

ТРАНСФОРМАЦИЯ ГОРНЫХ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОТВЕТ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И АНТРОПОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

УДК 551.324.5:551.435

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОСЛЕДНИХ ДЕСЯТИЛЕТИЙ, СВЯЗАННЫЕ С ДЕГРАДАЦИЕЙ ЛЕДНИКОВ И МЕРЗЛОТЫ В ГОРАХ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

© 2023 г. М. Ю. Беккиев^а, М. Д. Докукин^а *, Р. Х. Калов^а

^аВысокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия

*e-mail: inrush@bk.ru

Поступила в редакцию 18.01.2023 г.

После доработки 08.08.2023 г.

Принята к публикации 25.08.2023 г.

На основе анализа материалов дистанционного зондирования Земли и публикаций приводятся данные о катастрофических проявлениях опасных природных процессов, связанных с деградацией ледников и горной мерзлоты, вызванной изменением климата. На фоне ускоренных темпов деградации ледников чаще наблюдаются катастрофические проявления их динамики — сходы ледников и ледяные лавины, ледово-каменные лавины. На Центральном и Западном Кавказе наблюдается активизация сходов каменных и ледово-каменных лавин, максимальные из которых были с дальностью выброса до 11.3 км (на г. Казбек в 2014 г.), с площадью зоны поражения 3.2 км² (в ущелье Аксаут в 2022 г.). В 2021–2022 гг. происходили катастрофические сходы ледников и ледово-каменные лавины на г. Мармолада в Альпах, в ущелье Джууку на Тянь-Шане и в долине р. Ронти Гад в Гималаях. Максимальным по объему был сход ледника Седонгпу в Восточном Тибете в 2018 г. (130 млн м³). Таяние льда в массивах горной мерзлоты (моренных пьедесталах) приводит к формированию селей гигантских объемов выноса, достигающих 300 млн м³ и более. С блокировкой подземных каналов стока внутри каменных глетчеров связаны накопления воды в длительное время пустующих котловинах и формирование озер с последующими их катастрофическими прорывами. Процессы, происходящие в ледниках и моренных комплексах, часто имеют унаследованный и взаимообусловленный характер и длительный период подготовки, что позволяет на основе постоянного мониторинга с использованием космоснимков выявлять прогностические признаки и предупреждать заранее о грозящей опасности.

Ключевые слова: сход ледника, ледово-каменная лавина, моренный пьедестал, каменный глетчер, селевой поток, прорыв озера, космические снимки

DOI: 10.31857/S2587556623070051, **EDN:** NGTATM

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата приводит к ускорению темпов и масштабов деградации ледников, представляющих собой стратегические запасы пресной воды. Проблема деградации ледников и управления водными ресурсами с каждым годом становится острее (Rasul and Molden, 2019). Вместе с тем увеличивается угроза активизации опасных природных процессов в горах, где развито оледенение и массивы крупнообломочных грунтов, содержащие большие объемы льда (моренные пьедесталы, каменные глетчеры и другие образования). Увеличилась частота сходов ледников, ледово-каменных и каменных лавин с большими объемами и дальностью выброса, прорывов наледниковых и приледниковых озер, подледниковых водоемов. Очаги селевых потоков захватывают зна-

чительные площади тающей горной мерзлоты и сбрасывают вниз гигантские массы обломочного материала, разрушая все на своем пути. Появляются новые очаги опасности на участках, где они раньше не были зафиксированы и, соответственно, не были учтены в существующих каталогах и кадастрах опасных процессов и явлений. В связи с этим возникают проблемы уточнения карт распространения опасных процессов и явлений и зон поражения, разработки мер адаптации к потенциальным новым угрозам.

Цель настоящей работы — на основе анализа разновременной аэрокосмической информации, а также публикаций и сообщений дать обзор опасных процессов в горных районах, связанных с деградацией ледников и массивов горной мерзлоты (сходы ледников и селевые процессы на массивах моренных пьедесталов и каменных

Таблица 1. Параметры сходов ледников в горных районах мира в XXI в.

№	Название ледника, долины, горы	Регион	Год	Географические координаты		Дальность выброса, км	Перепад высот, км	Объем, 10 ⁶ м ³	Угол наклона ледника, град
				широта, град	долгота, град				
1	г. Мармолада	Итальянские Альпы	2022	46.43	11.85	2.7	0.9	0.07	26
2	Колка	Кавказ	2002	42.73	44.44	19	2.0	130	11
3	р. Шураки Капали	Памир	2017	38.98	70.85	9	1.4	8.8	16
4	р. Дегильмони Поен	Памир	2019	38.99	70.70	6.7	1.5	8.6	20
5	р. Шаклысу	Памир	2019	39.01	70.98	4.7	1.3	1.7	30
6	р. Джууку	Тянь-Шань	2022	41.95	77.85	2.8	0.8	1.1	17
7	Ару-1	Западный Тибет	2016	34.02	82.25	8.2	0.8	68	12
8	Ару-2	Западный Тибет	2016	34.00	82.27	7.2	0.8	83	13
9	хр. Амни Мачен	Восточный Тибет	2004	34.82	99.44	5.2	1.0	27	13
10	Седонгпу	Юго-восточный Тибет	2018	29.80	94.92	8	1.3	130	9
11	г. Ронти	Гималаи	2016	30.37	79.72	6.5	2.3	6	32
12	р. Флэт Крик	Аляска	2015	61.50	–141.54	12.7	1.1	17–20	20
13	Ленас	Аргентинские Анды	2007	–34.46	–70.05	2	0.2	4.2	15
15	г. Тингуиририка	Чилийские Анды	2007	–34.83	–70.35	7.9	1.4	12	20

Примечание. Для ледников, испытавших несколько сходов, приведены максимальные значения параметров. Составлена по (Jacquemart et al., 2022; Kaab et al., 2021; Leinss et al., 2021) с добавлениями авторов.

глетчеров, обвальные и другие процессы), оценить современные масштабы и особенности их развития и по возможности определить характерные признаки и условия подготовки катастроф, чтобы в последующем выявлять новые очаги опасности и оценивать потенциальные угрозы, разрабатывать мероприятия по снижению рисков и ущерба.

В работе были использованы публикации и космоснимки Sentinel-2 и Landsat 4-9 с пространственным разрешением 10–30 м с различными вариантами обработки, в том числе в 3D формате¹, а также космоснимки сверхвысокого разрешения с сервиса Google Earth (QuickBird, WorldView-2, Pleiades-1A).

Разновременные космоснимки привязывались по опорным точкам в программе ArcMap и сравнивались визуально с использованием инструмента “зашторить слой” (Swipe Layer) для выявления фактов селепроявлений, обвалов и сходов ледников, а также построения векторных слоев контуров селевых врезов и отложений, зон поражения опасными процессами, на основе которых проводились автоматические вычисления площади и определения длины.

¹ <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>.

ОБЗОР КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Сходы ледников

Самыми крупномасштабными и разрушительными процессами, связанными с ледниками, являются сходы ледников (glacier detachments). Сходы ледников характеризуются значительно более высокими скоростями движения масс льда [до 100 м/с и более (Заалишвили, 2020) в отличие от пульсаций ледников (до 200–300 м/сут)]. Долгое время катастрофические сходы ледника Колка в 1902 и 2002 гг. считались уникальным явлением, не имевшим аналогов в мире и обусловленным проявлениями вулканизма г. Казбек. В последующем подобные процессы были зафиксированы уже в разных горных районах мира (Kääb et al., 2021). Данные о сходах ледников в XXI в. приведены в табл. 1. Примерно такого же объема, как в случае ледника Колка, был сход ледника Седонгпу в 2018 г. (130 млн м³) (An et al., 2022). В среднем дальность выброса масс льда при сходах ледников составляла 5–8 км (максимально до 19 км) (Kääb et al., 2021).

Сходы ледников происходили на участках с углами наклона от 8°–9° до 25°–35°. Процессы на крутосклонных участках часто именуют ледяными лавинами. События далекого прошлого, например ледяную лавину 1895 г. объемом более 4 млн м³ на горе Альтельс (Faillietaz et al., 2011; Heim, 1895), можно интерпретировать как сход ледника.

Подробнее случаи сходов ледников и ледово-каменных и ледяных лавин на хребте Петра Первого на Памире представлены в (Leinss et al., 2021). В (Shugar et al., 2021) приведены данные о сходах ледника на г. Ронти в Индийских Гималаях в 2000 и 2016 гг. и катастрофической ледово-каменной лавине в 2021 г. В (Беккиев и др., 2022) охарактеризованы сходы ледников на г. Ронти, в том числе событие 2021 г., а также сходы ледников в 2022 г.: 3 июля в Доломитовых Альпах (Италия) и 8 июля на Тянь-Шане (Кыргызстан).

На рис. 1 показаны участки отрыва и зоны поражения сходами ледников в Альпах и на Тянь-Шане. Сход небольшого висячего ледника на г. Мармолада в Альпах привел к гибели 11 человек. Объем сошедших масс льда составил всего 65 ± 10 тыс. м³ (Berthier and Gascoin, 2022a). Объем сошедшей массы льда ледника в долине р. Джууку на Тянь-Шане составил 1.1 млн м³ (Berthier and Gascoin, 2022b). Зоны поражения сходами этих ледников составили 0.25 и 0.83 км² (см. рис. 1в, г). Площади обрушившихся массивов льда достигали 11 тыс. м² (см. рис. 1а) и 71.5 тыс. м² (см. рис. 1б). Другие параметры сходов ледников в Альпах и на Тянь-Шане приведены в табл. 1.

На основе анализа космических снимков до и после схода ледника в случае ледников Ару в Западном Тибете и ледников на хребте Петра Первого на Памире, ледника Колка на Кавказе были выявлены признаки подготовки ледников к сходу (Докукин и др., 2019а): наступание ледников (в течение от 1.5 месяца до полугода), увеличение скорости движения (до 2 м/сут и более), появление разрывов в теле ледника и новых трещин и другие. Нередко в процессы схода через некоторое время вовлекались ледники соседние с сошедшим (ледники Ару в Тибете и ледники на хребте Петра Первого на Памире). Один ледник может испытывать несколько сходов в течение короткого периода (оставшиеся неподвижными участки ледника или восстановившиеся после первого схода могут сойти через несколько лет). На соседних с сошедшим ледниках могут происходить ледово-каменные обвалы или пульсации. Пульсации могут происходить у ледника, испытывавшего сходы (ледник Колка, ледник на хребте Амни Мачен в Восточном Тибете).

По этим признакам были выявлены ледники, динамика которых могла привести к сходу (Беккиев и др., 2021а). В 2010 г. на горе Андыртау (бассейн р. Баксан, Кабардино-Балкарская республика, Россия) обнаружено сползание висячего ледника от линии бергшрунда на 20 м и образование новой овальной системы трещин. В июне 2018 г. зафиксирована подвижка небольшого ледника на правом склоне долины р. Алибек (район Домбая, Карачаево-Черкесская республика, Россия) на расстояние 90 м с появлением новых тре-

щин и со скоростью движения до 2 м/сут. В этих случаях по разным причинам сход ледников не произошел.

Анализ проявлений аномальной динамики ледников в разных районах мира показал, что на фоне общей резкой деградации оледенения некоторые отдельные ледники (или группы ледников, находящихся в подобных условиях, как в случае ледников на склоне хребта Петра Первого на Памире) могут представлять угрозу их схода в тех местах, где они не наблюдались [по данным (Jasquetmart et al., 2022) сходов ледников в долине р. Флэт Крик не было на протяжении 400 лет] или там, где происходили раньше. Поэтому следует обращать особое внимание в первую очередь на ледники, сходившие в прошлом. Например, ледник Колка за 20 лет постепенного восстановления еще далеко не набрал объем, который был до схода (см. рис. 1д), но его сход может повториться и при меньшем объеме.

Деградация моренных пьедесталов и селевые потоки

Моренный пьедестал — аккумулятивная форма рельефа ледникового происхождения, выраженная в виде языкообразного массива, возвышающегося над дном долины или поверхностью склона на 50–70 м и имеющего трапецевидный поперечный профиль благодаря ровным скатам береговых морен, окаймляющих его. На основе анализа различных типов пьедесталов и особенностей их эволюции был сделан вывод о том, что образование моренных пьедесталов происходило в результате подвижек ледников, насыщенных обломками вследствие высокой активности камнепадов и обвалов с их скального обрамления, и наложения друг на друга продуктов подвижек — обломочно-ледяных масс (Докукин и др., 2016).

Деградация моренных пьедесталов как особых форм горной мерзлоты приводит к таянию внутреннего льда, постепенному насыщению моренных масс водой и сходу грязекаменных селей гигантских объемов с образованием крупнейших селевых врезов, остающихся на месте пьедесталов свидетельствами этих неординарных геоморфологических процессов. В прошлом такие селепро явления зафиксированы: в 1940 г. в ущелье Адылсу (бассейн р. Баксан, Центральный Кавказ), в 1953 г. (или немногим ранее) в ущелье Тютюнсу (бассейн р. Черек Балкарский, Центральный Кавказ), в 1963 г. в долине р. Иссык (Заилийский Алатау, Казахстан), в 1975 г. в долине р. Хазнидон (Центральный Кавказ), в 1983 г. в долине Дарайпшихарв (Памир, Таджикистан), в 2015 г. в долине р. Барсемдара (Памир, Таджикистан) (Виноградов, 1977; Докукин и др., 2016, 2019б; Ковалев, 1957; Тулеев, 2002).

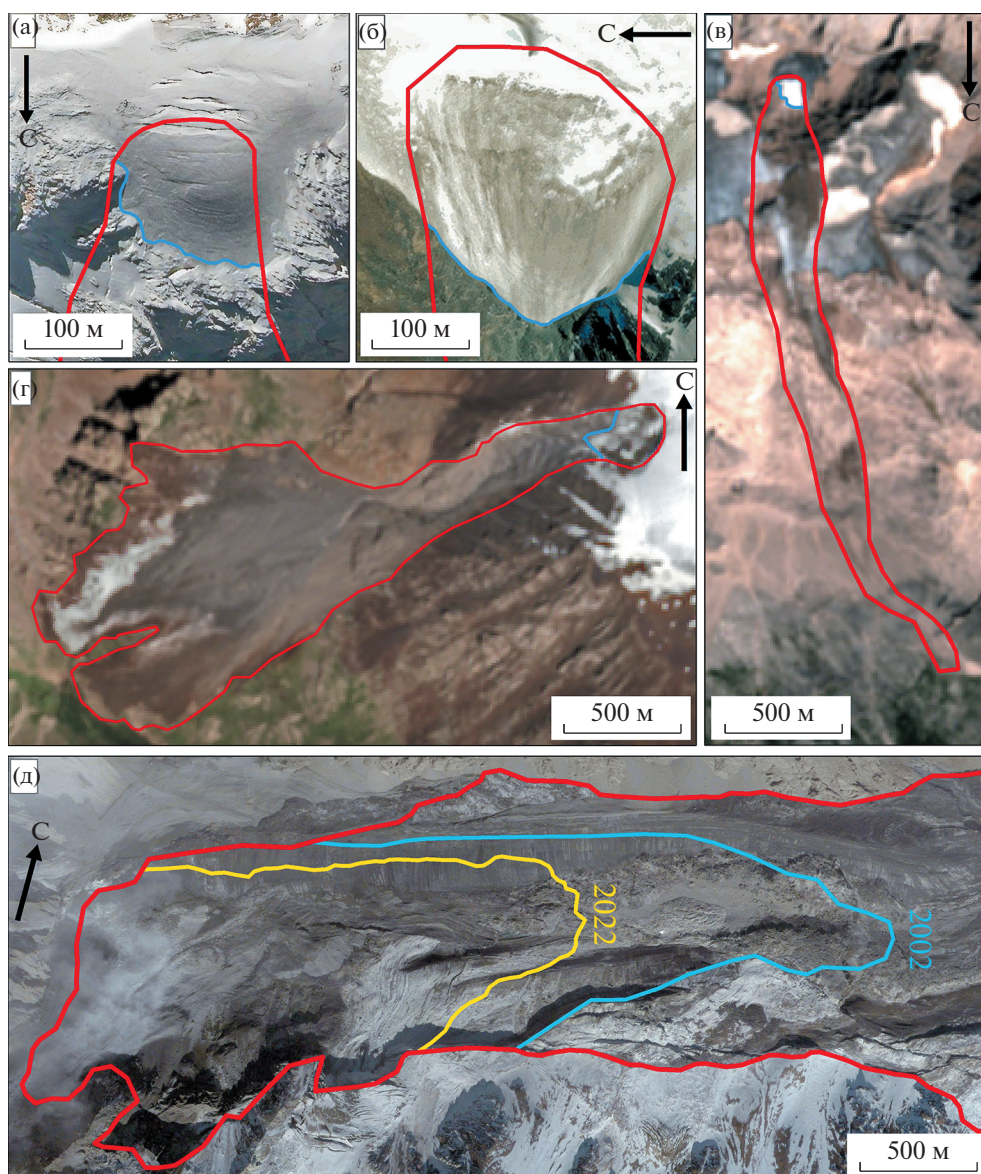


Рис. 1. Сходы ледников и зоны их поражения на космоснимках: (а) ледник на склоне г. Мармолада (Доломитовые Альпы, Италия) до схода (14.09.2012 WorldView-2), (б) ледник в долине р. Джууку (Тянь-Шань, Кыргызстан) до схода (24.09.2021 WorldView-2), (в) зона поражения сходом ледника с г. Мармолада (11.07.2022 Sentinel-2), (г) зона поражения сходом ледника в долине р. Джууку (16.07.2022 Sentinel-2), (д) верхняя часть зоны поражения сходом ледника Колка (Кавказ, Россия) (25.09.2002 QuickBird) и границы ледника до его схода в 2002 г. и на этапе его восстановления в 2022 г. (желтая линия). Границы ледников до их схода показаны голубыми линиями, зоны поражения сходами ледников — красными контурами. Фрагменты космоснимков (а), (б), а также (в), (г), (д) показаны в одном масштабе.

Объемы селевых выносов при формировании врезов на моренных пьедесталах достигали 4–6 млн м³ и зависели от объемов ледово-каменных масс, содержащихся между береговыми моренами, ограничивающими пьедесталы. Образовавшиеся селевые врезы имели площадь до 0.17 км², длину до 1 км и ширину до 180 м (Докукин и др., 2019б). Характерной особенностью селевых процессов в моренных пьедесталах является их формирование в основном без влияния дождей, а также большая продолжительность (от нескольких

дней до недели и более) и высокая плотность селевых потоков. Начавшийся селевой процесс продолжается до полного выноса моренных масс, содержащихся в пьедесталах, но может быть ограничен концом ледника, частично покрывающего пьедестал. Моренные пьедесталы в основном являются отдельными формами, но встречаются и в виде парагенетических комплексов в сочетании с береговыми моренами крупных ледников, с каменными плетчерами (Беккиев и др., 2021б).

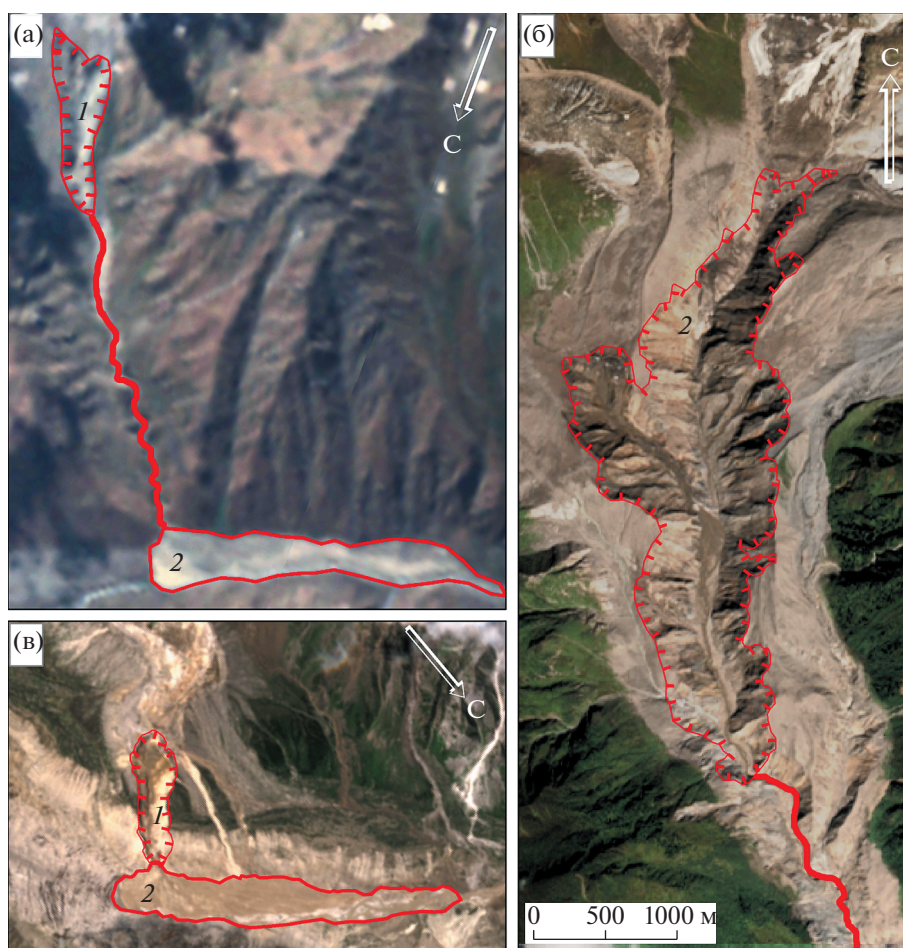


Рис. 2. Селевые врезы в моренных пьедесталах и зоны селевых отложений на космоснимках: (а) в долине р. Дараипшихарв на Памире в 1983 г. (22.08.1988 Landsat-4 TM), (б) на моренном пьедестале ледника Седонгпу в Восточном Тибете в 2021 г. (30.09.2021 Sentinel-2), (в) на моренном пьедестале ледника Меру у конца ледника Ганготри (исток р. Ганг) в Гималаях в 2017 г. (21.07.2017 Sentinel-2). 1 – селевой врез, 2 – селевые отложения. Все фрагменты космоснимков показаны в одном масштабе.

На рис. 2 показаны одни из крупных проявлений селевых процессов в моренных пьедесталах (моренные формы определены как пьедесталы авторами настоящей статьи) на Памире, в Гималаях и Тибете. Длина вреза в долине р. Дараимудирав (приток р. Дараипшихарв, Памир) (см. рис. 2а) составила 1.3 км, а площадь – 0.17 км². Площадь селевых отложений в долине р. Дараипшихарв достигала 0.41 км². Самая мощная селевая волна процесса 1 августа 1983 г. прошла расстояние 18 км от вершины селевого вреза до р. Пяндж (Тукеев, 2002).

По данным (Kumar et al., 2019) объем селевых отложений из образовавшегося в период с 16 по 19 июля 2017 г. на массиве пьедестала ледника Меру Бамак и береговой морены ледника Ганготри (исток р. Ганг) селевого вреза составил 6.5 млн м³. Площадь вреза достигла 0.13 км², а участка селевых отложений – 0.46 км² (см. рис. 2в). Длина вреза (0.9 км) была ограничена концом ледника Меру

Бамак. В (Беккиев и др., 2021в) приведены сведения о формировании вреза длиной 1.3 км на участке моренного комплекса бывшего притока ледника Батсват с моренным пьедесталом в виде террасовидной береговой морены и сходе селевых потоков в течение 12 дней в июле 2018 г. в долине левого притока р. Ишкоман (Пакистан) с разрушениями в кишлаках Батсват и Бильханц и формированием подпружного озера площадью около 0.74 км² на расстоянии 5.4 км от вершины вреза. Этот случай показывает, что моренные пьедесталы могут быть частью крупного моренного комплекса и не иметь четкую форму пьедестала, и кроме пьедестала в селевой процесс вовлекаются массы обычных береговых и донных морен основного комплекса.

Самым крупным селепроявлением на моренных пьедесталах был селевой процесс на пьедестале ледника Седонгпу в долине левого притока р. Ярлунг Цангпо (Юго-Восточный Тибет), в ре-

зультате которого в июле–августе 2021 г. образовался врез площадью 2.6 км² и длиной 4.7 км. Объем селевых выносов из моренного пьедестала превысил 300 млн м³ (Kääb, Girod, 2022) (см. рис. 26). Перед формированием вреза на пьедестале, где был расположен ледник Седонгпу, произошел целый ряд событий (6 сходов ледово-каменных лавин с 2014 г. и сход ледника), что было охарактеризовано в нескольких публикациях (An et al., 2022; Kääb et al., 2021; Li et al., 2022; Zhao et al., 2022). В конце октября 2017 г. сошла ледово-каменная лавина объемом около 50 млн м³, затем 16 октября и 29 октября 2018 г. произошел сход ледника. До формирования вреза высота внешних откосов моренного пьедестала ледника Седонгпу составляла 50–70 м, как и пьедестала в балке Джаловчат (бассейн р. Адыр-Су, Центральный Кавказ). Ширина пьедестала по верху (между бровками боковых откосов) была около 400 м. В образовавшемся врезе она уже составляла около 700 м (т.е. бровки откосов пьедестала отступили по обе стороны примерно на 150 м).

Селевые процессы на пьедестале ледника Седонгпу показали, что для оценки селевой опасности необходимо обращать внимание и на пьедесталы, еще покрытые ледником, так как между сходом ледника и формированием вреза может быть небольшой временной интервал; селевой процесс протекает непрерывно до практически полного выноса масс пьедестала и этому процессу подвержены и моренные пьедесталы с минимальными углами наклона (до 8°–9°). Примером моренного пьедестала, еще покрытого ледником, но в будущем представляющего селевую угрозу, является ледниково-моренный комплекс Донгуз-Орун (Чегеткарачиран) в верховьях р. Донгуз-Орунбаксан (правый приток р. Баксан, Центральный Кавказ) (Докукин и др., 2016). Сход селей из этого моренного пьедестала может принести разрушения многочисленным объектам на Поляне Чегет в Приэльбрусье.

Деградация каменных глетчеров и селевые потоки

Каменные глетчеры являются характерным элементом перигляциальной зоны в горных районах и представляют собой языкообразные ледово-обломочные массивы с многочисленными дугообразными валами на поверхности. Каменным глетчерам Евразии посвящена монография (Горбунов, Горбунова, 2013). Селепроявления в каменных глетчерах охарактеризованы в работах (Докукин, 1987; Докукин и др., 2020; Сейнова, Мезенина, 1987). На рис. 3 показаны различные участки формирования селей в каменных глетчерах, а также следы обрушения части массива каменного глетчера (см. рис. 3в).

В отличие от моренных пьедесталов, каменные глетчеры часто встречаются с развитыми разновозрастными генерациями, что свидетельствует об устойчивости этих форм в течение длительного времени и меньшей скорости таяния, заключенного в них льда. Ареной развития селевых процессов в каменных глетчерах в основном являются их незадернованные фронтальные уступы значительной протяженности (Докукин, 1987), которые рассечены многочисленными рытвинами.

Многолетние исследования динамики каменного глетчера Ритиграбен на правом склоне долины р. Маттерталь в Швейцарских Альпах (кантон Вале) и 16 селепроявлений с 1958 г. (Lugon and Stoffel, 2010) показали, что скорость движения каменного глетчера с повышением температуры воздуха в последние годы увеличилась по сравнению с 1975–1993 гг. на 70% (до 0.6–0.9 м/год). Крупнейшее селевое событие на каменном глетчере Ритиграбен произошло 24 сентября 1993 г., когда перед этим выпало 115 мм осадков за 72 часа – объем отложений на конусе выноса составил 60000 м³.

Последствием выпадения большого количества осадков на участки цирков, заполненных каменными глетчерами (в том числе разными по возрасту генерациями), может быть вовлечение в селевые процессы значительных объемов фронтальных зон каменных глетчеров. На рис. 3е показана эрозионно-оползневая воронка на фронтальной части массива каменного глетчера в верховьях р. Вторая Шихтолайка (бассейн р. Кынгарга, Республика Бурятия), образовавшаяся 28 июня 2014 г. Объем селевых отложений вместе с материалом, захваченным на участке ниже каменного глетчера, составил 0.72 млн м³ (Макаров и др., 2014).

Несмотря на то, что селепроявления на фронтальных уступах каменных глетчеров распространенное явление, встречаются каменные глетчеры с уступами протяженностью до 300–400 м, покрытые свежим осыпным материалом, и при этом селевая деятельность на них длительное время не фиксируется. Например, по данным сравнения аэрофотоснимков 1957, 1959, 1975 гг. и космоснимков Landsat 4–5 и Sentinel-2 1985–2022 гг. не выявлено селепроявлений на участке фронтального уступа каменного глетчера (протяженность до 380 м, ширина в верхней части 240 м, см. рис. 3ж) на левом склоне долины р. Хазнидон (Центральный Кавказ) с площадью водосбора до бровки уступа 1.9 км². При этом наблюдается постоянная активность осыпных процессов и камнепадов на уступе, а скорость движения каменного глетчера в нижней части языка за период 2015–2021 гг. в среднем составила 2.0 м/год.

Одними из самых значительных по объему перемещаемого материала процессов, происходящих в каменных глетчерах, являются обрушения (быстрые сползания) фронтальных их участков с

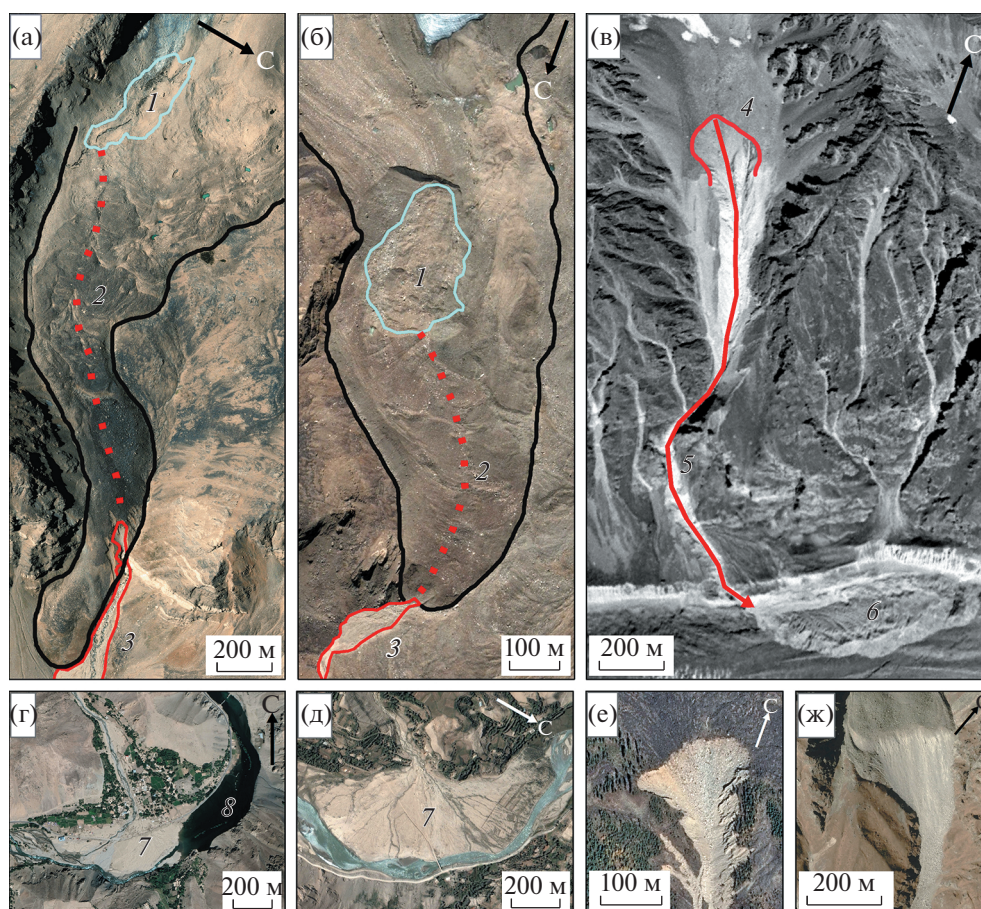


Рис. 3. Селепроявления и обрушения в каменных глетчерах на космоснимках и аэрофотоснимках: (а) верховья р. Даррагари (правый приток р. Панджшер, Афганистан) 08.09.2018 WorldView-2, (б) верховья р. Даштдара (левый приток р. Шахдара, Таджикистан) 31.08.2008 QuickBird, (в) левый склон долины р. Черек Безенгийский над ледником Безенги (Кавказ, Россия) аэрофотоснимок 15.08.1957, (г) кишлак Пашгор в долине р. Панджшер в устье р. Даррагари (Афганистан) 08.09.2018 WorldView-2, (д) кишлак Дашт в долине р. Шахдара в устье р. Даштдара (Таджикистан) 31.08.2008 QuickBird, (е) верховья долины р. Вторая Шихтолайка (левый приток р. Кынгарга, Бурятия, Россия) 26.09.2016 Pleiades-1A, (ж) верховья левого притока р. Хазнидон (Кавказ, Россия) 27.10.2020 Pleiades-1A. 1 – котловина озера после прорыва, 2 – подземный канал водного и селевого стока в массиве каменного глетчера, 3 – селевые отложения, 4 – зона отрыва массива каменного глетчера, 5 – зона транзита обрушившегося массива каменного глетчера, 6 – отложенная масса обрушившегося каменного глетчера, 7 – селевые отложения на конусе выноса, 8 – подпруженное селевыми массами озеро.

частичным сохранением первоначальной структуры массива. В работе (Bodin et al., 2012) приведены данные об обрушениях (коллапсах) каменных глетчеров: 1) каменный глетчер Берард (хребет Парпайон, Французские Альпы) летом 2006 г. с объемом обрушившейся массы 0.5 млн м^3 , 2) каменный глетчер на юго-западном склоне массива горы Серро-лас-Тортолас (6145 м, Анды, Чили) весной (по нашим данным между 12 февраля и 13 марта, космоснимки Landsat 4–5) 2006 г. с площадью отложений 0.12 км^2 . Подобные явления зафиксированы и на Центральном Кавказе. По данным (Сейнова, Мезенина, 1987) в июле 1937 г. на склоне горы Гихи (3213 м) в долине ручья Люклен (левый склон долины р. Гара-Аузусу, бассейн р. Чегем) произошло обрушение каменного

глетчера с дальностью выброса около 1.9 км. Площадь отложенной массы составила 60 тыс. м^2 . На аэрофотоснимке 1957 г. (см. рис. 3в) выявлены следы обрушения каменного глетчера на левом склоне долины р. Черек Безенгийский с площадью отложенного на поверхности ледника Безенги массива 0.14 км^2 и дальностью выброса около 2.3 км.

Наиболее разрушительными процессами, связанными с деградацией каменных глетчеров, являются прорывы озер в тыловых котловинах каменных глетчеров (Докукин и др., 2020а). На рис. 3а, б, г, д показаны последствия двух таких случаев: 1) в верховьях долины р. Даррагари (Афганистан), 2) в верховьях долины р. Даштдара (Таджикистан). Следствием прорывов озер были

селевые потоки, разрушившие и затопившие дома в кишлаке Пашгор с площадью отложений 0.2 км^2 в долине р. Панджшер (см. рис. 3г) и в кишлаке Дашт с площадью отложений 0.3 км^2 в долине р. Шахдара (см. рис. 3д), и принесли гибель людей. Если в верховьях р. Даштдара озеро перед прорывом 7 августа 2002 г. существовало в 2000 и 2001 гг. и имело максимальную площадь 44.6 тыс. м^2 (см. рис. 3б), то озеро в верховьях р. Даррагари площадью 62.6 тыс. м^2 появилось только в год прорыва (2018 г.) после многолетнего периода его отсутствия. В обоих случаях озера питались талыми водами ледников и снежников. Заполнение котловин в тыловой части каменных глетчеров и существование озер были следствием блокировки подземных каналов, которые существовали длительное время в телах каменных глетчеров. Длина подземных каналов стока составляла: из котловины оз. Даррагари — 1550 м , из котловины оз. Дашт — 680 м (обозначение 2 на рис. 3а и б). Подобные прорывы озера, периодически возникавшего в тыловой котловине каменного глетчера в верховьях р. Каргалы (хребет Иле Алатау, Казахстан), происходили в 2015 и 2019 гг. и сопровождалась селевыми потоками с ущербом району г. Алматы.

Кроме озер в тыловых котловинах каменных глетчеров, озера образовывались в результате блокировки долин языками каменных глетчеров, спускавшимися со склонов. Одним из таких озер было оз. Маашей площадью 286 тыс. м^2 в долине р. Мажой (Алтай), подпруженное телом каменного глетчера с несколькими возрастными генерациями (Докукин, 2014). Озеро существовало более 100 лет, и все это время функционировал стабильный подземный канал стока в теле каменного глетчера. Прорыв озера произошел 15 июля 2012 г. в результате цепочки процессов: 1) ускорения движения каменного глетчера (величина смещения отдельных участков достигала $43\text{--}48 \text{ м}$ за период 2002–2013 гг.), 2) блокировки канала стока вследствие деформации тела каменного глетчера, 3) проливных дождей и поднятия уровня воды в озере, 4) дальнейшего поверхностного размыва тела каменного глетчера при переполнении котловины.

Активизация обвальных процессов

В результате деградации ледников, вызванной потеплением климата, скальные склоны, окаймляющие ледники, освобождаются от ледового панциря и вовлекаются в интенсивные процессы морозного выветривания с формированием обвалов (каменных и ледово-каменных лавин). В работе (Bessette-Kirton and Coe, 2020) показано, что в горах Св. Ильи на Аляске увеличение количества каменных лавин в период 2013–2016 гг. коррелировало с повышением температуры, что в период 1964–2019 гг. сейсмогенные каменные лави-

ны были в два раза реже, чем не сейсмогенные. Рекордной по площади зоны поражения и по объему была каменная лавина на леднике Ламплуг в национальном парке Глейшер-Бей в 2016 г. — 21.8 км^2 (площадь), около 70 млн м^3 (объем) (Bessette-Kirton et al., 2018). Катастрофическим был сход ледово-каменной лавины с горы Ронти (Гималаи, Индия) в 2021 г. с дальностью выброса около 16 км — 204 погибших (Shugar et al., 2021). На Кавказе в XXI в. ледово-каменные и каменные лавины отличались значительной дальностью выброса: 11.3 км (по левому ответвлению пути в верховьях) в Девдоракском ущелье (Грузия) в 2014 г. (Докукин и др., 2020в), 7.5 км в долине р. Харгабахк (Чеченская республика) в 2006 г. (Докукин, Савернюк, 2010), 6.4 км с площадью зоны поражения 3.2 км^2 в долине р. Аксаут (Караево-Черкесская республика) в 2022 г. (Савернюк и др., 2022). На одном участке Главного Кавказского хребта (северный и южный склоны) площадью 160 км^2 в XXI в. было зафиксировано 16 обвалов с дальностью выброса до 4.2 км , а всего, по данным (Докукин и др., 2020в) около 70% случаев обвалов формировалось на высотах свыше 3600 м .

Обвалы нередко становятся причинами формирования различных опасных процессов, вследствие чего зоны их поражения увеличиваются многократно: последствием многочисленных обвалов стал сход ледника Колка и селевой поток по долине р. Гизельдон в 2002 г., каменные и ледово-каменные лавины трансформируются в селевые потоки, а также могут приводить к прорывам озер и прорывным паводкам (Mani et al., 2022), отложения обвальных масс на ледниках могут приводить к их подвижкам и обвалам льда (после обвала с г. Казбек в 2014 г. ледник Шантор в цирке Девдоракского ледника наступил на 400 м и с крутого уступа участились ледяные лавины с дальностью выброса до 2 км , в 2021–2022 г. начал наступать Девдоракский ледник).

Предвестниками крупных обвалов могут служить мелкие обвалы за сутки, месяц или год (Докукин и др., 2020в). В одной долине возможно повторение сходов каменных и ледово-каменных лавин через определенный промежуток времени (от года до нескольких лет и десятков лет) (Докукин, 2010; Leinss et al., 2021). В зоне отрыва катастрофической ледово-каменной лавины 7 февраля 2021 г. на горе Ронти в период 2016–2021 гг. формировалась и расширялась трещина, что было видно на космоснимках (Беккиев и др., 2021а; Shugar et al., 2021).

ИТОГИ ОБЗОРА

Обзор катастрофических событий выявил значительную активизацию опасных процессов, свя-

занных с потеплением климата и деградацией ледников (сходы ледников, ледово-каменные лавины, селевые потоки, вызванные деградацией массивов горной мерзлоты и др.). В работе не приведены последствия других процессов, которые происходят повсеместно в ходе деградации ледников — формирование и прорывы озер, например, катастрофический прорыв оз. Башкара (долина р. Адылсу, Центральный Кавказ) в 2017 г. (Черноморец и др., 2018), методика оценки угрозы которых детально разработана, постоянно совершенствуется и основана на количественных оценках многочисленных фактов прорывов озер различных типов. Кроме этого возникают единичные случаи прорывов внутриледниковых (подледниковых) водоемов, например, формирование водных импульсов селевых потоков на р. Каяартысу (бассейн р. Баксан, Центральный Кавказ) в 1960–1962, 1999, 2000, 2011, 2017 и 2022 гг. (Докукин и др., 2020б).

В результате многолетних исследований ледников были выявлены многочисленные случаи пульсаций, определена их периодичность, оценена степень угрозы и в новом каталоге учтены все нестабильные ледники (Хромова и др., 2021). На современном этапе возникают угрозы катастрофических сходов ледников в районах, где они раньше не были зафиксированы и не были исследованы, что затрудняет оценку их опасности. Первое обобщение случаев схода ледников в мире представлено в работе (Kääb et al., 2021), а на региональном уровне в работе (Leinss et al., 2021). Количество сходов ледников с каждым годом неуклонно растет, о чем свидетельствуют катастрофа в Альпах на горе Мармолада и сход ледника на Тянь-Шане в 2022 гг. (Беккиев и др., 2022). Для некоторых сходов ледников выявлены признаки их подготовки (Докукин и др., 2019а), которые можно фиксировать при анализе разновременных космоснимков ледниковых районов и предупреждать на их основе о потенциальной угрозе схода ледника.

Выявленная связь формирования крупнейших селевых врезов с особыми формами горной мерзлоты — моренными пьедесталами — дает возможность при обнаружении этих форм оценивать их как потенциальные селевые массивы и предвидеть развитие катастрофических селей в будущем, а также оценивать угрозы и масштабы селевого процесса на основе данных об объемах моренных пьедесталов. Кроме ярко выраженных форм моренных пьедесталов существуют переходные образования к обвально-осыпным конусам, береговым моренам, каменным глетчерам, что усложняет распознавание селевой угрозы. Но при достаточном количестве выявленных случаев схода селей с подобных участков в разных горных районах (Беккиев и др., 2021в) можно использовать их как аналоги при оценке селевой опасности. Селевые

процессы в моренных пьедесталах вышли на одно из первых мест среди экзогенных процессов по объему перемещенного за один процесс обломочного материала, что подтверждают данные о селевых выносах с пьедестала ледника Седонгпу объемом более 300 млн м³.

Как отмечено в работе (Wagner et al., 2020), деградация каменных глетчеров приводит к увеличению потенциальной возможности временной аккумуляции воды в их массивах, а при выпадении аномальных осадков — последующего сброса накопленной воды вместе с обломочным материалом в виде селевых потоков. Такое накопление воды в каменных глетчерах при блокировке подземных каналов стока с озер в тыловых котловинах каменных глетчеров может значительно увеличить объем сброшенной воды и обломочного материала в ходе прорывов таких озер, что важно для оценки селевой опасности. Признаком явной селевой угрозы каменного глетчера может служить появление в его тыловой котловине озера после длительного периода отсутствия в сочетании с прекращением поверхностного водного стока в русле ниже фронтального уступа каменного глетчера. Эти процессы могут проходить как в активных каменных глетчерах, так и древних генерациях.

В совокупности в высокогорной ледниковой зоне формируется система опасных процессов, влияющих друг на друга, в которой следствие одного процесса становится причиной другого, в том числе на соседних участках, увеличивая зону поражения. Учет всех факторов формирования и развития системы процессов, ее технологических цепочек и пространственно-временных особенностей очень важен для актуализации оценки опасности горных территорий (Assessment ..., 2017).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потепление климата и вызванное им ускорение темпов деградации ледников привело к активизации опасных природных процессов, наиболее масштабными и катастрофическими из которых стали сходы ледников, ледово-каменные и каменные лавины, селевые потоки, связанные с деградацией массивов горной мерзлоты и прорывы озер.

Некоторым катастрофическим проявлениям опасных процессов предшествовали периоды подготовки и развития, признаки которых можно было выявить при дешифрировании разновременных космоснимков. На современном этапе возрастает значение непрерывного комплексного мониторинга высокогорной зоны с использованием космоснимков высокой периодичности, материалов аэрофотосъемок и маршрутных наблюдений, и картирования проявлений опасных

процессов и зон их поражения, а также пересмотра оценок степени опасности горных территорий, отраженных в имеющихся картах и кадастрах, на основе данных мониторинга, расчетов и моделирования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках госзадания ФГБУ “ВГИ” по Плану НИТР Росгидромета (Рег. № НИТР 122031600407-4).

FUNDING

The study was carried out within the framework of the state task of FGBI “VGI” according to the Plan of the NITR of Roshydromet (Reg. no. NITR 122031600407-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Х.М., Калов Р.Х. Об оценке опасности сходов и обвалов ледников // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа (ГЕОКАВКАЗ 2021). г. Ессентуки. М.: ИИЕТ РАН, 2021а. Т. XI. С. 181–186.
- Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Федченко Л.М. Формирование селевых врезов на участках береговых морен долинных ледников // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2021б. Т. 21. № 3. С. 48–55. <https://doi.org/10.46698/m6092-4144-2648-e>
- Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Шагин С.И. Экстремальные селепроявления на моренных пьедесталах в 2018–2021 гг. (по материалам дистанционного зондирования земли) // ГеоРиск. 2021в. Т. XV. № 3. С. 40–48. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2021-15-3-40-48>
- Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Шагин С.И. О сходах ледников в 2021–2022 годах // Результаты 20 лет изучения катастрофы мирового масштаба в Геналдонском ущелье (сход ледника Колка). Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (гос. технологический ун-т), 2022. С. 155–163.
- Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 155 с.
- Горбунов А.П., Горбунова И.А. География каменных глетчеров и их аналогов в Евразии. Алматы: Институт географии МОН РК, 2013. 184 с. www.ingeo.kz
- Докукин М.Д. Каменные глетчеры Центрального Кавказа как селевые очаги // Труды ВГИ. 1987. Вып. 70. С. 33–42.
- Докукин М.Д., Савернюк Е.А. О возможности оценки угрозы каменных лавин (на примере долины р. Харгабахк, Чеченская Республика) // В мире научных открытий. 2010. № 3–4 (9). С. 146–151.
- Докукин М.Д. Выдающиеся прорывы озер в 2012–2013 гг. (по материалам ДЗЗ): сб. трудов Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства. Пятигорск: ОАО “Севкавгипроводхоз”, 2014. Вып. 20. С. 82–97.
- Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А. Моренные пьедесталы — очаги формирования катастрофических гляциальных селей // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 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: коллектив. монография / под ред. А.В. Николаева, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2019а. С. 522–528.
- Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Запороженченко Э.В., Бобов Р.А., Пирмамадов У.Р. Барсемская селевая катастрофа на Памире в 2015 году и ее аналоги на Центральном Кавказе // ГеоРиск. 2019б. Т. 13. № 1. С. 26–36. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-1-26-36>
- Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Каменные глетчеры — очаги формирования катастрофических селей // ГеоРиск. 2020а. Т. 14. № 2. С. 52–65. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-52-65>
- 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 Международ. конф. (Душанбе—Хорог, Таджикистан) / отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. Душанбе: ООО “Промоушн”, 2020б. Т. 1. С. 388–404.
- 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. 2020в. Т. 60. № 3. С. 361–378. <https://doi.org/10.31857/S2076673420030045>
- Заалишвили В.Б. Реконструкция процесса схода ледника Колка в Кармадонском ущелье 20 сентября 2002 года // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. М.: ИИЕТ РАН, 2020. С. 90–102.
- Ковалев П.В. Геоморфологические исследования в Центральном Кавказе (бассейн р. Баксан). Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1957. 162 с.
- Макаров С.А., Черкашина А.А., Атутова Ж.В., Бардаш А.В., Воронин Н.Н., Кичигина Н.В., Мутин Б.Ф., Осипова О.П., Ухова Н.Н. Катастрофические селевые потоки, произошедшие в поселке Аршан Тункинского района Республики Бурятия 28 июня 2014 г. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2014. 111 с.
- Савернюк Е.А., Докукин М.Д., Черноморец С.С., Крыленко И.В., Юдина В.А. Каменная лавина в долине ре-

- ки Аксаут 1 января 2022 г. и другие обвалы на Кавказе с 1957 по 2022 годы / Результаты 20 лет изучения катастрофы мирового масштаба в Геналдонском ущелье (сход ледника Колка). Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (гос. технологический ун-т), 2022. С. 50–68.
- Сейнова И.Б., Мезенина Т.Н. Каменные глетчеры — очаги зарождения селей в бассейне р. Чегем // Материалы гляциологических исследований. 1987. № 60. С. 179–183.
- Тукаев О.В. Селевые явления Памира: катастрофы, закономерности, прогноз. М., 2002. 176 с.
- Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаврентьев И.И. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // Лёд и Снег. 2021. Т. 63. № 3. С. 341–358. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030093>
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Выхаджиева 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. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(70-80\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80))
- An B., Wang W., Yang W., et al. Process, mechanisms, and early warning of glacier collapse-induced river blocking disasters in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon, southeastern Tibetan Plateau // Science of the Total Environ. 2022. Vol. 816. Article 151652. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151652>
- Assessment of Glacier and Permafrost Hazards in Mountain Regions. Technical Guidance Document / Allen S., Frey H., Huggel C., et al. (Eds.). Zurich, Lima, 2017. 72 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26332.90245>
- Berthier E., Gascoïn S. Estimation of Marmolada glacier collapse volume using Pleiades imagery // CESBIO multitemp. Séries Temporelles. 2022a. <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/estimation-of-marmolada-glacier-collapse-volume-using-pleiades-imagery/> (дата обращения 07.04.2023).
- Berthier E., Gascoïn S. Kyrgyzstan glacier collapse. New Pleiades and SPOT7 images tell us more... // CESBIO multitemp. Séries Temporelles. 2022b. <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/kyrgyzstan-infamous-avalanche-new-pleiades-and-spot7-images-tell-us-more/> (дата обращения 07.04.2023).
- Bessette-Kirton E.K., Coe J.A., Zhou W. Using stereo satellite imagery to account for ablation, entrainment, and compaction in volume calculations for rock avalanches on glaciers: Application to the 2016 Lamplugh rock avalanche in Glacier Bay National Park, Alaska // J. of Geophysical Research: Earth Surface. 2018. Vol. 123. P. 622–641. <https://doi.org/10.1002/2017JF004512>
- Bessette-Kirton E.K., Coe J.A. A 36-year record of rock avalanches in the Saint Elias Mountains of Alaska, with implications for future hazards // Frontiers in Earth Science. 2020. Vol. 8. Article 293. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00293>
- Bodin X., Krysiecki J.-M., Iribarren P. Recent collapse of rock glaciers: two study cases in the Alps and in the Andes // 12th Congress INTERPRAEVENT. 2012. <https://www.researchgate.net/publication/279253780>
- Faillietaz J., Sornette D., Funk M. Numerical modeling of a gravity-driven instability of a cold hanging glacier: reanalysis of the 1895 break-off of Altelsgletscher, Switzerland // J. Glaciology. 2011. Vol. 57. № 205. P. 817–831. <https://doi.org/10.3189/002214311798043852>
- Heim A. Die Gletscherlawine an der Altels am 11. September 1895. Zürich: Zürcher und Furrer, 1895. 63 p.
- Jacquemart M., Welty E., Leopold M., Loso M., Lajoie L., Tiampo K. Geomorphic and sedimentary signatures of catastrophic glacier detachments: A first assessment from Flat Creek, Alaska // Geomorphology. 2022. Vol. 414. Article 108376. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108376>
- Kääb A., Jacquemart M., Gilber A., Leinss S., Girod L., Huggel Ch., Falaschi D., Ugalde F., Petrakov D., Chernomorets S., Dokukin M., Paul F., Gascoïn S., Berthier E., Kargel J. Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers — more frequent than thought? // Cryosphere. 2021. Vol. 15. № 4. P. 1751–1785. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1751-2021>
- Kääb A., Girod L. Brief communication: Rapid $\sim 335 \times 10^6 \text{ m}^3$ bed erosion after detachment of the Sedongpu Glacier (Tibet) // The Cryosphere. 2023. Vol. 17. № 6. P. 2533–2541. <https://doi.org/10.5194/tc-17-2533-2023>
- Kumar A., Bhambri R., Tiwari S.K., Verma A., Gupta A.K., Kawishwar P. Evolution of debris flow and moraine failure in the Gangotri Glacier region, Garhwal Himalaya: Hydro-geomorphological aspects // Geomorphology. 2019. Vol. 333. P. 152–166. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.015>
- Leinss S., Bernardini E., Jacquemart M., Dokukin M. Glacier detachments and rock-ice avalanches in the Pervogo range, Tajikistan (1973–2019) // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2021. Vol. 21. P. 1409–1429. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1409-2021>
- Li W., Zhao B., Xu Q., Scaringi G., Lu H., Huang R. More frequent glacier-rock avalanches in Sedongpu gully are blocking the Yarlung Zangbo River in eastern Tibet // Landslides. 2022. Vol. 19. P. 589–601. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01798-z>
- Lugon R., Stoffel M. Rock-glacier dynamics and magnitude–frequency relations of debris flows in a high-elevation watershed: Ritigraben, Swiss Alps // Global and Planetary Change. 2010. № 73 (3) P. 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.06.004>
- Mani P.A., Allen S.K., Evans S.G., Kargel J.S., Mergili M., Petrakov D., Stoffel M. Geomorphic process chains in high-mountain regions — A review and classification approach for natural hazards assessment // ESS Open Archive. October 11, 2022. 69 p. <https://doi.org/10.1002/essoar.10512593.1>
- Rasul G., Molden D. The Global Social and Economic Consequences of Mountain Cryospheric Change // Fron-

- tiers in Environmental Science. 2019. Vol. 7. Article 91. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00091>
- Shugar D.H., Jacquemart M., Shean D., et al. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya // Science. 2021. Vol. 373. № 6552. P. 300–306. <https://doi.org/10.1126/science.abh4455>
- Wagner T., Brodacz A., Krainer K., Winkler G. Active rock glaciers as shallow groundwater reservoirs, Austrian Alps // Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie. 2020. Vol. 25. P. 215–230. <https://doi.org/10.1007/s00767-020-00455-x>
- Zhao C., Yang W., Westoby M., An B., Wu G., Wang W., Wang Z., Wang Y., Dunning S. Brief communication: A ~50 Mm³ ice-rock avalanche on 22 March 2021 in the Sedongpu valley, southeastern Tibetan Plateau // The Cryosphere. 2022. Vol. 16. № 4. P. 1333–1340. <https://doi.org/10.5194/tc-16-1333-2022>

Catastrophic Phenomena in the last Decades Associated with the Degradation of Glaciers and Permafrost in Mountains (Analytical Review)

M. Yu. Bekkiev¹, M. D. Dokukin¹ *, and R. Kh. Kalov¹

¹High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia

*e-mail: inrush@bk.ru

Based on the analysis of Earth remote sensing materials and publications, data on catastrophic manifestations of dangerous natural processes associated with the degradation of glaciers and mountain permafrost caused by climate change are presented. Amid accelerated rates of glacier degradation, catastrophic manifestations of their dynamics are more often observed—detachment of glaciers and ice avalanches, ice-rock avalanches. In the Central and Western Caucasus, there is an intensification of rock and ice-rock avalanches, the maximum of which had a runout distance of up to 11.3 km (on Mount Kazbek in 2014), with an affected area of 3.2 km² (in the Aksaut gorge in 2022). In 2021–2022, there were catastrophic glaciers detachments and ice-stone avalanches on the Marmolada mountain in the Alps, in the Juuku gorge in the Tien Shan and in the Ronti Gad River valley in the Himalayas. The Sedongpu glacier detachment in Eastern Tibet in 2018 had the maximum volume (130 mln m³). Melting of ice in moraine pedestals (massifs of mountain permafrost) leads to the formation of debris flows of gigantic runout volumes, reaching 300 mln m³ or more. The blocking of underground drain channels inside rock glaciers is associated with the accumulation of water in long-empty basins and the formation of lakes with their subsequent catastrophic outburst. The processes occurring in glaciers and moraine complexes often have an inherited and interdependent nature and a long period of preparation, which allows on the basis of constant monitoring using satellite images to identify prognostic signs and warn in advance of the imminent danger.

Keywords: glacier detachment, ice-rock avalanche, moraine pedestal, rock glacier, debris flow, lake outburst, satellite images

REFERENCES

- An B., Wang W., Yang W., et al. Process, mechanisms, and early warning of glacier collapse-induced river blocking disasters in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon, southeastern Tibetan Plateau. *Sci. Total Environ.*, 2022, vol. 816, no. 3, art. 151652. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151652>
- Assessment of Glacier and Permafrost Hazards in Mountain Regions. Technical Guidance Document. Allen S., Frey H., Huggel C. et al., Eds. Zurich, Lima, 2017. 72 p. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.26332.90245>
- Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh. On the assessment of the danger of glacier detachments and collapses. In *Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza (GEOKAVKAZ 2021). Nomer 11* [Modern Problems of Geology, Geophysics and Geoecology of the North Caucasus (GEOKAVKAZ 2021). No. 11]. Moscow: IIET RAN, 2021a, pp. 187–192. (In Russ.).
- Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Fedchenko L.M. Formation of debris flow cuts in the areas of lateral moraines of valley glaciers. *Vestn. Vladikavkaz. Nauch. Ts.*, 2021b, vol. 21, no. 3, pp. 48–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.46698/m6092-4144-2648-e>
- Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Shagin S.I. Extreme debris flow processes on moraine pedestals in 2018–2021 (based on remote sensing data). *GeoRisk*, 2021c, vol. 15, no. 3, pp. 40–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2021-15-3-40-48>
- Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Shagin S.I. About the glacier detachments in 2021–2022. In *Rezultaty 20 let izucheniya katastrofy mirovogo masshtaba v Genaldonskom ushel'e (skhod lednika Kolka)* [Results of 20 Years of Studying the Global Catastrophe in the Genaldon Gorge (the Detachment of the Kolka Glacier)]. Vladikavkaz: Sev.-Kavkaz Gorn.-Metal. Inst. (Gos. Tekhn. Univ.) Publ., 2022, pp. 155–163. (In Russ.).
- Berthier E., Gascoin S. Estimation of Marmolada glacier collapse volume using Pleiades imagery. *CESBIO multitemp. Séries Temporelles*, 2022a. Available at: <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/estimation-of-marmolada-glacier-collapse-volume-using-pleiades-imagery/> (accessed: 07.04.2023).

- Berthier E., Gascoin S. Kyrgyzstan glacier collapse. New Pleiades and SPOT7 images tell us more... *CESBIO multitemp. Séries Temporelles*, 2022b. Available at: <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/kyrgyzstan-infamous-avalanche-new-pleiades-and-spot7-images-tell-us-more/> (accessed: 07.04.2023).
- Bessette-Kirton E.K., Coe J.A., Zhou W. Using stereo satellite imagery to account for ablation, entrainment, and compaction in volume calculations for rock avalanches on glaciers: Application to the 2016 Lamplugh rock avalanche in Glacier Bay National Park, Alaska. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2018, no. 123, pp. 622–641. <https://doi.org/10.1002/2017JF004512>
- Bessette-Kirton E.K., Coe J.A. A 36-year record of rock avalanches in the Saint Elias Mountains of Alaska, with implications for future hazards. *Front. Earth Sci.*, 2020, vol. 8, art. 293. <http://doi.org/10.3389/feart.2020.00293>
- Bodin X., Krysiecki J.-M., Iribarren P. Recent collapse of rock glaciers: two study cases in the Alps and in the Andes. In *Proceedings of the 12th Congress INTERPRAEVENT, Grenoble, France, 23–26 April 2012*. Grenoble, 2012, pp. 2–3.
- Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Aleynikov A.A., Bekkiev M.Y., Viskhadzhieva K.S., Dokukin M.D., Kalov R.K., Kidyayeva V.M., Krylenko V.V., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Rets E.P., Savernyuk E.A., Smirnov A.M. The outburst of Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia) on September 1, 2017. *Earth's Cryosph.*, 2018, vol. 22, no. 2, pp. 61–70.
- Dokukin M.D. Rock glaciers of the Central Caucasus as places of formation of debris flows. *Tr. VGI*, 1987, no. 70, pp. 33–42. (In Russ.).
- Dokukin M.D., Savernyuk E.A. *O vozmozhnosti otsenki ugrozy kamennykh lavin (na primere doliny r. Hargabakh, Chechenskaya Respublika)* [On the Possibility of Assessing the Threat of Rock Avalanches (on the Example of the Khargabakh River Valley, Chechen Republic)]. *Mire Nauch. Otkryt.*, 2010, vol. 9, no. 3–4, pp. 146–151. (In Russ.).
- Dokukin M.D. Outstanding Lake outburst in 2012–2013 (based on remote sensing materials). In *Sbornik trudov Severo-Kavkazskogo instituta po proektirovaniyu vodokhozyaistvennogo i meliorativnogo stroitel'stva. Vyp. 20* [Collection of Works of the North Caucasus Institute for the Design of Water Management and Reclamation Construction. Vol. 20]. Pyatigorsk: OAO "Sevkav-giprovodhoz", 2014, pp. 82–97. (In Russ.).
- Dokukin M.D., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A. Moraine pedestals – initiation zones of catastrophic glacial debris flows. In *Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita* [Debris Flows: Risks, Forecast, Protection]. Irkutsk: Inst. Geogr. im. V.B. Sochava SO RAN Publ., 2016, pp. 67–71. (In Russ.).
- Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S. Signs of preparation of catastrophic glacier detachments (analysis of multi-temporal space information). In *Opasnye prirodnye i tekhnogennye protsessy v gornykh regionakh: modeli, sistemy, tekhnologii. Kollektivnaya monografiya* [Dangerous Natural and Technogenic Processes in Mountain Regions: Models, Systems, Technologies. Collective Work]. Nikolaev A., Zaalishvili V., Eds. Vladika-vkaz: GFI VNTS RAN, 2019a, pp. 522–528. (In Russ.).
- Dokukin M.D., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A., Zaporozhchenko E.V., Bobov R.A., Pirmamadov U.R. Barsem debris flow disaster in the Pamirs in 2015 and its analogues in the Central Caucasus. *GeoRisk*, 2019b, vol. 13, no. 1, pp. 26–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-1-26-36>
- Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S. Rock glaciers as origination sites of the catastrophic debris flows. *GeoRisk*, 2020a, vol. 14, no. 2, pp. 52–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-52-65>
- Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S., Bogachenko E.M. Glaciogeomorphological conditions for the Gerkhozhan-Su River debris flow formation (Central Caucasus). In *Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita. Trudy 6-i Mezhdunarodnoi konferentsii (Dushanbe–Khorog, Tadzhikistan). Tom 1* [Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Vol. 1]. Dushanbe: Promotion Publ., 2020b, pp. 388–404. (In Russ.).
- Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A. Activation of rock avalanches in the Central Caucasus and their impact on the dynamics of glaciers and debris flows. *Sneg i Led*, 2020c, vol. 60, no. 3, pp. 361–378. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673420030045>
- Faillietaz J., Sornette D., Funk M. Numerical modeling of a gravity-driven instability of a cold hanging glacier: re-analysis of the 1895 break-off of Altelsgletscher, Switzerland. *J. Glaciol.*, 2011, vol. 205, no. 57, pp. 817–831. <http://doi.org/10.3189/002214311798043852>
- Gorbunov A.P., Gorbunova I.A. *Geografiya kamennykh gletcherov i ikh analogov v Evrazii* [Geography of Rock Glaciers and Their Analogues in Eurasia]. Almaty: Inst. Geogr., MON RK, 2013. 184 p.
- Heim A. *Die Gletscherlawine an der Altels am 11. September 1895*. Zürich: Zürcher und Furrer, 1895.
- Jacquemart M., Welty E., Leopold M., Loso M., Lajoie L., Tiampo K. Geomorphic and sedimentary signatures of catastrophic glacier detachments: A first assessment from Flat Creek, Alaska. *Geomorphology*, 2022, no. 414, art. 108376. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108376>
- Käab A., Jacquemart M., Gilber A., Leinss S., Girod L., Huggel Ch., Falaschi D., Ugalde F., Petrakov D., Chernomorets S., Dokukin M., Paul F., Gascoin S., Berthier E., Kargel J. Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers – more frequent than thought? *Cryosph.*, 2021, vol. 15, no. 4, pp. 1751–1785. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1751-2021>
- Käab A., Girod L. Brief communication: Rapid $\sim 335 \times 10^6 \text{ m}^3$ bed erosion after detachment of the Sedongpu Glacier (Tibet). *Cryosph.*, 2023, vol. 17, no. 6, pp. 2533–2541. <https://doi.org/10.5194/tc-17-2533-2023>
- Khromova T.Y., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraviev A.Y., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I. New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–

- 2019). *Sneg I Led*, 2021, vol. 61, no. 3, pp. 341–358. (In Russ.).
<http://doi.org/10.31857/S2076673421030093>
- Kovalev P.V. *Geomorfologicheskie issledovaniya v Tsentral'nom Kavkaze (bassein r. Baksan)* [Geomorphological Studies in the Central Caucasus (Baksan River Basin)]. Kharkiv: Kharkiv Univ. Publ., 1957. 162 p.
- Kumar A., Bhambri R., Tiwari S.K., Verma A., Gupta A.K., Kawishwar P. Evolution of debris flow and moraine failure in the Gangotri Glacier region, Garhwal Himalaya: Hydro-geomorphological aspects. *Geomorphology*, 2019, vol. 333, pp. 152–166.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.015>
- Leinss S., Bernardini E., Jacquemart M., Dokukin M. Glacier detachments and rock-ice avalanches in the Petra Pervogo range, Tajikistan (1973–2019). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2021, vol. 21, pp. 1409–1429.
<https://doi.org/10.5194/nhess-21-1409-2021>
- Li W., Zhao B., Xu Q., Scaringi G., Lu H., Huang R. More frequent glacier-rock avalanches in Sedongpu gully are blocking the Yarlung Zangbo River in eastern Tibet. *Landslides*, 2022, vol. 19, pp. 589–601.
<https://doi.org/10.1007/s10346-021-01798-z>
- Lugon R., Stoffel M. Rock-glacier dynamics and magnitude–frequency relations of debris flows in a high-elevation watershed: Ritigraben, Swiss Alps. *Glob. Planet. Change*, 2010, vol. 73, pp. 202–210.
<http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.06.004>
- Makarov S.A., Cherkashina A.A., Atutova Zh.V., Bardash A.V., Voropaj N.N., Kichigina N.V., Mutin B.F., Osipova O.P., Uhova N.N. *Katastroficheskie selevyie potoki, proizoshedshie v poselke Arshan Tunkinskogo raiona Respubliki Buryatiya 28 iyunya 2014 g.* [Catastrophic Debris Flow, Occurred in the Village of Arshan, Tunkinsky District, Republic of Buryatia in June, 28 2014]. Irkutsk: Inst. Geogr. im. V.B. Sochava So RAN Publ., 2014. 111 p.
- Mani P.A., Allen S.K., Evans S.G., Kargel J.S., Mergili M., Petrakov D., Stoffel M. Geomorphic process chains in high-mountain regions – A review and classification approach for natural hazards assessment. *ESS Open Archive*, 2022.
<https://doi.org/10.1002/essoar.10512593.1>
- Rasul G., Molden D. The Global Social and Economic Consequences of Mountain Cryospheric Change. *Front. Environ. Sci.*, 2019, vol. 7, art. 91.
<http://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00091>
- Savernyuk E.A., Dokukin M.D., Chernomorec S.S., Krylenko I.V., Yudina V.A. About the rock avalanche 01.01.2022 in the Aksaut River valley and other rock collapses in the Caucasus from 1957 to 2022. In *Rezultaty 20 let izucheniya katastrofy mirovogo masshtaba v Genaldonskom ushel'e (skhod lednika Kolka)* [The Results of 20 Years of Studying the Global Catastrophe in the Genaldon Gorge (the Detachment of the Kolka Glacier)]. Vladikavkaz: Sev.-Kavkaz. Gorn.-Metal. Inst. (Gos. Tekhn. Univ.), 2022, pp. 50–68. (In Russ.).
- Seinova I.B., Mezenina T.N. Rock glaciers – centers of the origin of debris flows in the basin of the Chegem River. *Mater. Glyatsiolog. Iss.*, 1987, no. 60, pp. 179–183. (In Russ.).
- Shugar D.H., Jacquemart M., Shean D. et al. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science*, 2021, vol. 373, no. 6552, pp. 300–306.
<http://doi.org/10.1126/science.abh4455>
- Tukeev O.V. *Selevye yavleniya Pamira: katastrofy, zakonomernosti, prognoz* [Debris Flow Phenomena of the Pamirs: Catastrophes, Patterns, Forecast]. Moscow, 2002. 176 p.
- Vinogradov Yu.B. *Glyatsial'nye proryvnye pavodki i selevyie potoki* [Glacial Breakthrough Floods and Debris Flows]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 155 p.
- Wagner T., Brodacz A., Krainer K., Winkler G. Active rock glaciers as shallow groundwater reservoirs, Austrian Alps. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie*, 2020, vol. 25, pp. 215–230.
<https://doi.org/10.1007/s00767-020-00455-x>
- Zaalishvili V.B. Reconstruction of the process of the collapse of the Kolka glacier in the Karmadon gorge on September 20, 2002. In *Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza* [Modern Problems of Geology, Geophysics and Geoecology of the North Caucasus]. Moscow: IIET RAN, 2020, pp. 90–102. (In Russ.).
- Zhao C., Yang W., Westoby M., An B., Wu G., Wang W., Wang Z., Wang Y., Dunning S. Brief communication: A ~50 Mm³ ice-rock avalanche on 22 March 2021 in the Sedongpu valley, southeastern Tibetan Plateau. *Cryosph.*, 2022, vol. 16, no. 4, pp. 1333–1340.
<https://doi.org/10.5194/tc-16-1333-2022>