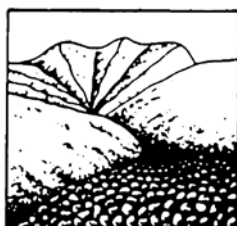


СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

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 ს.

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



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 озёр 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: канализованные (древовидные) или неканализованные (распределённые) системы. Быстрые дренажные системы образуют каналы стока, связанные с поверхностными водотоками, к медленным относятся подледниковые полости, плёнка воды на ложе, каналы, врезаемые 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. м³. На рис. 1 на фрагментах аэрофотоснимков показаны границы озера Башкара в 1957, 1960 и 1965 гг.

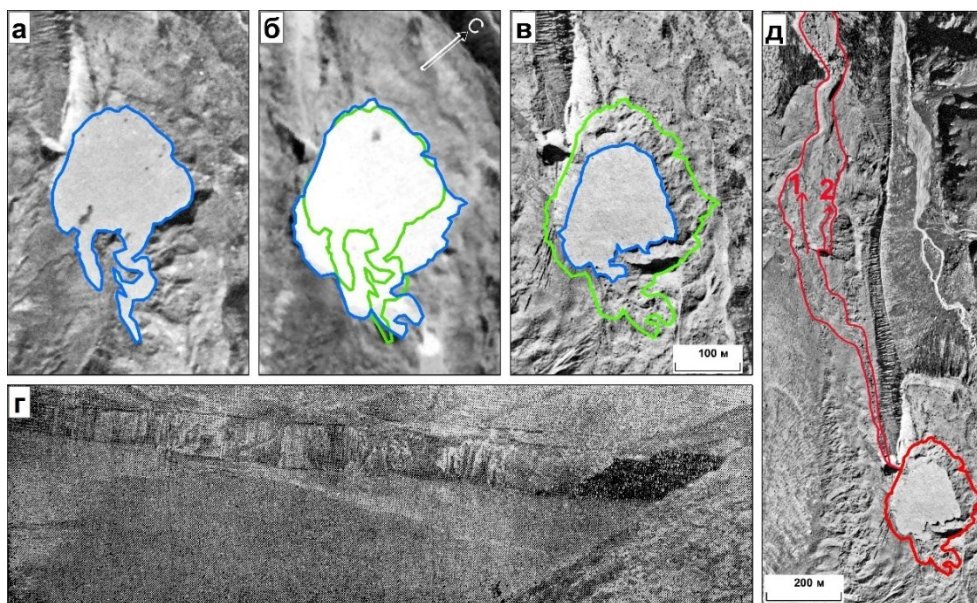


Рис. 1. Озеро Башкара в разные годы до и после прорывов: а – аэрофотоснимок 10.08.1957, б – аэрофотоснимок 05.09.1960, в – аэрофотоснимок август 1965 г., г – фото И. Черванева, август 1958 г. после прорыва озера [Ковалев, 1961], д – аэрофотоснимок август 1965 г. (уменьшенный масштаб). Салатные линии – 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 подледного 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. м² до 60 тыс. м². 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. м² (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. м³. 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., 2020a]. 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 космостёмок 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., 2020a].

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 м³/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 видеостёмок, 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.

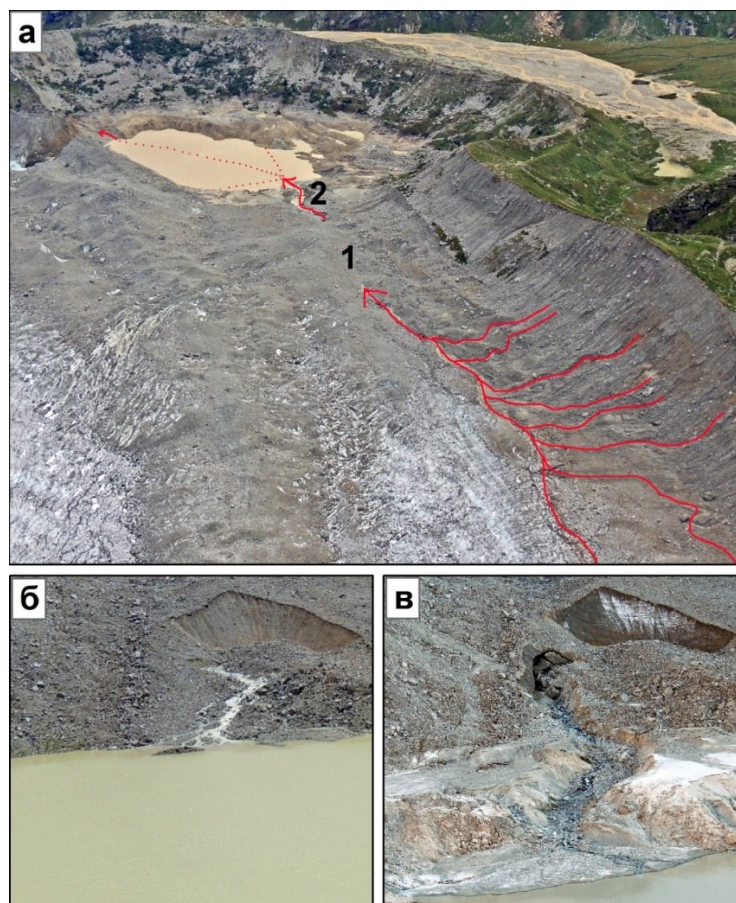


Рис. 2. Зона формирования селевого потока, вызвавшего селевую волну на озере Башкара 01.09.2027: а – вертолётный снимок 01.09.2017, б – наземный снимок 28.07.2017, в – наземный снимок 09.10.2017. 1 – участок накопления воды в массиве мёртвого льда, 2 – участок притока воды в озеро (см. фрагменты б, в). Фото М.Д. Докукина

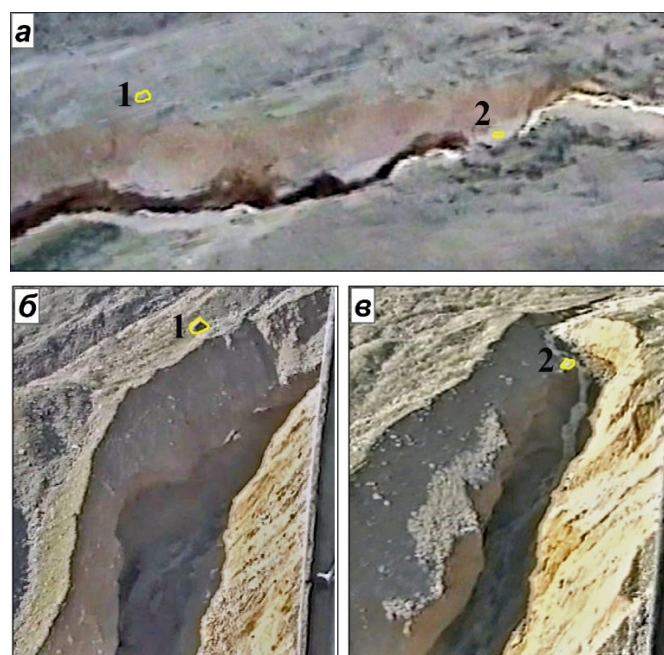


Рис. 3. Следы донной эрозии на участке верхнего моренного каньона р. Каяартысу после селя 1999 г. и после первой волны селей 2000 г.: а – кадр видеосъёмки 1999 г.; б, в – кадры видеосъёмки 19.07.2000 Точками 1 и 2 обозначены одни и те же участки моренного каньона на кадрах 1999 и 2000 гг.



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. м³ [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. м².

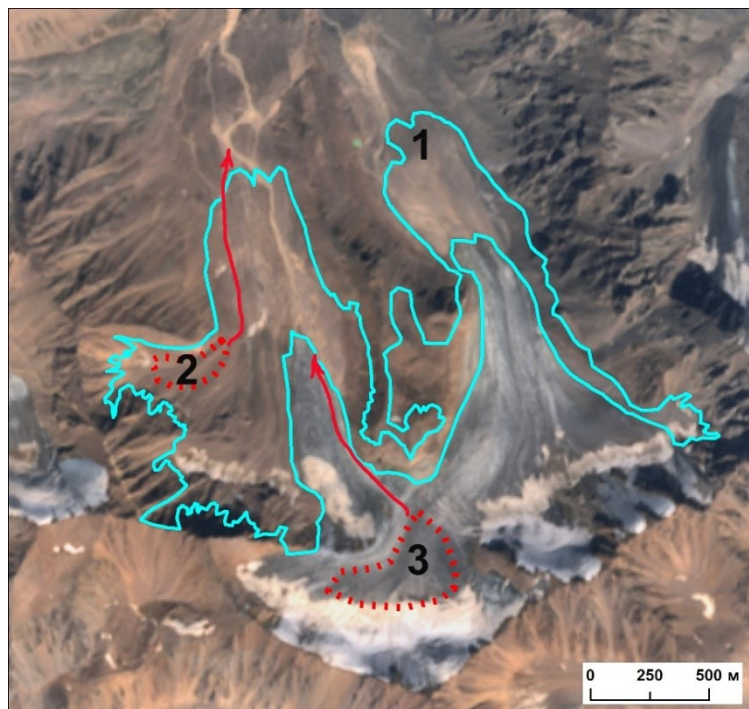


Рис. 5. Схема расположения участков водных импульсов гляциальных селей р. Каяартысу на космоснимке Sentinel-2 30.08.2023. 1 – граница ледника в 1957 г., 2 – участок водных импульсов селей 1960-1962 гг., 3 – участок водных импульсов селей 1999, 2000, 2011, 2017 и 2022 гг.

Так как накопление воды происходило на участке области аккумуляции ледника, то условия для формирования подледниковых озёр 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 [Запороженко, 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).

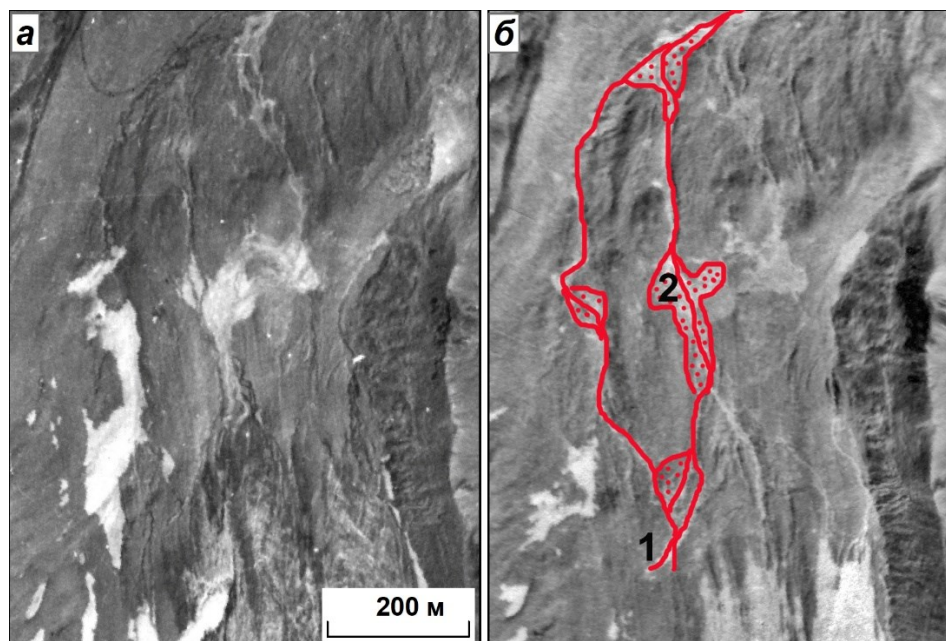


Рис. 6. Селепроявления 1960-х гг. в верховьях левого истока р. Каяартысу: а – аэрофотоснимок 1957 г., б – аэрофотоснимок 1973 г. 1 – селевые русла, 2 – селевые отложения

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 видеосъёмки, 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 м³), 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 м³ [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 аэрофотосъёмки 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.: Гидрометеиздат, 1977. – 155 с.
- Герасимов В.А. Селевые потоки в районе г. Тырнауза 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.: Гидрометеиздат, 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.: Гидрометеиздат, 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.
- Запороженченко 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.