

Активизация обвалов на Центральном Кавказе и их влияние на динамику ледников и селевые процессы

© 2020 г. М.Д. Докукин^{1*}, М.Ю. Беккиев¹, Р.Х. Калов¹,
С.С. Черноморец², Е.А. Савернюк²

¹Высокогорный геофизический институт Росгидромета, Нальчик, Россия;

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*inrush@bk.ru

Activation of rock avalanches in the Central Caucasus and their impact on the dynamics of glaciers and debris flows

M.D. Dokukin^{1*}, M.Yu. Bekkiev¹, R.Kh. Kalov¹, S.S. Chernomorets², E.A. Savernyuk²

¹High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia;

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*inrush@bk.ru

Received March 21, 2020 / Revised April 5, 2020 / Accepted June 7, 2020

Keywords: *debris flow, glacial lake outburst flood, glacier collapse, glacier surge, ice-rock avalanche, rock slope failure.*

Summary

We analyzed multi-time satellite images of the Central Caucasus glacial zone and interpreted more than thirty rock avalanche events in the 21st century with a total damage area of more than 25 km² (including the collapse zone of the Kolka Glacier disaster). The highest rock and rock-ice avalanche activity is detected in the section of The Greater Caucasus range (northern and southern slopes) with a length of about 20 km between the Bashkara and Kulaktau peaks (16 rock avalanches) and in the section of the Kazbek-Dzhimaray Massif (series of rock avalanches to the surface of Kolka, Suatisi and Devdoraki glaciers). The feature of the rock and ice-rock avalanches is the large runout distance. For 12 events (about 40%) the distance was more than 2000 m. One ice-rock avalanche from the Mount Kazbek (excluding the Kolka Glacier disaster in 2002) reached the runout distance more than 10 km. In some areas, the rock avalanches occurred several times. In particular, a large number of avalanches were in the cirque of the Kolka Glacier; the last of them at the end of 2019. Thrice in each case, rock avalanches originated from Mount Bashkara, in the cirques of the Murkvam Glacier, the East Shtulu Glacier, and the Devdoraki Glacier. Ice and rock avalanches were the initial stage of the complex process of the Kolka Glacier disaster and following catastrophic glacial debris flow in the Genaldon/Gizeldon River valley in 2002. Also, they were causes of glacier surges, formation of dammed lakes, and debris flows. As a result of the collapse of the hanging glacier and bedrock, the former right tributary of the Kolka Glacier surged to 200 m in 2006. Ice-rock avalanche from Mount Kazbek in 2014 load up the former right tributary of the Devdoraki Glacier and caused its advancing in 2015–2019, at a distance of more than 400 m. The avalanches caused catastrophic debris flows in the Amilishka/Kabakhi River valley in 2014, the Mestiachala River valley in 2019. Rock avalanches can cause outbursts of lakes and debris flows. Two dammed lakes formed as a result of the rock avalanche from the cirque above the Seri Glacier in the Tvi-beri River valley of the in May 2016. The lakes (total area was more than 0.05 km²) have outburst at the end of August 2017 after heavy rains. Rock avalanches of the 20th century led to an abrupt deceleration in the retreat of the Yusengi, Bartuytsete, East Shtulu and Mosota glaciers. The formation of rock avalanches in the 21st century took place at high altitudes (an average of about 3900 m). Possibly, the reason was associated with an increase of the «0» isotherm and of the high border of the zone of intense frost weathering due to climate warming. Some rock avalanches in the section of the Kazbek-Dzhimarai Massif have been caused by endogenous factors (seismicity and volcanism).

Citation: 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. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020. 60 (3): 361–378. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420030045.

Поступила 21 марта 2020 г. / После доработки 5 апреля 2020 г. / Принята к печати 7 июня 2020 г.

Ключевые слова: *ледово-каменная лавина, обвал, подвижка ледника, прорыв озера, селевой поток, сход ледника.*

На основе анализа разновременных космических снимков приведены данные о 32 обвалах в ледниковой зоне Центрального Кавказа в XXI в. Половина из них сосредоточена на участке северного и южного склонов Главного Кавказского хребта восточнее горы Башкара. Отмечена высокая активность обвалов в 2019 г., показано влияние обвалов на динамику ледников и селевые процессы.

Введение

Обвалы в горах происходят как в результате землетрясений или вулканической активности, так и без их влияния. Негативные последствия от обвалов бывают столь велики, что создают чрезвычайные ситуации на территории целых регионов. Обвалы в узких ущельях приводят к формированию подпрудных озёр с объёмами воды в несколько миллионов кубических метров, прорыв которых вызывает разрушительные паводки и бедствия на расстоянии до 400 км от места обвала [1]. Активизация склоновых процессов в горах происходит повсеместно. Причина этого — изменения климата. Подобные процессы наблюдаются в разных районах мира: в Перу — в 2020 г. [2], в Канаде — в 2019 г. [3], в Чили — в 2018 г. [4], в Швейцарии и Непале — в 2017 г. [5, 6], в Новой Зеландии — в 2013 г. [7]. Нередко обвалы приводят к селевым потокам и прорывам озёр [2, 4–6, 8]. В Альпах каталогизировано более 550 случаев обвалов, а также уже составлены базы данных [9]. В настоящей статье мы даём оценку активности обвалов в горах Кавказа.

В 2015 г. по материалам маршрутных обследований и дешифрирования космоснимков на Кавказе зафиксировано 25 случаев обвалов на территории от Карачаево-Черкесии до Республики Дагестан [10]. В дальнейшем работа была продолжена. В 2019 г. данные об активности обвалов на Западном Кавказе были обобщены [11]: всего выявлено 12 обвалов, из которых три обвала зафиксированы в цирке ледника Джаловчат в верховьях р. Аксаут. В апреле 2019 г. обнаружен и обследован обвал в долине р. Адыл-Су [12]. Анализ современных космических снимков позволил установить на Центральном Кавказе более 30 случаев обвалов, а всего на Кавказе зафиксировано более 50 обвалов в ледниковой зоне.

В настоящей работе рассматриваются в основном каменные и ледово-каменные лавины (rock avalanches, ice-rock avalanches), материал которых, обрушившийся со склонов, не отлагался у их подножий, а проносился дальше на значительное расстояние, т.е. движение обломков — это не только падение, но и лавина, и поток. Для катастрофического схода ледника Колка в работе [13] применён термин *ледяная лавина* (ice avalanche). В работе [5] при описании обвала с горы Пиццо Ченгало (Швейцария) последова-

тельно применяют термины «rock slope failure» (обрушение горного склона) и «rock avalanche» (каменная лавина), как для двух фаз процесса, который далее трансформировался в селевой поток. В работе [14] использован термин «rock-snow-ice avalanches» (каменно-снежно-ледовые лавины). В русской литературе с первой половины XIX в. применяется термин «обвал» [15], а употребление термина «лалина» относится главным образом к описанию снежных лавин. Учитывая это, в дальнейшем авторы статьи будут называть эти события также единым, более общим термином «обвал».

Материалы и методы

В настоящей статье авторы использовали космические снимки различных Интернет-ресурсов: Google Earth, Bing Maps, Yandex, ESRI, Геопортал Роскосмоса. Использованы космические снимки, любезно предоставленные Инженерно-технологическим центром «СканЭкс», Геопорталом МГУ и Научно-исследовательским центром «Планета», а также приобретённые при выполнении договорных работ (SPOT 5 разрешением 2,5 м, IRS 1D разрешением 5,8 м, Канопус В1 разрешением 2,1 м). Применяли и наземные фотографии маршрутных обследований. С сайта <https://landsatlook.usgs.gov/viewer.html> получены космоснимки Landsat 5 (разрешением 30 м). На сайте <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> просматривали большое число космических снимков Sentinel 2A (разрешением 10 м) за период 2015–2019 гг., а также Landsat 8 разрешением 30 м за период 2013–2019 гг. на территорию Центрального Кавказа (северный и южный склоны). Они сравнивались с космическими снимками детального разрешения, число которых в сети Интернет ограничено. Визуально определяли следы обвалов — зоны отрыва, зоны транзита и отложений — как на поверхности ледников, так и на участках речных долин. Последовательно просматривали космические снимки с выявленными следами обвалов и определяли интервал времени между датой снимка со следами обвала и ближайшей датой снимка, на котором следов обвала не было. Затем фрагменты космоснимков загружались в формате TIFF (32-bit float) в системе координат WGS84 проек-

ции UTM и таким образом формировалась база растровых данных для работы в GIS-программе.

Для более уверенного определения зоны отрыва обвала и даты обвала на снимках с наличием снежного покрова и на участках заморенных поверхностей ледников, а также границ зоны поражения проводился просмотр фрагментов космоснимков разных дат в режиме GIF-анимации. Такие GIF-анимации есть в социальной сети Твиттер на странице <https://twitter.com/inrushmd>. На космоснимках с более чёткими контурами обвалов строились векторные слои и автоматически подсчитывались площади зон поражения. Погрешности площади для разных по размерам контуров на снимках Sentinel 2A составляли: при площади 1 км² и периметре 9 км — около 4–5%; при площади 30 тыс. м² и периметре 1000 м — около 15–16%. Параметры высот зон отрыва и зон отложения определялись по модели SRTM (<http://srtm.csi.cgiar.org>). Для оценки параметров отступления ледников использованы аэрофотоснимки 1957–1960 гг., которые сканировали и привязывали по опорным точкам к космоснимкам Sentinel 2A.

Результаты исследований

В результате дешифрирования и измерений на космических снимках получены данные о числе и параметрах обвалов на территории ледниковой зоны Центрального Кавказа (таблица). Номера ледников в таблице соответствуют Каталогам [16–20] и Каталогу ледников К.И. Подозёрского (даны в скобках курсивом) [21]. Несмотря на то, что обвалы на леднике Суатиси произошли в конце XX в., они включены в таблицу (№ 28 и 29) из-за значительной площади покрытия поверхности ледника и близкого расположения к крупнейшим обвалам XXI в. Процесс схода ледника Колка был инициирован многочисленными обвалами скальных пород и льда и был продолжением этих процессов. Поэтому данные о параметрах схода ледника и зоны поражения также включены в таблицу (№ 25а). В результате исследования на территории Кавказа в XXI в. обнаружено более 50 обвалов, часть которых ранее была рассмотрена в работе [11]. Обвалы распространены неравномерно. Наибольшая активность обвалов (16) отмечена на участке

Главного Кавказского хребта (северный и южный склоны) площадью всего около 160 км².

Обвалы на участке Главного хребта к востоку от горы Башкара. На рис. 1 показаны участки поражения обвальными процессами в период с 2000 по 2019 г. В пределах одной зоны поражения в отдельных местах в разное время происходило несколько обвалов, например, № 1 и 2, 5 и 6, 13–15. Из 32 рассматриваемых событий даты или периоды обвалов известны только для 14 (44% общего числа). Пять из них произошли в летнее время (июнь–август), девять — в холодный период года. Три обвала установлено на склонах горы Башкара в 2018 и 2019 гг. На рис. 2 показаны фрагменты космических снимков с контурами зон поражения обвалов и фотография участка обвала, сделанная 30 апреля 2019 г. во время наземного обследования. В работе [12] даны характеристики зоны отрыва, транзита и аккумуляции обвала 24 апреля 2019 г., а также обвала 2018 г. Обвал 24 апреля произошёл в условиях отрицательных температур воздуха и имел признаки снежно-ледово-каменной лавины с несколькими языками отложений во фронтальной зоне, окаймлёнными валами из снега. Такая же особенность отложений отмечена у обвала 21.01.2013 г. с горы Хааст (3114 м) в Новой Зеландии [7], но отличие состояло в том, что обвал в Новой Зеландии произошёл в летнее время через 10 дней после ливня, когда выпало 383 мм осадков.

Отметим, что 21 марта 2019 г. на расстоянии всего 3,5 км от места отрыва обвала на горе Башкаре произошёл обвал в западном цирке ледника Лекзири (№ 12, см. таблицу и рис. 1), который зафиксирован на космоснимке Sentinel 2A с ещё не рассеявшейся пылью в воздухе (<https://twitter.com/inrushmd/status/1156250014034911232>). Обвалы в этом месте были и в июне, и в июле (в таблице они не внесены из-за сложности проведения их границ), а небольшой обвал наблюдался за два дня до основного. Обвал с горы Башкара повторился в конце октября — начале ноября 2019 г., но уже в сторону Грузии — отложился в северном цирке ледника Лекзыр (№ 11, см. таблицу и рис. 1).

Три обвала в цирке ледника Мурквами происходили: на рубеже 2011–2012 гг.; 25 июля 2019 г. (<https://twitter.com/inrushmd/status/1159681328297709568>) и в период 10–11 октября 2019 г. (№ 13–15, см. таблицу и рис. 1). Наибольший из обвалов имел дальность выброса более 4500 м, а площадь зоны

Характеристики обвалов на Центральном Кавказе

Но- мер п/п	Ледник и его номер	Долина реки (бассейн реки)	Координаты зоны отрыва с ш./в.д.	Площадь зоны пораже- ния, тыс. м ²	Абсолютная отметка точки отрыва, м	Средний угол наклона пути, градусы	Дальность выброса с учё- том наклона, м	Дата события или период, в который оно произошло
1	Башкара 59 (504)* [17]**	Адыл-Су (Баксан)	43°10'45,11"/42°44'24,24"	82	4150	45,3	1350	12.07.–13.08.2018 г.
2			43°10'45,11"/42°44'24,24"	930	4162	25,4	3500	24.04.2019 г.
3	Джанкуат 62 (503) [17]	Джанкуат (Адыл-Су, Баксан)	43°11'18,06"/42°46'02,12"	86	3550	22,1	1040	Июнь 2003 г.
4	Башиль Северный 11 (475a) [18]		43°12'04,50"/42°52'10,11"	55	4000	28,5	800	7.07.–9.07.2019 г.
5	Башиль Северный 15 (475b) [18]	Башиль–Аузу-Су (Чегем)	43°09'54,46"/42°55'37,59"	24	3560	40,8	900	2013 г.
6			43°09'52,16"/42°55'37,42"	61	3600	33,0	970	2015 г.
7			43°09'50,55"/42°55'44,16"	74	3650	33,9	1075	2017 г.
8	Болдошке 18 (477) [18]	Болдошке (Башиль- Аузу-Су, Чегем)	43°09'58,22"/42°57'17,15"	115	3720	16,4	1055	12.12.–26.12.2017 г.
9			43°09'51,46"/42°58'25,90"	157	3735	24,9	2540	2000 г.
10	Кулак-Чегемсичмар (Верхний Кулак) 22 (462b) [18]	Кулак-Су (Гара–Аузу-Су, Чегем)	43°07'44,65"/42°55'28,54"	202	3790	24,9	1215	2011 г.
11	Лекзири 247 (234b) [21]	Местная (Мулхура, Ингури)	43°10'45,11"/42°44'24,24"	504	4162	22,5	2250	27.10.–04.11.2019 г.
12			43°08'48,64"/42°43'54,67"	570	3320	19,7	2020	21.03.2019 г.
13	Мурквами 254 (237b) [21]	Мурквами (Местная, Мулхура, Ингури)	43°06'38,92"/42°47'50,49"	93	3100	31,2	1565	2011–2012 гг.
14			43°06'32,63"/42°48'06,18"	1370	3400	20,8	4520	25.07.2019 г.
15			43°06'31,85"/42°48'11,56"	28	3420	36,2	820	10.10.–11.10.2019 г.
16	Сери 262 (241a) [21]	Твибери (Мулхура, Ингури)	43°06'38,23"/42°50'59,13"	427	3100	22,2	2115	23.04.–03.05.2016 г.
17			42°54'25,36"/43°23'06,31"	146	3700	30,3	1565	2006–2009 гг.
18	Восточный Шгулу 119 (412) [18]	Кара-Су (Черек Балкарский)	42°53'56,17"/43°23'31,34"	105	3800	27,2	1575	2016 г.
19			42°54'38,94"/43°23'58,38"	80	3320	24,5	1010	2015 г.
20	Ледник Четырех 4 (327) [19]	Цейлон (Ардон)	42°47'10,27"/43°49'38,38"	437	3800	29,1	2500	2008–2011 гг.
21	Цейский 2 (325) [19]		42°44'20,80"/43°50'41,57"	290	4050	31,8	1955	2008–2011 гг.
22	Сказка 5 (324) [19]		42°44'52,38"/43°53'49,52"	94	3800	35,9	1310	2008–2011 гг.
23	Козилете 18 (317) [19]	Козилон (Мамикхон)	42°37'50,07"/43°43'41,19"	44	3330	30,6	550	2010–2014 гг.
24	Ледник 19 (269) [19]		42°37'04,20"/43°45'11,62"	154	3290	25,9	1500	2008 г.
25			42°43'21,80"/44°25'13,08"	1100	4200	24,6	2150	До 19.08.2002 г.
25a	Колка 39 (248a) [20]	Геналдон (Гизельдон)	42°43'11,91"/44°25'21,52"	12276	4450	9,0	20830	20.09.2002 г.
26			42°43'11,91"/44°25'21,52"	748	4450	21,6	3720	17.10.–19.10.2002 г.
27			42°43'14,58"/44°26'04,18"	366	4130	28,4	2120	28.11.–06.12.2019 г.
28	Суатиси 62 (231) [20]	Суатисидон (Терек)	42°42'24,59"/44°28'22,10"	392	4250	19,4	1650	1991 г.
29			42°42'22,61"/44°28'28,13"	1860	4400	17,5	3430	07.02.–02.08.1993 г.
30			42°42'18,22"/44°31'34,35"	730	4180	29,1	3000	2010 г.
31	Девдорак 48 (241) [20]	Амилшка (Кабахи, Терек)	42°42'07,26"/44°31'26,47"	3727	4500	16,3	11300	17.05.2014 г.
32			42°42'10,65"/44°32'20,84"	128	4045	33,2	870	09.06.–16.06.2019 г.
Средние значения параметров без учёта процесса схода ледника Колка				489,6	3924,6	27,4	2192	

*Номер ледника по Каталогу К. И. Подозерского [21]. **Ссылка на соответствующий Каталог ледников из списка литературы.

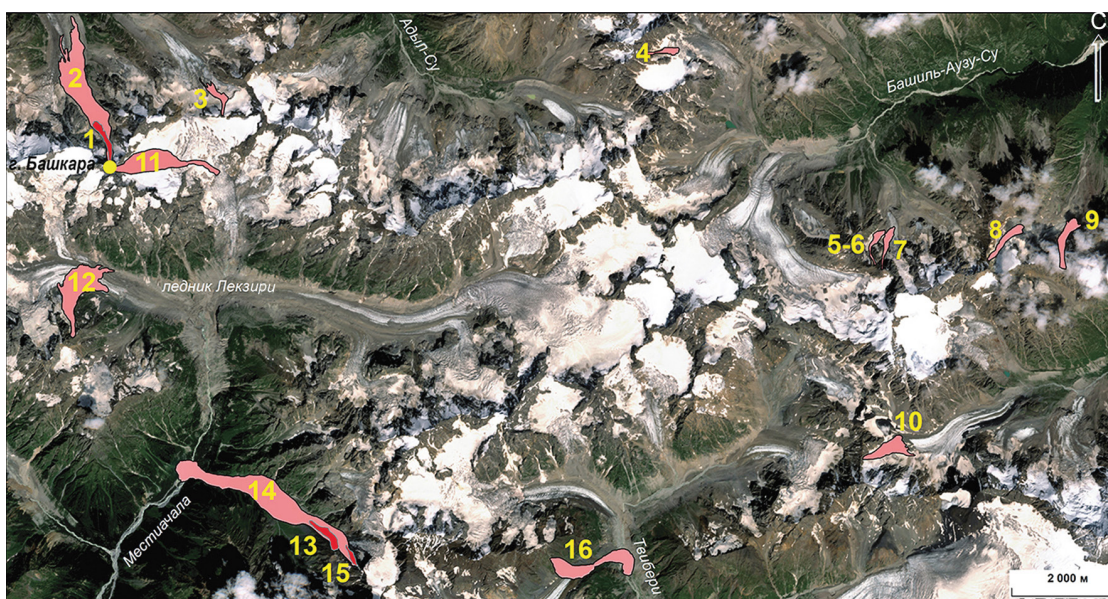


Рис. 1. Обвалы на северном и южном склонах Главного Кавказского хребта на участке к востоку от горы Башкара. Контуры с розовой и красной заливкой показывают зоны поражения обвальными процессами. Номера обвалов соответствуют таблице. Подложка — космоснимок Sentinel 2A 08.08.2019 г.

Fig. 1. Rock avalanches on the northern and southern slopes of the Greater Caucasus Range at the section to the east of Mt. Bashkara.

Outlines with pink and red fills show the areas affected by rock avalanche. The numbers of rock avalanches correspond to Table. Background: Sentinel 2A satellite image 08.08.2019

поражения 1,37 км². Несмотря на то, что массы обвала с цирка этого ледника отложились в долине р. Местиячала, подпрудного озера на космоснимках зафиксировано не было в отличие от обвала из цирка ледника Сери в мае 2016 г. (№ 16, см. таблицу и рис. 1), в результате которого в долине р. Твибери появилось два озера, просуществовавших более года (<https://twitter.com/inrushmd/status/999363888738111488>).

Обвалы на склонах Казбекско-Джигарайского массива. На рис. 3 показано расположение участков обвалов в цирках ледников Колка (№ 25–27), Девдорак (№ 30–32) и Суатиси (№ 28, 29). Первый по времени из указанных обвалов зафиксирован на космоснимках Landsat 7 за 1991 г. на леднике Суатиси со склона горы Майлихох. В 1993 г. с этого же места произошёл значительный обвал, массы которого обошли с двух сторон скальный выступ (абсолютная высота 3857 м). В общую площадь поражения скальный выступ не включён. За период 1993–2019 гг. край отложений обвала сместился с ледником вниз на расстояние от 500 м (правая лопасть) до 600 м (левая лопасть). При этом сам край ледника отступил на этом участке на 270 м.

Верхний левый край зоны отложений за период с 1993 по 1998 г. прошёл расстояние около 600 м и спустился на склон долины р. Мнаисидон. По видимому (разрешение космоснимков не позволило оценить этот процесс подробно), это была подвижка перегруженного отложениями потока льда ледника Суатиси.

Обвалы в цирке ледника Колка. Наибольшую активность обвалов в XXI в. проявлял цирк ледника Колка. В работе [22] показано, что значительные обвалы льда и коренных пород происходили в июле и августе 2002 г. Это подтверждается космоснимком Landsat 7 от 19.08.2002 г., где отчётливо видны обвальные отложения, которые преодолели высокую гряду левой береговой морены. Следовательно, в результате обвалов уже в августе в тыловой части поверхность ледника Колка сравнялась с уровнем левой береговой морены. Зона поражения предкатастрофических обвалов в цирке ледника Колка (см. рис. 3, № 25) определена авторами по космоснимку Landsat 7 от 19 августа 2002 — 1,1 км². Это больше, чем в работе [23], так как в неё были включены участки зоны транзита обвальных масс. Ширина зоны отрыва масс коренных пород и

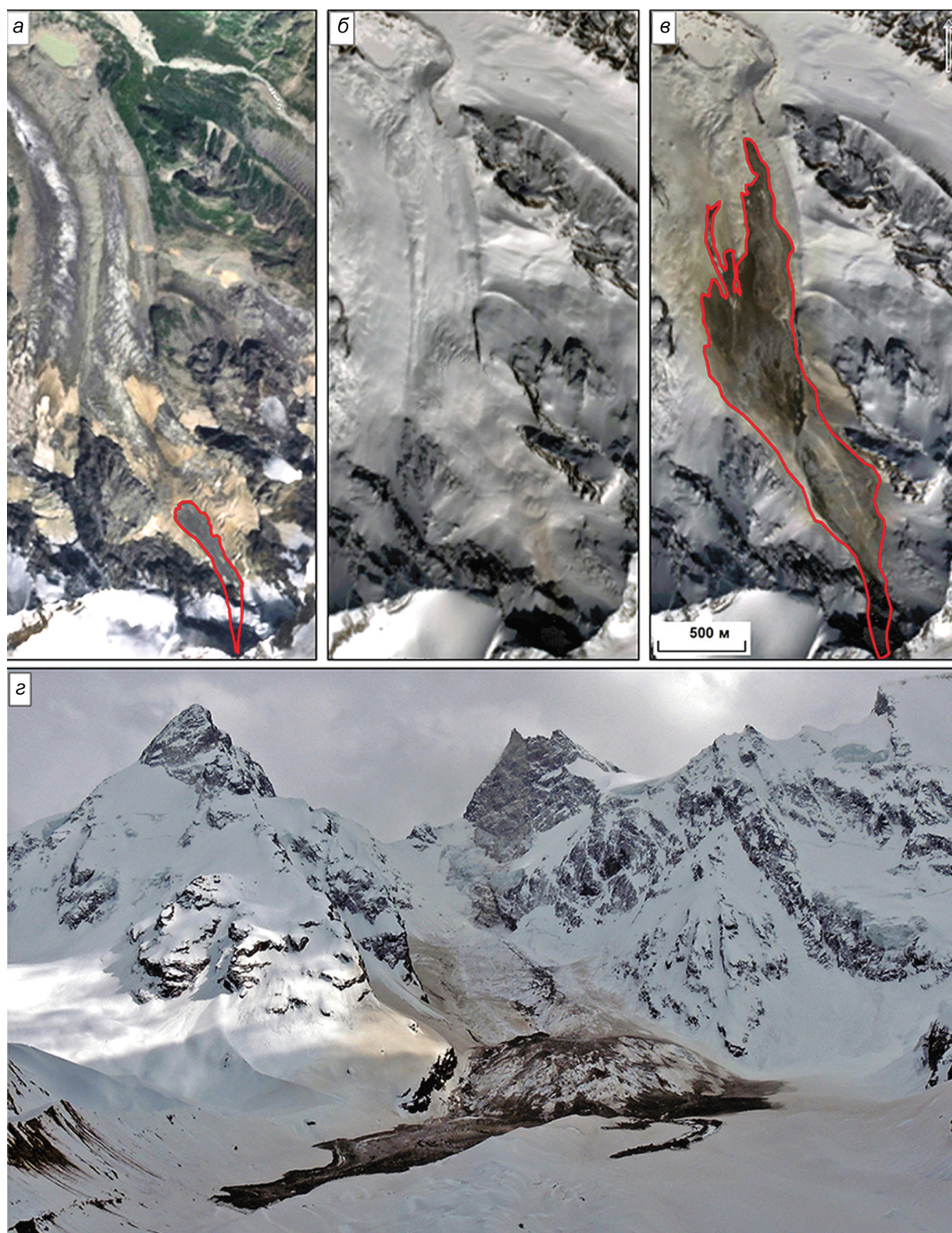


Рис. 2. Обвалы с горы Башкара в 2018 и 2019 гг.:

Космоснимки Sentinel 2A: *а* – 13.08.2018 г.; *б* – 23.04.2019 г.; *в* – 25.04.2019 г. (красная линия – контуры зон поражения обвалами); *г* – фото М.Д. Докукина 30.04.2019 г.

Fig. 2. Rock avalanches from Mt. Bashkara in 2018 and 2019.

Sentinel 2A images: *a* – 13.08.2018; *b* – 23.04.2019; *v* – 25.04.2019 (the red line is the outline of the areas affected by rock avalanches); *z* – ground photo by M.D. Dokukin 30.04.2019

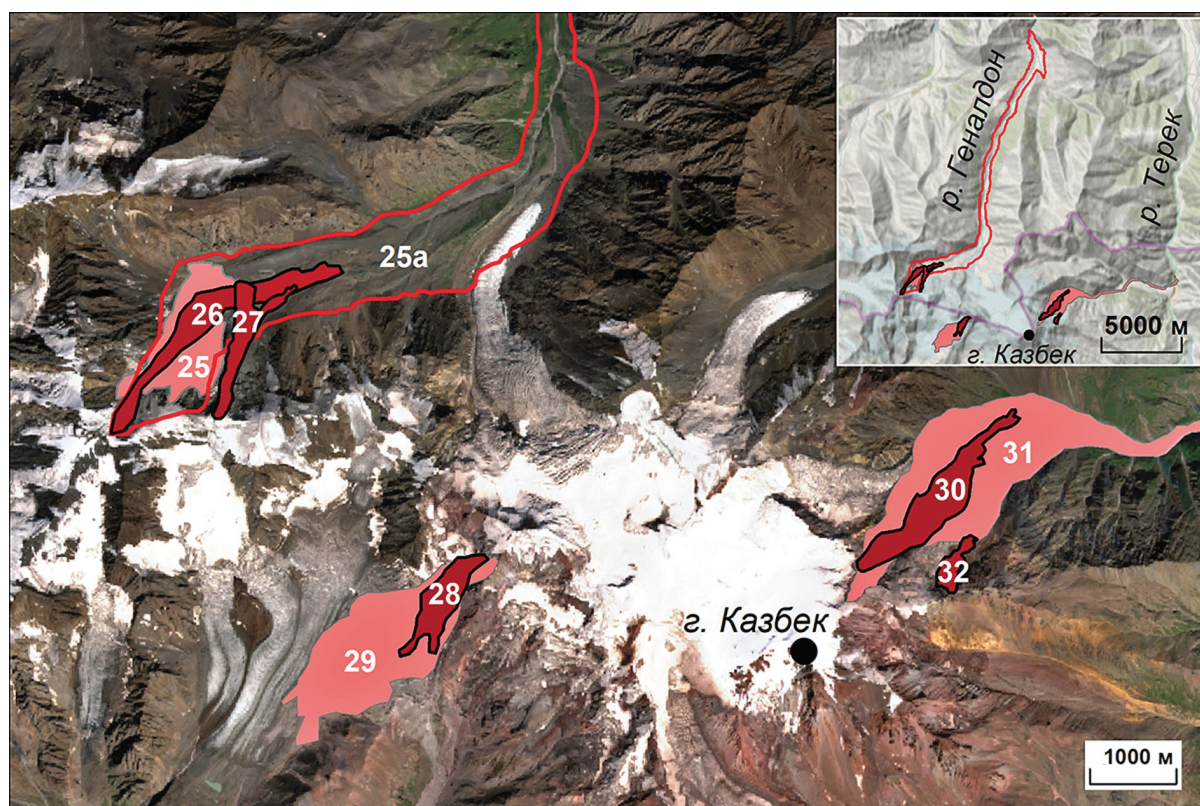


Рис. 3. Обвалы на участке Казбекско-Джигарайского горного массива.

Контурами с розовой и красной заливкой показаны зоны поражения обвальными процессами. Номера обвалов соответствуют таблице. Подложка — космоснимок Sentinel 2A 23.08.2019 г. и фрагмент карты Open Street Map

Fig. 3. Rock avalanches at the Kazbek-Dzhimmaray mountain range.

Outlines with pink and red fills show the areas affected by rock avalanches. The numbers of rock avalanches correspond to table. Background: Sentinel 2A satellite image 23.08.2019 and Open Street Map fragment

льда составила 1,2 км. В дальнейшем, вплоть до катастрофы 20 сентября 2002 г., обвалы продолжались. Суммарный объём отложенных масс обвалов перед сходом ледника Колка в работе [24] оценивается максимально в 60 млн м³; в работе [25] объём обрушившихся масс висячих ледников составил 18 млн м³, в работе [26] объём обрушившихся масс висячих ледников и коренных пород — 18,5–27 млн м³. В результате обвалов масса ледника увеличилась более чем на 10% [23]. Это намного превышает объёмы зафиксированных единичных обвалов, которые продолжались после схода ледника Колка.

В работе [10] приводятся данные об обвале, произошедшем 17–19 октября 2002 г. На снимке с МКС 17 октября обвала ещё не было. В таблице и на рис. 3 — это обвал № 27. Его площадь поражения — 748 тыс. м², дальность выброса — более 3700 м. Особенность данного обвала — необычный рельеф отложений с высотой холмов

от 2 до 7 м. Такие холмы получили название «муравьиные кучи», но генезис их во многих работах считался неясным [23, 27, 28]. В результате сравнения космоснимков 25 сентября, 17 и 19 октября был сделан вывод, что «муравьиные кучи» — это отложения обвала [10].

В ходе изучения процесса восстановления ледника Колка особый интерес вызвала динамика бывшего правого притока (№ 7 по [28]). Авторами работ [29, 30] установлено, что причины быстрого продвижения бывшего правого притока ледника Колка — лучшее условие его питания за счёт метелевого переноса снега с расположенного выше плато, а также сползания масс льда, оставшихся после схода ледника Колка в мульде на склоне в результате потери опоры со стороны ледника. В работе [31] приводятся сведения о том, что к 2006 г. обрушилась нижняя часть висячего ледника № 11 (по нумерации из работы [32]), или № 8 (по нумерации участников

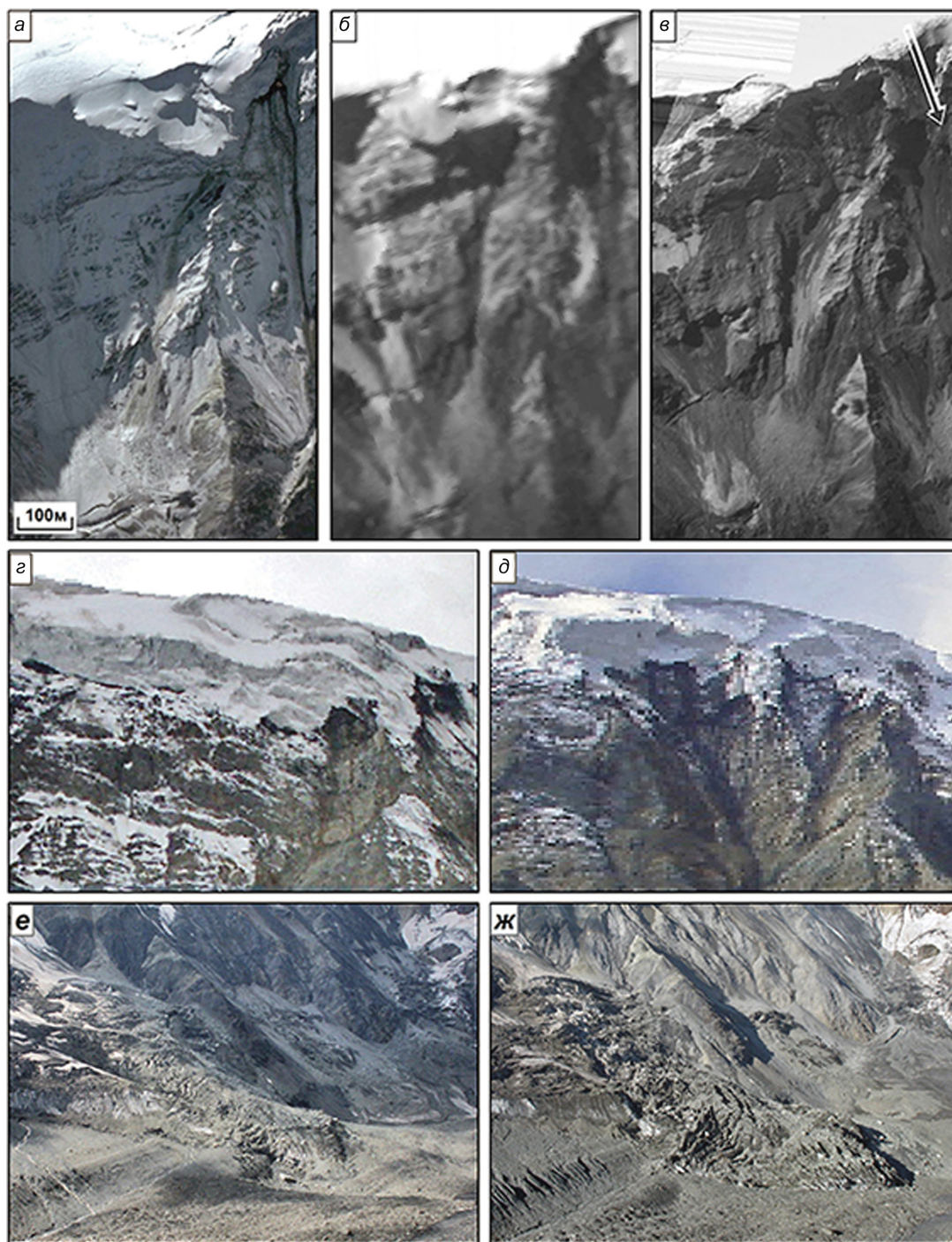
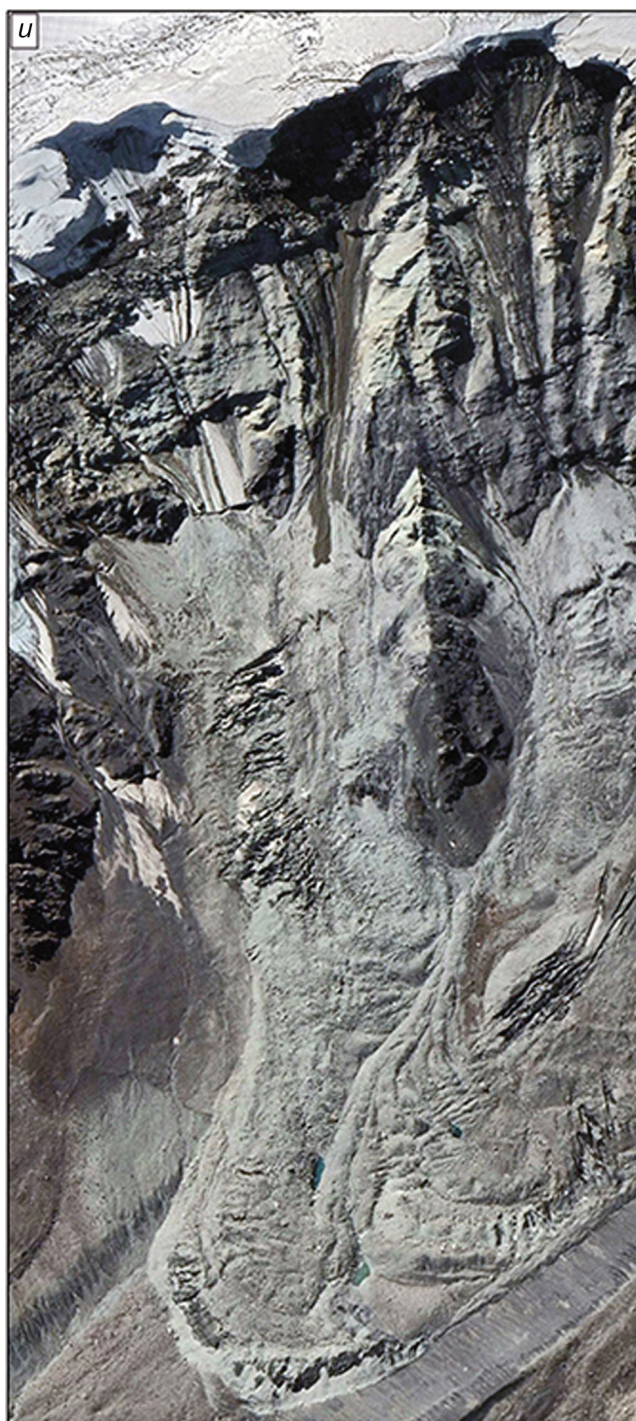


Рис. 4. Участки отрыва и отложения обвалов льда и обломков коренных пород с южного склона цирка ледника Колка.

Динамика висячего ледника № 8: *а* – космоснимок QuickBird 25.09.2002 г. (Google Earth); *б* – космоснимок IRS 24.08.2005 г.; *в* – космоснимок Ресурс ДК1 17.08.2008 г.; фотографии С.С. Черноморца: *з* – 26.08.2005 г., *д* – 29.08.2007 г. Динамика ледника № 7 (фотографии С.С. Черноморца): *е* – 26.08.2005 г., *ж* – 11.08.2006 г. Обвал с правого склона цирка ледника Колка: *и* – космоснимок 19.08.2019 г. (Google Earth), *к* – космоснимок 17.12.2019 г. (Google Earth)

Fig. 4. Areas of detachment and deposition of ice and rock avalanches from the south slope of the Kolka Glacier cirque. Dynamics of the hanging glacier № 8: *a* – QuickBird satellite image 25.09.2002 (Google Earth); *b* – IRS satellite image 24.08.2005; *v* – Resurs DK1 satellite image 17.08.2008; photos by S.S. Chernomorets: *z* – 26.08.2005, *d* – 29.08.2007. Dynamics of the hanging glacier № 7 (ground photos by S.S. Chernomorets): *e* – 26.08.2005, *zh* – 11.08.2006. Rock avalanche from the right slope of the Kolka glacier cirque: *и* – Google Earth satellite image 19.08.2019, *к* – Google Earth satellite image 17.12.2019



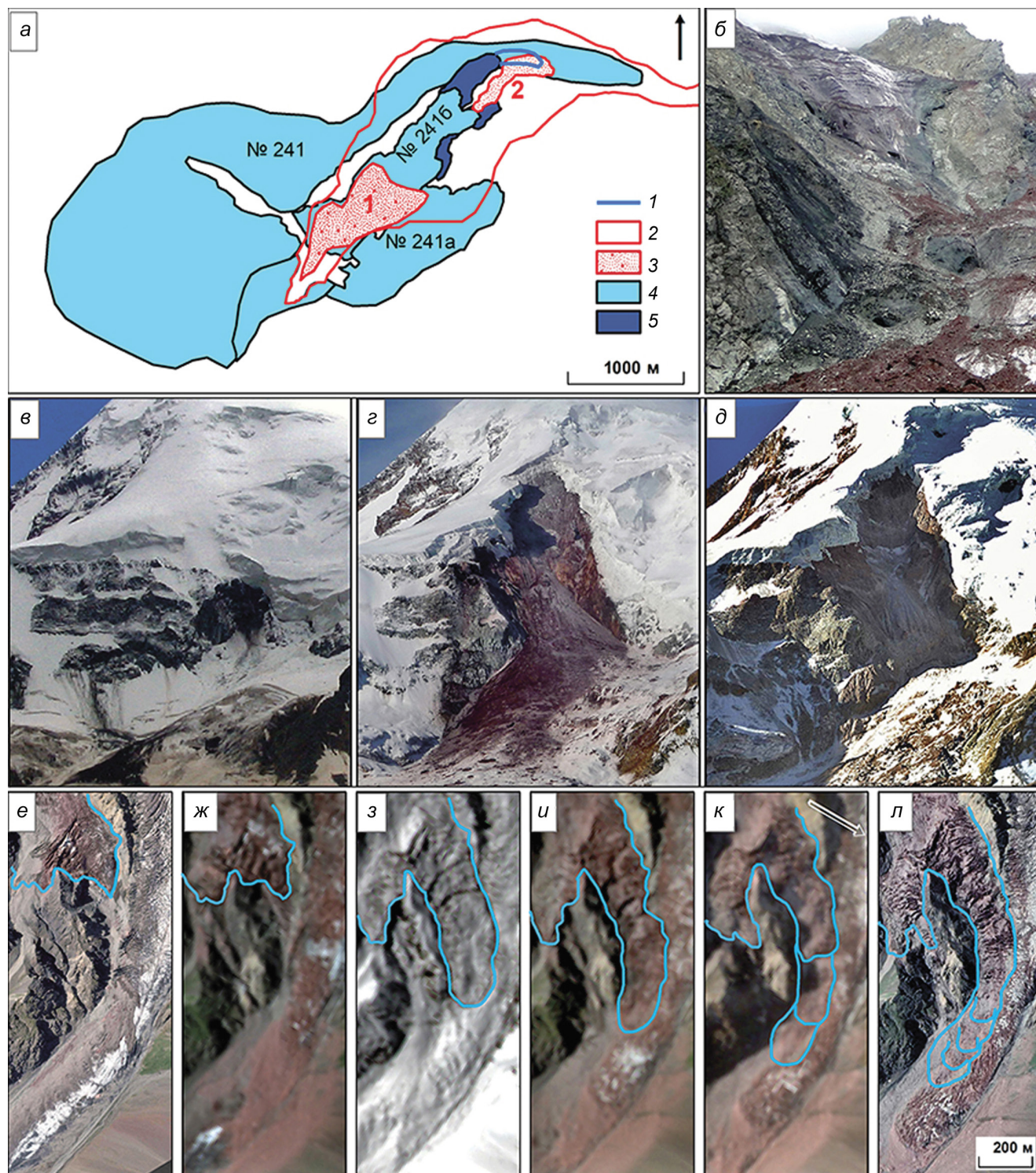
Межведомственной экспедиции в 2003–2005 гг. в Кармадонском ущелье).

В результате анализа разновременных космических снимков установлено, что продвижение вниз ледника-притока № 7 после схода ледника Колка происходило в два этапа по разным причинам. Вначале ледник восстанавливал свой продольный профиль на участке вертикальной ледя-

ной стены. При этом его длина за 2002–2003 гг. увеличилась на 240–250 м, за 2003–2004 г. — на 110 м, а за 2004–2005 гг. — на 15–35 м. В это время обвалы с висячего ледника № 8 были минимальны (рис. 4, а, б). Затем основная часть массива висячего ледника объемом около 1,5–2,0 млн м³ в период 2005–2006 гг. в виде обвалов льда и коренных пород основания обрушилась на ледник

№ 7, вызвав его подвижку на 200 м (см. рис. 4, в–ж). При этом ледник № 7 раздробился на большое число блоков льда (см. рис. 4, ж). В последующие годы скорость наступания ледника № 7 резко уменьшилась, а обвалы с ледника № 8 были минимальны. Следующий крупный обвал (№ 27,

см. рис. 4 и таблицу) произошёл с участка бывшего висячего ледника № 8 в декабре 2019 г. (см. рис. 4, и, к). Перед крупным обвалом было несколько мелких, материал которых аккумулировался в средней части ледника № 7, уже ставшего частью общего языка ледника Колка.



Обвалы в районе Девдоракского ледника. Ледово-каменный обвал с горы Казбек 17 мая 2014 г. детально охарактеризован в работах [10, 33–36]. Отмечено [10], что крупному обвалу 2014 г. (№ 31, см. таблицу и рис. 3) предшествовал обвал с того же места на склоне горы Казбек в 2010 г. (№ 30, см. таблицу и рис. 3). Особенность обвала 2014 г. – подвижка бывшего притока Девдоракского ледника, начавшаяся через год после обвала. На рис. 5, *а* показана схема ледников в верховьях р. Амилишка. Кроме Девдоракского ледника (№ 241), здесь находятся ледники № 241а и 241б (нумерация дана в соответствии с работой [35]). Границы ледников № 241 и 241а проведены по состоянию на август 2019 г. Показан также участок увеличения площади ледника № 241б в результате наступания и границы зоны поражения обвальным процессом 2014 г. На рис. 5, *б* отражено состояние ледника № 241б почти через месяц после обвала (11 июня 2014 г.). Сравнение рис. 5, *б* и *ж* позволило предположить, что положение конца языка ледника № 241б в июне 2014 г. и августе 2015 г. было одинаковым. И лишь после 14 августа 2015 г. ледник № 241б начал наступать. Ключом к пониманию причин этого наступания могут служить рис. 5, *в–д*, на которых изображены состояние зоны отрыва обвала и верхняя часть ледника № 241б.

На фотографии 2005 г. (см. рис. 5, *в*) видно, что ниже серии выходов коренных пород расположен покрытый льдом склон протяжённостью около 60 м, а на фотографии 2014 г. (см.

рис. 5, *г*) поверхность обвальных отложений уже стала вровень с этими скалами. Вероятно, толщина отложений в этом месте достигает 30 м. Среднюю толщину отложений оценить трудно, но если предположить, что она составляет 5 м, то объём отложений на участке у подножия зоны отрыва обвала может достигать 1,5 млн м³ и более (контур 1 на рис. 5, *а*). Это совпадает с оценкой авторов настоящей работы, которые отмечали, что «на первых двух километрах из потока было выведено 1 578 000 м³ лавинного материала». Такая нагрузка на ледник в области его питания привела к тому, что масса льда покинула своё ложе и стала продвигаться вниз. На фото 22.10.2016 г. с автоматической камеры, установленной на левом склоне над Девдоракским ледником, видно, что на месте, где были массы льда ледника, покрытые обвальным чехлом, открыта поверхность подледникового ложа и даже участки ледника на склоне обрушились вниз при подвижке основного тела ледника № 241б.

С 14 августа 2015 г. по 12 апреля 2017 г. ледник № 241б продвинулся на 410 м со средней скоростью около 0,7 м в сутки (максимальная скорость наступания превышала 1,0 м в сутки) и вышел на поверхность Девдоракского ледника (см. рис. 5, *ж*, *з*). В этот период скорость наступания ледника № 241б превышала скорость движения Девдоракского ледника (около 0,5–0,6 м в сутки). Далее, в апреле 2017 г. на теле языка ледника № 241б образовалась дугообразная поперечная трещина. Эта своеобразная трещина отрыва

Рис. 5. Схема расположения и динамика ледника № 241б в 2010–2019 гг.:

а – схема ледников в верховьях р. Амилишка: 1 – граница ледниковых масс ледника № 241б на языке Девдоракского ледника; 2 – граница зоны поражения ледово-каменного обвала 17 мая 2014 г.; 3 – отложения обвалов обломков коренных пород и льда с зоны отрыва обвала 17 мая 2014 г. (1) и с правого языка ледника № 241б (2); 4 – ледники в границах 2019 г.; 5 – прирост площади ледника № 241б после подвижки; *б* – ледник № 241б (фото Е.А. Савернюк 11.06.2014 г.). Участок отрыва ледово-каменного обвала 17 мая 2014 г. на склоне г. Казбек: *в* – фото С.С. Черноморца 04.08.2005 г.; *г* – фото Г. Гоциридзе 27.05.2014 г.; *д* – фото с автоматической фотокамеры 22.10.2016 г., представлено Г. Гоциридзе. Участок конца языка ледника № 241б: *е* – космоснимок 01.09.2010 г. (Google Earth); *ж* – космоснимок Sentinel 2A 14.08.2015 г.; *з* – космоснимок Sentinel 2A 12.04.2017 г.; *и* – космоснимок Sentinel 2A 02.09.2017 г.; *к* – космоснимок Sentinel 2A 09.10.2018 г.; *л* – космоснимок 19.08.2019 г. (Google Earth)

Fig. 5. Position and dynamics of 241b glacier in 2010–2019:

a – sketch map of glaciers in the headwaters of the river Amilishka: 1 – border of ice deposits moved from the 241b Glacier to the surface of the Devdorak Glacier tongue; 2 – border of the zone affected by the ice-rock avalanche on May 17, 2014; 3 – deposits of ice and rock avalanche from the detachment zone of the May 17, 2014 event (1) and from the right tongue of the 241b Glacier (2); 4 – glaciers in size of 2019 year; 5 – increase in the area of the 241b Glacier after the surge; *b* – the 241b Glacier (ground photo by E.A. Savernyuk 11.06.2014). Area of ice-rock avalanche detachment on May 17, 2014 on the slope of Mt. Kazbek: *v* – ground photo by S.S. Chernomorts 04.08.2005; *g* – photo by G. Gotsiridze 27.05.2014; *d* – photo from an automatic camera 22.10.2016 (courtesy of G. Gotsiridze). Area of the 241b Glacier tongue: *e* – Google Earth satellite image 01.09.2010; *zh* – Sentinel 2A satellite image 14.08.2015; *z* – Sentinel 2A satellite image 12.04.2017; *u* – Sentinel 2A 02.09.2017; *k* – Sentinel 2A satellite image 09.10.2018; *l* – Google Earth satellite image 19.08.2019

нижней части ледникового языка, которая, находясь на теле Девдоракского ледника, стала двигаться быстрее, чем вышележащая часть ледника, движение которой замедлилось. С 12 июля 2017 г. на левом крае ледника трещина стала быстро расширяться, и разрыв между замедлившейся частью ледника и оторвавшейся составил 50–55 м. Но этим всё не закончилось. В период с 9 октября 2017 г. по 10 октября 2018 г. замедлившаяся часть ледника № 2416 снова стала наступать и прошла около 140 м, догоняя хвост убежавшей вместе с Девдоракским ледником оторвавшейся фронтальной части ледника № 2416 (см. рис. 5, *к*). Таких напозданий на Девдоракский ледник было несколько. К концу 2019 г. наступание ледника № 2416 не прекратилось (см. рис. 5, *л*). В настоящее время его фронтальная часть частично налегает на тело Девдоракского ледника (космоснимок Google Earth 17.12.2019).

В то же самое время незначительно наступил и правый язык ледника № 2416 — около 200 м. Однако его наступание было бы большим, если бы не наличие крутого скального уступа, с которого наступавшие массы льда сбрасывались вниз в виде обвалов. Обвалы льда и обломков коренных пород достигали Девдоракского ледника и сформировывали на нём конус отложений площадью более 50 тыс. м² и протяжённостью на языке ледника более 400 м (см. рис. 5, *а*, контур 2). Дальность выброса глыб льда и обломков коренных пород достигала 900 м. Частота обвалов составляла до 3–5 в месяц, особенно в весенние месяцы.

Динамика ледников с отложениями обвалов на поверхности. Происходившие в XX в. обвалы покрывали ледники обломочным чехлом. Это значительно уменьшало площадь абляции, что должно было повлиять на динамику ледников. Было проведено сравнение отступления соседних ледников с обломочным чехлом и без него для ледников Бартуйцете и Караугом, а также Восточный Штулу и Агаштан (рис. 6).

В работе [37] приведены данные о площади отложений каменной лавины в 1959 г. на леднике Бартуйцете в бассейне р. Урух — 940 тыс. м². Объём отложений по данным [38] составлял более 2 млн м³, а средняя толщина отложений — немногим более 2 м. На рис. 6, *а*, *б* показано окончание языка ледника Бартуйцете в 1959 и 2019 г. За 1959–2019 гг. край обвального

чехла переместился вниз на расстояние более 1100 м и достиг конца языка ледника. Отступление ледника Бартуйцете за 60 лет составило около 200 м, причём это отступление пришлось на 1959–1975 гг. С 1975 г. по настоящее время ледник практически не отступал, а находился в стационарном состоянии. За 60 лет изменились параметры потоков льда языка ледника Бартуйцете и их соотношение. Левый поток оканчивался в 1959 г. выше конца правого потока на расстоянии около 800 м. В 2019 г. правый поток льда отступил на 850 м и его место на ложе цирка занял левый поток. Наступание левого потока за 1959–2019 гг. составило более 600 м.

Для сравнения на рис. 6, *в*, *г* показано состояние соседнего ледника Караугом также в бассейне р. Урух с отсутствием обвального чехла в эти же годы. По данным [39] отступление ледника Караугом за 1959–2017 гг. составило 1715 м. По нашим сведениям, за 1959–2019 гг. ледник отступил на 1800 м (в среднем 30 м в год), что в целом совпадает с данными [39].

В работе [40] приводятся данные о наступании ледника Восточный Штулу в верховьях р. Карасу в бассейне р. Черек Балкарский в 1940-х годах на 200 м. В работе [41] в результате анализа литературных источников показано, что соседний с ледником Восточный Штулу ледник Мосота испытал обвал с левого склона в 1913 г. Возможно, что он произошёл одновременно с обвалом правого притока ледника Восточный Штулу, отложения которого в 1957 г. закрывали нижнюю часть ледника на площади 0,45 км². В итоге обвал в XX в. и несколько обвалов в XXI в. (№ 17–19, см. таблицу) привели к значительному покрытию ледника Восточный Штулу обломочным чехлом в его области абляции и резко замедлили отступление в последние 60 лет (<https://twitter.com/inrushmd/status/1020990870043136000>). На рис. 6, *д*, *е* показано состояние ледника в 1957–2019 гг.: в центральной части ледник отступил на 230 м.

Ледник Мосота в 1957–2019 гг. в южной части языка отступил на 320 м. В этот период соседний ледник в долине р. Карасу — Агаштан (см. рис. 6, *ж*, *з*) отступил на 1100 м. Ледник Юсеньги (Озеного, № 44 по Каталогу [16]) в период 1983–2019 гг. отступил на 70 м (обвал был в 1988 г.), в то время как соседний с ним ледник, расположенный восточнее, за этот период отступил на 600 м.

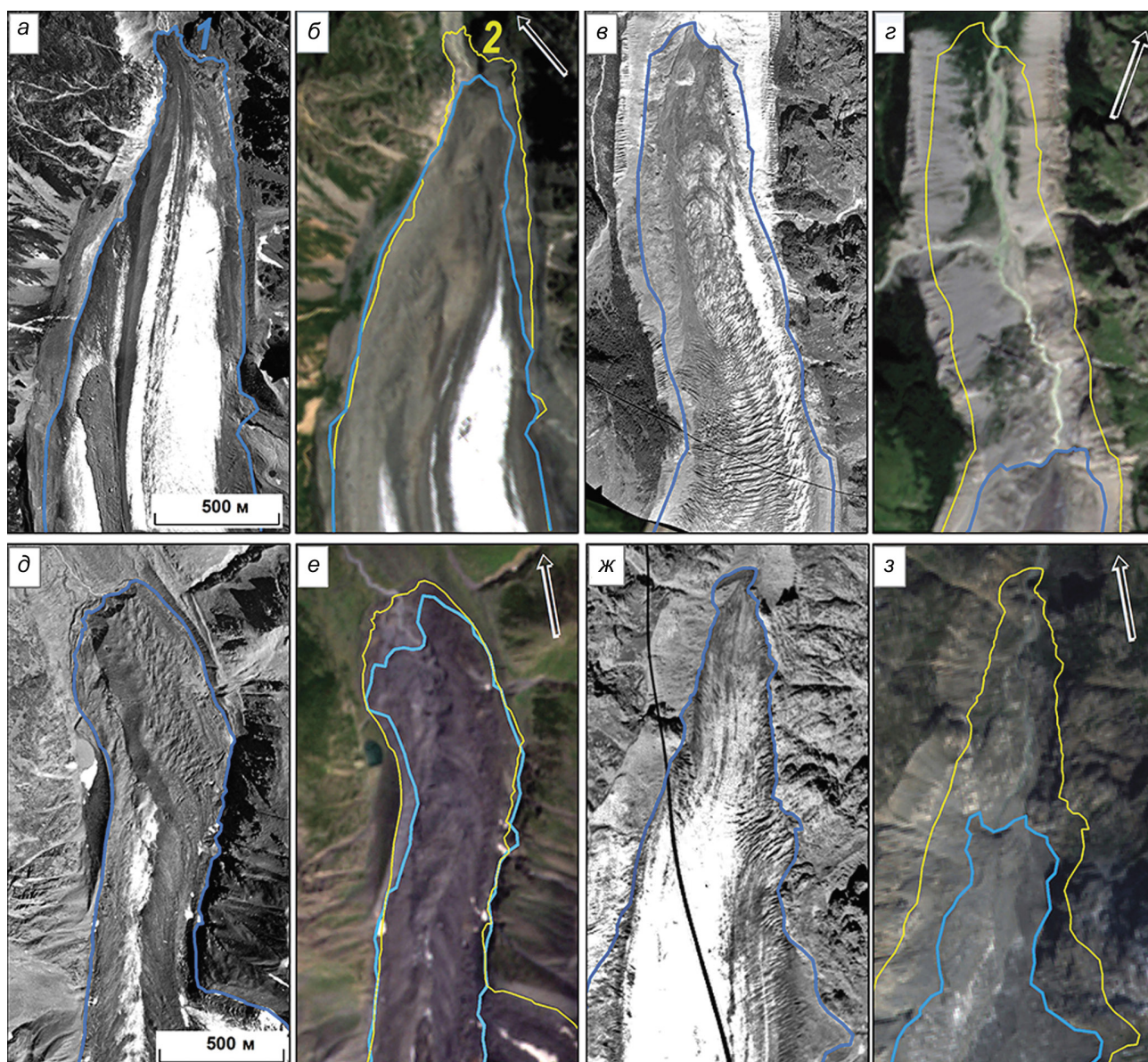


Рис. 6. Сравнение величин отступления ледников с отложениями обвалов на их поверхности и без отложений: ледник *Бартуйтсете*: а – аэрофотоснимок 04.08.1959 г., б – космоснимок Sentinel 2A 12.09.2019 г.; ледник *Караугом*: в – аэрофотоснимок 04.08.1959 г., г – космоснимок Sentinel 2A 28.08.2019 г.; ледник *Восточный Штулу*: д – аэрофотоснимок 10.09.1957 г., е – космоснимок Sentinel 2A 13.08.2019 г.; ледник *Агаштан*: ж – аэрофотоснимок 06.08.1960 г., з – космоснимок Sentinel 2A 23.08.2019 г. 1 – голубая линия – граница ледника на дату снимка; 2 – жёлтая линия – граница ледника на предыдущую дату

Fig. 6. Comparison of glacier retreat values with and without rock avalanche deposits on their surface: *Bartuytsete Glacier*: а – aerial photograph 04.08.1959, б – Sentinel 2A satellite image 12.09.2019; *Karaugom Glacier*: в – aerial photograph 04.08.1959, г – Sentinel 2A satellite image 28.08.2019; *East Shtulu Glacier*: д – aerial photograph 10.09.1957, е – Sentinel 2A satellite image 13.08.2019; *Agashtan Glacier*: ж – aerial photograph 06.08.1960, з – Sentinel 2A satellite image 23.08.2019. 1 – blue line, glacier border on the date of the image; 2 – yellow line, glacier border on the previous date.

Таким образом, ледники, закрытые обвальными отложениями в области абляции, отступили на расстояние в 5–9 раз меньшее, чем ледники, которые не были подвержены воздействию обвалов. В работе [42] проанализировано вли-

яние обвалов на динамику ледников на примере ледника Шермана на Аляске и ледников в Новой Зеландии. Предложена схема, согласно которой под нагрузкой обломочного чехла массив ледника в области абляции замедляется и

становится препятствием для чистого ледника, который натекает на зачехлённый массив и образует на его поверхности гряды напора. Так как зачехлённый массив ледника не тает, он сдвигается вперёд и ледник наступает. Наступание служит реакцией ледника на обвал. Вероятно, именно такой механизм был у наступания ледника Восточный Штулу в 1940-х годах. В настоящее время ледник Шермана на Аляске наступает после обвала в 1964 г. По нашим данным (анализ космических снимков), после того, как обломочный чехол на этом леднике продвинулся к его краю, ледник наступил на 380–470 м. За последние девять лет наступание составило 85–90 м, причём поверхность обломочного чехла наступающего ледника уже поросла кустарником. Можно предположить, что в ближайшее время будет наступать и ледник Бартуйцете в бассейне р. Урух.

Влияние обвалов на селевые процессы. Некоторые из представленных в таблице обвалов сопровождались селевыми потоками сразу или по истечении некоторого времени:

1) непосредственным продолжением обвального процесса и последующего схода ледника Колка был катастрофический гляциальный селевой поток с большой долей ледяной составляющей в долине р. Геналдон 20 сентября 2002 с объёмом выноса около 3–5 млн м³ [25];

2) после обвала со склона Казбека в ущелье Амилишка-Кабахи 17 мая 2014 г., в результате отложения больших объёмов ледово-каменного материала в русле и размыва его водным ливневым потоком 20 августа 2014 г. сошёл сель с объёмом выноса около 0,5 млн м³;

3) после обвала с ледникового цирка Мурками и заполнения обломочным материалом русла р. Местиячала с последующим его размывом 25 августа 2019 г. здесь сошёл селевой поток;

4) после обвала в мае 2016 г. из цирка ледника Сери в долине р. Твибери образовались подпружные озёра, которые прорвались после ливней в конце августа 2017 г. с формированием селевого потока.

В будущем возможны и другие механизмы обвально-селевых процессов:

1) выплеск воды из озёр в результате падения в их котловины масс скальных обломков и льда, подобные описанным в литературе случаям в долине Санта-Тереса при обвале в оз. Салкан-

тайкоча 23 февраля 2019 г. (Перу, [2]), в долине р. Барун 20 апреля 2017 г. (Непал, [6]), в долине р. Чукчун при обвале 11 апреля 2010 г. в оз. Лагуна 513 (Перу, [8]);

2) трансформация обвальных масс в селевой поток в русле реки, как при обвале 23 августа 2017 г. с г. Пиццо Ченгало (Швейцария), когда сформировался селевой поток по р. Бондаска [5];

3) блокирование обвальными массами выходов порталов подлёдных туннелей и полостей массивов мёртвых льдов и ледников с последующими прорывами и размывами обвальных отложений, как во время обвала в Чили 16 декабря 2019 г. (<https://twitter.com/inrushmd/status/980849057664045056>) [4].

Обсуждение результатов

В XXI в. обвалы проходили на участках, где их не было сто или несколько сотен лет (в цирке ледника Колка обвалы спровоцировали сход ледника через 100 лет после зафиксированного ранее; на склоне горы Казбек обвал повторился через 182 года). Представленные данные об активизации обвалов на Центральном Кавказе показывают, что обвальными процессами охвачена вся высокогорная зона. Более 70% обвалов формировалось на высотах свыше 3600 м. Не будет ошибкой предположить, что это связано с потеплением климата, когда зона интенсивного морозного выветривания захватывает более высокие участки скальных обрамлений ледников, которые ранее большую часть года находились в условиях отрицательных температур воздуха. Обвалы происходили в разные месяцы года (март–август, октябрь–декабрь). Это показывает, что непосредственной причиной обвалов могли быть не только резкое потепление или ливни, так как значительное число обвалов приходилось на периоды отрицательных температур воздуха. Возможно, обвалы были подготовлены длительно протекавшими процессами морозного выветривания. На постепенность такого процесса указывают случаи, когда крупным обвалам предшествовали небольшие обвалы за несколько лет, месяцев или дней.

Обвалы сконцентрированы на отдельных локальных участках, что, видимо, связано с особенностями геологического строения. На участке Казбекско-Джигарайского масси-

ва формированию обвалов способствовали эндогенные факторы (сейсмические и вулканические). Однако для других районов активизации обвалов в результате анализа онлайн-карт сейсмической активности был сделан вывод, что в периоды и на даты обвалов близко к этим районам сейсмической активности не установлено. Не было также случаев и нескольких обвалов в одно и то же время. Обвальные процессы в высокогорье влияют и на другие экзогенные процессы, и на динамику ледников: они приводят к сходу ледников (зафиксированы сходы и пульсации ледника в восточном Тибете после обвалов [43]), подвижкам и наступанию ледников, замедлению их деградации, формированию озёр, прорывам длительно существующих озёр, активизации селевых процессов.

Возможно развитие сложных единовременных процессов в качестве цепной реакции, вызванной обвалами, когда обвалы трансформируются в селевые потоки и когда они продолжаются в виде схода ледника и далее в виде селевого потока. Это значительно увеличивает зону поражения такими процессами.

Заключение

Использование разновременной космической информации позволило установить активизацию обвалов на Центральном Кавказе в XXI в., оценить их параметры и высокую активность в 2019 г. Всего на Центральном Кавказе зафиксировано более 30 случаев проявлений обвальных процессов: в России (в Кабардино-Балкарии в бассейнах рек Баксан, Чегем и Черек; в Республике Северная Осетия-Алания в бассейнах рек Мамихдон, Ардон, Геналдон) и в Грузии (в бассейнах рек Ингури и Терек). Катастрофическими были последствия обвальных процессов в долинах Геналдон в 2002 г. и Амилишка-Кабахи в 2014 г. Обвалы в горах Центрального Кавказа, включая обвалы и сход ледника Колка, отличаются значительной дальностью переноса обломков горных пород и льда в виде каменных и ледово-каменных лавин. Отмечено 11 случаев (около 40%) с дальностью выброса более 2000 м и один случай с дальностью выброса более 10 км (без учёта схода ледника Колка). На отдельных участках обвалы происходили по нескольку раз:

большое число обвалов было в цирке ледника Колка, по три обвала произошло с горы Башкара, в цирке ледника Мурквм и в цирке ледника Восточный Штулу, в цирке Девдоракского ледника.

Активизация обвалов в горно-ледниковых районах, где находится много ледниковых озёр, может привести к прорывам озёр и сходам катастрофических селей. К одному из таких объектов можно отнести оз. Сылтранкель объёмом более 2 млн м³ [44] в верховьях левого притока р. Баксан (Сылтран-Су), которое в случае падения в него обвала может нести угрозу селу Верхний Баксан с населением более 450 человек. Потенциальная угроза может исходить от оз. Азот, расположенного над альплагерем «Уллу-Тау» в ущелье Адыр-Су, и от других озёр. Не исключено повторение обвалов на участках, где они были зафиксированы в XX в. или раньше. Такой вывод сделан в работе [45] в результате анализа следов схода ледово-каменных лавин в ущелье Харгабах в Чеченской Республике с дальностью выброса 7,5 км. Возможен сход ледово-каменной лавины в ущелье Шхельды в долине р. Адыл-Су, где обвал с дальностью выброса более 10 км произошёл в XIX в., и трансформация в селевой поток с угрозой для рекреационных объектов в этой долине, в первую очередь для пансионата «Приэльбрусье», расположенного на отложениях обвала.

Таким образом, исследование активности обвалов в высокогорной зоне и разработка возможных сценариев катастрофических событий, связанных с ними, весьма важно и в настоящем, и в будущем.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы 6.3.2 плана НИТР Росгидромета при финансовой поддержке РГО (грант № 12/2019-Р) и по теме I.7 АААА-А16-116032810093-2 «Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов» (ГЗ).

Acknowledgements. This work was carried out within the framework of topic 6.3.2 of the NITR plan of Roshydromet with the financial support of the Russian Geographical Society (grant № 12/2019-R), and was partially supported by Lomonosov Moscow State University (grant I.7 АААА-А16-116032810093-2 «Mapping, modeling and risk assessment of dangerous natural processes»).

Литература

References

1. *Стром А.Л., Жиркевич А.Н.* Реконструкция селевых паводков, вызванных прорывами доисторических обвалных дамб в Центральной Азии, и оценка их параметров // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Тр. 5-й Междун. конф. Тбилиси, Грузия, 1–5 октября 2018 г. Тбилиси: Универсал, 2018. С. 182–192.
2. Электронный ресурс: <https://blogs.agu.org/landslide-blog/>.
3. Электронный ресурс: <https://twitter.com/inrushmd/status/1132861019141939200>.
4. *Duhar P., Sepulveda V., Garrido N., Mella M., Quiroz D., Fernandez J., Moreno H., Hermosilla G.* The Santa Lucia landslide disaster, Chaiten-Chile: origin and effects // Debris-flow hazards mitigation: Mechanics, Monitoring, Modeling, and Assessment. Proc. of the Seventh Intern. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, Golden, Colorado, USA, June 10–13. 2019. P. 653–660.
5. *Walter F., Amann F., Kos A., Kenner R., Phillips M., Preux A., Huss M., Tognacca C., Clinton J., Diehl T., Bonanomi Y.* Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows // *Geomorphology*. 2020. V. 351. Article. 106933. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106933>.
6. *Byers A.C., Rounce D.R., Shugar D.H., Lala J.M., Byers E.A., Regmi D.* A rockfall-induced glacial lake outburst flood, Upper Barun Valley, Nepal // *Landslides*. 2019. V. 16. P. 533–549.
7. *Hancox G.T., Thomson R.* The January 2013 Mt Haast Rock Avalanche and Ball Ridge Rock Fall in Aoraki/Mt Cook National Park, New Zealand // *GNS Science Report*. 2013, 33. 26 p.
8. *Valderrama P., Vilca O.* Dinamica e implicancias del aluvión de la laguna 513, Cordillera Blanca, Ancash Perú // *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 2012. V. 69. № 3. P. 400–406.
9. *Schoeneich P., Hantz D., Amelot F., Deline P.* A new database of alpine rock falls and rock avalanches // *INTERPRAEVENT 2008 – Conf. Proc.* 2008. V. 2. P. 243–250.
10. *Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Черноморец С.С.* Обвалные процессы в высокогорной зоне Кавказа в XXI веке // *Природа*. 2015. № 7. С. 52–62.
11. *Докукин М.Д., Калов Х.М., Савернюк Е.А.* Активизация обвалных процессов в высокогорной зоне Западного Кавказа в XXI веке (анализ разновременных космических снимков) // Актуальные направления сбалансированного развития горных территорий в контексте междисциплинарного подхода: Материалы I Междунар. науч. конф. Карачаевск: КЧГУ, 2019. С. 61–66.
12. *Докукин М.Д., Калов Р.Х., Черноморец С.С., Гяургиев А.В., Хаджиев М.М.* Снежно-ледово-каменная лавина на леднике Башкара в ущелье Адыл-Су (Центральный Кавказ) 24 апреля 2019 года // *Криосфера Земли*. 2020. Т. 24. № 1. С. 64–70.
13. *Hungr O., Leroueil S. & Picarelli L.* The Varnes classification of landslide types, an update // *Landslides*. 2014. № 11. С. 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.
14. *Sosio R.* Rock–snow–ice avalanches // *Landslide Hazards, Risks and Disasters*. Chap. 7. Amsterdam: Elsevier, 2015. P. 191–240.
15. *Strom A.L., Zhirkevich A.N.* Reconstruction of debris floods caused by breach of the prehistoric rockslide dams in Central Asia and their parameters assessment. *Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashita*. Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 5th International Conference. Tbilisi, Georgia, 1–5 October 2018. Eds.: S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili. Tbilisi: Publishing House «Universal», 2018: 182–192.
16. <https://blogs.agu.org/landslideblog/>.
17. <https://twitter.com/inrushmd/status/1132861019141939200>.
18. *Duhar P., Sepulveda V., Garrido N., Mella M., Quiroz D., Fernandez J., Moreno H., Hermosilla G.* The Santa Lucia landslide disaster, Chaiten-Chile: origin and effects. Debris-flow hazards mitigation: Mechanics, Monitoring, Modeling, and Assessment. Proceedings of the Seventh International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Golden, Colorado, USA, June 10–13. 2019: 653–660.
19. *Walter F., Amann F., Kos A., Kenner R., Phillips M., Preux A., Huss M., Tognacca C., Clinton J., Diehl T., Bonanomi Y.* Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. *Geomorphology*. 2020, 351. Article. 106933. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106933>.
20. *Byers A.C., Rounce D.R., Shugar D.H., Lala J.M., Byers E.A., Regmi D.* A rockfall-induced glacial lake outburst flood, Upper Barun Valley, Nepal. *Landslides*. 2019, 16: 533–549.
21. *Hancox G.T., Thomson R.* The January 2013 Mt Haast Rock Avalanche and Ball Ridge Rock Fall in Aoraki/Mt Cook National Park, New Zealand. *GNS Science Report*. 2013, 33: 26 p.
22. *Valderrama P., Vilca O.* Dinamica e implicancias del aluvión de la laguna 513, Cordillera Blanca, Ancash Perú. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 2012, 69 (3): 400–406.
23. *Schoeneich P., Hantz D., Amelot F., Deline P.* A new database of alpine rock falls and rock avalanches. *INTERPRAEVENT 2008 – Conf. Proc.* 2008, 2: 243–250.
24. *Dokukin M. D., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S.* Rock Avalanches in the Alpine Zone of the Caucasus in the 21 Century. *Priroda*. Nature. 2015, 7: 52–62. [In Russian].
25. *Dokukin M.D., Kalov Kh.M., Savernyuk E.A.* Large rock slope failures activation in the high-mountain zone of the western Caucasus in the 21st century (analysis of multi-temporal satellite images). *Aktual'nye napravleniya sbalansirovannogo razvitiya gornyykh territoriy v kontekste mezhdisciplinarnogo podkhoda: Materialy I Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Actual directions of balanced mountain development in the context of an interdisciplinary approach: Materials of the I Intern. Scientific Conf. Karachayevsk: KCHU, 2019: 61–66. [In Russian].
26. *Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Chernomorets S.S., Gyaurgiev A.V., Khadzhiev M.M.* The snow ice rock avalanche on Bashkara glacier in the Adyl-Su valley (Central Caucasus) on april 24, 2019. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2020, 24 (1): 64–70. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(64-70). [In Russian].
27. *Hungr O., Leroueil S., Picarelli L.* The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*. 2014, 11: 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.
28. *Sosio R.* Rock–snow–ice avalanches. *Landslide Hazards, Risks and Disasters*. Ch. 7. Amsterdam: Elsevier, 2015: 191–240.
29. *Sochineniya Aleksandra Pushkina. Tom tretiy. Sankt-peterburg, v tipografii zagotovleniya gosudarstvennykh bumag.* Works of Alexander Pushkin. Volume Three. St.Petersburg, in the printing house of government se-

15. Сочинения Александра Пушкина. Томъ третій. Санктпетербургъ, въ типографіи заготовления государственныхъ бумаг. MDCCCXXXVIII. Обвал. С. 75–76. <http://lib.pushkinskijdom.ru>
16. Каталог ледников СССР. Т. 8. Северный Кавказ. Ч. 5. Бассейны рек Малки, Баксана. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 146 с.
17. Каталог ледников СССР. Т. 8. Северный Кавказ. Ч. 6. Бассейн р. Чегема. Ч. 7. Бассейн р. Череха. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 96 с.
18. Каталог ледников СССР. Т. 8. Северный Кавказ. Ч. 8. Бассейн р. Уруха. Ч. 9. Бассейн р. Ардона. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 76 с.
19. Каталог ледников СССР. Том 8. Северный Кавказ. Часть 10. Бассейны рек Фиагдона и Гизельдона. Часть 11. Бассейн верховьев р. Терека. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 72 с.
20. Каталог ледников СССР. Т. 9. Закавказье и Дагестан. Вып. 1. Западное Закавказье. Ч. 2–6. Бассейны рек Бзыби, Келасури, Кодори, Ингури, Хоби, Риони. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 87 с.
21. Подозерский К.И. Ледники Кавказского хребта // Изв. Кавказского отдела Императорского Русского географического общества. Кн. 29. Вып. 1. Тифлис, 1911. 200 с.
22. Десинов Л.В. Пульсация ледника Колка в 2002 г. // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2004. Т. 4. № 3. С. 72–87.
23. Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Петраков Д.А. Ледник Колка перед катастрофой 2002 года: новые данные // Криосфера Земли. 2005. Т. 9. № 4. С. 62–71.
24. Васьков И.М. Катастрофические обвалы: происхождение и прогноз. Владикавказ: ООО НПКи «МАВР», 2016. 370 с.
25. Поповин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Гляциальная катастрофа 2002 года в Северной Осетии // Криосфера Земли. 2003. Т. 7. № 1. С. 3–17.
26. Huggel C., Zraggen-Oswald S., Haeblerli W., Kaab A., Polkvoj A., Galushkin I., Evans S.G. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2005. V. 5. P. 173–187.
27. Котляков В.М., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Десинов Л.В., Осокин Н.И., Чернов Р.А. Кармадонская катастрофа: что случилось и чего ждать дальше. М.: Издательский дом «Кодекс», 2014. 184 с.
28. Никитин М.Ю., Гончаренко О.А., Галушкин И.В. Динамика и стадийность развития Геналдонского ледово-каменного потока на основе дистанционного анализа // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2007. Т. 7. № 3. С. 2–15.
29. Петраков Д.А., Дробышев В.Н., Алейников А.А., Аристов К.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Изменения в зоне Геналдонской гляциальной катастрофы в период 2002–2010 гг. // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 1. С. 35–46.
30. Котляков В.М., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Осокин Н.И., Чернов Р.А. Динамика процессов восстановления ледника Колка // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Владикавказ: Центр геофиз. исслед. Владикавказского науч. центра РАН и РСО-А, 2014. С. 233–238.
31. Тавасиев Р.А. Ледники Майли и Колка (Центральный Кавказ) // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2012. Т. 12. № 3. С. 37–45.
- curities. MDCCCXXXVIII. Obval: 75–76 <http://lib.pushkinskijdom.ru>. [In Russian].
16. *Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 8. Pt. 5.* Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970: 146 p. [In Russian].
17. *Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 8. Pt. 6–7.* Leningrad: Hydrometeoizdat, 1973: 96 p. [In Russian].
18. *Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 8. Pt. 8–9.* Leningrad: Hydrometeoizdat, 1976: 76 p. [In Russian].
19. *Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 8. Pt. 10–11.* Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977: 72 p. [In Russian].
20. *Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 9. Is. 1. Pt. 2–6.* Leningrad: Hydrometeoizdat, 1975: 87 p. [In Russian].
21. *Podozersky K.I. Glaciers of the Caucasus Range. Izvestiya Kavkazskogo otdela Imperatorskogo Russkogo geograficheskogo obshchestva.* News of the Caucasus Department of the Imperial Russian Geographical Society. Tiflis. 1911, 29 (1): 200 p. [In Russian].
22. *Desinov L.V. Surge of Kolka glacier in 2002. Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Centra.* Bulletin of Vladikavkaz Scientific Centre. 2004, 4 (3): 72–87. [In Russian].
23. *Tutubalina O.V., Chernomorets S.S., Petrakov D.A.* Kolka glacier before the 2002 collapse: new data. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere.* 2005, 9 (4): 62–71. [In Russian].
24. *Vaskov I.M. Katastroficheskie obvaly: proiskhozhdenie i prognoz.* Catastrophic collapses: origin and prognosic. Vladikavkaz: «MAVR», 2016: 370 p. [In Russian].
25. *Popovnin V.V., Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Chernomorets S.S.* The 2002 glacial catastrophe in North Ossetia. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere.* 2003, 7 (1): 3–17. [In Russian].
26. *Huggel C., Zraggen-Oswald S., Haeblerli W., Kaab A., Polkvoj A., Galushkin I., Evans S.G.* The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences.* 2005, 5: 173–187.
27. *Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Desinov L.V., Osokin N.I., Chernov R.A.* Karmadonskaya katastrofa: chto sluchilos i chego zhdet dalshe. Karmadon catastrophe: what happened and what we should wait for in future. Moscow: «Koдекс» Publishing House, 2014: 184 p. [In Russian].
28. *Nikitin M.Yu., Goncharenko O.A., Galushkin I.V.* Dynamics and stages in the development of the Genaldon ice-rock flow on the basis of remote sensing analysis. *Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Centra.* Bulletin of Vladikavkaz Scientific Centre. 2007, 7 (3): 2–15. [In Russian].
29. *Petrakov D.A., Drobyshev V.N., Aleinikov A.A., Aristov K.A., Tutubalina O.V., Chernomorets S.S.* Changes in the area of Genaldon glacial disaster in 2002–2010. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere.* 2013, 17 (1): 35–46. [In Russian].
30. *Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Osokin N.I., Chernov R.A.* Dynamics of the Kolka Glacier recovery processes. *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra.* Kolka Glacier: Past, Present, Future. Eds.: Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili. Vladikavkaz: CGI VSC RAS and RNO, 2014: 233–238. [In Russian].
31. *Tavasiev R.A.* Mayli and Kolka glaciers (Central Caucasus). *Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Centra.* Bulletin of Vladikavkaz Scientific Centre. 2012, 12 (3): 37–45. [In Russian].
32. *Rototayev K.P., Khodakov V.G., Krenke A.N.* Issledovanie pulsiruyushchego lednika Kolka. A study of the surging Kolka Glacier. Moscow: Nauka, 1983: 168 p. [In Russian].
33. *Chernomorets S.S.* The new «Kazbek blockage» on May 17, 2014. *Priroda.* Nature. 2014, 7: 67–72. [In Russian].

32. Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н. Исследование пульсирующего ледника Колка. М.: Наука, 1983. 168 с.
33. Черноморец С.С. Новый «Казбекский завал» 17 мая 2014 года // Природа. 2014. № 7. С. 67–72.
34. Дробышев В.Н., Торчинов Х.-М.З., Тутубалина О.В., Хубаев Х.М. Основные топогеодезические параметры и кинематика Девдоракского обвала 17 мая 2014 года // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2014. Т. 14. № 4. С. 30–41.
35. Тавасиев Р.А. Катастрофические обвалы с ледника Девдорак // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2015. Т. 15. № 1. С. 50–57.
36. Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Петраков Д.А., Гоциридзе Г.З., Гавардашвили Г.В., Докукин М.Д., Дробышев В.Н., Тутубалина О.В., Колчин А.А., Запорожченко Э.В., Каменев Н.А., Каменев В.А., Кээб А., Каргел Дж., Хуггел К. Ледово-каменный обвал и последующий селевой поток в Девдоракском ущелье (Кавказ, Грузия) в 2014 году // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Материалы IV Междунар. конф. (Россия, г. Иркутск – пос. Аршан (Республика Бурятия), 6–10 сентября 2016 г.). Иркутск: Ин-т географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. С. 244–248.
37. Докукин М.Д. О каменной лавине в районе ледника Бартуйцете (Центральный Кавказ) // Изв. ВГО. 1988. Т. 120. Вып. 4. С. 348–353.
38. Савернюк Е.А. Особенности морфологии и динамики обвальных отложений на леднике Бартуйцете (Республика Северная Осетия – Алания) // Тр. ВГИ. 2013. Т. 97. С. 36–40.
39. Тавасиев Р.А. Деградация ледника Караугом. Ч. 1. Динамика отступления ледника // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2017. Т. 17. № 4. С. 19–27.
40. Олюнин В.Н. К истории оледенения юго-востока горной части Кабардинской АССР // Тр. Ин-та географии АН СССР. 1953. Т. 58. Вып. 10. С. 90–178.
41. Тавасиев Р.А. Пульсирующий ледник Мосота в Дигории (Центральный Кавказ) Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа. Тр. II Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 10-летию со дня создания Владикавказского науч. центра РАН и Правительства РСО-А. Владикавказ, 2010. С. 225–235.
42. Reznichenko N.V., Davies T.R.H., Alexander D.J. Effects of rock avalanches on glacier behaviour and moraine formation // Geomorphology. 2011. V. 132. P. 327–338.
43. Paul F. Repeat Glacier Collapses and Surges in the Amney Machen Mountain Range, Tibet, Possibly Triggered by a Developing Rock-Slope Instability // Remote Sensing. 2019. № 11. P. 708. doi: 10.3390/rs11060708. <https://www.researchgate.net/publication/331990406>.
44. Кидяева В.М., Крыленко И.Н., Крыленко И.В., Петраков Д.А., Черноморец С.С. Колебания уровня воды в горных ледниковых озерах Приэльбрусья // Геориск. 2013. № 3. С. 20–27.
45. Докукин М.Д., Савернюк Е.А. О возможности оценки угрозы каменных лавин (на примере долины р. Харгабахк, Чеченская Республика) // В мире научных открытий. Красноярск, 2010. Вып. 3 (09). Ч. 4. С. 146–151.
46. Drobyshev V.N., Torchinov H.-M.Z., Tutubalina O.V., Hubaev H.M. Main topographical data and kinematics of the Devdorakskiy collapse on May 17, 2014. *Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Centra*. Bulletin of Vladikavkaz Scientific Centre. 2014, 14 (4): 30–41. [In Russian].
47. Tavasiev R.A. Catastrophic collapses from the Devdorak Glacier. *Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Centra*. Bulletin of Vladikavkaz Scientific Centre. 2015, 15 (1): 50–57. [In Russian].
48. Chernomorets S.S., Savernyuk E.A., Petrakov D.A., Dokukin M.D., Gotsiridze G., Gavardashvili G.V., Drobyshev V.N., Tutubalina O.V., Kolchin A.A., Zaporozhchenko E.V., Kamenev N.A., Kamenev V.A., Kaab A., Kargel J., Huggel C. Ice-rock avalanche and consequent debris flow in the Devdorak gorge (Mt. Kazbek, Caucasus, Georgia) in 2014. Debris flows: risks, forecast, protection: Materials of IV International Conference (Russia, Irkutsk – Arshan village (The Republic of Byriatia), September 6–10, 2016. Irkutsk: Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the RAS, 2016: 244–248. [In Russian].
49. Dokukin M.D. About a rock avalanche near the Bartuytete glacier (Central Caucasus). *Izvestiya vsesoyuznogo geogra-ficheskogo obshchestva*. Proceedings of the All-Union Geographical Society. 1988, 120 (4): 348–353. [In Russian].
50. Savernyuk E.A. Features of the morphology and dynamics of landslides on the Bartuytete glacier (Republic of North Ossetia – Alania). *Trudy Vysokogornogo geofizicheskogo instituta*. Proc. of the High Mountain Geophysical Institute. 2013, 97: 36–40. [In Russian].
51. Tavasiev R.A. The degradation of Karaugom glacier. Part 1. The dynamics of the glacier's retreat. *Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Centra*. Bulletin of Vladikavkaz Scientific Centre. 2017, 17 (4): 19–27. [In Russian].
52. Olyunin V.N. On the history of glaciation in the south-east of the mountainous part of the Kabardin ASSR *Trudy Instituta geografii AN SSSR*. Proc. of the Institute of Geography, USSR Academy of Sciences. 1953, 58 (10): 90–178. [In Russian].
53. Tavasiev R.A. Surging Mosota Glacier in Digoria (Central Caucasus) Dangerous natural and anthropogenic geological processes in the mountain and foothill territories of the Northern Caucasus. *Trudy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchyonnoy 10-letiyu so dnya sozdaniya Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra RAN i Pravitel'stva RSO-A*. Proc. of the II Intern. Scientific and Practical Conf. dedicated to the 10th anniversary of the founding of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and the Government of North Ossetia-Alania. Vladikavkaz, 2010: 225–235. [In Russian].
54. Reznichenko N.V., Davies T.R.H., Alexander D.J. Effects of rock avalanches on glacier behaviour and moraine formation. *Geomorphology*. 2011, 132: 327–338. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.05.019>.
55. Paul F. Repeat Glacier Collapses and Surges in the Amney Machen Mountain Range, Tibet, Possibly Triggered by a Developing Rock-Slope Instability. *Remote Sensing*. 2019, 11: 708 p. <https://doi.org/10.3390/rs11060708>.
56. Kidyayeva V.M., Krylenko I.N., Krylenko I.V., Petrakov D.A., Chernomorets S.S. Water level fluctuations in mountain glacier lakes in the Elbrus region. *Georisk*. 2013, 3: 20–27. [In Russian].
57. Dokukin M.D., Savernyuk E.A. On the possibility of assessing the threat of rock avalanches (using the example of the valley of the Khargabakhk river, Chechen Republic). *V mire nauchnykh otkrytiy*. In the world of scientific discoveries. 2010, 3 (09), 4: 146–151. [In Russian].