СТАТЬЯ

УДК 551.332.56
DOI 10.17513/use.38385

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ОЗЕР У ЛЕДНИКА БАШКАРА (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАВКАЗ) В 2023–2024 ГГ.

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Акаев А.Р.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик, e-mail: inrush@bk.ru

В условиях изменения климата и деградации ледников возникает большое количество ледниковых озер с угрозой их катастрофического прорыва. На Кавказе в долине реки Адылсу происходили прорывы озер у ледника Башкара в 1958, 1959, 1960 и 2017 гг. В последние годы произошли значительные изменения этих озер, и в 2024 г. наблюдался повышенный приток воды с ледника в озеро Башкара, что создало прорывоопасную обстановку. Целью исследования является оценка состояния озер у ледника Башкара в период увеличения притока воды в озеро Башкара и их динамики за 2017–2024 гг. Была проведена аэрофотосъемка с применением квадрокоптера 29.06.2024 и для сравнения использованы ортофотопланы и цифровые модели рельефа предыдущих аэрофотосъемок 2017 и 2023 гг. Выявлены значительное увеличение площади Башкара и уменьшение площади озера Лапа. На участке притока воды в озеро Башкара обнаружены следы прохождения селевого потока. Селевой режим наблюдался также на участке прорана на выходе с озера Башкара. В результате анализа материалов аэрофотосъемок был сделан вывод об изменении направления подледного канала стока с ледника Башкара и возможном повторном прорыве озера Башкара. Во избежание повторения прорыва озера Башкара в будущем предложено отвести водный поток с ледника, который питает озеро, влево, минуя озеро, путем прокопа на участке моренной перемычки минимальной высоты.

Ключевые слова: ледник Башкара, озеро Башкара, озеро Лапа, проран, селевой поток, подледниковая дренажная система

FEATURES OF THE DYNAMICS OF LAKES NEAR THE BASHKARA GLACIER (CENTRAL CAUCASUS) IN 2023-2024

Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Akaev A.R.

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, e-mail: inrush@bk.ru

In the conditions of climate change and glacier degradation, a large number of glacial lakes are emerging with the threat of their catastrophic outburst. In the Caucasus, in the Adylsu River valley, there were outbursts of lakes near the Bashkara glacier in 1958, 1959, 1960 and 2017 with catastrophic consequences. In recent years, there have been significant changes in these lakes and in 2024 there was an increased inflow of water from the glacier into Lake Bashkara, which created a dangerous situation. The purpose of the study is to assess the condition of lakes near the Bashkara glacier during the period of increased water inflow into Lake Bashkara and their dynamics for 2017–2024. Aerial photography was carried out using a quadcopter on 06/29/2024 and orthophotoplanes and digital terrain models from previous aerial surveys in 2017 and 2023 were used for comparison. Orthophotoplanes and digital terrain models of previous aerial surveys were used for comparison. A significant increase in the area of Bashkara and a decrease in the area of Lapa Lake were revealed. Traces of a debris flow have been identified in the area of the inflow of water into Bashkara Lake. A debris flow regime was also observed at the proran site at the outlet of Bashkara Lake. As a result of the analysis of aerial survey materials, a conclusion was made about a change in the direction of the subglacial runoff channel from the Bashkara glacier and a possible re-outburst of Bashkara Lake. In order to avoid a repeat of the Lake Bashkara outburst in the future, it is proposed to divert the water flow from the glacier that feeds the lake to the left, bypassing the lake, by digging a channel in the area of the minimum height of the moraine ridge.

Keywords: Bashkara glacier, Bashkara Lake, Lapa Lake, proran, debris flow, subglacial drainage system

Введение

В условиях изменения климата и деградации ледников во всем мире увеличивается количество ледниковых озер и возрастает опасность их прорыва. По данным обобщающего исследования, в настоящее время 15 млн человек проживают в зоне возможного поражения прорывными паводками и селями [1]. Одним из последних катастрофических событий был прорыв озера Лхонак Южное в Сиккиме 03.10.2023, в результате которого погибли 169 человек [2]. Перед ледником Башкара в долине р. Адылсу бассейна р. Баксан на Центральном Кавказе существуют озера Башкара и Лапа, испытавшие прорыв с прохождением разрушительного селевого потока по р. Адылсу и далее по р. Баксан 1 сентября 2017 г. [3]. Известно, что ранее прорывы озер происходили в 1958, 1959 и 1960 гг. [4, с. 116].

По данным анализа аэрофотоснимков был сделан вывод о том, что прорывы в середине XX в. происходили по подледному каналу стока с озера Башкара в процессе его формирования и прекратились после образования устойчивого постоянного подлед-

ного канала стока. Затем длительное время состояние озера было стабильным до тех пор, пока при наступании ледника Башкара в 1990-х годах не сформировался новый моренный вал, перекрывший поверхностный сток с озера [5]. С этого момента сток с озера в основном осуществлялся по подземным фильтрационным каналам, и уровень воды в озере испытывал сезонные колебания, достигавшие 1,5–2,0 м [6], в случаях с переливом воды через моренный вал повышение уровня достигало 4 м и более [7]. В многочисленных исследованиях озер Башкара отмечалась опасность прорыва озера [4, с. 120; 6; 8, с. 144]. Но прорыв 1 сентября 2017 г., несмотря на все прогнозы, стал неожиданностью и случился после выпадения аномальных осадков 45 мм и 98 мм [3]. Они вызвали цепочку процессов: на леднике Башкара возникли потоки, которые аккумулировались в подледниковой полости и прорвались со сходом селя в озеро и прохождением селевой волны по озеру, которая быстро размыла перемычку, и дальше по долине прошел катастрофический селевой поток [5]. В дальнейшем были проведены моделирования прорывного паводка и селевого потока [9, 10] и оценка изменений озер и гидрологического режима [11]. 24.04.2019 был выявлен факт и проведена оценка последствий схода снежно-ледово-каменной лавины на ледник Башкара [12].

В 2023–2024 гг. в ФГБУ «ВГИ» были проведены аэрофотосъемки ледниково-озерного комплекса Башкара. Уже в начале июня 2024 г. выявлен аномально высокий приток воды в озеро Башкара и изменилось состояние озер. Возникла необходимость оценки этого процесса и сравнения с событиями 2017 г.

Целью исследования является оценка состояния озер у ледника Башкара в период увеличения притока воды в озеро Башкара в 2024 г. и их динамики за 2017–2024 гг.

Материал и методы исследования

Для анализа были выбраны ортофотопланы аэрофотосъемок ФГБУ «ВГИ» с использованием квадрокоптера DJI Mavic Air 2 озер у ледника Башкара 05.08.2023, 22.10.2023 и 29.06.2024, а также 06.06.2024 (аэрофотосъемка ГУ МЧС России по КБР, квадрокоптер DJI Phantom 4) и 08.10.2017 (МГУ, квадрокоптер DJI Phantom 4). Разрешение ортофотопланов, построенных в программе Agisoft Metashape Professional, составляло около 0,10–0,13 м на пиксель. Вследствие того что расхождения в плане между ортофотопланами составляли от 0,7 до 5,0 м, их привязывали по опорным точкам в программе ArcMap, в которой затем строили векторные слои контуров озер и определяли линейные и площадные параметры в системе координат WGS84 проекции UTM. Методы обработки материалов аэрофотосъемок подробнее представлены в работе [13].

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнение ортофотопланов и космоснимка Sentinel-2 28.08.2017 показало изменения, произошедшие с озерами Башкара и Лапа за период 2017–2024 гг. На рисунках 1 и 2 показаны контуры озер на ортофотопланах 08.10.2017 и 29.06.2024.

Данные площади озер Башкара и Лапа в разные годы представлены в таблице.

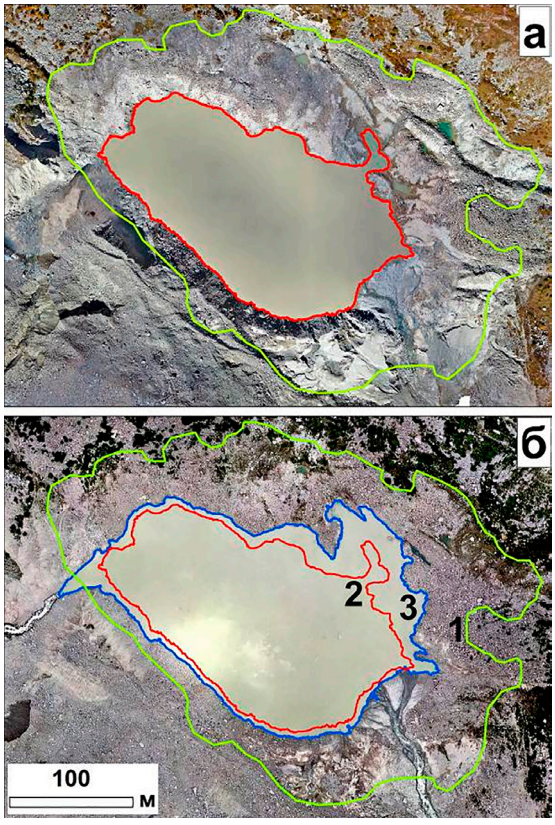

Рис. 1. Контуры озера Башкара на ортофотопланах: а – 08.10.2017, б – 29.06.2024. 1 – контур озера до прорыва по космоснимку Sentinel-2 28.08.2017, 2 – контур озера 08.10.2017, 3 – контур озера 29.06.2024 Источник: составлено авторами с использованием материалов съемки МГУ 2017 г.

Таблица 1

Площади озер Башкара и Лапа в разные годы

Озеро	Площадь озера на соответствующую дату, тыс. м^2				
	28.08.2017	08.10.2017	05.08.2023	22.10.2023	29.06.2024
Башкара	79,7	26,4	34,4	32,8	35,0
Лапа	58,6	44,7	27,9	21,0	24,5

Источник: составлено авторами.

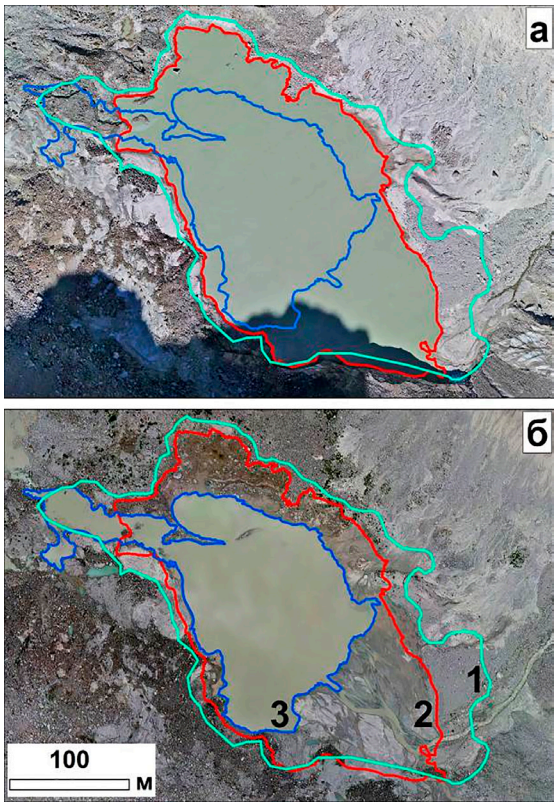

Рис. 2. Контуры озера Лапа на ортофотопланах: а – 08.10.2017, б – 29.06.2024. 1 – контур озера до прорыва по космоснимку Sentinel-2 28.08.2017, 2 – контур озера 08.10.2017, 3 – контур озера 29.06.2024 Источник: составлено авторами с использованием материалов съемки МГУ 2017 г.

После прорыва озер 01.09.2017 наблюдался рост площади озера Башкара вследствие продолжения процесса оползания левого склона прорана и увеличения высоты плотины, а площадь озера Лапа уменьшалась вследствие размыва ледово-моренной перемычки и таяния в ней льда, а также из-за увеличения дельты на участке притока в озеро Лапа. Увеличение площади озера Башкара в 2017–2024 гг. после прорыва составило 8,6 тыс. м^2 (32,6%), уменьшение площади озера Лапа – 20,2 тыс. м^2 (45,2%).

Уровень воды в озере Лапа уменьшился на 4,2 м, а в озере Башкара увеличился на 3,2 м [11]. При этом следует отметить значительное падение уровня воды и уменьшение площади озер в октябре 2023 г.: площадь озера Башкара стала меньше, чем в августе 2023 г., на 1,6 тыс. м^2, а площадь озера Лапа – на 6,9 тыс. м^2 (частично из-за того, что берега были покрыты снегом и часть озера покрыта льдом со свежим снегом, что затруднило проведение границ).

На рисунке 3 показано изменение границ озера Башкара в северо-восточном углу. На фрагменте 22.10.2023 четко видна светлая полоса на участке берега, который 05.08.2023 был под водой. Значительное увеличение площади озера Башкара произошло в 2024 г. Оно видно на рисунке 3 (фрагменты в, г). Уровень озера 06.06.2024 и 29.06.2024 был практически одинаков, но 29.06.2024 на берегу появилась белая полоса только на участке именно северо-восточного угла (рис. 3г). В 2024 г. значительные изменения произошли на участке прорана озера Башкара (рис. 4). Здесь 22.10.2023 поверхностный сток на ортофотопланах был неразличим (рис. 4в), как и 08.10.2017 (рис. 4а). Но наземное обследование показало его наличие – вода стекала между камнями в виде ручья.

В 2024 г. сток с озера был аномальным, как и приток в озеро (рис. 5). На участке прорана в период 06.06.2024 – 29.06.2024 произошло изменение направления стока – он ушел вправо, и вход в подледный канал в массиве мертвого льда сместился на расстояние 30 м от прежнего (рис. 4д). 29.06.2024 перед входом в подледный канал ширина русла составляла 15 м, а 06.06.2025 – около 8 м, в то время как в августе 2023 г. она была 6 м. Наибольшие изменения произошли на участке прорана, где уклон русла резко увеличивался с 9–10° до 20–22°. В этом месте был подрезан правый осыпной склон на протяжении 30 м.

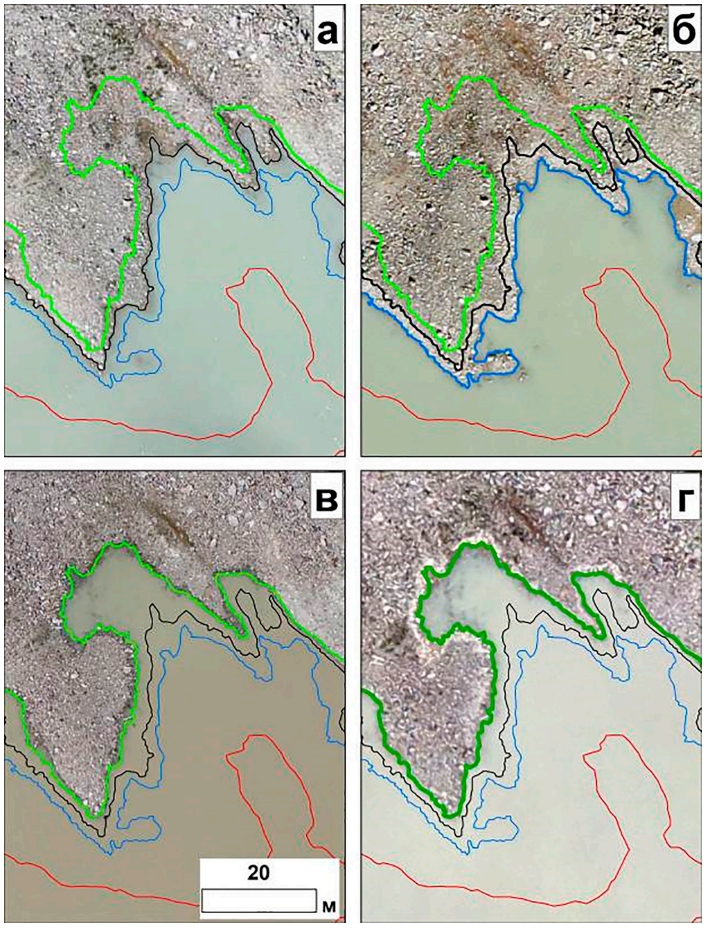

Рис. 3. Границы озера Башкара в северо-восточном углу на фрагментах ортофотопланов: а – 05.08.2023, б – 22.10.2023, в – 06.06.2024, г – 29.06.2024. Береговая линия обозначена цветными линиями: красная 08.10.2017, черная 05.08.2023, синяя 22.10.2023, зеленая 06.06.2024, зеленая утолщенная 29.06.2024 Источник: составлено авторами с использованием материалов съемки 06.06.2024 ГУ МЧС России по КБР

Была проведена оценка изменений на участке притока воды в озеро Башкара (рис. 5). По сравнению с состоянием русла притока воды в озеро Башкара в 2023 г. (рис. 5а) в 2024 г. в течение всего летнего сезона наблюдался увеличенный приток воды – ширина русла увеличилась с 3–4 м до 7–8 м (рис. 5б, 5в). В 2024 г. в отдельные моменты отмечался селевой режим – боковая эрозия (срезан участок старых озерных отложений площадью 500 м^2), два участка новых селевых отложений площадью 350 и 950 м^2 на левом берегу потока и новая дельта (конус выноса) площадью 2300 м^2 (рис. 5в).

По-видимому, так же как в 2017 г. [5], в результате схода селевого потока в озеро по нему проходила селевая волна с сохранением селевого режима в русле прорана ниже озера. Поэтому и появилась светлая полоса на берегу в северо-восточном углу озера (см. рис. 3г). Как следствие селевого режима ниже прорана при впадении в озеро Лапа отложения потока увеличили площадь дельты на 1,4 тыс. м^2. Выявленный длительный процесс увеличенного притока воды в озеро Башкара в течение всего летнего сезона 2024 г. и сход селевого потока с участка правой половины языка ледника Башкара позволили сделать вывод об изменении гидрологического режима ледника Башкара. Ранее гидрологический режим ледника Башкара характеризовался тем, что доля стока с озера Башкара составляла 35%, а стока с ледника Башкара – 65% [11]. С учетов обнаруженных морфологических изменений можно признать, что соотношение между стоком с участка озера Башкара и с языка ледника Башкара поменялось в противоположную сторону.

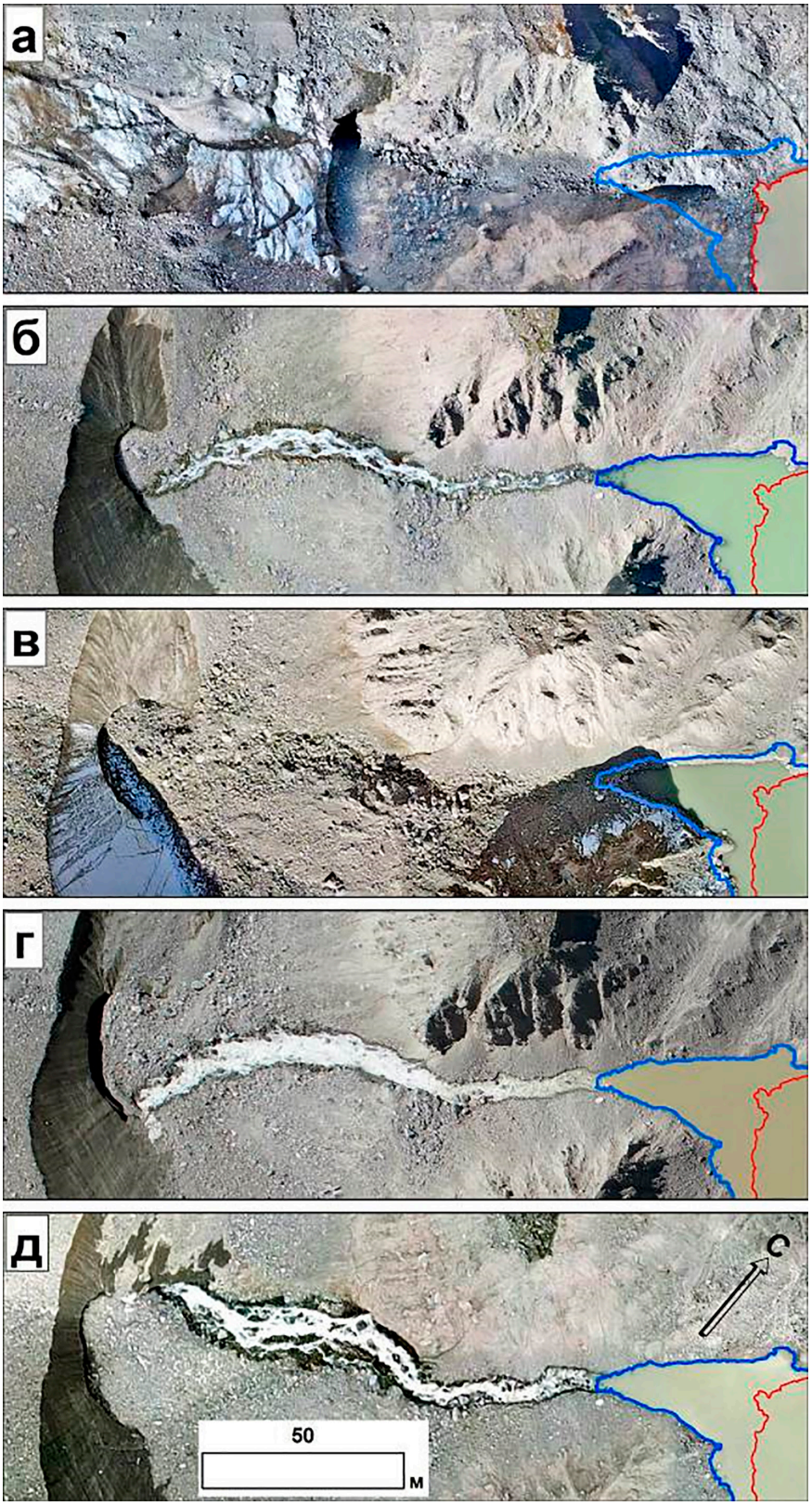

Рис. 4. Участок прорана озера Башкара в разные годы на ортофотопланах: а – 08.10.2017, б – 05.08.2023, в – 22.10.2023, г – 06.06.2024, д – 29.06.2024. Синяя линия – граница озера 29.06.2024, красная линия – граница озера 08.10.2017. Источник: составлено авторами с использованием материалов съемки 08.10.2017 МГУ и 06.06.2024 ГУ МЧС России по КБР

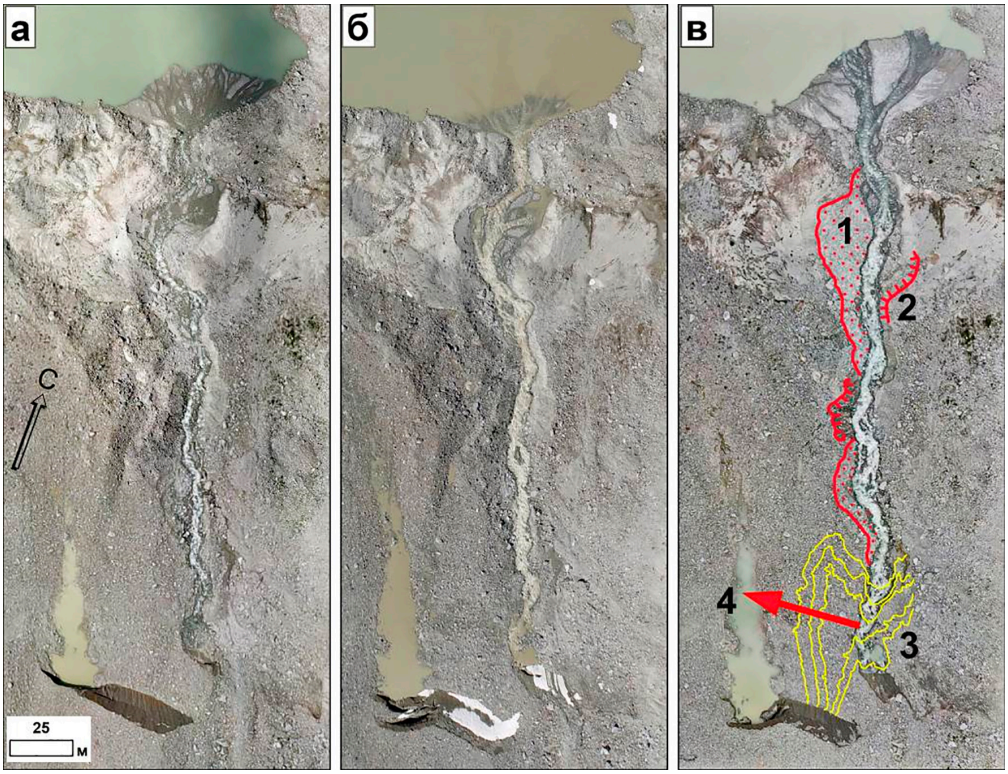

Рис. 5. Участок притока воды в озеро Башкара на ортофотопланах:
а – 05.08.2023, б – 06.06.2024, в – 29.06.2024. 1 – селевые отложения в русловой зоне,
2 – участки боковой эрозии, 3 – горизонтали рельефа сечением 1 м,
4 – направление возможного отвода стока от озера.
Источник: составлено авторами с использованием материалов съемки
06.06.2024 ГУ МЧС России по КБР

Следовательно, в подледной дренажной системе ледника Башкара произошла смена направления русла основного подледного стока талых вод. Раньше выход этого основного канала стока находился у конца языка ледника Башкара, теперь – на участке начала русла притока воды в озеро Башкара. Это – выходной грот у конца массива мертвого льда перед правым активным потоком льда ледника Башкара, берущего начало со склона горы Башкара. 24.04.2019 в основном на этот поток ледника обрушилась снежно-ледово-каменная лавина [12], и в дальнейшем предположительно это стало причиной изменения направления подледного канала стока, так как в результате замедления таяния изменилась динамика правого потока льда.

В случае стабилизации создавшейся в 2024 г. ситуации с увеличенным притоком воды возникает угроза нового прорыва озера Башкара, который может произойти при сочетании аномального таяния ледника в условиях высоких температур воздуха и выпадения аномальных осадков. Новый селевой поток в результате пятящейся эрозии в зоне прорана ниже озера Башкара может привести к размыву оставшейся моренной перемычки и выплеску воды из озера, объем которого составляет около 340 тыс. м^3 [11], но может увеличиться при активизации оползней на подрезанных стенках прорана и увеличении высоты перемычки. Чтобы снизить риск нового прорыва озера Башкара, можно отвести увеличенный водный поток от озера Башкара, сделав прокоп на участке ниже выходного грота с массива мертвого льда (отмечено стрелкой на рисунке 5в), где русло слева сдерживает вал высотой около 1 м, как показывают горизонтали рельефа.

Заключение

Анализ результатов исследования показал, что в современных условиях изменения климата и активизации обвальных процессов происходят резкие изменения в динамике ледников и приледниковых озер, и при этом возникает угроза прорыва озер, длительное время находящихся в стабильном

состоянии. Мониторинг с использованием материалов космосъемок и аэрофотосъемок позволяет выявлять эти изменения и предупреждать о возникновении чрезвычайной ситуации с целью заблаговременно осуществить необходимые мероприятия по снижению риска прорыва озер.

Список литературы

1. Taylor C., Robinson T.R., Dunning S., Carr J.R., Westoby M. Glacial lake outburst floods threaten millions globally // Nature Communications. 2023. Vol. 14. Article 487. DOI: 10.1038/s41467-023-36033-x

2. Zhang T., Wang W., An B. A massive lateral moraine collapse triggered the 2023 South Lhonak Lake outburst flood, Sikkim Himalayas // Landslides. 2024. Vol. 22. P. 299–311. DOI: 10.1007/s10346-024-02358-x.

3. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. 2018. Т. 22, № 2. С. 70–80. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80).

4. Сейнова И.Б., Золотарёв Е.А. Ледники и сели Приэльбрусья (Эволюция оледенения и селевой активности). М.: Научный мир, 2001. 204 с. URL: https://sites.google.com/view/glaciobiblio/книги (дата обращения: 02.02.2025).

5. Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Условия и механизмы прорывов Башкаринских озер в долине р. Адыл-су (Центральный Кавказ) // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Коллективная монография по материалам X Всероссийской научно-технической конференции в 2-ух частях. Т. X. Ч. 2. Грозный: ООО «Формат», 2020. С. 369–375. URL: https://istina.msu.ru/publications/article/343691924/?ysclid=m8zm2fjvas815358139 (дата обращения 02.02.2025).

6. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Тутубалина О.В., Алейников А.А., Тарбеева А.М. Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су (Кавказ) // Криосфера Земли. 2007. Т. XI, № 1. С. 72–84. URL: https://earthcryosphere.ru/archive/2007_1/09.Chernomorets_1_2007.pdf?ysclid=m8zl48yfs3663237207 (дата обращения 02.02.2025).

7. 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. URL: https://www.researchgate.net/publication/294206224_Kolebania_urovna_vody_v_gornyh_lednikovyh_ozerah_Prielbrusa (дата обращения: 02.02.2025).

8. Черноморец С.С. Селевые очаги до и после катастроф. М.: Научный мир, 2005. 184 с. URL: https://istina.msu.ru/publications/book/508508/?ysclid=m8znhiyc4b531122568 (дата обращения: 02.02.2025).

9. Кидяева В.М., Петраков Д.А., Крыленко И.Н., Алейников А.А., Штоффел М., Граф К. Опыт моделирования прорыва Башкаринских озер // Геориск. 2018. Т. 12, № 2. С. 38–46. URL: https://www.geomark.ru/articles/opyt-modelirovaniya-proryva-bashkarin/ (дата обращения: 02.02.2025).

10. Солодова А.С., Петраков Д.А., Пуганов К.А. Моделирование селевого потока при прорыве оз. Башкара в 2017 г. // Лёд и Снег. 2024. Т. 64, № 4. С. 527–542. DOI: 10.31857/S2076673424040043.

11. 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. Vol. 17. № 4. P. 66–75. DOI: 10.24057/2071-9388-2024-3717.

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. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(64-70).

13. Акаев А.Р., Шидугов И.Ж. Применение БПЛА для мониторинга экзогенных процессов в приледниковой зоне (на примере ледника Мижирги) // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XIII / Науч. ред. И.А. Керимов, В.А. Широкова, В.Б. Заалишвили, В.И. Черкашин. М.: ИИЕТ РАН, 2023. С. 425–430. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.54.78.054.