

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ЛЕДНИКОВ С ОБЛОМОЧНЫМ ЧЕХЛОМ БЕЗЕНГИ И БАШКАРА НА ЦЕНТРАЛЬНОМ КАВКАЗЕ

© 2025 г. М. Ю. Беккиев, М. Д. Докукин*, Р. Х. Калов, А. Р. Акаев

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия

*e-mail: inrush@bk.ru

Поступила в редакцию 10.02.2025 г.

После доработки 03.04.2025 г.

Принята к публикации 26.06.2025 г.

На основе анализа космоснимков и материалов аэрофотосъёмок приведены данные об изменениях подледниковой дренажной системы и динамики ледников Безенги и Башкара (Центральный Кавказ) в 2024 г. под влиянием обломочного чехла, образовавшегося в результате схода селей в 2016 и 2018 гг. на ледник Безенги и схода снежно-ледово-каменной лавины в 2019 г. на ледник Башкара.

Ключевые слова: ледник Безенги, обвал, селевой поток, озеро Башкара, наступление ледника, подледниковый канал

DOI: 10.7868/S2412376525030033

ВВЕДЕНИЕ

В результате изменения климата в последние годы наблюдается ускоренная деградация ледников и активизация обвальных процессов в высокогорной зоне (Докукин и др., 2020а; Беккиев и др., 2021; Tielidze et al., 2022; Котляков и др., 2023). Исследователи отмечают рост моренного покрова (обломочного чехла) на ледниках, который замедляет их таяние (Резепкин, Поповнин, 2018; Postnikova et al., 2023; Tielidze et al., 2024). Формирование обломочного чехла может происходить в результате различных процессов, в том числе обвальных. Влияние обвального чехла и его динамики учитывается при моделировании ледников и прогнозе их изменений (Postnikova et al., 2023; Постникова и др., 2024). Под ледниками и внутри ледников существуют дренажные системы (Мачерет, Глазовский, 2011), которые со временем могут значительно меняться. Наблюдения за ними проводятся редко, хотя накопление воды на ложе ледников служит одной из причин катастрофических сходов ледников (Kääb et al., 2021). На Кавказе на основе радиолокационного зондирования реконструировалась подледниковая дренажная сеть нескольких ледников (Лаврентьев и др., 2020). Динамика ледника Безенги

характеризовалась в работах (Панов, 1978; Керимов и др., 2014; Беккиев и др., 2021). Ледник Безенги, по данным (Беккиев и др., 2021), за период 1957–2020 гг. отступил на 1220 м, а ледник Башкара – на 440 м. При этом зафиксировано наступление ледника Башкара в начале 90-х годов XX века (Докукин и др., 2020в).

В 2024 г. по данным космоснимков и материалов аэрофотосъёмок 2022–2024 гг. выявлены необычные изменения на участках ледников Безенги (бассейн р. Черек-Безенгийский) и Башкара (бассейн р. Баксан, долина р. Адылсу) и приледниковой зоны, сопровождавшиеся перестройкой поверхности и подлёдной гидрологических систем, что стало предметом исследований статьи. Основная цель – охарактеризовать современные процессы в нижних частях ледников Безенги и Башкара и оценить возможное влияние на них обломочного чехла, образованного в разное время на поверхности ледников. Для этого поставлены задачи провести анализ разновременных космоснимков и материалов аэрофотосъёмок, а также публикаций и выявить пространственно-временные изменения динамики ледников и участков с обломочным чехлом, а также на участках ниже ледников.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы космоснимки со спутников Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м и Landsat 8–9 с разрешением 15 м за период 2013–2024 гг. с сайта (Sentinel-hub..., 2025), материалы аэрофотосъёмок Высокогорного геофизического института 28.08.2022, 23.08.2023, 08.11.2023 и 11.09.2024 участка ледника Безенги и аэрофотосъёмок 05.08.2023 и 29.06.2024 участка озёрно-ледникового комплекса Башкара с квадрокоптера DJI Mavic Air 2, материалы аэрофотосъёмки ГУ МЧС России по Кабардино-Балкарии озёрно-ледникового комплекса Башкара от 06.06.2024.

Материалы аэрофотосъёмок обрабатывались в программе Agisoft Metashape Professional, и были построены ортофотопланы и цифровые модели рельефа. Пространственное разрешение ортофотопланов в зависимости от высоты полёта квадрокоптера над землёй составило 0.05–0.08 м в пикселе. Для оценки изменений рельефа строились векторные слои высот горизонталей через 1 м в относительных высотах (относительно точки запуска квадрокоптера), так как по характеристикам квадрокоптера не предусматривалось получение абсолютных высот. Линии горизонталей наносились на ортофотопланы и соответствовали минимальным неровностям рельефа. Они хорошо совпадали с элементами изображений на ортофотопланах, сечения горизонталей 1 м было достаточно для оценки изменений некоторых элементов рельефа, и построение горизонталей с меньшим сечением рельефа не потребовалось. Вследствие того, что квадрокоптер не имел модуля RTK (Real-Time Kinematic) и на местности не были заложены опорные реперы, разновременные ортофотопланы имели расхождения в плане 2–3 м. Для оценки пространственно-временных изменений участки ортофотопланов и космоснимков совмещались по опорным точкам в программе ArcMap.

Точность измерения площади контура селевых отложений на космоснимке Sentinel-2 определена из произведения периметра контура и половины размера пикселя изображения (5 м) и составила 12.3%. Разновременные фрагменты космоснимков и ортофотопланов многократно просматривали и сравнивали в режиме “зашторить слой” в программе ArcMap и в режиме GIF-анимации, и дешифрировались участки движущихся массивов ледников и мёртвых льдов, факты проявлений селей и обвалов и изменений гидрологической сети, определялись изменения

направления движения отдельных участков ледников, проводились их границы. Ниже представлены результаты исследований динамики концевых участков ледников Безенги и Башкара и приледниковой зоны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Участок ледника Безенги. В результате анализа ортофотопланов 28.08.2022, 23.08.2023, 08.11.2023 и 11.09.2024 выявлены явные изменения положения истока р. Черек-Безенгийский (рис. 1). По данным (Панов, 1978), исток р. Черек-Безенгийский ранее был расположен ближе к левому краю ледника. В 2022 г. (см. рис. 1, *a*) кроме основного истока реки был небольшой выход воды с правой части ледника ниже на расстоянии 210 м. Это показывает, что подледных каналов было несколько. В 2023 г. основной исток реки уже был почти на месте второго небольшого выхода (см. рис. 1, *b*) с удалением от него на 55 м к юго-западу. В 2024 г. общее смещение истока реки от левого края ледника к правому и вниз по долине составило 280 м (см. рис. 1, *c*). На фрагменте ортофотоплана 11.09.2024 (рис. 2, *b*) показаны точки истоков р. Черек-Безенгийский (6, 7, 8), отмеченные на рис. 1. Почти в том же месте, как и в 2024 г., исток реки находился в ноябре 2023 г. (на расстоянии около 16–18 м), но тогда расход воды был минимальным и вода вытекала из грунтового массива, а не из ледяного грота, как в 2024 г. В этом году вода вытекала уже из грота с высотой ледяной стенки над полостью 10–12 м. Высота самого грота была более 2 м. Ширина русла водного потока у грота достигала 16 м. Сравнение цифровых моделей рельефа 2022 и 2024 гг. показало, что в 2022 г. исток реки гипсометрически был на 30 м выше, чем в 2024 г. Размывов старого участка русла реки на выходе воды из грота не выявлено, что свидетельствует об отсутствии селевых потоков в результате прорывов внутриледниковых ёмкостей.

Дальнейший анализ разновременных космоснимков Sentinel-2 показал, что в 2016 и 2018 гг. на поверхность ледника Безенги с правого склона сошли селевые потоки и общая площадь селевых отложений в 2018 г. составила около 81 ± 10 тыс. м² (см. рис. 2, *a*, *1*). Селевые отложения возвышались над тальвегом эрозионной ложбины (см. рис. 2, *a*, *2*). С 2018 по 2024 г. нижний край селевых отложений сместился с ледником на расстояние 85 м (см. рис. 2, *b*, *3*; рис. 2, *c*, *3*). Нижняя часть линии тальвега эрозионной ложбины сместилась на расстояние около

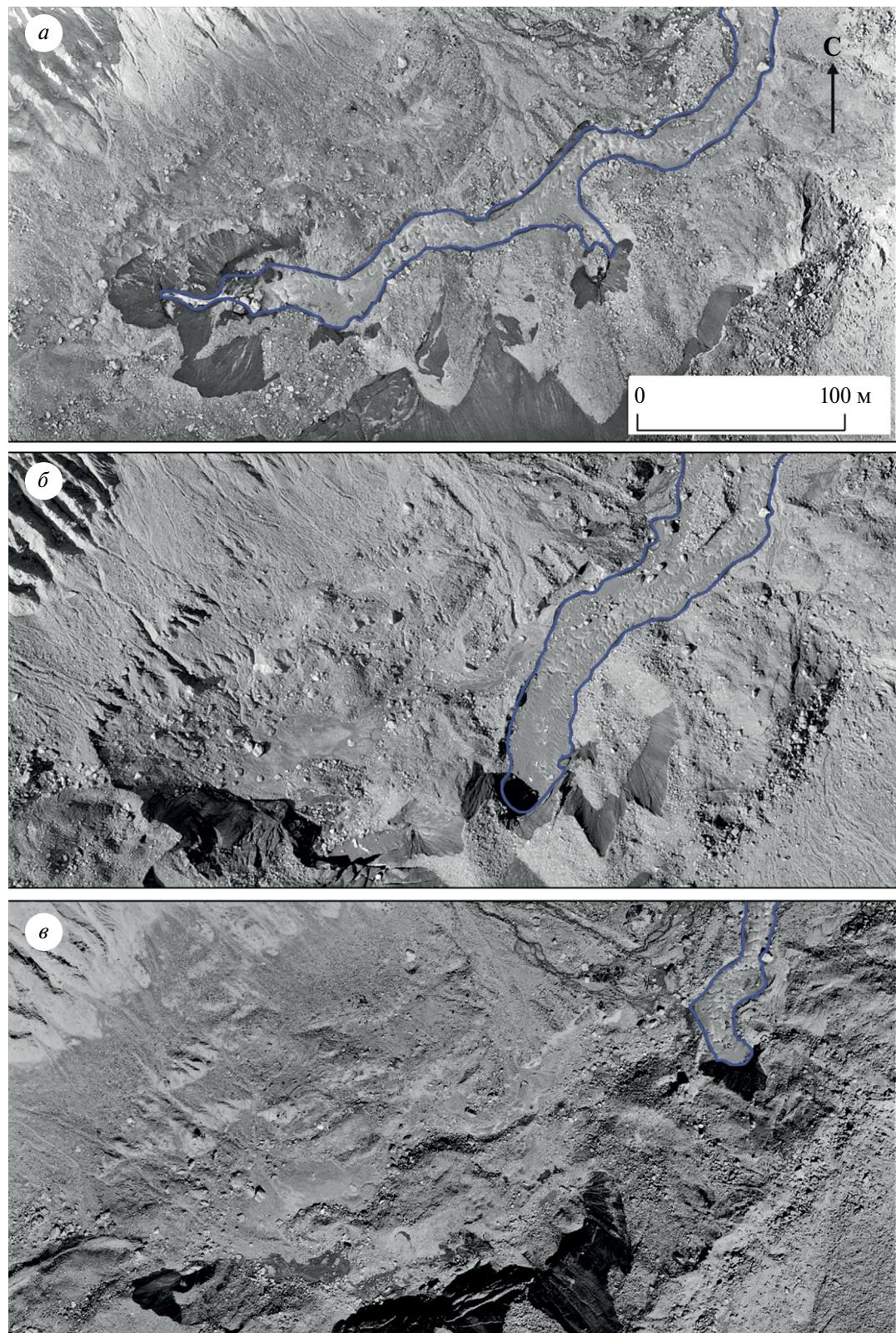


Рис. 1. Изменение положения истока р. Черек-Безенгийский на ортофотопланах разных лет: 28.08.2022 (а), 23.08.2023 (б), 11.09.2024 (в). Синими линиями показаны участки истоков и русел р. Черек-Безенгийский

Fig. 1. Change in the position of the source of the Cherek-Bezengiysky River on orthophotoplans of different years: 08/28/2022 (a), 08/23/2023 (b), 09/11/2024 (в). The blue lines show the sources and channels of the Cherek-Bezengiysky River

130 м вперёд и влево (см. рис. 2, б, 4; рис. 2, в, 4). При этом высота ледяного левого склона ложбины оставалась неизменной — около 20 м. Общий вектор направления движения массива ледника с чехлом селевых отложений (см. рис. 2, б,

показан стрелкой) был под углом к осевой линии ледника вследствие того, что этот массив испытывал пластические деформации, которые развивались по линии большего уклона. Превышение поверхности обломочного чехла над

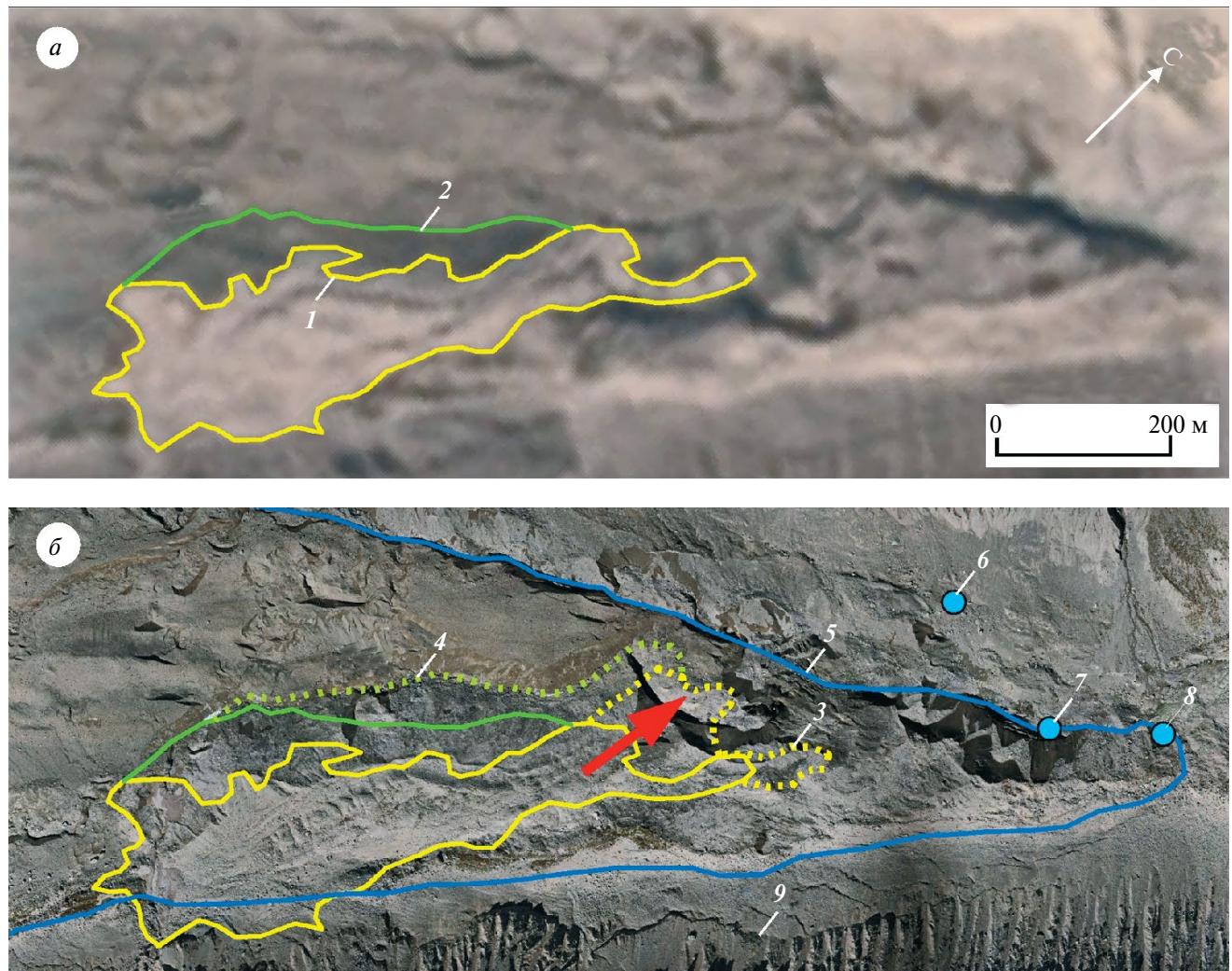


Рис. 2. Концевая часть ледника Безенги и участок селевых отложений в разные годы: космоснимок Sentinel-2 28.08.2018 (а), ортофотоплан 11.09.2024 (б), перспективная фотография А.Р. Акаева с квадрокоптера 11.09.2024 (в). 1 — граница селевых отложений 2018 г., 2 — тальвег эрозионной ложбины на леднике в 2018 г., 3 — фронтальная и левая граница селевых отложений 2024 г., 4 — тальвег эрозионной ложбины на леднике в 2024 г., 5 — граница ледника Безенги в 2024 г., 6 — участок бывшего истока р. Черек-Безенгийский в 2022 г. (см. рис. 1, а), 7 — участок бывшего истока р. Черек-Безенгийский в 2023 г. (см. рис. 1, б), 8 — участок истока р. Черек-Безенгийский в 2024 г. (см. рис. 1, в), 9 — линии отрыва обрушения обломочных масс пролювиально-коллювиального шлейфа правой береговой морены ледника Безенги. Красная стрелка — общее направление движения участка ледника с обломочным чехлом

Fig. 2. The terminal part of the Bezengi glacier and the area of debris flow deposits in different years: Sentinel-2 08/28/2018 satellite image (a), orthophotoplan on 09/11/2024 (b), perspective photograph by A.R. Akaev from a quadcopter on 09/11/2024 (в). 1 — boundary of debris flow deposits in 2018, 2 — talweg of the erosional depression on the glacier in 2018, 3 — frontal and left boundary of debris flow deposits in 2024, 4 — talweg of the erosional depression on the glacier in 2024, 5 — boundary of the Bezengi glacier in 2024, 6 — the site of the former source of the Cherek Bezengiysky River in 2022 (see Fig. 1, а), 7 — the site of the former source of the Cherek Bezengiysky River in 2023 (see Fig. 1, б), 8 — the site of the source of the Cherek Bezengiysky River in 2024 (see Fig. 1, в), 9 — the detachment lines of the collapse of the proluvial-colluvial cones of the right lateral moraine of the Bezengi Glacier. The red arrow indicates the general direction of movement of a glacier section with a debris cover

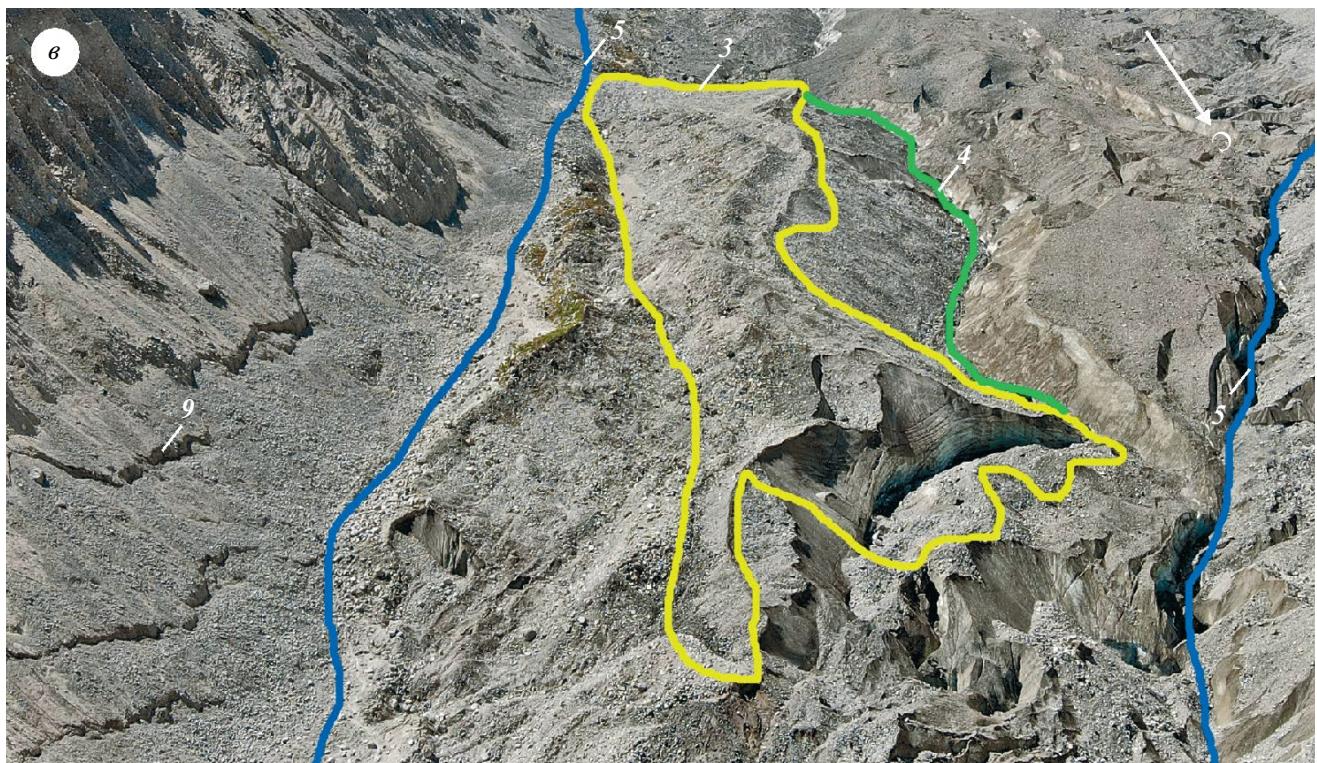


Рис. 2. Продолжение

Fig. 2. Continued

тальвегом эрозионной ложбины в 2024 г. достигало 50 м. Это превышение наглядно можно видеть на рис. 2, в между зелёной и жёлтой линиями.

Таким образом, вследствие замедления таяния правой части ледника Безенги, покрытого обломочным чехлом, эта часть ледника продолжала движение с изменённым вектором направления, оказывая давление на основной поток ледника, и вовлекала в движение массу мёртвого льда ниже селевых отложений, в то время как основная часть конца ледника сокращалась и превращалась в мёртвый лёд. При смещении массы ледника с обломочным чехлом был перекрыт основной подледниковый канал талых вод, в результате водный поток устремился в правый подлёдный канал и исток р. Черек-Безенгийский резко сместился вправо и вниз по долине.

Ускорение правой части ледника Безенги привело к тому, что началась деформация подножия пролювиально-коллювиального шлейфа правой береговой морены с образованием трещин в верхней части пролювиально-коллювиальных конусов (рис. 2, б, 9; рис. 2, в, 9)

и обрушением этих масс к подножию склона. Высота стенок отрыва по линии трещин достигала 5–7 м. Такие деформации пролювиально-коллювиального шлейфа береговой морены раньше не наблюдались, так как система “ледник – пролювиально-коллювиальный шлейф” находилась в равновесии при постоянном движении ледника. Возобновление движения мёртвого льда в правой части ледника произошло в условиях избыточного накопления обломочных масс у подножия шлейфа при неподвижности массива мёртвого льда, и движущаяся масса ледника стала вовлекать в движение отложенные обломочные массы пролювиально-коллювиального шлейфа.

Изменения, произошедшие на леднике Безенги, самом крупном долинном леднике Кавказа, привели к тому, что положение конца ледника в 2024 г. (рис. 3, б) было почти на том же месте, что и в 2014 г. (см. рис. 3, а). То есть отступания ледника за последние 10 лет фактически не произошло с одной лишь разницей, что ширина ледника сократилась за счёт обычного таяния центральной и левой частей ледника и превращения части языка ледника в мёртвый лёд. Визуально

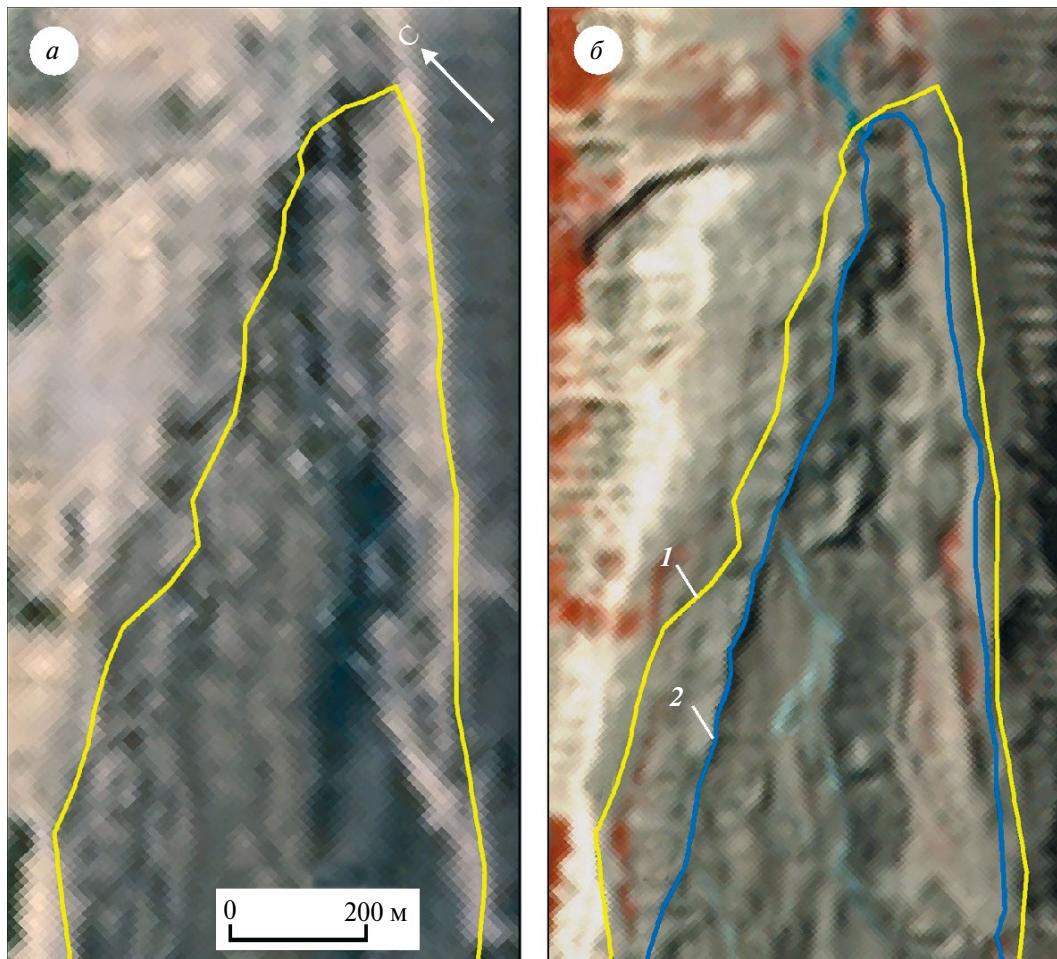


Рис. 3. Границы фронтальной активной части ледника Безенги в 2014 и 2024 гг.: космоснимок Landsat 8–9 03.08.2014 (а), космоснимок Sentinel-2 30.09.2024 (б). 1 – граница активной части ледника Безенги в 2014 г., 2 – граница активной части ледника Безенги в 2024 г.

Fig. 3. Boundaries of the frontal active part of the Bezengi Glacier in 2014 and 2024: satellite image of Landsat 8–9 08/03/2014 (a), satellite image of Sentinel-2 09/30/2024 (b). 1 – boundary of the active part of the Bezengi Glacier in 2014, 2 – boundary of the active part of the Bezengi Glacier in 2024

проводить границу ледника Безенги было сложно. Разграничение активного льда ледника и мёртвых льдов проводилось на основе многократного просмотра GIF-анимаций фрагментов космоснимков и ортофотопланов разных лет с выявлением смещений характерных элементов поверхности и векторов их движения относительно неподвижных участков склонов и коренных выступов.

Участок ледника Башкара. На участке ледника Башкара, перед которым существуют оз. Башкара и оз. Лапа, во втором десятилетии XXI века произошли неординарные события: катастрофический прорыв оз. Башкара 01.09.2017 (Черноморец и др., 2018; Докукин и др., 2020в; Pavlyukevich et al., 2024), снежно-ледово-каменная лавина с горы Башкара 24.04.2019 (Докукин и др., 2020б).

С момента прорыва оз. Башкара параметры оз. Башкара и Лапа значительно изменились. По данным (Pavlyukevich et al., 2024), к 2024 г. уровень озера Башкара в результате нескольких обрушений склонов прорана (участка прорыва плотины в 2017 г.) постепенно поднялся на 3.2 м. Площадь оз. Башкара увеличилась на 32%, а объём – на 41%. Площадь оз. Лапа в результате постепенной эрозии плотины в 2018–2024 годах сократилась на 51%, объём – на 66%, а уровень снизился на 4.2 м. Гидрологический режим ледника Башкара характеризовался тем, что доля стока с правого потока ледника Башкара (через озеро Башкара) составляла 35%, а доля стока с левого потока ледника Башкара – 65% (Pavlyukevich et al., 2024), но в 2024 г.

произошло резкое изменение в гидрологическом режиме. Значительно увеличился приток воды в озеро Башкара, а сток на участке конца ледника Башкара уменьшился.

На рис. 4 показаны изменения на участке притока воды в озеро Башкара. Заметны различия в ширине русла потока: в 2023 г. (см. рис. 4, *а*) – до 2–3 м, в 2024 г. (см. рис. 4, *б*, *в*) – до 6–7 м. То есть расход водного потока стал значительно больше. В 2024 г. в отдельные моменты отмечался селевой режим – боковая эрозия (срезан участок старых озёрных отложений площадью 500 м²), два участка новых селевых отложений площадью 350 и 950 м² на левом берегу потока и новая дельта (конус выноса) площадью 2300 м² (см. рис. 4, *в*). Селевой режим наблюдался на участке прорана

ниже озера Башкара – происходила подрезка склонов и изменение направления русла (образовался новый входной грот в подледный канал участка мёртвого льда) (рис. 5). По-видимому, так же, как и в 2017 г. (Докукин и др., 2020в), в результате схода селевого потока в озеро по нему проходила селевая волна с сохранением селевого режима в русле прорана ниже озера.

Произошедшие события на озере Башкара имели признаки прорываопасной ситуации, и поэтому проводились дальнейшие обследования, которые показали, что в августе увеличенный приток воды в озеро сохранялся. Причина таких процессов, скорее всего, заключалась в перестройке подледниковой дренажной системы ледника Башкара.

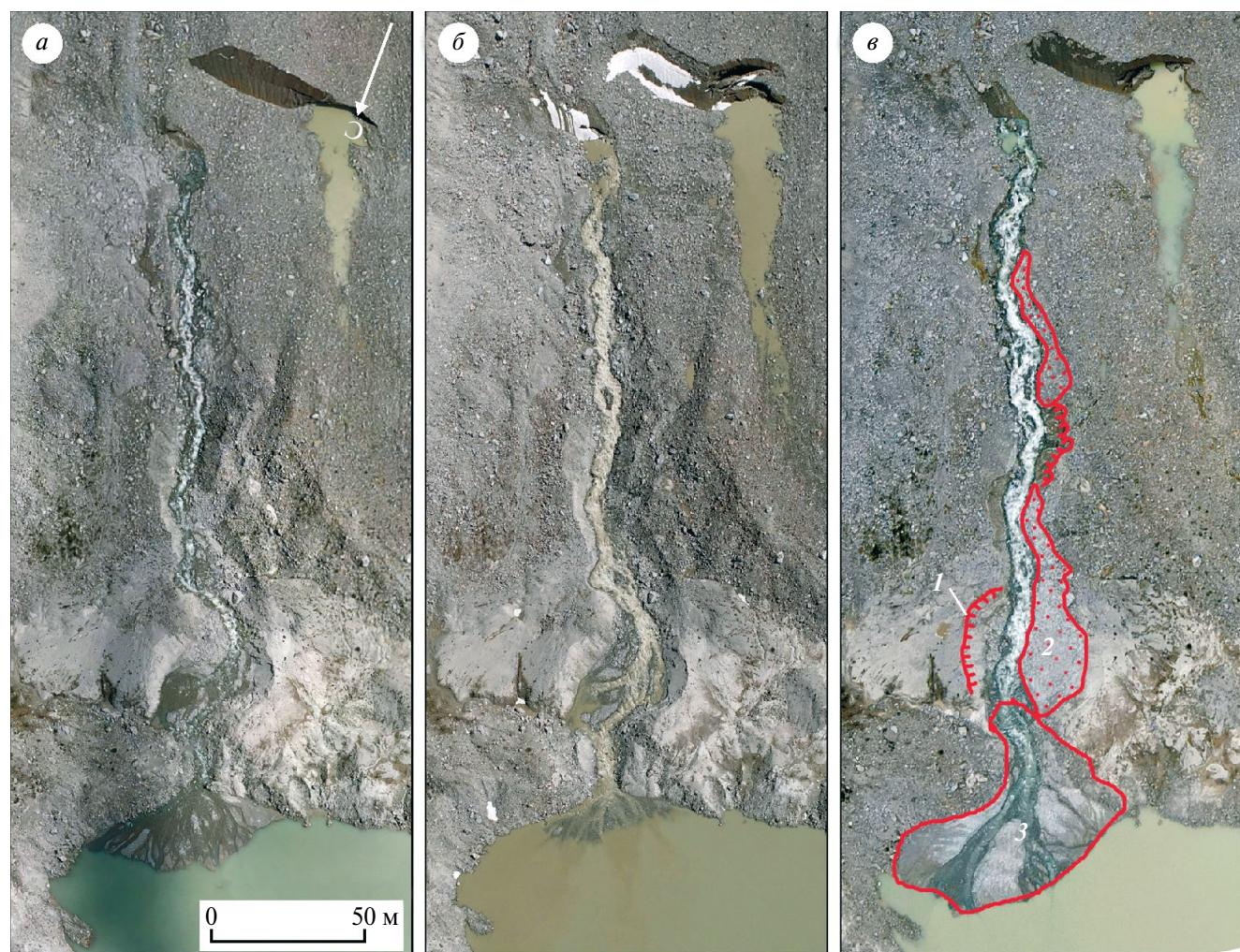


Рис. 4. Участок притока воды в озеро Башкара (фрагменты ортофотопланов): 05.08.2023 (*а*), 06.06.2024 (*б*), 29.06.2024 (*в*). 1 – бровки эрозионных откосов, 2 – селевые отложения, 3 – дельта (конус выноса)

Fig. 4. The area of water inflow into Bashkara Lake (fragments of orthophotoplans): 08/05/2023 (*а*), 06/06/2024 (*б*), 06/29/2024 (*в*). 1 – edges of erosion slopes, 2 – debris flow deposits, 3 – delta (fan)

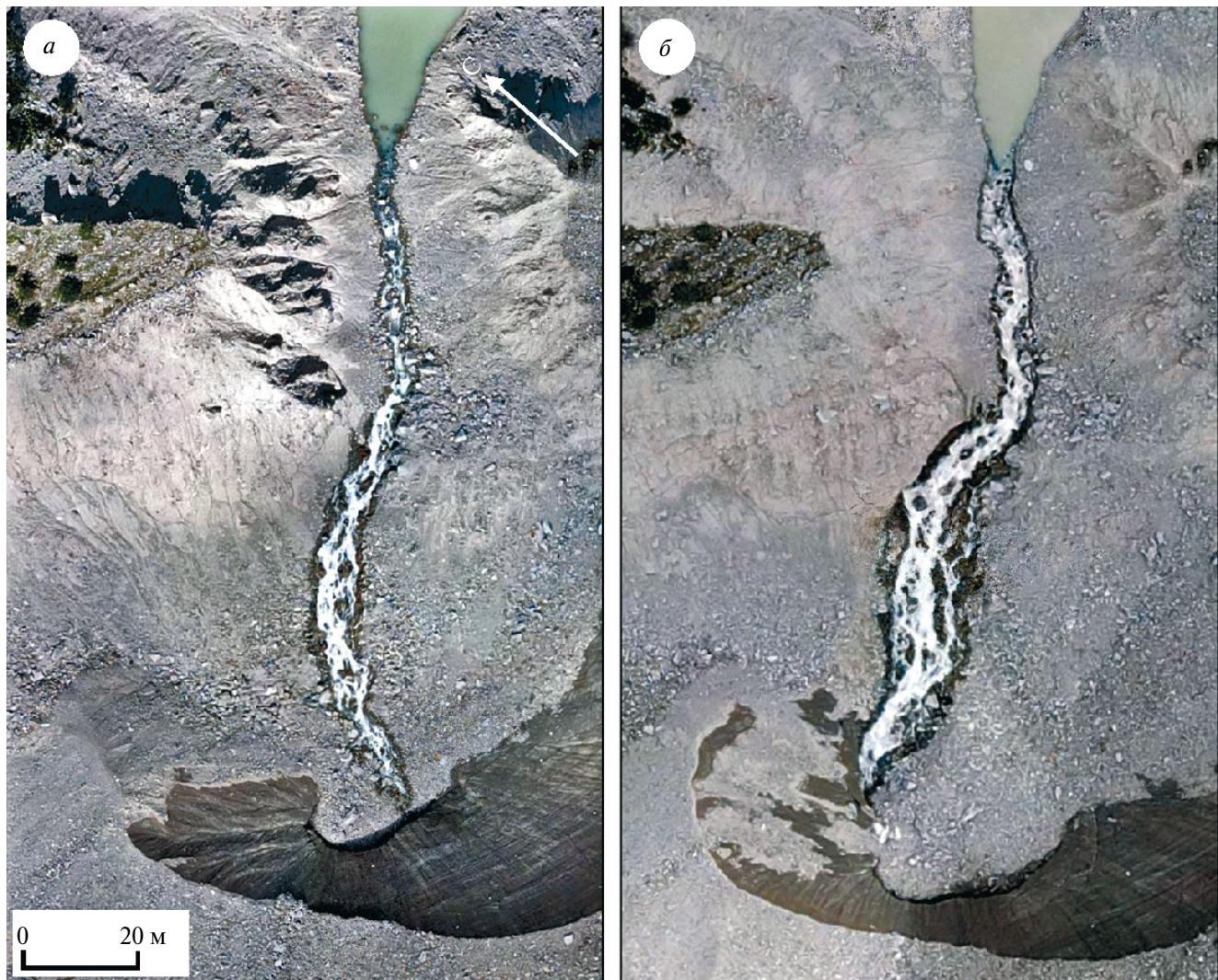


Рис. 5. Участок прорана озера Башкара на ортофотопланах: 05.08.2023 (а), 29.06.2024 (б)

Fig. 5. The section of the dam-break of Bashkara Lake on orthophotoplans: 08/05/2023 (a), 06/29/2024 (b)

Для оценки возможного влияния изменений на леднике Башкара после схода снежно-ледово-каменной лавины с горы Башкара в 2019 г. проведён анализ космоснимков, ортофотопланов и цифровых моделей рельефа разных лет и использована информация о наличии подледных русловых углублений из работы (Лаврентьев и др., 2020) (рис. 6, а).

На участке, обозначенном цифрой 1 (см. рис. 6, а, д, е), отмечено выклинивание подледного углубления (голубой контур), которое затем появляется левее и ниже на расстоянии более 200 м. Скорее всего, это связано с особенностями подледникового рельефа. Для того чтобы оценить распределение обломочного материала снежно-ледово-каменной лавины

2019 г. на поверхности ледника Башкара, показано состояние ледника до и после этой лавины (см. рис. 6, б, в, г). На фрагменте в рис. 6, так как значительная часть отложений снежно-ледово-каменной лавины (2, красный контур) представлена снегом и льдом, не видны контуры массивов обломочного материала. Сравнение фрагментов б и г рис. 6 позволило сделать вывод о том, что обломочный материал распределился неравномерно и в пределах контура зоны поражения снежно-ледово-каменной лавиной есть участки, не покрытые обломочным материалом. Например, дугообразный массив (см. рис. 6, г, д, е, 3) не связан с основной обломочной массой и находится на расстоянии 170 м от неё. В 2024 г. этот массив возвышался над поверхностью ледника на 12 м.

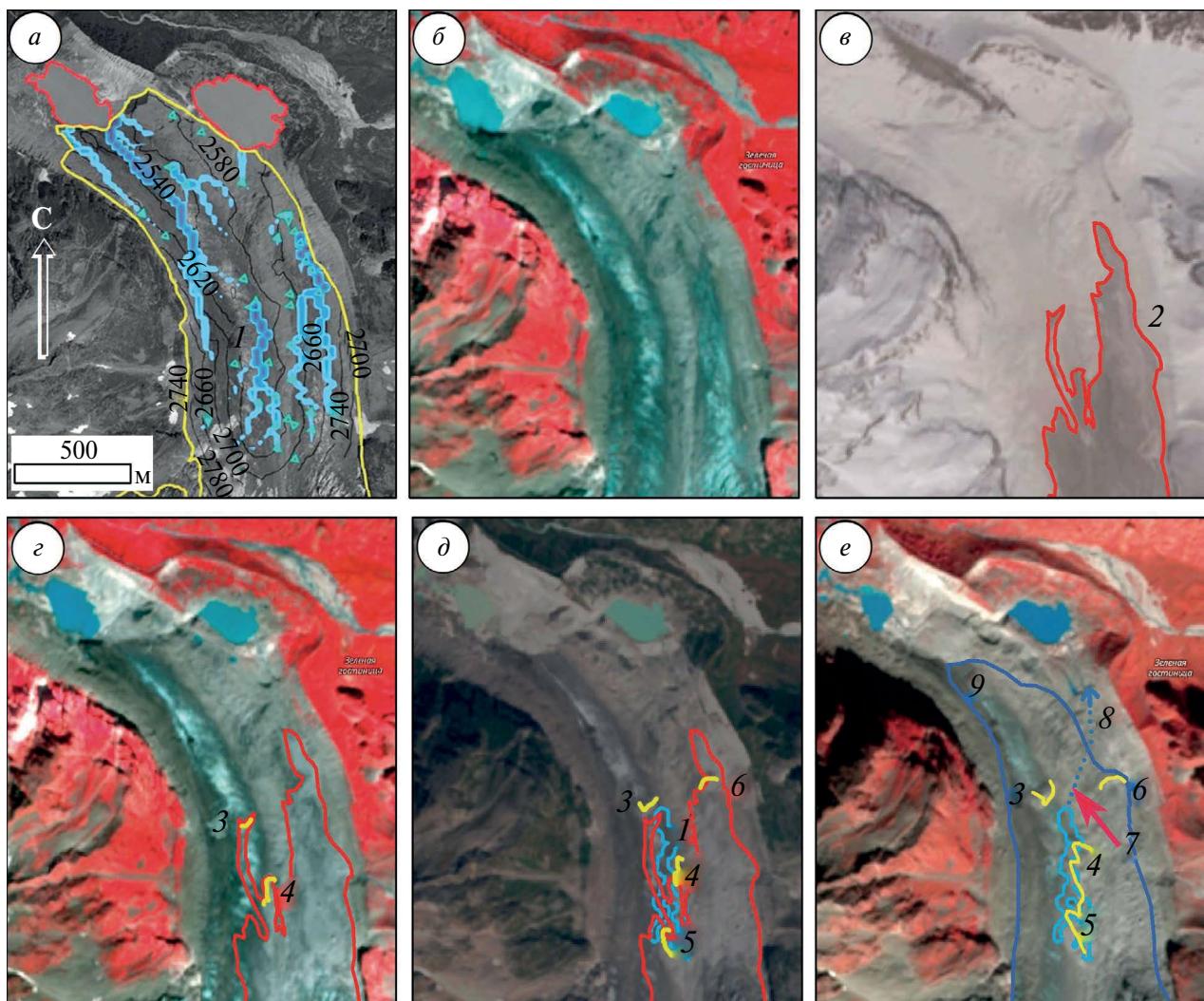


Рис. 6. Изменения на леднике Башкара после схода снежно-ледово-каменной лавины 24.04.2019: космоснимок SPOT-7 01.08.2017 (Лаврентьев и др., 2020) (а), космоснимки Sentinel-2: 31.08.2019 (б), 25.04.2019 (в), 28.08.2019 (г), 30.08.2022 (д), 30.09.2024 (е). 1 – участок выклинивания подледного дренажного канала (данные статьи Лаврентьев и др., 2020) в этом же положении отмечен на фрагментах *д* и *е* (голубой контур); 2 – граница отложений снежно-ледово-каменной лавины 24.04.2019 (на фрагментах *в*, *г*, *д*, красный контур); 3 – отдельный вал отложений снежно-ледово-каменной лавины; 4 и 5 – фронтальные валы левой части отложений снежно-ледово-каменной лавины; 6 – фронтальный вал правой части отложений снежно-ледово-каменной лавины, образовавшийся при движении ледника; 7 – направление смещения правого потока ледника; 8 – предполагаемое направление нового подледникового канала стока (пунктирная линия); 9 – граница активной части ледника Башкара (синий контур). Жёлтые линии на фрагменте *е* – изменившие положение и форму валы, отмеченные на фрагменте *д* (3, 4, 5, 6)

Fig. 6. Changes on the Bashkara Glacier after the snow-ice-rock avalanche on 24.04.2019: satellite image of SPOT-7 08/01/2017 (Lavrentiev et al., 2020) (a), satellite image of Sentinel-2: 08/31/2019 (б), 04/25/2019 (в), 08/28/2019 (г), 08/30/2022 (д), 09/30/2024 (е). 1 – the section of the subglacial drainage channel wedging (data from Lavrentiev et al., 2020) in the same section is marked on fragments *д* and *е* (blue outline); 2 – the boundary of the snow-ice-rock avalanche deposits on 04/24/2019 (on fragments *в*, *г*, *д*, red outline); 3 – a separate line of the snow-ice-rock avalanche deposits; 4 and 5 – the frontal line of the left part of the snow-ice-rock avalanche deposits; 6 – the frontal line of the right part of the branches of the snow-ice-rock avalanche formed during the movement of the glacier; 7 – the direction of displacement of the right flow of the glacier; 8 – the expected direction of the new subglacial drainage channel (dotted line); 9 – the boundary of the active part of the Bashkara glacier (dark blue outline). The yellow lines on fragment *е* are the lines that have changed their location and shape, marked on fragment *д* (3, 4, 5, 6)

Обращает на себя внимание расположение и изменение обломочного вала *б* с высотой фронтального уступа 15–16 м на рис. 6, *д, е*. Ниже этого вала, по данным сравнения нескольких разновременных космоснимков движения ледника, не выявлено, и этот нижележащий массив можно считать мёртвым льдом. На его поверхности отложилась часть обломочной массы снежно-ледово-каменной лавины. Вал *б* появился в период 2022–2024 гг. в результате давления правого потока льда ледника Башкара, усилившегося после отложения обломочного материала снежно-ледово-каменной лавины, на массив мёртвого льда. Левая часть вала заметно выпрямилась в 2023–2024 гг., что свидетельствует о смещении массы ледника влево от осевой линии. Направление движения показано стрелкой на рис. 6, *е*. В эту сторону смещались и массы валов *4* и *5*.

Таким образом, предположено, что наличие преграды из массива мёртвого льда с увеличившейся массой обломков от лавины впереди правого потока льда, а также замедлившееся, вследствие образования обломочного чехла, таяние правого потока льда привели к изменению вектора его перемещения и давлению на левый поток льда на участке, где выклинивалось углубление подледникового русла. В результате изменилось направление подледникового потока талых вод, что отмечено пунктирной линией (см. рис. 6, *е, 8*), и увеличился приток воды в озеро Башкара.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обычная реакция ледников на изменение климата характеризуется ускорением темпов деградации. Расположенные на низких абсолютных высотах концы долинных ледников отступают особенно быстро. За период 2014–2024 гг. наибольшее отступание зафиксировано у ледника Бирджалычиран на склоне Эльбруса – 1050 м, ледник Карагум отступил на 725 м. На этом фоне крупнейший долинный ледник Кавказа Безенги, конец которого расположен на высоте около 2150 м, при почти полном отсутствии отступания является исключением, что можно объяснить влиянием недавно образовавшегося обломочного чехла селевых отложений, замедляющего таяние ледника во фронтальной зоне. Этот феномен интересен ещё и тем, что правая часть ледника с обломочным чехлом смещается в сторону и воздействует на подледниковую

дренажную систему, изменяя направление каналов подледникового стока.

Для ледника Башкара не прошёл бесследно сход снежно-ледово-каменной лавины в апреле 2019 г., массы которой не долетели до оз. Башкара. Через 5 лет после лавины оз. Башкара снова напомнило о себе, испытав сход селевого потока, выплеснувшегося из подледникового канала ледника Башкара. В этом случае изменилось соотношение в динамике двух потоков льда, один из которых, усилившийся под влиянием обвального обломочного чехла, воздействовал на другой, и в результате изменилось направление подледникового стока с выбросом мощного водного импульса в озеро.

Ранее на процессе влияния обвалов на динамику ледников акцентировалось внимание в работах (Савернюк, 2012; Докукин и др., 2020а; Докукин и др., 2022); в них показано, что после обвалов на поверхность ледников через определённый период времени происходит их наступление. Левый поток ледника Бартуцете после обвала в 1959 г. начал наступать в 1975 г., когда обвальные отложения обёмом около 2 млн м³ сместились к фронту левого потока. При этом правый поток ледника в это время сокращался и освобождал место для усилившегося левого потока, который в итоге стал фронтальной частью ледника, хотя ранее он отстоял от фронта на расстоянии около 800 м. В итоге ледник Бартуцете с 1975 г. практически не отступал. Наступление ледника Шермана на Аляске в XXI в. происходило после обвала в 1964 г.

Сложная система взаимодействия потоков льда с обвальным чехлом образовалась в цирке Девдоракского ледника после ледово-каменного обвала в 2014 г., значительная масса которого аккумулировалась на леднике Шантор – правой ветви бывшего правого притока Девдоракского ледника на склоне горы Казбек, который, наступая, накрыл собой поверхность Девдоракского ледника. Последний, отягощённый обвальными отложениями и телом ледника Шантор, продолжал наступать в 2024 г. И поскольку конец ледника расположен на крутом скальном уступе, в результате ускорения движения и наступления ледника с обвальным чехлом происходят частые обвалы льда с дальностью выброса на большие расстояния. После обвала скальных пород в 2019 г. на правую часть ледника Шантор активизировались обвалы льда с дальностью выброса до 2 км и более.

В 2002 г. обвалы висячих ледников и скальных пород способствовали сходу ледника Колка (Ледник Колка, 2014). После нескольких каменных лавин произошёл сход ледника Седонгпу в Юго-Восточном Тибете в 2018 г. (Kääb et al., 2021).

Таким образом, примеры различной реакции ледников на появление обломочного чехла на поверхности в результате обвалов или сходов селевой массы показывают, что в зависимости от расстояния участка обвального чехла до конца ледника наступление ледника может происходить не только через 3–5 лет, как в случае ледников Безенги и Шантон, но и через довольно длительный период (до 15 лет и более).

В связи с этим в будущем можно предположить изменения в динамике ледника Джанкуат, верхняя часть которого в цирке ледника Лекзири на южном склоне Главного Кавказского хребта в значительной степени была погребена под мощным обломочным чехлом обвала с горы Башкара в ноябре 2019 г. За пять лет фронт обвальных отложений, диагностируемый только по форме рельефа поверхности ледника и почти не различимый даже летом, прошёл около 180 м не в сторону ледника Лекзири, а в направлении ледника Джанкуат и отстоит от конца ледника Джанкуат на расстоянии около 2.5 км.

Образование обвального чехла в области аккумуляции ледника долгое время будет замаскировано накоплениями снежно-firново-ледяных масс и может проявиться только на выходе масс ледника в область абляции. Подобным образом происходил процесс наступления ледника Уилпата в долине р. Цеядон в республике Северная Осетия – Алания, когда обломочный чехол, проявившийся в области абляции в 1980-х годах, уже приобрёл вид фронтального вала и активная обломочно-ледяная масса стала вовлекать в движение мёртвый лед во фронтальной зоне. В таких случаях важен непрерывный мониторинг ледниковых цирков в зимнее время.

ВЫВОДЫ

Со временем, в связи с продолжающимся потеплением климата, реакция ледников на появление обвального чехла в виде наступления ледников и формирования обвалов льда на крутых скальных уступах может чаще сопровождаться резкими изменениями подледниковой дренажной системы с последствиями в виде паводков и селевых потоков, а возможно и сходов ледников.

Для того чтобы своевременно выявлять потенциальные угрозы развития опасных обвальных, гляциальных и гидрологических процессов в приледниковой зоне, необходима организация комплексного мониторинга, включающего анализ разновременных космоснимков, проведение аэрофотосъёмок и радиолокационных съёмок, а также разработка и совершенствование моделей реакции ледников на воздействия обвалов и селевых потоков.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках темы 2.12 Плана НИТР Росгидромета. Авторы выражают признательность ГУ МЧС России по Кабардино-Балкарской Республике за предоставленные материалы аэрофотосъёмки озёрно-ледникового комплекса Башкара 06.06.2024 г.

Acknowledgements. The study was carried out within the framework of topic 2.12 of the Roshydromet Research Plan. The authors express their gratitude to the Ministry of Emergency Situations of Russia in the Kabardino-Balkarian Republic for providing aerial photography materials of the Bashkara Lake and glacier complex on 06.06.2024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Ташилова А.А. Современная деградация долинных ледников Центрального Кавказа // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 8. № 3. С. 113–141.
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-3-113-141>
- Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Черноморец С.С., Савернок Е.А. Активизация обвалов на Центральном Кавказе и их влияние на динамику ледников и селевые процессы // Лёд и Снег. 2020а. Т. 60. № 3. С. 361–378.
<https://doi.org/10.31857/S2076673420030045>
- Докукин М.Д., Калов Р.Х., Черноморец С.С., Гяургивев А.В., Хаджиев М.М. Снежно-ледово-каменная лавина на леднике Башкара в ущелье Адыл-Су (Центральный Кавказ) 24 апреля 2019 года // Криосфера Земли. 2020б. Т. 24. № 1. С. 64–70.
https://earthcryosphere.ru/arch/2020-1/dokukin_2020_1/
- Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернок Е.А., Черноморец С.С. Условия и механизмы прорывов Башкаринских озёр в долине р. Адыл-су (Центральный Кавказ) // Современные проблемы геологии, геофизики и геэкологии Северного Кавказа: коллективная монография по материалам X Всероссийской науч.-технич. конф.: В 2 ч. Т. X. Ч. 2. Грозный, 2020в. С. 369–375.
- Докукин М.Д., Савернок Е.А., Черноморец С.С., Шагин С.И. Активность обвалов на участке Казбек-

- ско-Джимарайского горного узла после катастроф на ледниках Колка и Девдораки в 2002 и 2014 годах // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии: коллективная монография / Науч. ред. В.Б. Заалишвили. Владикавказ, 2022. С. 389–394.
- Керимов А.М., Керимов А.А., Хутуев А.М.* Динамика языковых частей долинных ледников Безенги и Мижириги с конца XX в. // Изв. Кабардино-Балкарского науч. центра РАН. 2014. № 4 (60). С. 29–36.
- Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Никитин С.А.* Ледники в горах России (Кавказ, Алтай, Камчатка) в первой четверти XXI века // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. № 2. С 157–173. <https://doi.org/10.31857/S2076673423020114>
- Лаврентьев И.И., Петраков Д.А., Кутузов С.С., Коваленко Н.В., Смирнов А.М.* Оценка потенциала развития ледниковых озёр на Центральном Кавказе // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 3. С. 343–360. <https://doi.org/10.31857/S2076673420030044>
- Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра / Ред. Ю.Г. Леонов, В.В. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофиз. исследований Владикавказ. науч. центра РАН и Республики Северной Осетии – Алании, 2014. 432 с.
- Мачерет Ю.Я., Глазовский А.Ф.* Формирование и развитие дренажных систем в ледниках // Лёд и Снег. 2011. № 3. С. 23–40.
- Панов В.Д.* Режим и эволюция современного оледенения бассейна р. Черек Безенгийский. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 135 с.
- Постникова Т.Н., Рыбак О.О., Губанов А.С., Зеколлари Х., Хусс М.* Математическое моделирование ледников Эльбруса в XXI в. Ч. 2. Прогноз эволюции ледников и формирования озёр при разных сценариях SSP // Лёд и Снег. 2024. № 3. С. 326–344. <https://doi.org/10.31857/S2076673424030021>
- Резепкин Г.А., Поповнин В.В.* О влиянии поверхностной морены на состояние ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) к 2025 г. // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 3. С. 307–321. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-307-321>
- Савернюк Е.А.* Особенности морфологии и динамики обвальных отложений на леднике Бартуйцете (Республика Северная Осетия – Алания) // Тр. Высокогорного геофиз. ин-та. 2012. Вып. 97. С. 36–40.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М.* Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 2. С. 70–80. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(70-80](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80)
- Sentinel-hub // Электронный ресурс. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/ eo-browser/> (Дата обращения: 10.02.2025).
- Kääb A., Jacquemart M., Gilber A., Leinss S., Girod L., Huggel Ch., Falaschi D., Ugalde F., Petраков D., Chernomorets S., Dokukin M., Paul F., Gascoin S., Berthier E., Kargel J.S.* Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers – more frequent than thought? // Cryosphere. 2021. V. 15. № 4. P. 1751–1785. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1751-2021>
- Pavlyukevich E.D., Krylenko I.N., Krylenko I.V.* Modern evolution and hydrological regime of the Bashkara Glacier Lakes system (Central Caucasus, Russia) after the outburst on September 1, 2017 // Geography, Environment, Sustainability. 2024. V. 17. № 4. P. 66–75. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3717>
- Postnikova T., Rybak O., Gubanov A., Zekollari H., Huss M., Shahgedanova M.* Debris cover effect on the evolution of Northern Caucasus glaciers in the 21st century // Frontiers in Earth Science. 2023. V. 11. № 1. P. 1–22. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1256696>
- Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E., Paul F.* Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020 // The Cryosphere. 2022. V. 16. № 2. P. 489–504. <https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022>
- Tielidze L.G., Iacob G., Holobâcă I.H.* Mapping of supra-glacial debris cover in the Greater Caucasus: a semi-automated multi-sensor approach // Geosciences. 2024. V. 14. № 7. 178. <https://doi.org/10.3390/geosciences14070178>

Citation: Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Akaev A.R. Features of the dynamics of Bezengi and Bashkara glaciers with a debris cover in the Central Caucasus. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2025, 65 (3): 397–410. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525030033

Features of the Dynamics of Bezengi and Bashkara Glaciers with a Debris Cover in the Central Caucasus

© 2025 M. Yu. Bekkiev, M. D. Dokukin[#], R. Kh. Kalov, A. R. Akaev

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia

[#]e-mail: inrush@bk.ru

Received February 10, 2025; Revised April 3, 2025; Accepted June 26, 2025

Based on the analysis of satellite images and aerial photography, the study revealed the formation of a debris cover of mudflow and landslide deposits on the surface of the Bezengi Glacier in 2016–2018 and the Bashkara glacier in 2019 in the Central Caucasus. It was found that while the main part the Bezengi glacier tongue was retreating, its right part under the debris cover continued to move forward and, in addition, began to shift to the left to the centerline. The right part of the glacier, which accelerated the movement, began to deform the proluvial/colluvial fan on the slope of the lateral moraine on a distance longer 600 m, with the formation of cracks and falls of the debris mass to the foot of the slope. The source of the Cherek-Bezengiysky River has shifted from the left side of the glacier to the right side and down the valley for a distance of 280 m in the period 2022–2024. As a result of the involvement of dead ice mass in the movement, in 2024 the Bezengi glacier terminus was at the same place that it was in 2014. After the snow-ice-rock avalanche on the surface of the Bashkara Glacier, the dynamics of its right flow changed. Below it there is a significant frontal mass of dead ice, which is not capable of engaging in motion. Therefore, the ice flow began to shift to the left, affecting the main left ice flow. As a result, in 2024, there was a change in the direction of the subglacial channel of meltwater runoff, the main part of which flowed towards Lake Bashkara, increasing its water inflow. This in the debris flow release into the lake and then to a change in the channel on the dam-break section below the Bashkara Lake with partial undercutting of its slopes. Due to that a threat of erosion of the bottom of the dam-break and a new outburst of the Bashkara Lake became quite probable. The events of 2024 in the areas of the terminus parts of the Bezengi and Bashkara glaciers showed that against the background of the ongoing degradation of glaciers, extraordinary events are still possible being caused by the restructuring of the subglacial drainage system in several years after the formation of a debris cover on the glaciers due to rock avalanches or debris flows.

Keywords: Bezengi Glacier, rock avalanche, debris flow, Bashkara Lake, debris cover, glacier advance, subglacial channel

REFERENCES

- Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Tashilova A.A. Modern degradation of valley glaciers in the Central Caucasus. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya. Fundamental and applied climatology.* 2021, 8 (3): 113–141. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-3-113-141> [In Russian].
- 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.* 2020a, 60 (3): 361–378.
- 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.* 2020b, 24 (1): 67–70. https://earthcryosphere.ru/arch/2020-1/dokukin_2020_1/ [In Russian].
- Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S. Conditions and mechanisms of outburst of Bashkara lakes in the valley of

<https://doi.org/10.31857/S2076673420030045>
[In Russian].

- the river Adyl-su (Central Caucasus). *Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza: kollektivnaya monografiya po materialam X Vse-rossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii: V 2 ch. T. X. Ch. 2. Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus: a collective monograph based on the materials of the X All-Russian Scientific and Technical Conference: in 2 parts. V. 10. Pt. 2. Grozny, 2020b: 369–375* [In Russian].
- Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S., Shagin S.I.* Avalanche activity in the Kazbek-Jimara mountain junction area after the disasters on the Kolka and Devdoraki glaciers in 2002 and 2014. *Opasnye prirodnye i tekhnogennye processy v gornyh regionah: modeli, sistemy, tekhnologii: kollektivnaya monografiya.* Dangerous natural and technogenic processes in mountain regions: models, systems, technologies: a collective monograph. Scientific ed. V.B. Zalishvili. Vladikavkaz, 2022: 389–394 [In Russian].
- Kerimov A.M., Kerimov A.A., Khutuyev A.M.* Dynamics of the protruding parts of the trough (valley) glaciers Bezengi and Mizhirgi from the end of XX century. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN.* News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS. 2014, 60 (4): 29–34 [In Russian].
- Kotlyakov V.M., Khromova T.Y., Nosenko G.A., Muraev A.Y., Nikitin S.A.* Glaciers in the Russian Mountains (Caucasus, Altai, Kamchatka) in the First Quarter of the 21st Century. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2023, 63 (2): 157–173.
<https://doi.org/10.31857/S2076673423020114> [In Russian].
- Lavrentiev I.I., Petrakov D.A., Kutuzov S.S., Kovalenko N.V., Smirnov A.M.* Assessment of glacier lakes development potential in the Central Caucasus. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2020, 60 (3): 343–360.
<https://doi.org/10.31857/S2076673420030044> [In Russian].
- Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra.* The Kolka Glacier: Past, Present, Future. Vladikavkaz: Federal State Budgetary Institution of Science Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and the Government of the Republic of North Ossetia – Alania. 2014: 432 p. [In Russian].
- Macheret Yu.Ya., Glazovskij A.F.* Formation and development of drainage systems in glaciers. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2011, 115 (3): 23–40 [In Russian].
- Panov V.D.* *Rezhim i evolyuciya sovremennoj oledeneniya bassejna r. Cherek Bezengijskij.* Regime and evolution of modern glaciation of the Cherek Bezengijsky River basin. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1978: 135 p. [In Russian].
- Postnikova T.N., Rybak O.O., Gubanov A.S., Zekollari H., Huss M.* Mathematical modeling of Elbrus glaciers in the 21st century. Part 2. Forecasting glacier evolution and lake formation under various SSP scenarios. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2024, 64 (3): 326–344.
<https://doi.org/10.31857/S2076673424030021> [In Russian].
- Rezepkin A.A., Popovnin V.V.* Influence of the surface moraine on the state of Djankuat Glacier (Central Caucasus) by 2025. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2018, 58 (3): 307–321.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-307-321> [In Russian].
- Savernyuk E.A.* Morphology and dynamics of rock avalanche deposits on the Bartuitsete Glacier (Republic of North Ossetia – Alania). *Trudy VGI. Proc. of the Highland Geophysical Institute.* 2012, 97: 36–40. [In Russian].
- Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Aleynikov A.A., Bekkiev M.Y., Viskhadzhieva K.S., Dokukin M.D., Kallov R.K., Kidyaeva 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. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere.* 2018, 22 (2): 70–80. https://earthcryosphere.ru/arch/2018-2/chernomorets_2018-2/ [In Russian].
- Sentinel-hub: official site. Retrieved from: URL: <https://apps.sentinel-hub.com/ eo-browser/> (Last access: February 10, 2025).
- Kääb 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.S.* Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers – more frequent than thought? *Cryosphere.* 2021, 15 (4): 1751–1785.
<https://doi.org/10.5194/tc-15-1751-2021>
- Pavlyukevich E.D., Krylenko I.N., Krylenko I.V.* Modern evolution and hydrological regime of the Bashkara Glacier Lakes system (Central Caucasus, Russia) after the outburst on September 1, 2017. *Geography, Environment, Sustainability.* 2024, 17 (4): 66–75.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3717>
- Postnikova T., Rybak O., Gubanov A., Zekollari H., Huss M., Shahgedanova M.* Debris cover effect on the evolution of Northern Caucasus glaciers in the 21st century. *Frontiers in Earth Science.* 2023, 11 (1): 1–22.
<https://doi.org/10.3389/feart.2023.1256696>
- Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E., Paul F.* Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020. *The Cryosphere.* 2022, 16 (2): 489–504.
<https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022>
- Tielidze L.G., Iacob G., Holobâcă I.H.* Mapping of supra-glacial debris cover in the Greater Caucasus: a semi-automated multi-sensor approach. *Geosciences.* 2024, 14 (7): 178.
<https://doi.org/10.3390/geosciences14070178>