясь из ущелья на открытое пространство долины, поток наносит значительный ущерб сельскохозяйственным угодьям, жилым постройкам, различным социальным объектам, подвергает серьезной опасности жизнь и здоровье населения.

Одним из наиболее эффективных методов борьбы со стихией потока является строительство инженерных сооружений, обеспечивающих как защиту населения, проживающего в зоне риска прохождения селя, так и сохранение созданных человеческим трудом материальных ценностей.

При определении экономической эффективности строительства селезащитных сооружений необходимо иметь в виду прогнозную величину ущерба, возникающего от схода селя. При этом величина ущерба складывается из потерь, возникающих в промышленности, в сельском и лесном хозяйстве, жилищно-коммунальном хозяйстве.

Результаты расчетов чистого приведенного дохода (*NPV*) и внутренней нормы доходности инвестиций (*IRR*) показали, что значение *NPV* достигает своего максимума при прохождении селя в течение первого года после завершения строительства защитного сооружения. На удовлетворительном уровне эффективность находится при прохождении селя в течение пяти лет после завершения строительства, но уже через десять лет, величина внутренней нормы доходности инвестиций становится ниже стоимости авансированного капитала.

С целью повышения экономической эффективности капиталовложений в строительство селезащитных сооружений необходимо осуществлять капитальные затраты только на основе детальной оценки потенциала очагов солеобразования, строить защитные сооружения в ближайшем к прогнозируемому значению времени схода селя.

Список литературы

Вартанов М.В., Экономическая эффективность инженерной защиты хозяйственных объектов на реках Западной Грузии от наводнений. Тверь-Рязань: Российская академия наук, ВНИИ сельскохозяйственного использования мелиорированных земель, 2014.

Гавардашвили Г.В. Защита горных ландшафтов от стихийных явлений некоторых объектов стратегического назначения Грузии. Симферополь, 2010.

Гагошидзе М.С., Селевые явления и борьба с ними. Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1970. 386 с.

Ковалев В.В. Методы оценки инвестиционных проектов, М.: Финансовая статистика, 1998. 144 с.

Метеорологические условия формирования селей на Черноморском побережье России

В.С. Воронцова, П.А. Торопов

Институт географии РАН, Москва, Россия, vrn.vorontsova@mail.ru

Аннотация. Исследование посвящено анализу метеорологических условий, способствующих формированию селевых потоков на Черноморском побережье России, являющегося одним из селеопасных регионов. Актуальность работы обусловлена увеличением частоты и силы селей в условиях глобального изменения климата, что требует совершенствования методов их прогнозирования. В основе подхода данной работы лежит физико-статистический метод оценки пороговых значений параметров осадков, необходимых для возникновения селевых ситуаций, в значимом радиусе корреляции совместно с характеристиками крупномасштабной атмосферной динамикой. Результаты исследования могут быть использованы для улучшения систем раннего предупреждения, минимизации ущерба инфраструктуре и населенным пунктам. Работа вносит вклад в понимание региональных особенностей селеобразования в условиях меняющегося климата.

Ключевые слова: *селевое событие, экстремальные осадки, Черноморское побережье, прогнозирование, пороговые значения*

Ссылка для цитирования: Воронцова В.С., Торопов П.А. Метеорологические условия формирования селей на Черноморском побережье России. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 449–454.

Meteorological conditions for the debris flow formation on the Black Sea coast of Russia

V.S. Vorontsova, P.A. Toropov

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, vrn.vorontsova@mail.ru

Abstract. The study is devoted to the analysis of meteorological conditions contributing to the formation of debris flows on the Black Sea coast of Russia, which is one of the debris flow-prone regions. The relevance of the work is due to the increase in the frequency and strength of debris flows in the context of global climate change, which requires improved forecasting methods. The approach of this work is based on a physico-statistical method for estimating the threshold values of precipitation parameters necessary for the occurrence of mudslides in a significant radius of correlation with the characteristics of large-scale atmospheric dynamics. The results of the study can be used to improve early warning systems, minimize damage to infrastructure and human settlements. The work contributes to understanding the regional features of goal formation in a changing climate.

Key words*: debris flow event, extreme precipitation, Black Sea coast, forecasting, thresholds values*

Cite of this article: Vorontsova V.S., Toropov P.A. Meteorological conditions for the debris flow formation on the Black Sea coast of Russia. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 449–454.

Введение

Сели являются одним из наиболее опасных природных явлений, способных нанести значительный ущерб инфраструктуре, включая жилые зоны, сельскому хозяйству и объектам туристической инфраструктуры. Эта проблема становится особенно актуальной в условиях глобального климатического изменения, которое приводит к увеличению частоты и интенсивности экстремальных погодных условий, включая ливневые дожди, которые являются основным триггером для формирования селей. Изучение метеорологических условий, способствующих формированию селей, крайне важно для предотвращения катастрофических последствий и минимизации ущерба.

Территория Черноморского побережья России характеризуется сложной орографией, интенсивными осадками и высокой влажностью, что создает благоприятные условия для возникновения селей. В последнее десятилетие в регионе наблюдается увеличение частоты и интенсивности экстремальных метеорологических явлений, таких как сильные дожди и шквальные ветры, что подчеркивает необходимость исследования факторов, влияющих на формирование селевых потоков и разработка методов их прогнозирования.

Обзор проблемы

С увеличением общего числа опасных явлений погоды (экстремальных осадков и наводнений) по всей планете увеличилось число опасных селевых ситуаций. Однако прогнозирование селей остается трудной задачей настоящего, так как для прогноза необходимо большое количество региональных, труднодоступных данных, различающихся для каждого водосборного бассейна.

Методика

В основе подхода лежит статистический анализ характеристик осадков в районе селевого события в значимом радиусе корреляции в сочетании с синоптическим анализом на основе данных реанализа ERA5.

Данные

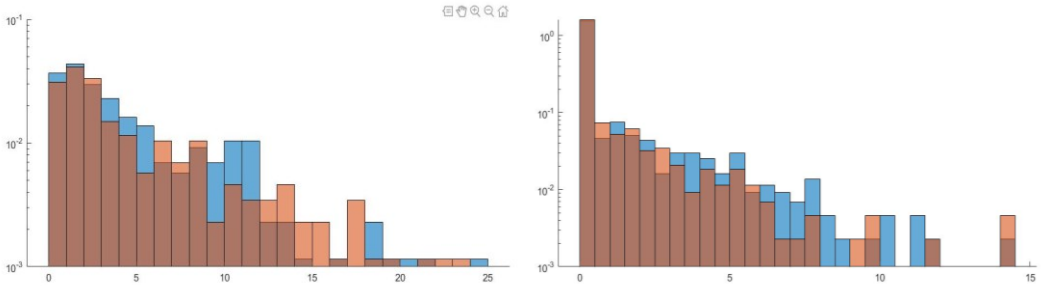
В работе были использованы данные о селях на Черноморском побережье Кавказа, собранные в рамках работы Лаборатории Лавин и Селей Географического факультета МГУ в последние десятилетия. Также используются данные срочных наблюдений (использовались суммы осадков, мм) на метеорологических станциях архива ВНИИГМИ–МЦД. Были проанализированы данные плювиографа по интенсивности, мм/10 мин и продолжительности, ч осадков. Использовались данные реанализа высокого разрешения ERA5 (сумма осадков, мм; приземное давление; ветер; геопотенциал; температура AT850; влагосодержание столба атмосферы).

Анализ

По данным плювиографа метеостанции Сочи за период 1997–2022 гг. были рассчитаны параметры: максимальная интенсивность за событие дождя (мм/10 мин), продолжительность дождя в часах и процент дождя. Для анализа временной изменчивости характеристик осадков были построены диаграммы распределения за два подпериода: 1997–2006 и 2013–2022 гг. (рис. 1).

Наблюдается увеличение интенсивности осадков в последние десять лет (2013–2022) по сравнению с предыдущим периодом (1997–2006). В частности, зафиксирован рост частоты случаев с интенсивностью осадков, превышающей 12 мм/10 мин. В то же время, на функции распределения продолжительности дождя отмечается тенденция к сокращению продолжительности осадков в последние десять лет.

Для оценки статистической значимости изменений в характеристиках осадков между двумя периодами (1997–2006 и 2013–2022 гг.) был применен непараметрический критерий Колмогорова – Смирнова (таблица 1). Результаты теста показали, что для большинства параметров различия между периодами не являются статистически значимыми ($p > 0,05$).



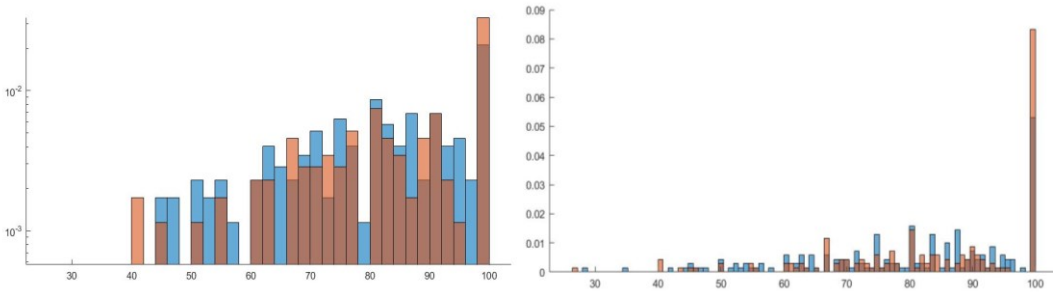
а б

Рис. 1. Диаграммы распределения параметров осадков: а) Максимальная интенсивность, мм/10 мин; б) Продолжительность дождя, ч

Таблица 1. Результаты теста Колмогорова-Смирнова для параметров осадков

Параметр	Значение p
максимальная интенсивность	0,94
продолжительность дождя	0,23
процент дождя	0,03

Однако для параметра «процент дождя», характеризующего долю времени с непосредственным выпадением осадков в рамках одного события, (событие – дождь без перерывов или с перерывами менее 1 ч), было выявлено статистически значимое различие ($p = 0,03$). Это указывает на резкое увеличение доли непрерывных осадков в последние десять лет.

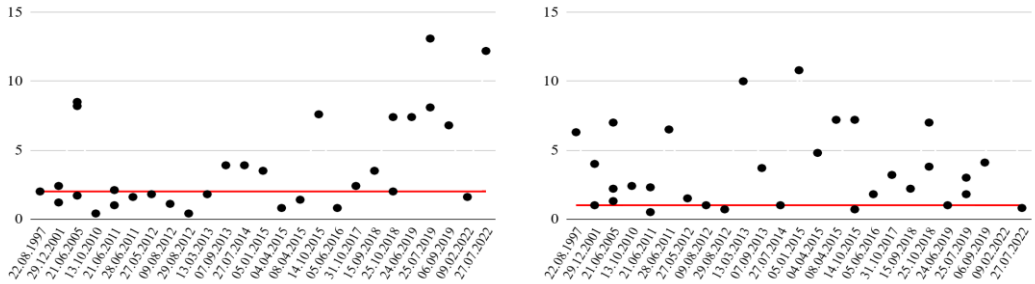


а б

Рис. 2. Диаграмма распределения параметра процент дождя: а) Логарифмический формат; б) Линейный формат

Для выявления пороговых значений параметров дождя, которые могут служить предикторами селевой опасности, ключевые характеристики осадков были сопоставлены с датами селевых ситуации. В результате анализа было установлено, что пороговыми значениями, при которых значительно возрастает вероятность схода селей, являются дожди продолжительностью не менее 1 ч с интенсивностью не менее 2 мм/10 мин (рис. 3).

Были построены приземные и высотные (AT850) карты основных метеорологических параметров по данным реанализа ERA5 в день схода селя и за предшествующие дни для того, чтобы проследить эволюцию атмосферных процессов, повлиявших на возникновение селеопасных осадков.



а б

Рис. 3. Предикторы селеобразования: а) максимальная интенсивность, мм/10 мин; б) продолжительность дождя, ч

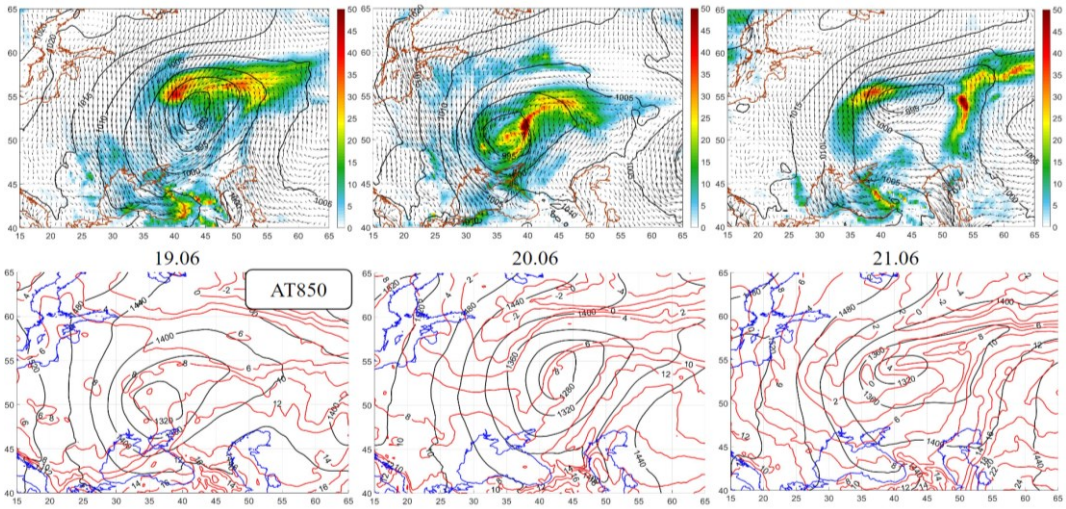
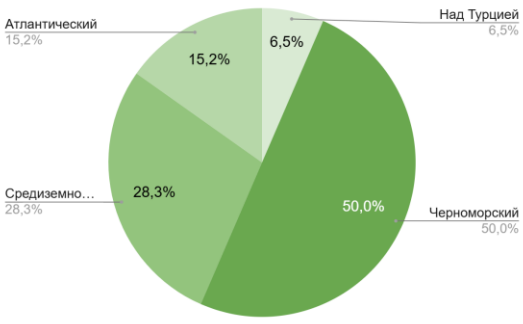


Рис. 4. Пример анализа синоптической ситуации для селевого случая 21.06.2005 (Водопадный, Сочи).

По итогам синоптического анализа селевых событий была составлена сводная таблица, которая выявила, что подавляющее количество селей было вызвано прохождением Черноморского циклона.

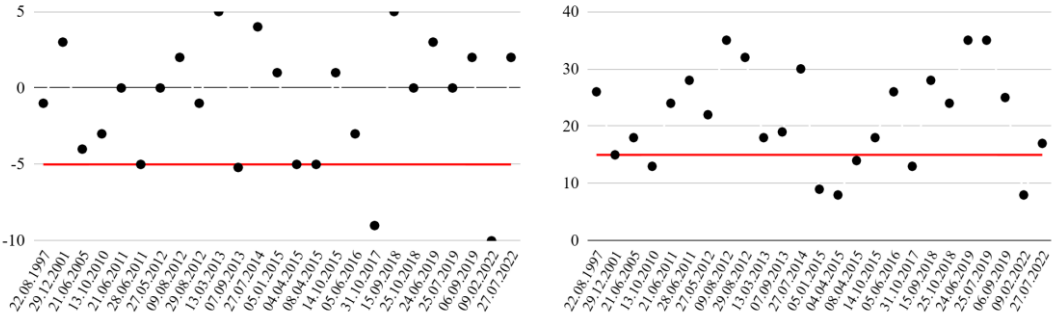


21.06.2005	Водопадный	Атлантический циклон 990, южная периферия 1000
13.10.2010	Сочи (12.10 32,6 мм / 11,1 мм)	**Черноморский циклон**
21.06.2011	Дагомыс-Сочи (13,2 мм / 6,4 мм)	**Черноморский циклон 1000**
28.06.2011	Сочи (19,6 мм / 15,7 мм)	**Черноморский циклон 1000**
27.05.2012	Лазоревское, Сочи (7,7 мм / 6,0 мм)	Средиземноморский циклон
09.08.2012	Красная поляна (6,4 мм / 0,09 мм	**Черноморский циклон**
29.08.2012	Красная поляна	**Черноморский циклон 1000**
13.03.2013	Сочи (32,3 мм / 21,2 мм)	Антициклон севернее 2030; Средиземноморский циклон
07.09.2013	Адлер	**Черноморский циклон 1010**
27.07.2014	Красная поляна	Средиземноморский циклон
05.01.2015	Сочи, Хостинский район	Атлантический циклон 985 южная периферия 1005;

а б

Рис. 5. Синоптический анализ а) Циклоны, ставшие триггером селевых ситуаций на Черноморском побережье; b) Фрагмент сводной таблицы

По данным реанализа ERA5 были построены карты аномалий температуры и аномалий интегрального влагосодержания в столбе атмосферы для каждого селевого случая. Затем значения аномалий также были сопоставлены с датами селевых событий. Пороговое значение аномалии температуры на 850 гПа (~ 1,5 км) составляет не менее – 5°C (в промежутке от +5°C до –5°C), то есть находится в зоне фронтального раздела, аномалии интегрального влагосодержания водяного пара составляет 15 мм, что указывает на достаточное содержание влаги в атмосфере, необходимое для схода селя.



(a) (b)

Рис. 6. Предикторы селеобразования a) Аномалия температуры на 850 гПа; b) Аномалия интегрального влагосодержания в столбе атмосферы

Радиус значимой корреляции определяет расстояние, на котором наблюдается статистически значимая связь между метеорологическими параметрами. Этот показатель характеризует пространственную согласованность изменчивости осадков, что важно для прогнозирования селевой опасности. Анализ показал, что радиус достоверной корреляции суточных сумм осадков составляет 50 км (таблица 2).

Таблица 2. Радиус пространственной корреляции для поля осадков по станционным данным

	Коррел	Расст, км
СОЧИ\КРАСНАЯ ПОЛЯНА	0,67	50
СОЧИ\ТУАПСЕ	0,58	116
СОЧИ\КЛУХОРСКИЙ ПЕРЕВАЛ	0,4	152
СОЧИ\КРАСНОДАР	0,37	172
СОЧИ\АРМАВИР	0,33	193
СОЧИ\АНАПА	0,26	335
СОЧИ\ПРИМОРСКО-АХТАРСК	0,26	300
СОЧИ\ЗЕЛЕНЧУГСКАЯ	0,18	153
СОЧИ\БУДЕННОВСК	0,16	378
СОЧИ\ПЯТИГОРСК	0,14	273
СОЧИ\МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ	0,14	282
СОЧИ\КИСЛОВОДСК	0,14	244
СОЧИ\ШАДЖАТМАЗ	0,12	264

Выводы

Исследование метеорологических условий формирования селей на Черноморском побережье России является важной задачей в контексте прогнозирования и минимизации рисков. Селевые потоки представляют серьезную угрозу для инфраструктуры и населения прибрежных регионов, что определяет необходимость детального изучения факторов, провоцирующих их возникновение. Проведенная работа позволила выявить ключевые метеорологические параметры, влияющие на возникновение селей, рассчитать их критические значения и определить пространственно-временные закономерности.

1. Определена роль влияния изменения климата на характер выпадения осадков:

(a) Наблюдается увеличение интенсивности осадков при одновременном уменьшении их продолжительности в последние 10 лет и значительном сокращении пропусков в событии дождя *(преобладание непрерывных интенсивных, но непродолжительных дождей)*.

(b) Также изменился характер накопления осадков в течение 20 дней перед событием – значительное увеличение суммы осадков в последние 5 дней перед сходом селя.

2. Вычислены пороговые значения селевой опасности: осадки продолжительностью не менее 1 ч с интенсивностью не менее 2 мм/10 мин и суммой за сутки не менее 40 мм; аномалия температуры -5°C, аномалия содержания водяного пара 20.

3. Выявлена преобладающая роль Черноморских циклонов в формировании селей (около 50% от всех селевых ситуаций).

4. Выполнен анализ пространственной корреляции, который показал, что радиус достоверной корреляции суточных сумм осадков составляет 50 км.

Полученные пороговые значения представляют собой новый научный результат, который может быть интегрирован в системы мониторинга и прогнозирования селевой опасности. Эти значения помогут совершенствовать методы прогнозирования селей, разработать региональные модели и оптимизировать систему мониторинга и предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Комплексный подход к оценке селевой опасности в горных долинах Кыргызской Республики

В. Загинаев[1], С. Ерохин[2], Д. Сакыев[3], М. Аманова[3]

[1]Институт исследования горных сообществ, Университет Центральной Азии, Бишкек, Кыргызская Республика, vitalii.zaginaev@ucentralasia.org

[2]Институт водных проблем и гидроэнергетики, Национальная Академия Наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика

[3]Департамент мониторинга, прогнозирования чрезвычайных ситуаций при Министерстве чрезвычайных ситуаций Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика

Аннотация. Кыргызская Республика в значительной степени подвержена действию селевых потоков. Селевые потоки составляют более 30% от общего числа опасных природных процессов, происходящих на территории Кыргызской Республики, 96% селей формируется от ливневых осадков, 3% – от снеготаяния и 1% – от прорывов высокогорных озер. Однако гляциальные сели являются наиболее катастрофическими и наносят наибольший ущер. Для селеформиравния ключевыми факторами являются: геологические (морфологический, литологический, генетический, тектонический) и гидрологические (интенсивные ливни, снеготаяние, прорывы озер). В данном исследовании определена критическая роль селевых очагов в трансформации водных потоков в селевые и в многократном увеличении их разрушительной силы. Селевые очаги используются как один из наиболее важных критериев для оценки селевой опасности долин. Для всей территории Кыргызской Республики составлен каталог селеопасных рек, содержащий информацию о более чем 700 водотоках, включая информацию о прохождении селей с 1925 г. Рациональное освоение горных территорий, а также разработка защитных превентивных мер требует от селеведения применения современных методов картографирования селей. Последние десятилетия характеризуются усиленным вниманием к проблемам оценки селевой активности и риска, возникает важность оценки роли климата в селевой активности для построения адекватной системы защиты. Для эффективного управления рисками селей и паводков необходимо четкое понимание того, где сели и паводки произошли или могут произойти; какие районы могут потенциально пострадать; понимание основных триггеров и того, как их распознать; и потенциальные структурные и неструктурные решения для снижения риска. Комплексный подход по оценке селеопасности долин позволяет эффективно планировать защитные мероприятия, зонировать территории по степени опасности и снижать ущерб от селевых процессов в условиях изменяющегося климата.

Ключевые слова: *селевые потоки, селевая опасность, горные долины, Кыргызстан, селевые очаги, прорывоопасные озера, управление рисками*

Ссылка для цитирования: Загинаев В., Ерохин С., Сакыев Д., Аманова М. Комплексный подход к оценке селевой опасности в горных долинах Кыргызской Республики. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 455–468.

Comprehensive approach to debris flow hazard assessment in mountain valleys of the Kyrgyz Republic

V. Zaginaev[1], S. Erokhin[2], D. Sakyev[3], M. Amanova[3]

[1]Mountain Societies Research Institute, University of Central Asia, Bishkek, Kyrgyz Republic, vitalii.zaginaev@ucentralasia.org

[2]*Institute of Water Problems and Hydropower, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic*

[3]*Hazard Monitoring and Forecasting Department, Ministry of Emergency Situations of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic*

Abstract. The Kyrgyz Republic is significantly exposed to debris flows. Debris flows account for more than 30% of the total number of hazardous natural processes occurring in the territory of the Kyrgyz Republic. 96% of debris flows are formed by torrential precipitation, 3% by snowmelt, and 1% by outburst floods from high-altitude lakes. However, glacial debris flows are the most catastrophic and cause the greatest damage. Key factors for debris flow formation are: geological (morphological, lithological, genetic, tectonic) and hydrological (intensive rainfall, snowmelt, lake outbursts). This study identifies the critical role of debris flow source areas in transforming water flows into debris flows and multiplying their destructive power. Debris flow source areas are used as one of the most important criteria for assessing debris flow hazard in valleys. A catalog of debris flow-prone rivers has been compiled for the entire territory of the Kyrgyz Republic, containing information on more than 1,700 water courses, including information on debris flow occurrences since 1925. Rational development of mountain territories, as well as the development of protective preventive measures, requires debris flow science to apply modern methods of debris flow mapping. Recent decades have been characterized by increased attention to problems of debris flow activity and risk assessment, highlighting the importance of evaluating the role of climate in debris flow activity for building an adequate protection system. For effective management of debris flow and flood risks, a clear understanding is needed of where debris flows and floods have occurred or may occur; which areas may potentially be affected; understanding of the main triggers and how to recognize them; and potential structural and non-structural solutions for risk reduction. A comprehensive approach to assessing debris flow hazard in valleys allows for effective planning of protective measures, zoning of territories by hazard level, and reduction of damage from debris flow processes under changing climate conditions.

Key words: *debris flows, hazard, mountain valleys, Kyrgyzstan, debris flow source areas, outburst-prone lakes, risk management*

Cite of this article: Zaginaev V., Erokhin S., Sakyev D., Amanova M. Comprehensive approach to debris flow hazard assessment in mountain valleys of the Kyrgyz Republic. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 455–468.

Введение

Кыргызская Республика за свою многолетнюю историю неоднократно подвергалась разрушительным бедствиям, которые влекли за собой огромные экономические потери, и самое страшное – гибель людей. Среди опасных экзогенных процессов по частоте формирования, территориальному распространению, масштабам наносимых ущербов особое место занимают селевые потоки и селеформирующие паводки. В среднем ежегодно в республике происходит около 70 чрезвычайных ситуаций, связанных с селями и паводками, что составляет до 31% всех чрезвычайных ситуаций. Селе-паводковому поражению подвергаются населенные пункты (95% всех населенных пунктов республики находятся на берегах или конусах выноса рек или временных водотоков), транспортные коммуникации, сельхозугодия, гидротехнические, ирригационные сооружения и другие объекты. Почти на всей территории Кыргызской Республики проявляется селевая деятельность.

В период весенне-летних ливней 2024 г. на реках, стекающих со склонов Кичи-Алайского, Алайскогого, Ферганского, Чаткальского, Кыргызского, Кунгей и Терскей Ала-Тоо хребтов, наблюдались выдающиеся селевые паводки, принесшие большой экономический ущерб. В ходе прохождения селевых потоков были разрушены дома,

затоплены сельскохозяйственные поля, разрушены мосты и дороги, а также были человеческие жертвы. Всего за весенне-летний период 2024 г. было зафиксировано более 50 разрушительных селевых потоков.

В 2024 г. на реке Зындан (бассейн р. Тон) в результате прорыва высокогорного озера повторились мощные грязекаменные селевые потоки, по мощности сходные с катастрофическим селем прорывного характера сошедшим по этой долине в 2008 г. [*Narama et al., 2010; Zaginaev et al., 2024*].

Место исследования

Территория Кыргызстана занимает юго-восточную часть Центральной Азии. Ее границы проходят главным образом по естественным рубежам – гребням высоких горных хребтов и рекам, за исключением окраинных долин (Чуйской, Таласской и Ферганской), где граница спускается на равнину. На севере и северо-востоке она граничит с Казахстаном, юго-востоке – с Китаем, юго-западе – с Узбекистаном и на юге – с Таджикистаном. Площадь республики составляет 198,4 тыс. км^2, основная часть которой занята мощной горной системой Тянь-Шань, а на юге – хребтами Памиро-Алая.

Более 60% территории страны находится на высоте от 2000 до 4000 м над уровнем моря [*Ресурсы поверхностных вод СССР, вып. 1*]. В широтном направлении вытянута вся горная система. В систему Тянь-Шаня входят следующие орографические районы: Северный, Восточный, Западный, Юго-Западный и Внутренний. Северный Тянь-Шань представляет собой сравнительно молодую горную систему, включающую следующие горные хребты в пределах Кырызстана: Таласский, Кыргызский, Кунгей и Тескей Ала-Тоо [*Ресурсы поверхностных вод СССР, вып. 2*], созданную глыбовыми поднятиями и складкообразованием на месте старой, ранее существовавшей, но сильно выровненной. Позднее поднятия и складки подверглись различным рельефным изменениям, в особенности речной эрозии.

В тесной зависимости от геологических условий: от состава пород, разломов и др. зависит развитие тех или иных типов селевых очагов, играющих ключевую роль в селеформировании. Селевые очаги – это участки горных долин, обладающих свойствами трансформации водного потока в селевой. Селевые очаги часто путают с эрозионными очагами, которые также являются участками горных долин, которые лишь подпитывают обломочным материалом водный поток, качественно не изменяя его. Водные потоки до селевого очага имеют плотность ниже 1,1 г/см^3, после прохождения селевого очага свыше 1,1 г/см^3 и до 2,5 г/см^3. При прохождении эрозионных очагов водный поток подпитывается рыхлообломочным материалом, однако, его плотность остается ниже 1,1 г/см^3.

Морфологически селевые очаги представляют собой узкие и глубокие горные ущелья с крутыми высокими бортами, чаще сложенными рыхлообломочным неустойчивым к размыву материалом, или реже скальными породами. Днища ущелий имеют крутизну 10–20° и выше. Днища завалены рыхлообломочным, в основном, склоновым материалом, а также обломками, принесенными с верхних участков долины. Особую форму имеют селевые очаги, образованные на склонах передовых уступов моренно-ледниковых комплексов. Это, так называемые, селевые овраги, или селевые врезы глубокие с крутыми бортами с V-образным поперечным профилем. Вверх по оврагу высота его бортов и ширина по их верхней кромке уменьшаются. Селевые овраги на горных склонах получили название селевых рытвин или селевых лотков. Длина селевых очагов изменяется от нескольких сотен метров до первых километров, высота бортов от нескольких десятков до первых сотен метров.

Эрозионные очаги имеют форму крутых обрывов, которые образуются при подрезании рекой либо горных склонов долины, либо уступов речных террас. Длина эрозионных обрывов обычно составляет несколько десятков метров, высота от 1 до 30–40 м.

Между селевыми и эрозионными очагами нет отчетливо выраженной морфологической, литологической, инженерно-геологической границы. Тип очага

проявляется по результатам воздействия на него водного потока: если водный поток, насыщаясь обломочным материалом, переходит в селевой – это селевой очаг, если он так и остается водным потоком, хотя и насыщенным наносами, то очаг эрозионный. Различием между селевым и водным паводковым потоками является их плотность. В соответствии с положением «Руководства селестоковыми станциями и гидрографическими партиями» (1990) принято считать, что плотность селевой смеси превышает 1100 кг/м^3. Морфология селевых русел имеет большие отличия от русел паводковых. Навалы глыб и валунов, селевые валы и ложбины, русловые ступени, «выплески» грубообломочного материала на поверхности надпойменных террас – вот признаки селевых русел. По ним выявляются селевые очаги в горных долинах.

Селевые врезы распространены преимущественно на моренных отложениях ниже современного оледенения. Они распространены по территории более или менее равномерно. Селевые рытвины развиты не только на элювиально-делювиальном субстрате, но и на коллювиальном (на осыпях). Причем, в современных гляциальных и перигляциальных областях рытвины приурочены преимущественно к осыпям. Отмечены случаи их развития и на уступах морен, где могут зарождаться сдвиговые и эрозионно-сдвиговые селевые процессы.

Другие типы очагов развиваются преимущественно на скальных участках горных хребтов (скальные очаги). Чаще их можно видеть по тектоническим разломам на контактах. Поэтому скальные селевые очаги встречаются в осевых участках горных хребтов. Рытвины, развиваются преимущественно, на осадочных толщах, делювиальных склонах, развитых в средних частях хребтов и в предгорьях. К осадочным толщами делювиальным отложениям приурочены и активные стокообразующие поверхности.

Селевые врезы приурочены не только к древним моренам, но и к другим мощным морфогенетическим образованиям, таким как оползни, обвалы, каменные глетчеры.

Результаты

Из анализа данных, составленного для всей территории Кыргызской Республики каталога селеопасных рек выделены на основе данных об исторических катастрофических селевых потоков наиболее подверженные районы, карта приведена на рис. 1.

Основной причиной селеобразования в Кыргызстане являются дожди большой интенсивности и продолжительности, что составляет около 96% от всех зарегистрированных в республике случаев, на долю селевых потоков, вызванных активным снеготаянием, приходится порядка 3% и около 1% приходится на потоки прорывного характера.

Как правило наибольшая селевая активность проявляется обычно не на главной реке бассейна, а на ее притоках, имеющих большее падение (высокие уклоны) и сравнительно небольшие размеры водосборов, которые чаще могут быть одновременно охвачены интенсивным дождем. В селевых районах Кыргызской Республики в теплый период года выпадает в среднем 200–500 мм осадков. Осадки ливневого характера наблюдаются в апреле – августе (селеопасный период). Среднее число дней с ливнями в апреле – июле равно 5–7. В последние годы в связи с изменением климата в некоторых областях наблюдается продление селеопасного периода до сентября.

Анализ имеющихся материал показал, что сели возникали при осадках с количеством более 30 мм за дождь, при этом интенсивность ливней в Приферганском горном обрамлении достигала 1,44 мм/мин, в Ыссык-Кульской котловине – 1 мм/мин, на Кыргызском хр. – 0,7 мм/мин, на Таласском – до 0,5 мм/мин [*Крошкин и Талмаза, 1960; Ильясов, 1962*].

Образование селевого потока начинается в форме паводка, который, двигаясь вниз по долине, попадает в селевой очаг, насыщается рыхлообломочным материалом и тем самым трансформируется в селевой поток. Сель и паводок – это разные формы горных потоков. Одна форма может легко трансформироваться в другую и обратно в зависимости от строения горной долины. Селевые потоки тесно связаны с паводками и

наоборот. Поэтому прогнозирование селевой активности отражает в целом увеличение до катастрофических размеров водности горных и предгорных потоков. Селевые потоки отличаются от паводковой более высокой концентрацией твердого материала и плотностью. При насыщении паводкового потока грубообломочным материалом более 10% его плотность возрастает свыше 1,1 г/см^3. Такой поток уже качественно отличается от паводкового.

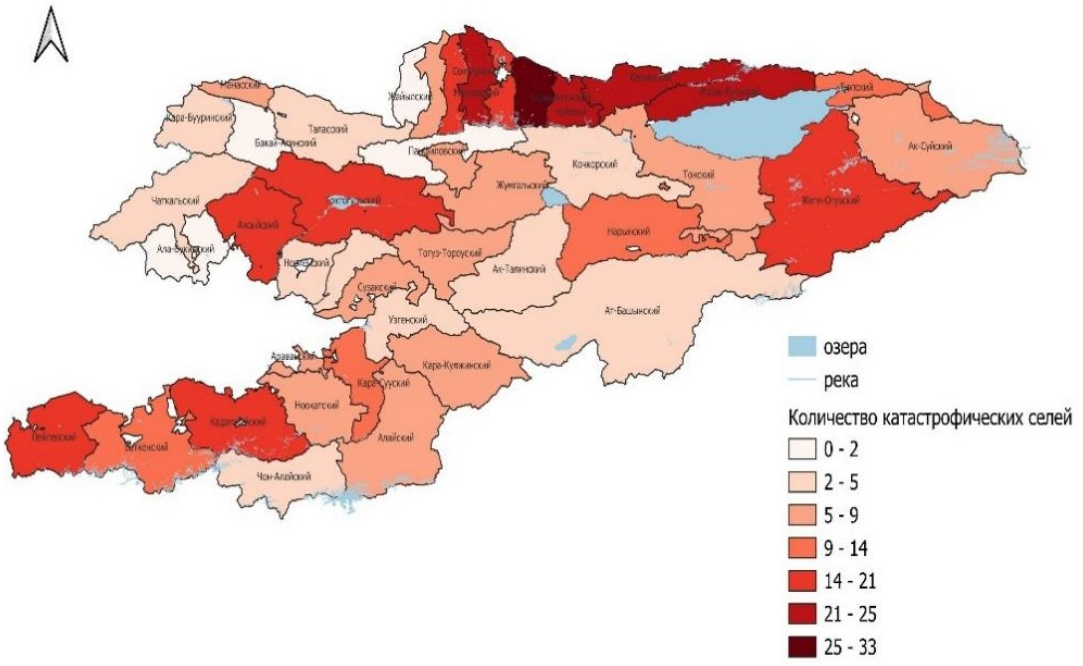


Рис. 1. Количество селевых потоков по административным районам Кыргызской Республики

Скорость движения селевых потоков — в среднем 2–4 м/с, иногда 4–6 м/с, что обуславливает их большое разрушительное действие [*Херхеулидзе, 1972*].

Кроме паводков селевые потоки сопровождаются наносоводными и эрозионными процессами.

Селевые потоки в Кыргызской Республике возникают в результате:

1) выпадения жидких атмосферных осадков;

2) прорывов высокогорных озер и внутриледниковых емкостей

3) интенсивного таяния снега.

При своем движении вниз по долине вода прорывного потока проникает в рыхлообломочные породы, слагающие борта и днище долины, насыщает их и вовлекает в движение. При этом концентрация твердого обломочного материала в потоке возрастает, плотность потока увеличивается. По мере насыщения прорывного потока обломочным материалом увеличивается его плотность, от которой зависит структура и динамика потока. На первом этапе селеформирования насыщение еще не значительно, его плотность увеличивается только до 1,4 кг/дм^3. Такой поток по своим свойствам относится к наносоводным. На втором этапе насыщения плотность возрастает до 1,8 кг/дм^3 и поток становится грязевым. На третьем этапе плотность может увеличиться до 2,5 кг/дм^3 и поток переходит в грязекаменный, обладающий огромной разрушительной силой. В таком потоке глыбы диаметром до 5–6 м плывут как легкие деревяшки.

Таким образом, по структурному сходству, по соотношению гидродинамических и реологических свойств селевые потоки группируются в следующие типы:

1) наносоводные;

2) грязевые;

3) грязекаменные.

Наблюдения в горных долинах показывают, что в селеформировании принимает участие рыхлообломочный материал различных генетических типов четвертичных отложений. При этом вклад каждого типа в процесс селефомирования далеко не одинаков. Так, в процессе полевых испытаний выяснилось, что генетически различные отложения насыщают водный поток обломочным материалом не одинаково: наиболее высокая степень насыщения наблюдается в селевых потоках, размывающих гляциальные отложения морен. Напротив, степень насыщения селевых потоков, размывающих аллювиальные отложения значительно ниже (см. таблицу 1). Соответствует концентрации и плотность селевых потоков. Селевые потоки высокой плотности могут сформироваться из гляциальных или пролювиальных отложений, но не из аллювиальных.

Таблица 1. Результаты расчетов концентрации обломочного материала в селевой смеси $C_т$, % и плотности селевого потока

Стратиграфо-генетический комплекс	Число проб	Весовая концентрации обломочного материала в селевом потоке, *ст*	Плотность селевых потоков, г/см^3 ρ_c
аллювий Q_{IV}	30	0.41	1.68
аллювий Q_{III}	30	0.58	1.96
аллювo-пролювий Q_{IV}	36	0.47	1.78
аллювo-пролювий Q_{III}	30	0.41	1.68
коллювийQ_{IV}	50	0.53	1.87
делювий Q_{IV}	38	0.47	1.78
гляциальный Q_{IV}	60	0.63	2.04
гляциальный Q_{III}	30	0.91	2.50
гляциальный Q_{II}	30	0.91	2.50
коллювиально-гляциальный Q_{IV}	30	0.58	1.96
пролювиальный Q_{III-IV}	30	0.82	2.3

Причиной не одинаковой предрасположенности генетически разных отложений к селеформированию является их литологический состав. В гляциальных или пролювиальных отложениях содержится больше пылеватых и глинистых частиц, чем в аллювиальных отложениях, из которых эти частицы вымываются постоянно действующими речными потоками.

Сели гляциального генезиса

В горах Северного Тянь-Шаня за время их формирования образовались тысячи озер различного генезиса, из которых сотни озер имели неустойчивые плотины и прорывались. Последствия многих прорывов были катастрофическими для жителей горных долин и предгорных равнин [*Ерохин и др., 2020; Ерохин и Диких, 2003*]. В процессе движении вниз по долине прорывной поток может трансформироваться в селевой поток, при этом его разрушительная энергия возрастает в десятки раз. Соответственно резко увеличиваются площадь зоны селевого поражения, и степень разрушительности селевого потока. Из-за того, что прорывной поток часто трансформируется в селевой, прорывоопасные озера стали называть селеопасными.

Несмотря на то, что потоки гляциального генезиса составляют всего 1% от общего числа селей они практически во всех зарегистрированных случаях носят катастрофический характер [*Erokhin et al., 2019; Zaginaev et al., 2016*]. Некоторые параметры провывных потоков, которые трансформировались в катастрофические селевые потоки приведены в таблице 2.

Таблица 2. Наиболее катастрофические сели гляциального генезиса

№	Название озера	Бассейн реки	Год прорыва	Расход прорывного потока, $м^3/с$	Расход селевого потока, $м^3/с$	Тип озера	Горный хребет
1	Челектор (Ч-53)	-	2017	20	200	моренно-ледниковое стационарное	Северный склон Кыргызского хребта
2	Текетор (Ч-12)	Туюк-Ыссык-Ата	16.08.1953 08.1978	40–50 30	- 300	моренно-ледниковое стационарное	
3	Такыртор (Ч-55)	Ноорус	4.06.1991 4.06.2009	15 25	- 300	моренно-ледниковое нестационарное	
4	Тезтор (Ч-8)	Ала-Арча	22.06.1953 июнь1988 июль 2004 31.07.2012	50 - 6–8 10–15	250 - - 300	моренно-ледниковое нестационарное	
5	Топ-Карагай (Ч-10)	Ала-Арча	1974 1993	6	-	моренно-ледниковое нестационарное	
6	Аксай	Ала-Арча	50.07.1960 26.07.1961 21.08.1965 18.06.1968 24.07.1969 18.07.1970 04.08.1975 18.07.1980	- - - 30–40 30–40 10–20 - -	- - - 800 900 150 - -	внутреледниковая емкость	
7	Аксай (Ч-40)	Ала-Арча	24– 25.07.2015	-	120	моренно-ледниковое стационарное	
8	Иша (Ч-3)	Аксуу	06.1968	20	100	моренно-ледниковое нестационарное	
9	Кейды-Кучкач (Ч-4)	Аксуу	07.1980 12.08.1983	40 40–50	- 500	моренно-ледниковое стационарное	
10	Ат-Джайлоо (Ч-13)	Кегеты	13.07.1968 1997	- 10	- 60	моренно-ледниковое стационарное	
11	Джарды-Каинды (Ч-26)	Сокулук	1995	-	-	моренно-ледниковое	
12	Акпай (Ч-19)	Сокулук	01.08.2021	30	350	моренно-ледниковое нестационарное	
27	Бузулгансуу (Н-14)	Шамси-Кочкорское	июль 1987	20	100	ледниковое	Южный склон Кыргызского хребта
13	Джалпактор (Т-2)	Чиркана к Талас	20.06.1969 14.07.1976 07.1993 07.1997	- - 5–8 35	- - 150 300	моренно-ледниковое нестационарное	Северный склон Талас-

№	Название озера	Бассейн реки	Год прорыва	Расход прорывного потока, $м^3/с$	Расход селевого потока, $м^3/с$	Тип озера	Горный хребет
							ского хребта
14	Кызылжар (И-72)	Чон-Аксуу	15.07.1958	50	-	моренно-ледниковое	Южный склон хребта Кунгей-Ала-Тоо
20	Чоктал-1 (И-1)	Чоктал	27.09.1978	30	300	моренно-ледниковое стационарное	
21	Чоктал-2 (И-2)	Чоктал	09.1999	11	250	моренно-ледниковое нестационарное	
22	Чонкойсуу (И-13)	Чонкойсуу	14.06.1994	20	-	моренно-ледниковое	
15	Чон-Кызылсуу (И-29)	Чон-Кызылсуу	5.06.1959 октябрь 1966 11.07.1968	- 60 50	- - -	моренно-ледниковое стационарное	Северный склон хребта Тескей-Ала-Тоо
16	Кичи-Кызылсу (И-53)	Кичи-Кызылсу	август 1952	45	-	моренно-ледниковое стационарное	
17	Тамга (И-6)	Тамга	12.08.1964	30	-	моренно-ледниковое стационарное	
18	Тосор (И-176)	Тосор	9.07.1995	60	-	моренно-ледниковое стационарное	
19	Ангысай	Тон	17.06.1975 24.07.1978	- 15	- 300	внутреледниковая емкость	
23	Суюктор (И-10)	Джеруй	1985	-	300	моренно-ледниковое нестационарное	
24	Кольтор (И-35) (I-35)	Тон	июль 2003	-	-	моренно-ледниковое нестационарное	
25	Курумды (И-172)		июль 2015	-	-	моренно-ледниковое нестационарное	
25	Четынды (И-181)	Джеруй-Аксай-Тон	15.08.2013	15	300	моренно-ледниковое нестационарное	
26	Зындан (И-167)		июль 2008 август 2024	25 -	250 200	моренно-ледниковое нестационарное	
28	Аллаудин (О-20)	Шахимардан	июль 1998	30	300	моренно-ледниковое нестационарное	Северный склон Алайского хребта
29	Тегермач-южный (О-16)	Исфайрамсай	июль 1999	-	-	моренно-ледниковое стационарное	
30	Тегермач-северный (О-15)	Исфайрамсай	июль 1978	30	600	моренно-ледниковое стационарное	

№	Название озера	Бассейн реки	Год прорыва	Расход прорывного потока, $м^3/с$	Расход селевого потока, $м^3/с$	Тип озера	Горный хребет
31	Яшилькель	Исфайрамсай	18.06.1966	1000	2000	Завально-обвальное	
31	Яшилькель	Исфайрамсай	18.06.1966	1000	2000	Завально-обвальное	

Оценка селевой активности горных долин

Развитие селевых процессов зависит от двух групп факторов: 1) геологических факторов; 2) гидрологических факторов. Каждая группа факторов играет свою роль в формировании селевых потоков и от их совокупного действия зависит активность селевого процесса в каждой горной и предгорной долине.

Особенно большую роль в оценке селевой активности горных долин играет исторический фактор. Однако фиксация селевых потоков проводится в Кыргызстане эпизодически и зависит от катастрофичности селевого потока. Селевые потоки, не причинившие вред населению, обычно не заносятся в исторические хроники, хотя их мощность бывает весьма значительной. Поэтому исторические данные о проявлениях селевых потоков в прошлом по той или иной долине необходимо дополнять натурными исследованиями селевых признаков в этой долине.

Каждый селевой поток оставляет следы, которые проявляются в различных признаках строения формируемой им долины, из множества которых выделяются три главных:

- признаки в строении русла водотока;
- признаки в строении руслового конуса выноса;
- признаки в составе отложений, слагающих днище горной долины.

В этих селевых признаках отражается действие всех вышеперечисленных геологических и гидрологических факторов селеформирования. По этим признакам можно оценить селевую активность горных долин Тянь-Шаня и разделить их по степени активности на 4-е категории: А, Б, В, Г (таблица 3).

Таблица 3. Признаки селевой активности

№ п/п	Категории горных долин по селевой активности	Селевые признаки в главной долине			Селевая активность
		в строении русла водотока	в строении устьевого конуса выноса	в составе отложений днища долины	
1	**А**	1) селевые гряды; 2) селевые ступени; 3) селевые перемычки; 4) отсутствие русловой отмостки.	1) глыбово-каменные валы и языки; 2) селевые ложбины; 3) глыбовые россыпи; 4) миграция русла по поверхности конуса.	1) навалы крупных обломков вдоль берегов русла; 2) отложения инстративного и перстративного аллювия; 3) селевая фация аллювия.	Весьма активные
2	**Б**	1) глыбово-валунно-каменная	1) конус выноса расчленен врезом русла на глубину 5–25 м;	1) уменьшение крупности обломочного материала от	Малоактивные

№ п/п	Категории горных долин по селевой активности	Селевые признаки в главной долине			Селевая активность
		в строении русла водотока	в строении устьевого конуса выноса	в составе отложений днища долины	
		русловая отмостка; 2) галечно-гравийно-песчаная пойма; 3) уступы подреза берегов.	2) поверхность конуса хорошо задернована.	стрежня русла к берегам; 2) отложения перстративного аллювия с содержанием селевых наносов;	
3	**В**	1) отсутствие русловой отмостки; 2) селевые ступени; 3) уступы подреза берегов.	1) миграция русла по поверхности конуса; 2) глыбово-каменные валы и языки.	1) слоистые отложения перстративного и инстративного аллювия; 2) селевая фация аллювия	Активные
4	**Г**	1) отсутствие русловой отмостки; 2) гравийно-суглинистая пойма	1) выпуклый продольный профиль; 2) разветвленная сеть распластанных по конусу русел временных водотоков;	1) пролювиальные отложения; 2) отсутствие сортировки наносов; 3) отсутствие зависимости между крупностью обломков и продольным уклоном долины; 4) суглинистый и супесчаный заполнитель.	Активные

Из ряда селевых признаков, указанных в таблице 2, важнейшим является русловая отмостка. Она образуется в результате поступления в русло достаточно крупного обломочного материала преимущественно не аллювиального генезиса. Энергии водотока недостаточно для перемещения этого материала вдоль русла даже в период паводков, поэтому вдоль русла формируется каменная отмостка из плотно пригнанных один к другому валунов и крупной гальки. Так происходит в долинах, где почти отсутствует селевая активность. В этом случае между потоком и аллювиальными отложениями возможно динамическое равновесие, при котором фракционный состав транспортируемых наносов соответствует крупности русловых отложений.

В селеактивных долинах, где паводки часто формируются из селевых потоков, в процессе их распада, русловая отмостка не образуется. Это обусловлено тем, что селевые паводки имеют повышенную плотность, которая придает им эрозионную энергию достаточную, чтобы взломать русловую отмостку на всем протяжении крупных долин. Поэтому строение русла в селеактивных долинах отличается отсутствием русловой отмостки. Вместо плотно пригнанных валунов, выстилающих русловое ложе, в русле селеактивных долин наблюдаются валунно-галечные ступени, навалы валунов, подрезы бортов русла.

Другим важным селевым признаком является состав русловой фации аллювия. В селеактивных долинах категории А и В русловой аллювий представлен, в основном инстративным типом, а на участках расширений, выше конусов выноса боковых долин, перстративным типом. Для первого типа характерны небольшая мощность (несколько

метров), плохая сортировка и обработка обломочного материала. Перстративный аллювий (перестилаемый) представляет собой слоистые отложения с хорошо обработанным обломочным материалом, мощностью первые десятки метров. В долинах категории Б преобладает перстративный тип руслового аллювия, меньше развит констративный аллювий, значительную роль играет пойменный аллювий. В предгорных долинах категории Г днище выстилают пролювиальные отложения временно действующих потоков.

Для долин каждой категории характерен свой комплекс типов селесборов, составляющих эти долины, и определяющих не только их селевую активностью, но и типы селевых потоков, их мощность, периоды селевой активизации (таблице 4).

Таблица 4. Категории селевой активности горных долин

№ п/п	Категории долин	Типы селесборов в долинах	Селевая активность	Зоны формирования селевых потоков	Типы селевых потоков	Мощность селевых потоков, расход, $м^3$/сек	Селеактивный период	Пик селевой активности
1	**А**	1–4	Весьма активные	высокогорная	1) грязекаменные плотностью 1,8–2,2 г/$см^3$; 2) наносоводные плотностью 1,1–1,4 г/$см^3$	от 100 до 1000 $м^3$/сек	июнь–август	третья декада июля–первая декада августа
2	**Б**	2–4	Малоактивные	высокогорная	1) грязекаменные плотностью 1,8–2,2 г/$см^3$; 2) грязевые плотностью 1,4–1,8 г/$см^3$; 3) наносоводные плотностью 1,1–1,4 г/$см^3$	10–100 $м^3$/сек	июнь–август	вторая половина июля – первая половина августа
3	**В**	4–5	Активные	средне-низкогорная	1) грязевые плотностью 1,4–1,8 г/$см^3$; 2) наносоводные плотностью 1,1–1,4 г/$см^3$.	10–200 $м^3$/сек	май–сентябрь	июнь-июль
4	**Г**	6	Активные	предгорная	1) наносоводные плотностью 1,1–1,4 г/$см^3$; 2) грязевые плотностью 1,4–1,8 г/$см^3$.	3–8 $м^3$/сек	апрель – июнь	май

Разделение горных долин на категории позволяет дифференцировать горные и предгорные территории по их предрасположенности к селеформированию, отразить эту дифференциацию на карте (рис. 2) и использовать её для построения селевого прогноза, как критерий, определяющий место проявления селевого потока.

Селеактивность горных долин изменяется в процессе её развития. Деградация ледников приводит к появлению разнообразных типов моренно-ледниковых комплексов, которые играют важную роль в формировании селевых потоков, так как через них проходят потоки талых ледниковых вод. На поверхности моренно-ледниковых комплексов образуются прорывоопасные озера, так как их плотины на 40–60% состоят из неустойчивых погребенных льдов. Прорывные потоки дают начало мощным катастрофически опасным селевым потокам.

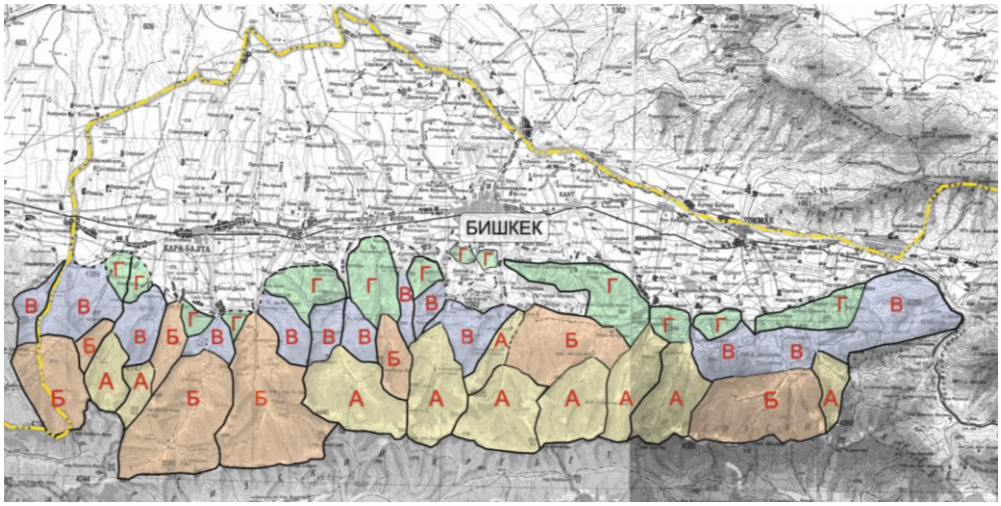


Рис. 2. Распределение горных долин северного склона Кыргызского хребта по категориям селевой активности.

Для всей территории Кыргызской Республики обновлена карта селевой опасности с учетом частоты прохождения селевых потоков, зон формирования и возможных объемов селей, приведенная на рис. 3.

Рис. 3. Карта селевой опасности Кыргызской Республики

На рис. 4 приведен фрагмент каталога селеопасных рек Кыргызской Республики, содержащий на данный момент информацию о 729 водотоках. Каталог также содержит информацию об исторических селевых событиях, что является очень важным для составления и обновления карт селевой активности.

Отношение	Название водотока	Куда и с какого берега	Длина водотока, км	Площадь селесборного бассейна, кв. км	Абсолютная высота, м		Средний уклон русла водотока	Даты прохождения селей или периоды селевой опасности	Карта-схема	Тип селевого потока	Возможные причины возникновения	Селевая активность
			Общая	Общая	Истока водотока	Устья конуса выноса	От истока до вершины конуса выноса, ‰					
Бассейн озера Иссык-Куль	Чон-Сарыбулак	"	16	29,6	3080	1610	91	-	49	Наносоводный, Грязекаменный	Ливневые	средняя
	Чон-Сугеты	"	17	32,1	3330	1610	101	-	50	Наносоводный, Грязекаменный	Ливневые	средняя
	Карасу	"	9,8	66	2090	1610	49	29.07.1952	51	Наносоводный, Грязекаменный	Ливневые	средняя
	Тургень-Аксу	Р. Джиргалан (л)	50	412	3340	1760	32	17.06.2016, 23.06.2016, 22.09.2015	52	Наносоводный, Грязекаменный	Ливневые	средняя
	Кудюр	р.Тургень-Аксуу (л)	2,51	10	2735	2197	214	IV-VII	52А	Наносоводный, Грязекаменный	Ливневые	средняя
	Боз-Учук	-	14,24	73,8	3141	1912	86	27.06.2011, 10.11.2016	52Б	Наносоводный, Грязекаменный	Ливневые	средняя
	Джергез	Аксуу	26	191	3029	1903	43	22.09.2015	52В	Наносоводный, Грязекаменный	Ливневые	средняя
	Каракол	-	50	394			49	17.07.2012, 12.04.2012,16.10.2020, 29.05.2020	52Д	Наносоводный, Грязекаменный	Ливневые	высокая
	Саи междуречья Турасу-Актерек	Кан. Чон-Арык	-	75	-	-	-	28.07.1964	53	Наносоводные	Ливневые	средняя

Рис. 4. Фрагмент каталога селеопасных рек Кыргызской Республики.

Заключение

Селевые потоки формируются в горных и предгорных долинах по всей территории Кыргызской Республики. По ходу своего движения они начинают распадаться, отлагать принесенный обломочный материал и трансформироваться в паводковые потоки, которые устремляются вниз на подгорные равнины. Таким образом, зона действия селевых процессов охватывает не только горы и предгорья, но и подгорные равнины, то есть значительную часть территории Республики

Формирование и развитие селевых процессов происходит при определенных условиях, складывающихся в горной долине под действием ряда факторов, которые разделяются на гидрологические и геологические. Первые определяют формирование водной составляющей селевого потока, от вторых зависит насыщение водного потока грубообломочным материалом, и его трансформация в селевой поток.

Селевые потоки характеризуются кратковременностью своего прохождения, высокой скоростью и разрушительной силой, насыщенностью твердым материалом, создающим характерные отложения. Сели обладают также большой эрозионной способностью, вызывая углубление русел и разрушение берегов, могут приводить к образованию паводков на реках. Сели формируются как на временных, так и на постоянных водотоках, при этом расход потоков резко возрастает и превышает паводковые расходы в несколько раз. Для селей характерно движение в виде последовательных волн (валов) с образованием заторов из обломочного материала, снежно-ледниковой массы, деревьев, кустарников с последующим их прорывом. Селевые потоки формируются при взаимодействии геолого-геоморфологических и гидрометеорологических факторов. К геолого-геоморфологическим факторам относятся – крутизна склонов и русел, наличие большого количества легкоразмываемых пород, селевых очагов и русел.

Для комплексной оценки селеопасности горных долин предлагается использовать комплекс факторов на основе селевых признаков, приведенных в таблицах 4 и 3.

Список литературы

Ерохин С.А., Диких А.Н. Оценка опасности действия селевых и паводковых потоков на территории Ала-Арчинского национального парка // Известия НАН КР, вып. 4, Бишкек, 2003, с. 130–139.

Ерохин С.А., Загинаев В.В., Чонтоев Д.Т. Прорывоопасные озера Кыргызстана. Бишкек, 2020, 272 с.

Ильясов А.Т. Сели на территории Киргизии и условия их возникновения // Материалы V Всесоюзного совещания по изучению селевых потоков и мер борьбы с ними. Баку: Изд-во АН Азерб. ССР, 1962, с. 115–118.

Крошкин А.Н., Талмаза В.Ф. О селевых явлениях в Киргизии // Изв. АН Киргизской ССР, сер. естеств. и технич. наук, 1960, 2(4): 147–162.

РД 52.30.238-89. Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям. Вып. 1. Организация и проведение работ по изучению селей. М., Гидрометеоиздат, 1990.

Ресурсы поверхностных вод СССР, т. 14, Средняя Азия. Бассейн р. Сыр-Дарьи, Гидрометеоиздат, 1969, вып. 1.

Ресурсы поверхностных вод СССР, т. 14, Средняя Азия, Бассейны оз. Иссык-Куль и рек Чу, Талас, Тарим. Гидрометеоиздат, 1973, вып. 2.

Херхеулидзе И.И. Скорости течения и русловые характеристики селевых потоков // Тр. ЗакНИГМИ, 1972, Вып. 40 (46).

Erokhin S.A., Zaginaev V.V., Meleshko A.A., Ruiz-Villanueva V., Petrakov D.A., Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S., Tutubalina O.V., Stoffel M. Debris flows triggered from non-stationary glacier lake outbursts: the case of the Teztor Lake complex (Northern Tian Shan, Kyrgyzstan) // Landslides, 2018, 15(1): 83–98. doi: 10.1007/s10346-017-0862-3.

Narama C., Duishonakunov M., Kääb A., Daiyrov M., Abdrakhmatov K. The 24 July 2008 outburst flood at the western Zyndan glacier lake and recent regional changes in glacier lakes of the Teskey Ala-Too range, Tien Shan, Kyrgyzstan. // Natural Hazards and Earth System Sciences, 2010, 10(4), 647–659.

Zaginaev V., Ballesteros-Cánovas J.A., Erokhin S., Matov E., Petrakov D., Stoffel M. Reconstruction of glacial lake outburst floods in northern Tien-Shan: implications for hazard assessment // Geomorphology, 2016, 269: 75–84. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.06.028.

Zaginaev V.V., Sakyev D.J., Nazarkulov K.B., Amanova M.T., Isaev E.K., Erokhin S.A. Monitoring the development of potential hazardous mountain lakes using remote sensing in the Kyrgyz Republic // International Journal of Geoinformatics, 2024, 20(12): 36–48.

Mathematical support for forecasting slush flows and avalanches with the help of fuzzy analysis

M.I. Zimin[1], A.Kh. Adzhiev[2], O.A. Kumukova[2], T.V. Gavrilenko[3], N.V. Kondratyeva[2], O.M. Kulikova[4], S.A. Zimina[1]

[1]Ontario Ltd., Toronto, Canada, zimin7@yandex.ru, zimin82@yandex.ru

[2]High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, adessa1@yandex.ru, kumukova@rambler.ru, kondratyeva_nat@mail.ru

[3]Surgut State University, Surgut, Russia, taras.gavrilenko@gmail.com

[4]Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia, , ya.aaaaa11@yandex.ru

Abstract. Mathematical support for forecasting slush flows and avalanches with the help of fuzzy analysis is considered. All types of them can be foreseen. Prediction formulae are based on mathematical modeling of physical and mechanical processes in snow. They can be used at any region. Effectiveness of this mathematical support is confirmed by experimental data.

***Key words**: slush flow, avalanches, mathematical support, forecast, snow, fuzzy analysis*

Cite of this article: Zimin M.I., Adzhiev A.Kh., Kumukova O.A., Gavrilenko T.V., Kondratyeva N.V., Kulikova O.M., Zimina S.A. Mathematical support for forecasting slush flows and avalanches with the help of fuzzy analysis. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 469–472.

Математическое обеспечение для прогнозирования водоснежных потоков и лавин с помощью нечёткого анализа

М.И. Зимин[1], А.Х. Аджиев[2], О.А. Кумукова[2], Т.В. Гавриленко[3], Н.В. Кондратьева[2], О.М. Куликова[4], С.А. Зимина[1]

[1]Ontario Ltd., Торонто, Канада, zimin7@yandex.ru, zimin82@yandex.ru

[2]Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, adessa1@yandex.ru, kumukova@rambler.ru, kondratyeva_nat@mail.ru

[3]Сургутский государственный университет, Сургут, Россия, taras.gavrilenko@gmail.com

[4]Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия, ya.aaaaa11@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается математическое обеспечение для прогнозирования водоснежных потоков и снежных лавин. Все их типы могут быть предсказаны. Прогностические зависимости базируются на результатах математического моделирования физико-механических процессов в снеге. Они пригодны для использования в любом регионе. Эффективность этого математического обеспечения подтверждается экспериментальными данными.

***Ключевые слова**: водоснежный поток, лавина, математическое обеспечение, прогноз, снег, нечёткий анализ*

Ссылка для цитирования: Зимин М.И., Аджиев А.Х., Кумукова О.А., Гавриленко Т.В., Кондратьева Н.В., Куликова О.М., Зимина С.А. Математическое обеспечение для прогнозирования водоснежных потоков и лавин с помощью нечёткого анализа. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 469–472.

Introduction

Planners, designers, and managers of public and industrial roads in avalanche areas often need to decide whether or not their safety procedure with respect to avalanches is adequate, and to choose an appropriate level of avalanche control [*Schaerer, 1989*]. The same problem occurs on sites exposed slush flows. Therefore, further improvement of slush flows and avalanche forecasting methodologies present some features of interest.

Predicting avalanches with the help of using fuzzy sets and results of mathematical modeling of physical and mechanical processes in snow is described in [*Zimin et al. 2020*]. Suggested technique simulates activity of a group of experts; so, prediction formulae knowingly have maximized semantic charge, and their efficient combination may be considered as optimized theory of prognosis of this slope process by a collective of professionals.

Such approach permits to foresee all types of avalanches. But, forecast of slush flows is not addressed, although they may occur in the same places. In addition, influence of situation in origin zone on dynamic parameters of slope processes is not researched too.

This study uses the same approach for developing mathematical support for prognosis of slush flows, determination of type of slope process (it may be avalanche or slush flow), and calculating its dynamic parameters. Prediction formulae for avalanche risk forecast are worked out before [*Zimin et al. 2020*].

Prediction formulae

Analysis of slope process risk with the help of fuzzy analysis according to [*Zimin et al. 2020*] results in one of the following reports.

1. No slope process risk.
2. Snow is in instable state, slope processes having volume of up to 10% of amount of snow in the site are possible during the next 24 h.
3. Snow is in instable state, slope processes having volume of 10–50% of amount of snow in the site are possible during the next 24 h. Slope processes having volume of up to 10% of amount of snow in the site are possible during the next second day.
4. Slope processes having volume of 10–50% of amount of snow in the site are expected during the next 24 h. Slope processes having volume of 10–50% of amount of snow in the site are possible during the next second day. Slope processes having volume of up to 10 % of amount of snow in the site are possible during the next third day.
5. Slope processes having volume of more than 50% of amount of snow in the site are expected during the next 24 h. Slope processes having volume of 10–50% of amount of snow in the site are possible during the next second and the third days.

Therefore, such analytical prediction permits not only to estimate danger, but also to determine volume of a slush flow or an avalanche in rough way. It is important for computing parameters of this slope processes.

Descent of the slush flow or the avalanche is considered as motion of material point. The slope is approximated by the angled line. Frictional coefficient depends on snow properties, slope process parameters, and angle of gradient. It is computed by formula:

$$k = 0.28 k_\alpha k_V k_\rho k_m k_{w_0}, \quad (1)$$

where $\mathbf{k}$ is the frictional coefficient at a segment of the angle line, $\mathbf{k_\alpha}$ is parameter taking into account influence of angle of slope over frictional coefficient, $\mathbf{k_V}$ is parameter making allowance for influence of avalanche volume, $\mathbf{k_\rho}$ is parameter adverting of density of snow in

avalanche site, $\mathbf{k_m}$ is parameter considering influence of moisture of snow, $\mathbf{k_{w0}}$ is parameter having respect to velocity starting at the first point of the segment.

Parameters $\mathbf{k_\alpha}$ and $\mathbf{k_{w0}}$ are calculated in such a manner. Firstly, factors of $\mathbf{k_{\alpha 0}}$ and $\mathbf{k_{w00}}$ are figured out:

$$k_{\alpha o} = 1 - \frac{1.12}{\pi} arctan(\,0.02\alpha), \tag{2}$$

where $\boldsymbol{\alpha}$ is slope inclination, degrees,

$$k_{woo} = 1 - \frac{0.73}{\pi} arctan(\,0.6w_o), \tag{3}$$

where $\mathbf{w_0}$ is velocity starting at the first point of the segment, m/s.

Then, $\mathbf{k_\alpha}$ and $\mathbf{k_{w0}}$ are computed as

$$k_\alpha = k_{\alpha 0}^{\,1+0.076\,arctan\left(\frac{1.14}{k_{voo}}\right)}, \tag{4}$$

$$k_{wo} = k_{woo}^{\,1+0.069\,arctan\left(\frac{1.12}{k_{\alpha o}}\right)}. \tag{5}$$

Other parameters are calculated like that

$$k_v = 1 - \frac{0{,}64}{\pi} arctan(\,0.00044V - 4.2), \tag{6}$$

where $\mathbf{V}$ is slope process volume,

$$k_\rho = 1 + \frac{0.68}{\pi} arctan(\,0.012\rho - 3), \tag{7}$$

where $\boldsymbol{\rho}$ is density of snow,

$$k_m = 1 + \frac{1.82}{\pi} arctan[\,0.0144m(16.2 - m)], \tag{8}$$

where $\mathbf{m}$ is moisture of snow in mass percentage.

In some cases, computing the frictional coefficient permits to fine-tune the forecast. Simulation physical and mechanical processes in the snow shows that slope process risk under $\boldsymbol{\alpha} < 15^o$ or avalanche origin zone length less than 11 m or thickness of the snow mantle less than 0.26 m is roughly the same as such danger under increasing α to 15º (if $\boldsymbol{\alpha} < 15^o$), increasing avalanche origin zone length to 11 m (if avalanche origin zone length is less than 11 m), increasing thickness of the snow mantle to 0.26 m (if thickness of the snow mantle is less than 0.26 m), as long as under these changes risk of avalanches or slush flows occurs and the frictional coefficient is suitable to start moving. In addition, $\mathbf{k_V}$ is computed under $\mathbf{V}$ being volume of all snow in the avalanche origin zone.

If $\mathbf{k_\rho} > \mathbf{k_m}$ and $\mathbf{m} > 27$, the slope process is considered as a slush flow. Otherwise, it is meant to be an avalanche.

Slope process speed decreasing in crossing area having barriers is figured out be formula

$$\Delta w = \sqrt{2gh_b}\,\frac{S_b}{S_t}, \tag{9}$$

where $\Delta\mathbf{w}$ is slope process speed changing, $\mathbf{g}$ is free-fall acceleration, $\mathbf{S_b}$ is area of barriers, $\mathbf{S_t}$ is value of total area, $\mathbf{h_b}$ is mean height of barriers.

If slope process speed decreases on a segment, its volume lessening is estimated as

$$\Delta V = \frac{\Delta w}{w_0} V, \tag{10}$$

where $\Delta \mathbf{V}$ is slope process volume decreasing.

If slope process speed increases on a segment, its volume may greaten in the presence of friable fragmental material consisting of particles with volume less than estimated change of volume of the avalanche or the slush flow. It is computed in the following way:

$$\Delta V_0 = \begin{cases} \frac{\Delta w}{w_0} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} V if \rho_a < \rho_w \\ \frac{\Delta w}{w_0} \cdot V \cdot \left\{1 + \left[tanh\left(\frac{\rho_a - \rho_w}{\rho_w}\right)\right]^{0.71}\right\} if \rho_a \geq \rho_w \end{cases}, \tag{11}$$

where $\boldsymbol{\rho_a}$ is density of avalanche material, $\boldsymbol{\rho_w}$ is density of friable fragmental material, $\Delta \mathbf{V_0}$ is enlargement of slope process volume.

Discussion

Calculations performed with the help of described approach show that slush flows may occur if inclination of the origin zone is about at least 5º. It is in good agreement with data of [*McClung et al., 2022*]. Analysis also demonstrates possibility of some avalanches to have abnormally long runout distance. It confirms by experimental data too. On multiple occasions, such slope processes traveled unusually far [*Kazakov, 2006*]. For example, runout distance of an avalanche on Sakhalin Island in April 1993 was 1300 m [*Kazakov, 2006*]. In addition, this avalanche passed about 600 m, whereat inclination was 3–5º [*Kazakov, 2006*]. According to calculation with the help of technique described at [*Kozik, 1962*] such avalanche could cover 1100 m [*Kazakov, 2006*].

Conclusions

Developed mathematical support permits to improve accuracy of slush flows and avalanche. Its adequateness is confirmed by experimental data. Also, prediction formulae enable to determine slope process type.

References

Казаков Н.А. Лавинный фронт как уединённая волна – солитон // Материалы гляциологических исследований. 2006. Вып. 100. С. 22–25.

Козик С.М. Расчёт движения снежных лавин. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 74 с.

Schaerer P. The avalanche-hazard index // Annals of Glaciology. 1989. Vol. 13. P. 241–247.

Zimin M.I., Kumukova O.A., Zimin M.M. Mathematical model and software for avalanche forecasting // Russian Journal of Cybernetics. 2020. Vol. 1, No. 1. P. 63–80.

McClung D., Schaerer P. The avalanche handbook. Seattle: Mountaineers Book, 2022. 366 p.

Mathematical modeling of physical and mechanical processes in the debris flow source area

M.I. Zimin[1], M.M. Zimin[1], N.V. Kondratyeva[2]

[1]Ontario Ltd., Toronto, Canada, zimin7@yandex.ru, maxim.zimin@yahoo.com

[2]High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, kondratyeva_nat@mail.ru

Abstract. Mathematical modeling of physical and mechanical processes in the debris flow source area is considered. Material is thought of as medium of inhomogeneous structure medium, which properties vary with time. Two levels are separated. Macrolevel is used for analyzing ground massif as a whole, and there is microlevel where elementary macrovolumes forming the source area are investigated. Heat transfer equation, diffusion equation, and equation of non-homogeneous compression of the beam are solved at the macrolevel. Processes of phase change, evaporation-condensation, mechanical failure, and deformation are calculated at the microlevel. Typical size of basic macrovolumes is much greater than molecular-kinetic sizes, and it is much less than the distance where macroscopic parameters, such as Young's modulus, heat-conduction coefficient, density of material, considerably change. Results of simulation can be utilized for building prediction formulae for debris flow forecast.

***Key words**: analysis, mathematical modeling, forecast, debris flow source area, debris flow, inhomogeneous structure medium, physical and mechanical process*

Cite of this article: Zimin M.I., Zimin M.M., Kondratyeva N.V. Mathematical modeling of physical and mechanical processes in the debris flow source area. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 473–479.

Математическое моделирование физико-механических процессов в селевых очагах

М.И. Зимин[1], М.М. Зимин[1], Н.В. Кондратьева[2]

[1]Ontario Ltd., Торонто, Канада, zimin7@yandex.ru, maxim.zimin@yahoo.com

[2]Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, kondratyeva_nat@mail.ru

Аннотация. Рассматривается математическое моделирование физико-механических процессов в селевых очагах. Материал представляется как структурно-неоднородная среда с изменяющимися во времени свойствами. Выделены макроуровень для расчёта массива пород как единого неоднородного тела, и микроуровень, на котором анализируются элементарные макрообъёмы, формирующие зону зарождения селей. На макроуровне решаются уравнения диффузии, теплопроводности и неоднородного сжатия, а на микроуровне рассчитываются процессы фазового перехода, испарения-конденсации, механического деформирования и разрушения. Характерный размер элементарных макрообъёмов много больше молекулярно-кинетических размеров, но много меньше расстояний, на которых существенно меняются макроскопические параметры, такие как модуль Юнга, коэффициент теплопроводности и плотность вещества. Результаты имитации могут быть использованы для создания прогностических зависимостей для предсказания селей.

***Ключевые слова:** анализ, математическое моделирование, прогноз, селевой очаг, сель, структурно-неоднородная среда, физико-механический процесс*

Ссылка для цитирования: Зимин М.И., Зимин М.М., Кондратьева Н.В. Математическое моделирование физико-механических процессов в селевых очагах. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 473–479.

Introduction

Some of the most dangerous slope processes taking place in the mountains and foothills are debris flows [*Anakhaev et al., 2012*]. In most cases, these natural phenomena result in enough negative effect on natural landscapes, obstructions and destructions in human settlements, harm of utility facilities, and loss of life [*Anakhaev et al., 2012*]. Therefore, developing methodologies of their forecast presences some features of interest.

Various physical and mechanical processes happen in the debris flow source area. For example, water supplying for glacial debris flow is provided by melting of glacier [*Fleishman, 1978*], so phase change takes place. Besides, fluid movement occurs in ground massif. Material temperature may variate too, having, for instance, a large impact on thaw of buried ice. And, without question, no slope process arises if there is no mechanical failure. Moreover, these things do not exist in isolation but have a significant influence on each other.

As a matter of fact, formation of friable fragmental rock in origination sites, movement of debris flow, accumulation of its deposits would be considered not as a hydrological or gravitational process, but as a phenomenon of a more complex nature [*Kazakov, 2015*]. Nonlinear structures with chaotic behavior containing an unlimited number of elements, which are debris flow geosystems, can be described as self-organizing objects in which self-organization of ordered components occurs sequentially [*Kazakov, 2015, Kyul et al., 2012*].

The following approach is used for a comprehensive analysis of origin and movement of debris flows. Material is thought of as medium of inhomogeneous structure medium, which properties vary with time. Two levels are separated. Macrolevel is used for analyzing ground massif as a whole, and there is microlevel where elementary macrovolumes forming the source area are investigated. Heat transfer equation, diffusion equation, and equation of non-homogeneous compression of the beam are solved at the macrolevel. Phase change, evaporation-condensation, mechanical failure, and deformation are calculated at the microlevel. All processes influence each other. Typical size of basic macrovolumes is much greater than molecular-kinetic sizes, and it is much less than the distance where macroscopic parameters considerably change [*Sokolkin et al., 1984*].

Properties of material and, accordingly, coefficients of differential equations describing the debris flow source as a whole are calculated on the base of parameters of elementary macrovolumes. At the same time, solutions of these equations affect elementary macrovolumes.

Independently such an approach is poorly suited for debris flow forecasting in real time, because risk of obtaining inadequate results in solving non-linear problems takes place in each case, and computer costs may be unreasonable. But it provides to get training set of acceptable size suitable for building prediction formulae.

Design diagram of the debris flow source area and solution of time-dependent problem

It is supposed that debris flow source area consists of spherical particles of rock and ice connected with cylinder bonds, water, and wet air. As time passes, these elements may destroy or change.

System of heat transfer equation, diffusion equation, and equation of non-homogeneous compression of the beam is solved at the macrolevel. Step-by-step method is utilized.

It is known that both large and small step sizes have drawbacks in terms of accuracy. A large step size may introduce significant truncation errors and reduce accuracy, using a small step size may lead to serious round-off errors [*Rzhanitsin, 1982*]. Therefore, optimization of this step is a part of analysis. It is performed in the following way.

The problem is solved, utilizing various steps. In the course of computing, number of changes of sign of first order derivative of solution and response results to decreasing of step

are recorded. After that, dependences of these parameters on step are built, and their minimums are calculated. The method of ordered risk minimization [*Vapnik, 2006*] is used.

It is difficult to check of results of calculation, utilizing full-scale experiment, because works in the debris flow source area are complicated and may be unsafe. However, effects detected with the help of mathematical modeling may be confirmed by published data, and it is possible to estimate accuracy of debris flow forecast according to prediction formulae developed by the means of training set obtained by simulation of physical and mechanical processes in ground massif.

For instance, analysis shows chance of occurring of infrasound torsion vibrations in the debris flow source area before descent. A certain extent, it gets in line with results of solution of momentum theory of elasticity problem for seismic centre [*Belonosov, 1998*]. Infrasonics may well initiate abnormal behavior of a wide variety of animals and run to great distances [*Khorbenko, 1986*]. Such activity before debris flow was demonstrated by grass snakes [*Ershov, 1979*], domestic animals, and poultry [*Marikovskiy, 1984*].

Other example is estimation of slope inclination of zone of debris flow deposition. Computed value amounts to 1.9º, which is close to known quantity of 2º [*Fleishman, 1978*].

The third example is development of prediction formulae, using training set calculated with help of mathematical modeling, for Gerkhozhan tract (Kabardino-Balkarian Republic, Russia).

According to [*Zimin et al., 2001*] volume of loose materials is more than 10^8 m^3, thickness of moraine equals to 40–50 m, buried ice depth amounts to 4–30 m, volume of buried ice comes out at $3.8 \cdot 10^7$ m^3.

This debris flow origination zone has the following granulometric texture by volume [*Zimin et al., 2001*]:

1) ratchel having particle sizes of more than 20 mm (45–64%);
2) gritrock consisting of particle with sizes from 2 to 20 mm (10–15%);
3) sand being made up of particles with sizes from 0.05 to 2 mm (15–25%);
4) silt consisting of particle with sizes from 0.002 to 0.05 mm (4–5%);
5) clay particles having sizes of less than 0.002 mm (7–10%).

Developed mathematical support simulated activity of group of experts. Thus, prediction formulae knowingly have semantic charge, which increases effectiveness of operation.

The following factors are initially calculated:

$$p_{t10} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} arctan(\,0.00012 t_{10}^{3.76}) if t_{10} \geq 0 \\ -\frac{2}{\pi} arctan[\,0.00012(-t_{10})^{3.76}] if t_{10} < 0 \end{cases}, \quad (1)$$

where $\mathbf{p_{t10}}$ is factor taking into account influence of average temperature for the last 10 days on possibility of debris flow descent, $\mathbf{t_{10}}$ is average temperature for the last 10 days, °C;

$$p_t = \begin{cases} p_{t10} if p_{t10} \leq \frac{2}{\pi} arctan(\,3.2 \cdot 10^{-10} t^{3.7}) \\ \frac{2}{\pi p_h} arctan(\,3.2 \cdot 10^{-10} t^{3.7}) if \\ p_{t10} > \frac{2}{\pi} arctan(\,3.2 \cdot 10^{-10} t^{3.7}) \end{cases}, \quad (2)$$

where $\mathbf{p_t}$ is factor making allowance for influence of sum of average daily temperatures after average daily temperature to exceed zero on possibility of debris flow descent, $\mathbf{t}$ is sum of average daily temperatures after average daily temperature to exceed zero, °C;

$$p_q = \begin{cases} 0 if\ (t_{10} < 0°C and t_s < 0°C) and q < 52mm \\ \frac{2}{\pi} arctan(\,0.000686 q^{2.46}) if (t_{10} \geq 0°C or t_s \geq 0°C) or q \geq 52mm \end{cases}, \quad (3)$$

where $\mathbf{p_q}$ is factor adverting influence of daily precipitation amount on possibility of debris flow descent, $\mathbf{t_s}$ is average daily temperature, **q** is daily precipitation amount, mm;

$$p_{oq} = \begin{cases} 0 if\ (t_{10} < 0°C and t_s < 0°C) and q < 52mm \\ \frac{2}{\pi} arctan(\ 0.032 \cdot o) if (t_{10} \geq 0°C or t_s \geq 0°C) or q \geq 52mm \end{cases}, \quad (4)$$

where $\mathbf{p_{oq}}$ is factor allowing influence of average precipitation intensity for the last 3 h on possibility of debris flow descent, **o** is average precipitation intensity for the last 3 h, mm/h;

$$p_m = \begin{cases} 0 if\ (t_{10} < 0°C and t_s < 0°C) \\ \frac{2}{\pi} arctan(\ 0.00012 q_m^{1.9}) if (t_{10} \geq 0°C or t_s \geq 0°C) \end{cases}, \quad (5)$$

where $\mathbf{p_m}$ is factor considering influence of monthly sum of precipitation on possibility of debris flow descent, $\mathbf{q_m}$ is monthly sum of precipitation, mm;

$$p_e = \begin{cases} 0 if\ (t_{10} < 0°C and t_s < 0°C) and q < 52mm \\ \frac{2}{\pi} arctan(\ 0{,}000103 I^{5.3}) if\ (t_{10} \geq 0°C or t_s \geq 0°C) or q \geq 52mm \end{cases}, \quad (6)$$

where $\mathbf{p_e}$ is factor allowing influence of earthquake on possibility of debris flow descent, **I** is earthquake intensity on the MSK-81 scale.

$$p_{bio} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} arctan(\ 0.06d) if (p_q < 0.79 and p_t < 0.79 and p_m < 0.79) \\ \frac{2}{\pi} arctan(\ 0.85d) if (p_q \geq 0.79 or p_t \geq 0.79 or p_m \geq 0.79) \end{cases}, \quad (7)$$

where $\mathbf{p_{bio}}$ is factor adverting influence of degree of expressiveness of biological precursors on possibility of debris flow descent, **d** is degree of expressiveness of biological precursors (Table 1).

Table 1. Description of degrees of expressiveness of biological precursors

Distinguishing features of abnormal behavior of animals	d
Abnormal behavior of individual specimens (no more than 5 of each species or any specimen of only 1 species).	1
Abnormal behavior of 2 or 3 species, wherein no less 6 specimens of these species demonstrate such conduct.	2
Abnormal behavior of more than 3 species, wherein no less 6 specimens of these species demonstrate such conduct.	3

If abnormal condition of people is observed, **d** is increased by 1.
After that, the following parameters are computed.

$$p_q^* = p_q^{1-0.22p_{oq}-0.07p_e-0.04p_{bio}-0.16p_t-0.07p_{t10}-0.06p_m}, \quad (8)$$

where $\mathbf{p_q}^*$ is factor adverting influence of daily precipitation amount on possibility of debris flow descent with respect to values of $\mathbf{p_{oq}}$, $\mathbf{p_e}$, $\mathbf{p_m}$, $\mathbf{p_{bio}}$, $\mathbf{p_t}$, $\mathbf{p_{t10}}$;

$$p_{oq}^* = p_{oq}^{1-0.13p_t-0.05p_e-0.06p_{bio}-0.16p_q-0.04p_{t10}-0.07p_m}, \quad (9)$$

where $\mathbf{p_{oq}}^*$ is factor allowing influence of average precipitation intensity for the last 3 h on possibility of debris flow descent with consideration to values of $\mathbf{p_q}$, $\mathbf{p_e}$, $\mathbf{p_m}$, $\mathbf{p_{bio}}$, $\mathbf{p_t}$, $\mathbf{p_{t10}}$;

$$p_e^* = p_e^{1-0.07p_t-0.01p_{oq}-0.19p_{bio}-0.02p_q-0.02p_{t10}-0.04p_m}, \quad (10)$$

where $\mathbf{p_e}^*$ – is factor allowing influence of eventual earthquake on possibility of debris flow descent with reference to values of $\mathbf{p_q}$, $\mathbf{p_i}$, $\mathbf{p_m}$, $\mathbf{p_{bio}}$, $\mathbf{p_t}$, $\mathbf{p_{t10}}$;

$$p_t^* = p_t^{1-0.12p_q-0.15p_m-0.03p_{bio}-0.09p_{oq}-0.04p_e-0.08p_{t10}}, \quad (11)$$

where $\mathbf{p_t}^*$ is factor making allowance for influence of sum of average daily temperatures after average daily temperature to exceed zero on possibility of debris flow descent with regard to values of $\mathbf{p_q}$, $\mathbf{p_e}$, $\mathbf{p_m}$, $\mathbf{p_{bio}}$, $\mathbf{p_{oq}}$, $\mathbf{p_{t10}}$;

$$p_{bio}^* = p_{bio}^{1-0.21p_e-0.07p_q-0.04p_m-0.03p_i-0.08p_t-0.02p_{t10}}, \quad (12)$$

where $\mathbf{p_{bio}}^*$ is factor making allowance for influence of biological precursors on possibility of debris flow descent in terms of values of $\mathbf{p_q}$, $\mathbf{p_e}$, $\mathbf{p_m}$, $\mathbf{p_t}$, $\mathbf{p_i}$, $\mathbf{p_{t10}}$;

$$p_m^* = p_m^{1-0.11p_q-0.1p_{oq}-0.12p_e-0.04p_{bio}-0.07p_t-0.01p_{t10}}, \quad (13)$$

where $\mathbf{p}_{\mathbf{m}}{}^*$ – is factor considering influence of monthly sum of precipitation on possibility of debris flow descent with an eye toward values of $\mathbf{p_q}$, $\mathbf{p_e}$, $\mathbf{p_i}$, $\mathbf{p_{bio}}$, $\mathbf{p_t}$, $\mathbf{p_{t10}}$;

$$p_{t10}^* = p_m^{1-0.1p_q-0.04p_{oq}-0.02p_e-0.09p_{bio}-0.11p_t-0.03p_m}, \quad (14)$$

where $\mathbf{p_{t10}}^*$ is factor taking into account influence of average temperature for the last 10 days on possibility of debris flow descent in the face of values of $\mathbf{p_q}$, $\mathbf{p_e}$, $\mathbf{p_{oq}}$, $\mathbf{p_{bio}}$, $\mathbf{p_t}$, $\mathbf{p_m}$.

Degree of membership of conditions to debris flow descent situation is calculated as

$$p_s = \left[0.79 + 0.21\frac{2}{\pi}arctan(1.22d + 0.9q)\right] \times [1 - (1 - p_{bio}^*) \cdot (1 - p_e^*) \cdot (1 - p_{oq}^*) \cdot (1 - -p_m^*) \times\times (1 - p_q^*) \cdot (1 - p_t^*) \cdot (1 - p_{t10}^*)], \quad (15)$$

where $\mathbf{p_s}$ is degree of membership of conditions in debris flow descent situation.

Hereon, code of debris flow risk is figured out:

$$j = \begin{cases} 0 \; for \; p_s < 0.17 \\ 1 \; for \; 0.17 \le p_s < 0.6 \\ 2 \; for \; 0.6 \le p_s < 0.9 \\ 3 \; for \; 0.9 \le p_s < 0.95 \\ 4 \; for \; p_s \ge 0.95 \end{cases}, \quad (16)$$

where $\mathbf{j}$ is code of debris flow risk.

If $\mathbf{j} > 0$ and $\mathbf{d} = 3$, $\mathbf{j}$ is increased by 1.

Debris flow forecasts depending on $\mathbf{j}$ are shown in Table 2.

This mathematical support is tested with the aid of data about debris flows happened in the past. In particular, forecast of such slope processes in Tyrnyauz area is performed using information from July 15, 2000 to July 27, 2000. Data of meteorological station of "Terskol" are applied. Seismic load is not taken into account; biological precursors were observed in Nalchik. Results of analysis are shown at Table 3. Code of debris flow risk confirmed by field observations is denoted by $\mathbf{j_r}$.

Table 2. Debris flow forecast depending on **j**

j	Forecast for the next 24 h
0	No debris flow risk.
1	Debris flows of volume up to 10^4 m^3 may occur.
2	Debris flows of volume from 10^4 to 10^5 m^3 are expected.
3	Debris flows of volume from 10^5 to 10^6 m^3 are expected.
4	Debris flows of volume from 10^6 to 10^7 m^3 are expected
5	Debris flows of volume more than 10^7 m^3 are expected

Table 3. Results of analysis of debris flow risk in July 2000.

Date	t_s, °C	$t_{10,}$ °C	t, °C	q, mm	o, mm/h	q_m, mm	d	j	j_r
15.07	16.9	14.1	771.1	0	0	0	0	2	0
16.07	18.1	14.5	789.2	0	0	0	0	2	0
17.07	20.4	15.1	809.6	5	1	5	1	3	0
18.07	17.8	15.9	837.4	0	0	5	1	3	3
19.07	16.0	16.3	853.4	0	0	5	1	3	3
20.07	17.4	17.0	870.8	0	0	5	3	3	0
21.07	20.0	17.3	890.8	0	0	5	1	4	4
22.07	18.1	17.6	908.9	0	0	5	1	3	0
23.07	20.2	18.1	929.1	0	0	5	1	3	0
24.07	17.8	18.2	946.9	0	0	5	1	3	3
25.07	17.2	18.2	964.1	0	0	5	1	3	0
26.07	16.3	18.0	980.4	5	1	10	0	3	3
27.07	17.0	17.7	997.4	0	0	10	0	3	0

According to information of Table 3, unforetold debris flows are absent. Comparably low correctness of prognoses can be explained by requirement of high level of safety. As known [*Jonkman et al, 2003*], acceptable probability of death one person for one year is 10^{-6}.

Conclusions

Mathematical modeling of physical and mechanical processes in the debris flow source area can be useful tool to increase accuracy of debris flow forecast. Efficacy of analysis is validated experimentally. Results of the calculation can be utilized for development of prediction formulae.

References

Анахаев К.Н., Антоненко О.Л. Дифференциация селеопасности территорий селевых бассейнов горных водотоков // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды Второй конференции. М.: Географический факультет МГУ, 2012. С. 11–12.

Белоносов С.М. Применение моментной теории упругости к изучению землетрясений // Обратные задачи математической физики. Новосибирск, 1998. С. 15–16.

Ершов А. Укрощение «горного духа» // Вокруг света. 1979. № 3 (2462). С. 14–16.

Зимин М.И. и др. Моделирование многофазных структурно-неоднородных тел / Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет, 2001. Деп. в ВИНИТИ, № 2468 – В2001. 25 с.

Казаков Н.А. Эволюция селевой геосистемы как процесс самоорганизации упорядоченных структур // ГеоРиск. 2015. № 2. С. 28–30.

Кюль Е.В., Джаппуев Д.Р. О математическом моделировании процесса трансформации селевого потока // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2012. № 2. С. 86–88.

Мариковский П.И. Животные предсказывают землетрясения. Алма-Ата: Наука, 1984. 144 с.

Ржаницин А.Р. Строительная механика. М.: Высшая школа, 1982. 400 с.

Соколкин Ю.С., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел. М.: Наука, 1984. 115 с.

Флейшман С.М. Сели. Л: Гидрометеоиздат, 1978. 312 с.

Хорбенко И.Г. Звук, ультразвук, инфразвук. М.: Знание, 1986. 160 с.

Jonkman S.E. et al. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage // Journal of Hazardous Materials. 2003ю Vol. A99. P. 1–30.

Vapnik V. Estimation of dependences based on empirical data. New York: Springer Science + Business Media, 2006. 505 p.

Авторский указатель

Аджиев А.Х. 15, 469
Айзек М. 174, 186
Айзек Р.К. 174, 186
Алдаберген У.Р. 306
Алекперова С.О. 27
Аманова М. 455
Анаев М.А. 259
Асадов М.И. 334
Ахмедова А.Г. 136
Бакулина А.В. 205
Баринов А. 37
Барыкина О.С. 48
Благовещенский В.П. 306
Бойнагрян В.Р. 61
Бычков И.В. 77
Вартанов М. 444
Випплингер Б. 122
Воронцова В.С. 449
Вэй Ф. 82
Габибов Ф.Г. 136
Гавардашвили Г.В. 142
Гавриленко Т.В. 469
Гергокова З.Ж. 152
Голосов В.Н. 158, 356
Гонгадзе М. 246
Григорьев И.И. 363
Гусев О.И. 205
Денк М. 37
Дзагания Е.В. 217, 388
Дзагания Л.М. 388
Дзагания М.Ю. 217
Диаконидзе Р.В. 96
Добрынина А.А. 101
Докукин М.Д. 111, 259
Дреснер Ф. 122
Ерохин С. 455
Жданов В.В. 306
Загинаев В. 455
Зимин М.И. 469, 473
Зимин М.М. 473
Зимина С.А. 469
Зингер Дж. 122
Идрисов И.А. 168
Иманов Ф.А. 334

Кавлашвили Г. 246
Кайлиг К. 122
Камалбекова А.Н. 306
Керефова З.М. 15
Керимова Э.Д. 227
Кичигина Н.В. 101
Кладов А.В. 205
Кондратьева Н.В. 15, 469, 473
Король С.А. 101
Кортиев А.Л. 15
Крыленко В.И. 217
Крыленко И.В. 217
Куликова О.М. 469
Кумукова О.А. 469
Курашева О.А. 240
Курбанов Р.Н. 252
Кухалашвили Э. 444
Кучинская И.Я. 227
Лантер Г. 37
Ли Ц. 378
Либиш-Лехнер К. 122
Ломинадзе Г. 246
Лукашов А.А. 252
Мажайский Ю.А. 301
Мальнева И.В. 259
Мамедов С.Г. 267
Мамиева С.А. 283
Махаррамова А.Р. 334
Маций В.С. 294
Маций С.И. 294
Мгебришвили М.А. 96
Медеу А.Р. 306
Менабде З. 122
Миронюк С.Г. 316
Модебадзе С.Дж. 96
Музыченко А.А. 328
Музыченко Л.Е. 328
Нгуен Л.Т. 197
Нойманн П. 122
Нуриев А.А. 334
Панчулидзе Дж.Н. 96
Петрова Е.Г. 346
Пилоян А.С. 61
Посаженникова В.С. 356
Ранова С.У. 306
Резингер С. 122
Рыбченко А.А. 101
Рысин И.И. 363
Сакыев Д. 455

Самаркин-Джарский К.Г. 388
Саньков В.А. 101
Сафаров М.С. 378
Сидаравичуте У.Р. 294
Скиба В.С. 205
Степанов Б.С. 426
Стром А.Л. 168
Сулейманова Э.Э. 48
Сунь Я. 82
Сухаржевский Г.Н. 388
Тарихазер С.А. 267
Токликишвили Л.К. 96
Торгоев И.А. 433
Торопов П.А. 449
Успенский М.И. 158
Фазылов А.Р. 378
Фролов В.И. 48
Фролова Ю.В. 48
Фукс С. 122
Хаджиев М.М. 259
Хайдн М. 122
Хакимзянов Г.С. 205
Харченко С.В. 158, 356, 414
Церешко С.А. 205
Цзань Ч.Д. 197
Цулукидзе Л.Н. 96
Чжан Л. 82
Чжао Л. 205
Чжао Ц. 82
Чигирова Л.Б. 89
Чэнь Ц. 82
Шатохина В.Е. 158
Шварев С.В. 414
Шерхов А.Х. 407
Шешенев Н.В. 301
Шиммель А. 398
Шубина Д.Д. 168
Эхтлер П. 122
Ян К. 82
Яфязова Р.К. 426

Author's Index

Adzhiev A.Kh.	15, 469
Akhmedova A.G.	136
Alakbarova S.O.	27
Aldabergen U.R.	306
Amanova M.	455
Anaev M.A.	259
Asadov M.Y.	334
Bakulina A.V.	205
Barinov A.	37
Barykina O.S.	48
Blagovechshenskiy V.P.	306
Boynagryan V.R.	61
Bychkov I.V.	77
Chen Q.	82
Chigirova L.B.	89
Denk M.	37
Diakonidze R.V.	96
Dobrynina A.A.	101
Dokukin M.D.	111, 259
Draesner F.	122
Dzaganiia E.V.	217, 388
Dzaganiia L.M.	388
Dzaganiia M.Yu.	217
Echtler P.	122
Erokhin S.	455
Fanchulidze J.H.	96
Fazylov A.R.	379
Frolov V.I.	48
Frolova J.V.	48
Fuchs S.	122
Gabibov F.G.	136
Gavardashvili G.V.	142
Gavrilenko T.V.	469
Gergokova Z.Zh.	152
Golosov V.N.	1583 356
Gongadze M.	246
Grigoriev I.I.	363
Gusev O.I.	205
Haidn M.	122
Idrisov I.A.	168
Imanov F.A.	334
Isaac M.	174, 186

Isaac R.K. 174, 186
Jan C.-D. 197
Kamalbekova A.N. 306
Karimova E.J. 227
Kavlashvili G. 246
Keilig K. 122
Kerefova Z.M. 15
Khadzhiev M.M. 259
Khakimzyanov G.S. 205
Kharchenko S.V. 158, 356, 414
Kichigina N.V. 101
Kladov A.V. 205
Kondratyeva N.V. 15, 469, 473
Korol S.A. 101
Kortiev A.L. 15
Krylenko I.V. 217
Krylenko V.I. 217
Kuchinskaya I.Ya. 227
Kuhalashvili E. 444
Kulikova O.M. 469
Kumukova O.A. 469
Kurasheva O.A. 240
Kurbanov R.N. 252
Lanter H. 37
Li J. 379
Libisch-Lehner C. 122
Lominadze G. 246
Lukashov A.A. 252
Maharramova A.R. 334
Malneva I.V. 259
Mamiyeva S.A. 283
Mammadov S.G. 267
Matsiy S.I. 294
Matsiy V.S. 294
Mazhaisky Yu.A. 301
Medeu A.R. 306
Menabde Z. 122
Mgebrishvili M.A. 96
Mironyuk S.G. 316
Modebadze S.J. 96
Muzychenko A.A. 328
Muzychenko L.E. 328
Neumann P. 122
Nguyen L.-T. 197
Nuriyev A.A. 334
Petrova E.G. 346

Piloyan A.S. 61
Posazhennikova V.S. 356
Ranova S.U. 306
Resinger S. 122
Rybchenko A.A. 101
Rysin I.I. 363
Safarov M.S. 379
Sakyev D. 455
Samarkin-Dzharskii K.G. 388
Sankov V.A. 101
Schimmel A. 398
Shatokhina V.E. 158
Sherhov A.Kh. 407
Sheshenev N.V. 301
Shubina D.D. 168
Shvarev S.V. 414
Sidaravichute U.R. 294
Singer J. 122
Skiba V.S. 205
Stepanov B.S. 426
Strom A.L. 168
Sukharzhevskii G.N. 388
Suleymanova E.E. 48
Sun Y. 82
Tarikhazer S.A. 267
Toklikishvili L.K. 96
Torgoev I.A. 433
Toropov P.A. 449
Tsereshko S.A. 205
Tsulukidze L.H. 96
Uspenskii M.I. 158
Vartanov M. 444
Vorontsova V.S. 449
Wei F. 82
Wipplinger B. 122
Yafyazova R.K. 426
Yang K. 82
Zaginaev V. 455
Zhang L. 82
Zhao L. 205
Zhao Q. 82
Zhdanov V.V. 306
Zimin M.I. 469, 473
Zimin M.M. 473
Zimina S.A. 469

Содержание

Предисловие **13**

Оценка селевой опасности автомобильного пункта пропуска Нижний Зарамаг **15**

А.Х. Аджиев, Н.В. Кондратьева, З.М. Керефова, А.Л. Кортиев

Концепция подхода к оценке риска, связанного с селевой активностью в Шеки-Загатальском экономическом районе **27**

С.О. Алекперова

Обзор двадцатилетнего опыта защиты от селевых потоков гибкими противоселевыми барьерами **37**

А. Баринов, М. Денк, Г. Лантер

Инженерно-геологическая характеристика селевых отложений 2023 г. у подножия вулкана Шивелуч (Камчатка) **48**

О.С. Барыкина, В.И. Фролов, Ю.В. Фролова, Э.Э. Сулейманова

Катастрофическое наводнение на реке Дебед в мае 2024 г. (Армения) **61**

В.Р. Бойнагрян, А.С. Пилоян

Математическое, информационно-вычислительное и экспериментальное моделирование этапов зарождения, схода и управления селевыми процессами на примере северного склона хребта Хамар-Дабан **77**

И.В. Бычков

Мониторинг и оценка устойчивости скалистого берегового склона в районе водохранилища микросейсмическими методами (на примере гигантского оползня Цзюсяньпин в уезде Юньян) **82**

Ц. Чэнь, Ц. Чжао, К. Ян, Я. Сунь, Л. Чжан, Ф. Вэй

Динамика селевых процессов в бассейне реки Черек Балкарский (Кабардино-Балкарская Республика) **89**

Л.Б. Чигирова

Новая методика для расчёта расходов турбулентного селевого потока **96**

Р.В. Диаконидзе, Дж.Н. Панчулидзе, Л.Н. Цулукидзе, М.А. Мгебришвили, Л.К. Токликишвили, С.Дж. Модебадзе

Система мониторинга и экстренного оповещения о сходе селевого потока **101**

А.А. Добрынина, В.А. Саньков, С.А. Король, Н.В. Кичигина, А.А. Рыбченко

Подледниковые дренажные системы как зоны зарождения селей (бассейны рек Адылсу и Герхожансу, Центральный Кавказ) **111**

М.Д. Докукин

Четырехкомпонентная стратегия управления рисками стихийных бедствий в отдаленных горных регионах: выводы из опыта Местиачальской ГЭС, Грузия 122

С. Фукс, М. Хайдн, К. Кайлиг, С. Резингер, З. Менабде, Ф. Дреснер, П. Эхтлер, К. Либиш-Лехнер, Б. Випплингер, П. Нойманн, Дж. Зингер

Инновационные методы использования природно-техногенных петроструктур для уменьшения рисков аварийных последствий селевых потоков 136

Ф.Г. Габибов, А.Г. Ахмедова

Обеспечение безопасности города Телави от разрушительного воздействия селевого потока 142

Г.В. Гавардашвили

Цифровые методы анализа развития русловых деформаций повышенной опасности 152

З.Ж. Гергокова

Мониторинг развития селей на склонах бассейна р. Мзымты в районе горного кластера Олимпийской деревни 158

В.Н. Голосов, С.В. Харченко, М.И. Успенский, В.Е. Шатохина

Пространственная взаимосвязь крупных оползней и селевых процессов в бассейне р. Унсатлен (Восточный Кавказ) 168

И.А. Идрисов, А.Л. Стром, Д.Д. Шубина

Оценка воздействия селевых потоков на рыбу с использованием модели поддержки принятия решений на основе имитационного моделирования 174

М. Айзек, Р.К. Айзек

Многопараметрическая структура моделирования для оценки опасности селей с использованием экологических и гидрологических данных 186

Р.К. Айзек, М. Айзек

Корреляции между реологическими параметрами и параметрами теста L-Box для суспензий с обломками деревьев 197

Ч.Д. Цзань, Л.Т. Нгуен

Численное моделирование связных селевых потоков и оползней на горных склонах 205

Г.С. Хакимзянов, О.И. Гусев, В.С. Скиба, А.В. Бакулина, А.В. Кладов, С.А. Церешко, Л. Чжао

Опасность образования крупных селевых очагов в зонах водоподводящих разломов (на примере Чвежипсинского подрайона Западного Кавказа) 217

И.В. Крыленко, В.И. Крыленко, Е.В. Дзагания, М.Ю. Дзагания

Региональные особенности влияния селевых процессов на изменение ландшафтов южного склона Большого Кавказа 227

И.Я. Кучинская, Э.Д. Керимова

Потенциальная опасность приледниковых озёр в бассейне реки Мижирги (Кабардино-Балкарская Республика) 240

О.А. Курашева

Катастрофический сель в Шови **246**

М. Гонгадзе, Г. Ломинадзе, Г. Кавлашвили

Оползни и сели полуострова Мангышлак **252**

А.А. Лукашов, Р.Н. Курбанов

Особенности развития селевого процесса в бассейнах Кабардино-Балкарии в XXI веке **259**

И.В. Мальнева, М.Д. Докукин, М.А. Анаев, М.М. Хаджиев

Определение зон восприимчивости и оценка селевого риска бассейна реки Гудиалчай на основе данных дистанционного зондирования **267**

С.Г. Мамедов, С.А. Тарихазер

Оценка селевой опасности в бассейне реки Гянджачай: морфотектонические характеристики и антропогенные факторы (на примере северо-восточного склона Малого Кавказа в пределах Азербайджана) **283**

С.А. Мамиева

Инженерная защита объектов рекреации **294**

С.И. Маций, У.Р. Сидаравичуте, В.С. Маций

Концептуальная модель экспериментальной свайной конструкции для стабилизации оползневых процессов **301**

Ю.А. Мажайский, Н.В. Шешенев

Перспективы развития селевых прогнозов в Казахстане с применением технологий машинного обучения **306**

А.Р. Медеу, В.П. Благовещенский, В.В. Жданов, С.У. Ранова, А.Н. Камалбекова, У.Р. Алдаберген

Субаквальные сели на континентальном склоне в северо-восточной части Черного моря: анализ условий и причин образования **316**

С.Г. Миронюк

Применение ГИС для гранулометрического анализа селевых отложений **328**

Л.Е. Музыченко, А.А. Музыченко

Влияние селевых потоков на русловые процессы на предгорных равнинах **334**

А.А. Нуриев, Ф.А. Иманов, М.И. Асадов, А.Р. Махаррамова

Селевая и оползневая опасность для транспорта **346**

Е.Г. Петрова

Геоморфологическая реакция на селевой паводок, сформированный прорывом ледникового озера Башкара **356**

В.С. Посаженникова, В.Н. Голосов, С.В. Харченко

Особенности морфодинамики размыва берегов на реках Удмуртии **363**

И.И. Рысин, И.И. Григорьев

Мониторинг современного состояния оледенения, ледниковых озёр и связанных с ними опасных природных явлений (Памир, Таджикистан) 378

М.С. Сафаров, А.Р. Фазылов, Ц. Ли

Развитие селевых процессов в бассейне реки Кутарха (Западный Кавказ, Сочинский гидрологический район) 388

К.Г. Самаркин-Джарский, Е.В. Дзагания, Л.М. Дзагания, Г.Н. Сухаржевский

MAMODIS – универсальная, экономически эффективная система обнаружения селевых потоков на основе инфразвуковых и сейсмических сигналов 398

А. Шиммель

Данные инструментального контроля аварийных зон хвостохранилища Тырныаузского горно-обогатительного комбината 407

А.Х. Шерхов

Реконструкция катастрофического селевого события ≈ 1200 лет назад в бассейне р. Мзымта 414

С.В. Шварев, С.В. Харченко

Потепление климата и новый механизм формирования селей 426

Б.С. Степанов, Р.К. Яфязова

Проблемы управления селевым риском в Кыргызстане 433

И.А. Торгоев

Экономические методы повышения эффективности противоселевых защитных сооружений 444

М. Вартанов, Э. Кухалашвили

Метеорологические условия формирования селей на Черноморском побережье России 449

В.С. Воронцова, П.А. Торопов

Комплексный подход к оценке селевой опасности в горных долинах Кыргызской Республики 455

В. Загинаев, С. Ерохин, Д. Сакыев, М. Аманова

Математическое обеспечение для прогнозирования водоснежных потоков и лавин с помощью нечёткого анализа 469

М.И. Зимин, А.Х. Аджиев, О.А. Кумукова, Т.В. Гавриленко, Н.В. Кондратьева, О.М. Куликова, С.А. Зимина

Математическое моделирование физико-механических процессов в селевых очагах 473

М.И. Зимин, М.М. Зимин, Н.В. Кондратьева

Авторский указатель 480

Содержание 486

Contents

Preface **14**

Debris flow hazard assessment of the automobile checkpoint Nizhniy Zaramag **15**

A.Kh. Adzhiev, N.V. Kondratyeva, Z.M. Kerefova, A.L. Kortiev

The conceptual approach to risk assessment related to debris flow activity in the Sheki-Zagatala economic region **27**

S.O. Alakbarova

Twenty years' experience in flexible debris flow protection **37**

A. Barinov, M. Denk, H. Lanter

Engineering-geological characteristic of the 2023 debris flow deposits of the Shiveluch volcano (Kamchatka) **48**

O.S. Barykina, V.I. Frolov, J.V. Frolova, E.E. Suleymanova

Catastrophic flooding on the Debed river in May 2024 (Armenia) **61**

V.R. Boynagryan, A.S. Piloyan

Mathematical, information-computational and experimental modelling of the stages of debris flow initiation, descent and management on the example of the northern slope of the Khamar-Daban Ridge **77**

I.V. Bychkov

The study of monitoring and stability evaluation of rocky shore slope in reservoir area based on microseismicity: a case study of the Giant Landslide at Jiuxianping, Yunyang **82**

Q. Chen, Q. Zhao, K. Yang, Y. Sun, L. Zhang, F. Wei

Dynamics of debris flow processes in the Cherek Balkarsky River basin (Kabardino-Balkarian Republic) **89**

L.B. Chigirova

A new methodology for calculating turbulent debris flow discharges **96**

R.V. Diakonidze, J.H. Fanchulidze, L.H. Tsulukidze, M.A. Mgebrishvili, L.K. Toklikishvili, S.J. Modebadze

Debris flow monitoring and emergency warning system **101**

A.A. Dobrynina, V.A. Sankov, S.A. Korol, N.V. Kichigina, A.A. Rybchenko

Subglacial drainage systems as debris flow origination zones (basins of the Adylsu and Gerhozhansu rivers, Central Caucasus) **111**

M.D. Dokukin

A four-pillar strategy for natural hazard risk management in remote mountain regions: Insights from the Mestiachala HPP, Georgia **122**

S. Fuchs, M. Haidn, K. Keilig, S. Resinger, Z. Menabde, F. Draesner, P. Echtler, C. Libisch-Lehner, B. Wipplinger, P. Neumann, J. Singer

Innovative methods of using natural and technogenic petrostructures to reduce the risks of emergency consequences of debris flows 136

F.G. Gabibov, A.G. Akhmedova

The safety of city Telavi from the destructive effects of debris flow 142

G.V. Gavardashvili

Digital methods for analyzing the development of high-risk riverbed deformations 152

Z.Zh. Gergokova

Monitoring of debris flow development on the slopes of the Mzymta river basin in the area of the Olympic Village Mountain cluster 158

V.N. Golosov, S.V. Kharchenko, M.I. Uspenskii, V.E. Shatokhina

Spatial relationship of large landslides and debris flow processes in the Unsatlen River basin (Eastern Caucasus) 168

I.A. Idrisov, A.L. Strom, D.D. Shubina

Assessing the impact of debris flows on fish using a simulation-based decision support model 174

M. Isaac, R.K. Isaac

A multi-parameter simulation framework for debris flow hazard assessment using environmental and hydrological inputs 186

R.K. Isaac, M. Isaac

Correlations between rheological parameters and L-Box test parameters of woody-debris suspensions 197

C.-D. Jan, L.-T. Nguyen

Numerical modeling of viscous debris flows and landslides on mountain slopes 205

G.S. Khakimzyanov, O.I. Gusev, V.S. Skiba, A.V. Bakulina, A.V. Kladov, S.A. Tsereshko, L. Zhao

The hazard of the formation of large debris flow origination sites in the zones of water-supply faults (case study of the Chvezhipse subdistrict of the Western Caucasus) 217

I.V. Krylenko, V.I. Krylenko, E.V. Dzaganiia, M.Yu. Dzaganiia

Regional features of the influence of debris flow processes on changes in the landscapes of the southern slope of the Greater Caucasus 227

I.Ya. Kuchinskaya, E.J. Karimova

Potential hazard of proglacial lakes in the Mizhirgi River basin (Kabardino-Balkarian Republic) 240

O.A. Kurasheva

Shovi catastrophic debris flow 246

G. Lominadze, M. Gongadze, G. Kavlashvili

Landslides and debris flow processes of the Mangyshlak Peninsula 252

A.A. Lukashov, R.N. Kurbanov

Features of the development of the debris flow process in the basins of Kabardino-Balkaria in the 21st century 259

I.V. Malneva, M.D. Dokukin, M.A. Anaev, M.M. Khadzhiev

Determination of susceptibility zones and assessment of debris flow risk in the Gudiyalchay river basin based on remote sensing data 267

S.G. Mammadov, S.A. Tarikhazer

Geomorphological studies of the mud-filled Ganjachay river basin (a case study of the northeastern slope of the Lesser Caucasus within Azerbaijan) 283

S.A. Mamiyeva

Engineering protection of recreational facilities 294

S.I. Matsiy, U.R. Sidaravichute, V.S. Matsiy

Conceptual model of an experimental pile structure for stabilizing landslide processes 301

Yu.A. Mazhaisky, N.V. Sheshenev

Prospects for development of debris flow forecasts in Kazakhstan using machine learning technologies 306

A.R. Medeu, V.P. Blagovechshenskiy, V.V. Zhdanov, S.U. Ranova, A.N. Kamalbekova, U.R. Aldabergen

Subaqueous debris flows on the continental slope of the north-eastern part of the Black Sea: analysis of conditions and causes of formation 316

S.G. Mironyuk

Debris flow deposits granulometric analysis by GIS application 328

L.E. Muzychenko, A.A. Muzychenko

Influence of debris flows on channel processes in the foothill plains 334

A.A. Nuriyev, F.A. Imanov, M.Y. Asadov, A.R. Maharramova

Debris flow and landslide hazard for transport 346

E.G. Petrova

Geomorphic response to the debris flow triggered by the Bashkara glacier lake outburst 356

V.S. Posazhennikova, V.N. Golosov, S.V. Kharchenko

Peculiarities of morphodynamics of bank erosion on rivers of Udmurtia 363

I.I. Rysin, I.I. Grigoriev

Monitoring the current state of glaciation, glacial lakes, and associated natural hazards in the Pamirs, Tajikistan 379

M.S. Safarov, A.R. Fazylov, J. Li

Dynamics of debris flow processes in the Kutarkha River basin (Western Caucasus, Sochi hydrological region) 388

K.G. Samarkin-Dzharskii, E.V. Dzaganiia, L.M. Dzaganiia, G.N. Sukharzhevskii

MAMODIS – a universal, cost-effective debris flow detection system based on infrasound and seismic signals 398

A. Schimmel

Instrumental monitoring data of the emergency zones of the tailings dam of the Tyrnyauz mining and processing plant 407

A.Kh. Sherhov

Reconstruction of a catastrophic debris flow event ≈ 1200 years ago in the Mzymta River basin 414

S.V. Shvarev, S.V. Kharchenko

Climate warming and a new mechanism for formatting debris flows 426

B.S. Stepanov, R.K. Yafyazova

Problems of debris flow risk management in Kyrgyzstan 433

I.A. Torgoev

Economic methods of increasing the efficiency of debris-flow mitigation constructions 444

M. Vartanov, E. Kuhalashvili

Meteorological conditions for the debris flow formation on the Black Sea coast of Russia 449

V.S. Vorontsova, P.A. Toropov

Comprehensive approach to debris flow hazard assessment in mountain valleys of the Kyrgyz Republic 455

V. Zaginaev, S. Erokhin, D. Sakyev, M. Amanova

Mathematical support for forecasting slush flows and avalanches with the help of fuzzy analysis 469

M.I. Zimin, A.Kh. Adzhiev, O.A. Kumukova, T.V. Gavrilenko, N.V. Kondratyeva, O.M. Kulikova, S.A. Zimina

Mathematical modeling of physical and mechanical processes in the debris flow source area 473

M.I. Zimin, M.M. Zimin, N.V. Kondratyeva

Author's Index 483

Contents 490

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection.
Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia)

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита.
Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия)

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა.
მე–8 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო.

Ответственные редакторы
С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова)
Г.В. Гавардашвили (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета)
К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова)

Edited by
S.S. Chernomorets (Lomonosov Moscow State University)
G.V. Gavardashvili (Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University)
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 978-5-6053539-4-2

Подписано в печать 20.09.2025
Тираж 150 экз.
Количество страниц: 496

Signed to press on September 20, 2025.
Print in 150 copies.
Number of pages: 496

Conference organizers and partners

Financial support