

УДК 551.324.63

DOI: 10.46698/e6858-2115-8370-e

Оригинальная статья

Анализ многолетней динамики границ ледника Гарабаши

А.Х. Аджиев^{ORCID}, Н.В. Кондратьева^{ORCID}, В.В. Разумов^{ORCID},
З.М. Керефова^{ORCID}

Высокогорный геофизический институт, Россия, 360001, г. Нальчик,
пр. Ленина, 2, e-mail: zknyaz-kbsu@mail.ru

Статья поступила: 03.10.2025, доработана: 10.12.2025, принята к публикации: 15.12.2025

Резюме: Актуальность работы. Данная работа является результатом исследования модели поведения ледяных массивов ледника «Гарабаши» для использования в рекреационных целях. Изыскания проводились в 2025 году сотрудниками ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», в том числе авторами. Одним из участков использования для всесезонного катания на лыжах является ледник Гарабаши. С начала 1980-х гг. данный ледник является репрезентативным объектом ежегодных масс-балансовых измерений для мониторинга динамики массы ледникового покрова Эльбруса. За последние 19 лет наблюдений ледник постоянно находится в области отрицательных значений баланса массы, а это значит, что ледник ежегодно сокращается как по площади, так и в объёме. **Цель исследования:** Анализ многолетней динамики (1957–2025 гг.) границ ледника Гарабаши. **Методы исследования:** Динамика площадей ледника Гарабаши за разные годы определялась в результате мониторинга космоснимков с сайта Sentinel-2. Также проводились облёты БПЛА (Геоскан 401) территории обследования, в результате привязки аэрофотоснимка к космоснимку в программе ArcMap были построены границы ледника 2025 г. Для анализа привлекались также данные из научной литературы. **Результаты:** Уменьшение площади ледника, с 1957 г. по настоящее время, составило 1013497 м², периметр сократился на 11963 м. Помимо антропогенного воздействия и эндогенных процессов, одной из причин деградации ледника Гарабаши являются значительные положительные аномалии летних температур.

Ключевые слова: ледник, космоснимок, беспилотник, туристско-рекреационный комплекс, потепление климата.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (Соглашение № 23-17-20001).

Для цитирования: Аджиев А.Х., Кондратьева Н.В., Разумов В.В., Керефова З.М. Анализ многолетней динамики границ ледника Гарабаши. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 17–27. DOI: 10.46698/e6858-2115-8370-e

DOI: 10.46698/e6858-2115-8370-e

Original paper

Analysis of the long-term Dynamics of the Garabashi glacier boundaries

A.Kh. Adzhiev^{ORCID}, N.V. Kondratieva^{ORCID}, V.V. Razumov^{ORCID},
Z.M. Kerefova^{ORCID}

High Mountain Geophysical Institute, 2 Lenin Ave., Nalchik 360001,
Russian Federation, e-mail: zknyaz-kbsu@mail.ru

Received: 03.10.2025, revised: 10.12.2025, accepted: 15.12.2025

Abstract: Relevance. This work presents the results of investigating the behavioral model of the Garabashi Glacier ice mass for recreational use. The research was conducted in 2025 by specialists of the High Mountain Geophysical Institute, including the authors. The Garabashi Glacier is an area for all-season skiing. Since the early 1980s, this glacier has been a representative object of annual mass-balance measurements for the mass dynamics of the Elbrus glacial cover. Over the past 19 years of observation, the glacier has consistently remained in a negative mass balance region, meaning that the glacier is expanding annually in both area and volume. **Aim.** Analysis of the long-term dynamics (1957–2025) of the Garabashi Glacier boundaries. **Methods.** The area dynamics of the Garabashi Glacier over time were calculated using satellite images from the Sentinel-2 website. UAV (Geoscan 401) overflights of the observation area were also used. By georeferencing the aerial photographs with the satellite image in ArcMap, the glacier boundaries were constructed for 2025. Scientific literature data were also used for the analysis. **Results.** The glacier area has decreased by 1,013,497 m² since 1957, with its perimeter decreasing by 11,963 m. In addition to anthropogenic impact and endogenous processes, significant positive summer temperature anomalies are one of the causes of the Garabashi Glacier's degradation.

Keywords: glacier, satellite image, drone, tourist and recreational complex, global warming.

Acknowledgments: The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Agreement No. 23-17-2001).

For citation: Adzhiev A.Kh., Kondratieva N.V., Razumov V.V., Kerefova Z.M. Analysis of the long-term Dynamics of the Garabashi glacier boundaries. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 17–27. DOI: 10.46698/e6858-2115-8370-e

Введение

В соответствии с Федеральной целевой программой по развитию курортов Северного Кавказа Правительство РФ заявило о намерении в течение ближайших лет построить и развить до уровня современного европейского класса на территории региона пять горнолыжных курортов. Строительство и развитие горнолыжных комплексов ведется в Матласе (Дагестан), Мамисоне (Северная Осетия), Архызе (Карачаево-Черкесия), Лаго-Наки (Адыгея) и на Эльбрусе (Кабардино-Балкария).

В Кабардино-Балкарии развивается всесезонный туристско-рекреационный комплекс (ВТРК) «Эльбрус», на территории которого находится ледник Гарабаша [Аджиев и др., 2020; Беккиев и др., 2021]. Поверхность ледника активно используется для катания на лыжах (рис. 1).



Рис. 1. Ледник Гарабаши. Архивное фото ФГБУ «ВГИ», 2023 год /

Fig. 1. Garabashi Glacier. Archive photo by the All-Russian State Geological Institute, 2023

Ледник Гарабаши – часть южного склона ледникового массива Эльбруса. На конусе Эльбруса он граничит с ледниками Терскол и Малый Азау.

Материалы и методы

С начала 1980-х гг. ледник Гарабаши является репрезентативным объектом ежегодных масс-балансовых измерений для мониторинга динамики площади и массы ледникового покрова Эльбруса [Долгова и др., 2013; Коновалов, 2014; Чотчаев и др., 2021; Бурдзиева и др., 2024]. За последние 19 лет прямых наблюдений ледник постоянно находится в области отрицательных значений баланса массы, а это значит, что ледник ежегодно сокращается в объеме. Значения баланса массы составляют от -500 до -1500 мм в.э./год (рис. 2), что в среднем эквивалентно ежегодному понижению поверхности льда на 1–1,2 м [Kutuzov et al., 2019].

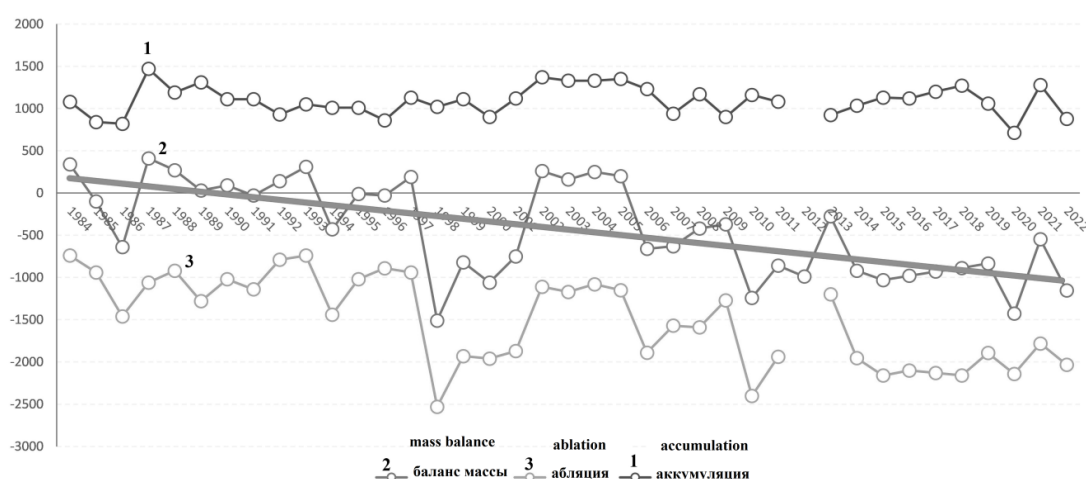


Рис. 2. График значений баланса массы ледника Гарабаши в мм водного эквивалента (мм в.э.) с 1984 года (начало инструментальных наблюдений) по 2022 год.

Красным цветом показана линия отрицательного тренда /

Fig. 2. Graph of the mass balance values of the Garabashi glacier in mm water equivalent (mm w.e.) from 1984 (the beginning of instrumental observations) to 2022. The negative trend line is shown in red

Отрицательный балансовый тренд отражается также в отступании фронта ледника, увеличении количества нунатаков (скальных выходов коренного ложа) и общем сокращении площади. Кроме того, из-за постоянного движения льда, и в том числе благодаря рельефу подстилающего ложа образуются новые трещины. Темпы сокращения площади ледника Гарабаши и в общем ледников Эльбруса постоянно возрастают, что в будущем может привести к существенным изменениям ледникового ландшафта, и необходимости проведения дополнительных работ по обеспечению безопасности.

Также отрицательный баланс массы означает объёмное сокращение ледника Гарабаши. Особенности морфологического строения его ложа (подлёдного рельефа) таковы, что изменения в плане (площадные) выглядят менее значительными, чем вертикальные [Рототаева и др., 2019]. При дешифрировании космических снимков можно фиксировать не только изменение положения фронта (языка) ледника и его боковых границ, но также, при достаточном разрешении изображений (более 1 м/пикс) положения трещин, а главное их размеров на поверхности.

В исследовании [Kutuzov et al., 2019] установлено, что, за период 1997–2017 гг. при сокращении площади оледенения всего на 10,8 %, Эльбрус потерял 22,8 % массы всего льда, то есть практически четверть. При этом абсолютная убыль объёма ледника Гарабаши за этот период составила $\sim 0,05 \text{ км}^3$ или 25,7 %, что соответствует среднему понижению поверхности на $14,21 \pm 0,15 \text{ м}$ (рис. 3), при отрицательном балансе массы, равном $0,60 \pm 0,04 \text{ м}$ в эквиваленте/год. К 2022 году ледник потерял ещё примерно $0,05 \text{ км}^3$ льда из-за ускоряющегося таяния, заметно сократившись по площади, главным образом из-за отступания языка и увеличения площади нунатаков (см. рис. 4).



Рис. 3. Изменение высоты поверхности ледников южного макросклона Эльбруса, в т.ч. ледника Гарабаши, за период 1997–2017 гг. по данным [Kutuzov et al., 2019] /

Fig. 3. Change in the surface height of glaciers on the southern macroslope of Elbrus, including the Garabashi glacier, for the period 1997–2017 according to data [Kutuzov et al., 2019]

Площадь ледникового покрова Эльбруса сокращается в течение всего периода наблюдений, что подтверждается работами [Лаврентьев и др., 2023; Татаренко, 2022; Tielidze et al., 2022]. Также анализируя данные космоснимков за период с 1957 по 1997 гг. с сайта Sentinel-2 (<https://sentinels.copernicus.eu/copernicus/sentinel-2>)

уменьшение площади оледенения Эльбруса составило 7,7 км² (-6 %) и примерно 15,5 км² с 1997 г. по настоящее время (-12 % площади за 25 лет). По контуру оледенения Эльбруса 2017 года его площадь составляет около 110 км². Эпизоды наступания за этот период наблюдались только у ледника Кюкюртлю на западном склоне вулкана [Дроздов и др., 2024; Керимов, Курашева, 2023; Abakimov et al., 2022]. Современные климатические прогнозы и ежегодные данные балансового мониторинга позволяют сделать вывод о том, что темпы деградации ледников на Эльбрусе с каждым десятилетием возрастают.

Изменение площади ледника Гарабаши и положения его фронта соответствует общему тренду дегляциации Эльбруса. Совместный анализ полученных данных с сайта Sentinel-2 (<https://sentinels.copernicus.eu/copernicus/sentinel-2>) и данных съёмки с БПЛА (Геоскан 401), показал динамику фронта ледника за последние почти 30 лет (рис. 4). При этом темпы сокращения площади увеличиваются, что характерно как для соседних ледников, так и для всего ледового комплекса Эльбруса [Клюев и др., 2025; Kushnov et al., 2024].

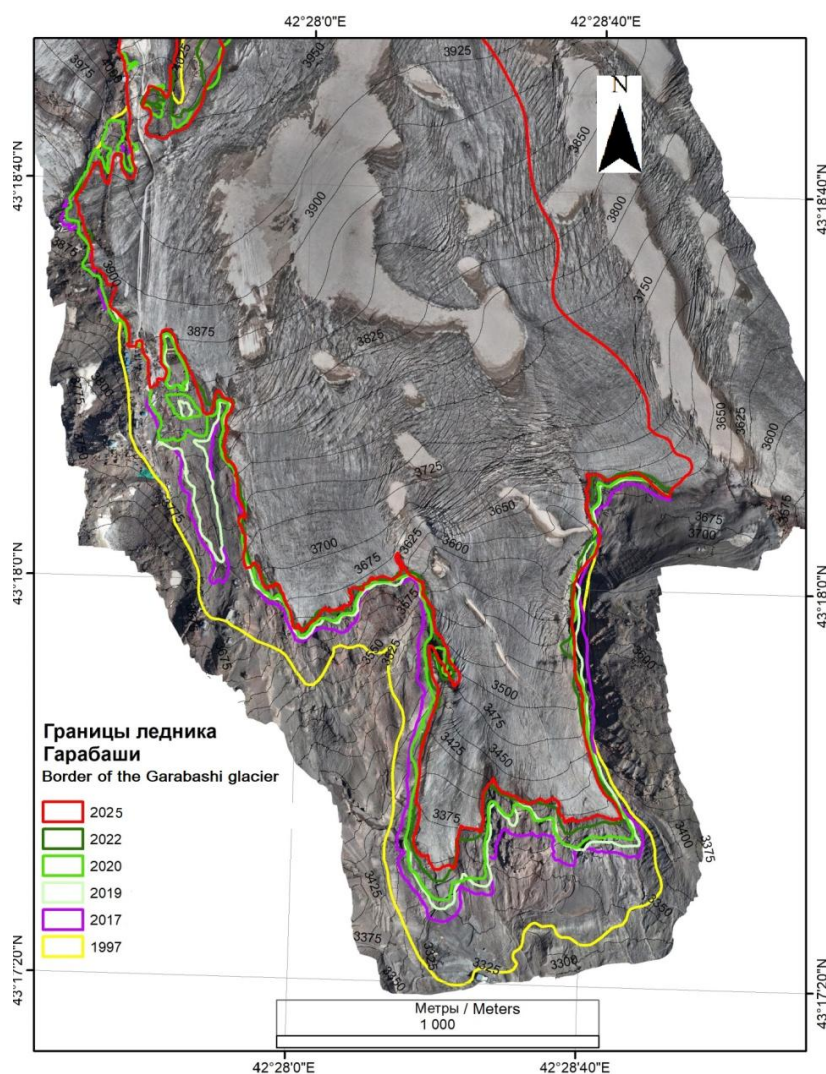


Рис. 4. Сокращение площади ледника Гарабаши в 1997–2025 гг. Подложка: АФС с БПЛА, 25.08.2025 г. /

Fig. 4. Shrinkage of the Garabashi Glacier in 1997–2025. Image: aerial survey from a UAV, 25.08.2025

Уменьшение площади ледника Гарабаши за 1957–2025 гг. авторами настоящей работы определено в результате привязки аэрофотоснимка к космоснимку в программе ArcMap и построения ГИС-слоя границ ледника. Оно составило 1013497 м² (рис. 5), периметр ледника сократился на 11963 м.

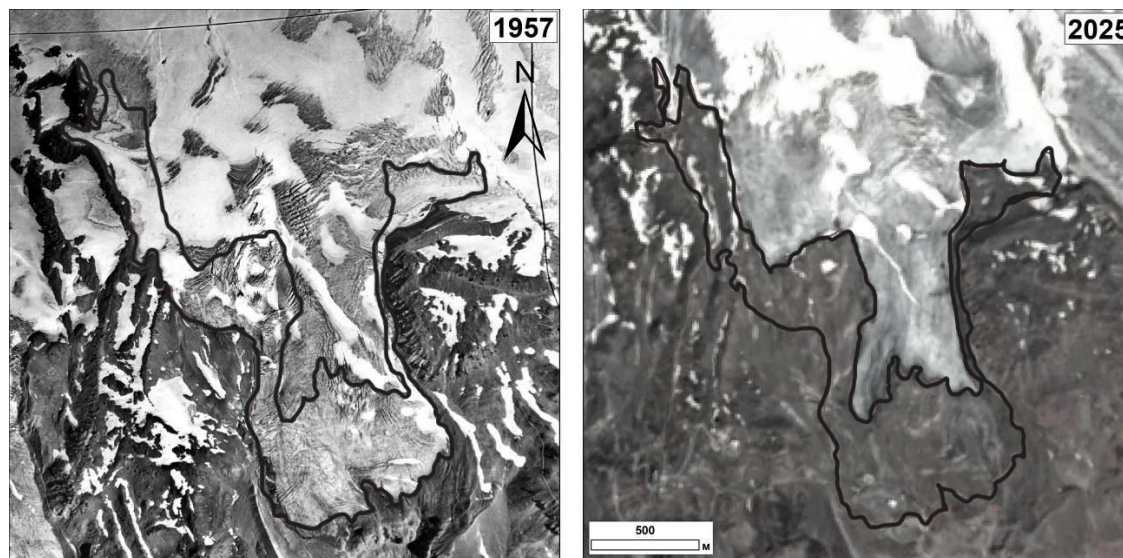


Рис. 5. Уменьшение площади ледника Гарабаши на Эльбрусе за 1957–2025 гг. /

Fig. 5. Decrease in area of the Garabashi glacier on Elbrus for 1957–2025

При пространственном разрешении изображения Sentinel-2 10 м, точность измерения площади составит $5 \text{ м} \times 11963 \text{ м} = 59815 \text{ м}^2$, что составляет около 6 %.

Среднее сокращение площади за 68 лет составляет 14904 м²/год.

В XX веке за период 1957–1999 гг. сокращение площади составило 252790 м², в среднем за 42 года – 6019 м²/год [Керимов, Курашева, 2023; Gladkov et al., 2024].

Обсуждение результатов

Термический режим играет важную роль в процессе отступления ледников Центрального Кавказа [Носенко и др., 2013; Frolov et al., 2023].

В работе [Беккиев и др., 2020] проведен анализ изменения температурного режима и режима осадков на высокогорной станции Терскол (склон горы Чегет и Терскольского ущелья) за последние 60 лет.

Среднегодовая температура в Терсколе за период 1957–2019 гг. составила 2,6°C при норме 2,54°C, что является наименьшей из среднегодовых температур всех других м/станций и соответствует зональному распределению температур. Как было сказано выше, за весь период исследования годовые (0,08°C/10 лет), зимние (-0,06°C/10 лет) весенние (0,02°C/10 лет) и осенние (-0,01°C/10 лет) температуры оставались практически постоянными, скорость роста средних летних температур составила 0,32°C/10лет ($D=35\%$). Всемирной метеорологической организацией 1976 г. определен как год начала глобального потепления. С 1976 года по 2019 год скорость роста средних летних температур на высокогорной станции Терскол значительно увеличилась до 0,44°C/10 лет с высоким вкладом тренда в суммарную дисперсию $D=42\%$ (максимальный из всех сезонных трендов), что видно на рисунке 6.

June - August/ июнь-август: $a=0,44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ $D=42\%$

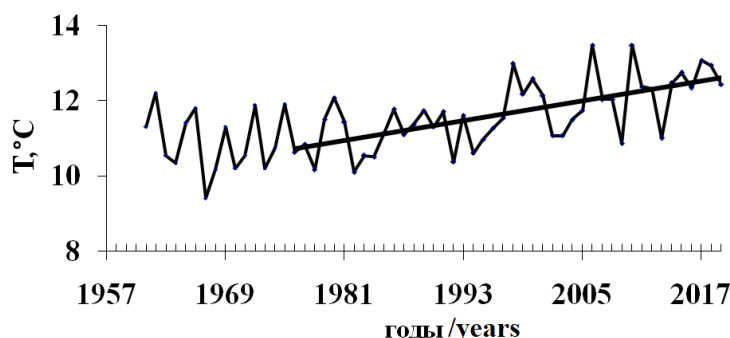


Рис. 6. Ход средней летней температуры воздуха с трендом за 1976–2019 гг. на м/станции Терскол

a – угловой коэффициент линейного тренда, $^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$; D – вклад тренда в суммарную дисперсию, %.

Fig. 6. Average summer air temperature with trend for 1976–2019 at Terskol meteorological station
 a – slope of the linear trend, $^{\circ}\text{C}/10\text{ years}$; D – contribution of the trend to the total variance, %.

Таким образом, с середины 70-х годов прошлого столетия изменение термического режима исследуемого района по данным м/станции Терскол происходило за счет значительного роста средних летних температур при относительной стабильности других сезонных (годовой) средних температур [Solomina et al., 2023].

Из анализа динамики абсолютных максимумов температур за 2006–2024 гг. следует, что в этот период происходит значительное увеличение максимальных зимних на $0,96^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ($D=71\%$) и максимальных летних на $0,65^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ($D=37\%$).

Десятилетие 2006–2015 гг. характеризуется также ростом средних зимних и весенних температур, с наиболее значимым вкладом за счет увеличения абсолютных максимумов температур. Темпы роста летних температур увеличились с $0,32^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ до $0,44^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ в период 1976–2019 гг., что привело к росту темпов отступления исследуемого ледника в XXI веке. По нашему мнению, деградация (отступление) ледника Гарабаши связана с такой динамикой летних температур [Беккиев и др., 2020].

Анализ режима осадков в Терсколе показал, что величина среднегодовой суммы осадков достаточно высока и составляет 970 мм при климатической норме 935,9 мм (1961–1990 гг.). Максимум суммы осадков приходится на летний сезон – 300,6 мм, затем по убыванию идут осенний, весенний и зимний сезоны. Несмотря на то, что с 1961 года на станции Терскол наблюдался рост суммы годовых осадков со скоростью $22,8\text{ мм}/10\text{ лет}$, а с 1976 года скорость роста годовых сумм выросла до $28,1\text{ мм}/10\text{ лет}$, количество зимних осадков в Терсколе имело устойчивую тенденцию к их уменьшению. На м/станции Терскол с 1976 года происходило уменьшение зимних сумм осадков со скоростью $4,9\text{ мм}/10\text{ лет}$. При этом суточные максимумы осадков имели отрицательную тенденцию для всех сезонов (с наибольшей зимой и осенью). Следовательно, аккумуляция также не вносила положительную составляющую в баланс деградации ледников [Беккиев и др., 2020].

Таким образом, термический режим играет важную роль в процессе отступления ледника Гарабаши. Причинами его деградации являются значительные положительные аномалии летних температур. Показано, что в XXI веке произошло увеличение темпов деградации ледников под действием роста среднесуточных

летних температур. Это вызвано усилением скорости роста летних температур до $0,4^{\circ}\text{C}/10$ лет в период глобального потепления с 1976 года по настоящее время.

Скорости отступания ледников значительно увеличились в последние 5–6 лет и достигали максимальных значений – 25–27 тыс. м² в год (ледники Малый Азау и Терскол) и 23 тыс. м² в год (ледник Гарабаши).

При сохранении таких темпов деградации в будущем (как это происходило за последние 5–15 лет), за последующие 5 лет ледник Гарабаши уменьшится на 50–75 тыс. м² и отступит примерно на 70–100 м. За 10 лет ледник Гарабаши уменьшится на 100–150 тыс. м² по площади и на 140–200 м по длине.

Вследствие слабой заморенности (площадь участков ледников, покрытых поверхностной мореной, составляет для ледника Гарабаши – 6–7 тыс. м²) для процесса деградации ледников южного склона Эльбруса не характерно формирование длительно существующих массивов мёртвых льдов [Dokukin et al., 2022]. Встречаются только редкие отдельные длительно существующие участки мёртвых льдов, как, например, гряда срединной морены перед ледником Малый Азау, которая существует более 20 лет. Остальные участки заморенных льдов сокращаются с такой же скоростью, как и сами ледники.

Заключение

В данной работе рассматривалась одна из причин деградации ледника Гарабаши – температурный режим. Хотя антропогенные и эндогенные процессы, конечно, влияют также на трансформацию ледника Гарабаши. Но эти факторы авторы рассматривают в следующих исследованиях.

Авторами выполнен анализ многолетней динамики границ ледника Гарабаши – части южного склона ледникового массива Эльбруса.

Отмечено уменьшение площади ледника Гарабаши на 1013497 м² за период с 1957 по 2025 гг., периметр сократился на 11963 м.

Одной из причин деградации ледника Гарабаши являются значительные положительные аномалии летних температур. Показано, что в XXI веке произошло увеличение темпов деградации ледников под действием роста среднесуточных летних температур. Это вызвано усилением скорости роста летних температур до $0,4^{\circ}\text{C}/10$ лет в период глобального потепления с 1976 года по настоящее время.

Скорости отступания ледников значительно увеличились в последние 5–6 лет и достигали максимальных значений – 25–27 тыс. м² в год (ледники Малый Азау и Терскол) и 23 тыс. м² в год (ледник Гарабаши).

При сохранении таких темпов деградации в будущем, за последующие 5 лет ледник Гарабаши уменьшится на 50–75 тыс. м² и отступит примерно на 70–100 м. За 10 лет ледник Гарабаши уменьшится на 100–150 тыс. м² по площади и на 140–200 м по длине.

Литература

1. Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Кондратьева Н.В., Юрченко Н.В. Современное состояние ледников Большого Кавказа. Нальчик: ВГИ, изд-во ООО «Фрегат», 2020. – 132 с.
2. Беккиев М.Ю., Аджиев А.Х., Докукин М.Д., Залиханов М.Ч., Ташилова А.А., Юрченко Н.В. Мониторинг деградации горных ледников Приэльбрусья в условиях изменения климата. // Материалы IV Всероссийской научной конференции «Экология и космос» им. акад. К.Я. Кондратьева. СПб., 2020. – С. 6–24.

3. Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Ташилова А.А. Современная деградация долинных ледников Центрального Кавказа. // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2021. – Т. 7. № 3. – С. 113–141. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-3-113-141.
4. Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л., Гогичев Р.Р. Влияние воздействия геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014.
5. Долгова Е.А., Мацковский В.В., Соломина О.Н., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Хмелевской И.Ф. Реконструкция баланса массы ледника Гарабаши (1800–2005 гг.) по дендрохронологическим данным. // *Лёд и снег*. – 2013. – Т. 53. № 1. – С. 34–42.
6. Дроздов Е.Д., Торопов П.А., Авилов В.К., Артамонов А.Ю., Полюхов А.А., Железнова И.В., Ярынич Ю.И. Метеорологический режим высокогорной зоны Эльбруса в период аккумуляции. // *Лёд и снег*. – 2024. – Т. 64. № 1. – С. 25–40. DOI: 10.31857/S2076673424010022.
7. Керимов А.М., Корчагина Е.А. Температурный режим, осадки и снежность ледника Гарабаши (южный сектор Эльбруса) за последние 60 лет. // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. – 2015. – № 1(63). – С. 97–104.
8. Керимов А.М., Курашева О.А. особенности формирования химического состава рек ледникового питания Кавказа при интенсивной деградации оледенения. // *Метеорология и гидрология*. – 2023. – № 2. – С. 80–89. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-1-2-80-89.
9. Ключев Р.В., Бригада В.С. Совершенствование мониторинга оползневых процессов горных склонов при наличии транспортной инфраструктуры. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2025. – Т. 15. № 3. – С. 66–78. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.32.001.
10. Коновалов В.Г. Моделирование и реконструкция параметров речного стока и баланса массы ледников на Северном Кавказе. // *Лёд и снег*. – 2014. – Т. 54. № 3. – С. 16–30.
11. Лаврентьев И.И., Смирнов А.М., Торопов П.А., Елагина Н.Э., Киселёва Т.Д., Дроздов Е.Д., Дегтярёв А.И. Гляциологические исследования института географии РАН на Эльбрусе в 2023 г. // *Лёд и снег*. – 2023. – Т. 63. № 4. – С. 553–557. DOI: 10.31857/S2076673423040099.
12. Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Рототаева О.В., Шахгеданова М.В. Реакция ледников центрального Кавказа в 2001–2010 гг. на изменения температуры и количества осадков. // *Лёд и снег*. – 2013. – Т. 53. № 1. – С. 26–33.
13. Рототаева О.В., Носенко Г.А., Керимов А.М., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Никитин С.А., Керимов А.А., Тарасова Л.Н. Изменения баланса массы ледника Гарабаши (Эльбрус) на рубеже XX–XXI вв. // *Лёд и снег*. – 2019. – Т. 59. № 1. – С. 5–22. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-5-22.
14. Татаренко Н.В. Концентрации тяжелых металлов в сезонных слоях ледника Гарабаши на южном склоне Эльбруса. // *Успехи современного естествознания*. – 2022. – № 1. – С. 49–55. DOI: 10.17513/use.37769.
15. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.
16. Abakumov E., Kushnov I., Polyakov V., Tembotov R. Micromorphology of cryoconite on Garabashi and Skhelda glaciers and soils of Baksan gorge, mt. Elbrus, Central Caucasus. // *Polish Polar Research*. – 2022. – Vol. 43. No. 1. – pp. 1–20. DOI: 10.24425/ppr.2021.138590.
17. Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Khatkutov A.V. Evolution of lakes at Dzhikiugankez glacier (Northern Elbrus region) in 1957–2020, taking into account subsurface flow channels. // *Water Resources*. – 2022. – Vol. 49. No. S1. – pp. S23–S36.
18. Frolov D.M., Rzhantsyn G.A., Koshurnikov A.V., Gagarin V.E. Thermal geophysical investigation of the snow cover, ice and frozen ground in the lite of climate variation. // In: *Processes in GeoMedia*. Singapore, 2023. – pp. 247–252.
19. Gladkov G.V., Kimeklis A.K., Tembotov R.Kh., Ivanov M.N., Andronov E.E., Abakumov E.V. Linking the composition of cryoconite prokaryotic communities in the arctic, Antarctic, and

Central Caucasus with their chemical characteristics. // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14. No. 1. – pp. 15838. DOI: 10.1038/s41598-024-64452-3.

20. Kushnov I., Tembotov R., Nizamutdinov T., Abakumov E. Role of cryoconite translocation on the biogeochemical features of alpine soils at the Central Caucasus region, mount Elbrus. // *Environmental Processes*. – 2024. – Vol. 11. No. 2. – pp. 23. DOI: 10.1007/s40710-024-00706-6.

21. Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D. Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017. // *Frontiers in Earth Science*. – 2019. – No. 7(153). – pp. 1–16. DOI: 10.3389/feart.2019.00153.

22. Solomina O.N., Jomelli V., Bushueva I.S. First10be dates of late holocene moraines of the Kashkatash and Irik glaciers, Northern Caucasus. // *Ice and Snow*. – 2023. – Vol. 63. No. 3. – pp. 410–425. DOI: 10.31857/S2076673423030110.

23. 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. – Vol. 16. No. 2. – pp. 489–504. DOI: 10.5194/tc-16-489-2022.

References

1. Adzhiev A.Kh., Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kondratieva N.V., Yurchenko N.V. Current state of glaciers of the Great Caucasus. Nalchik: VGI, Publishing House “Fregat”. 2020. 132 p. (In Russ.)

24. Bekkiev M.Yu., Adzhiev A.Kh., Dokukin M.D., Zalikhanov M.Ch., Tashilova A.A., Yurchenko N.V. Monitoring the degradation of mountain glaciers in the Elbrus region under climate change. In: *Proc. of the IV All-Russ. Sc. Conf. “Ecology and Space” named after Academician K.Ya. Kondratiev*. Saint. Petersburg. 2020. pp. 6–24. (In Russ.)

25. Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Tashilova A.A. Current degradation of glacier valleys of the Central Caucasus. *Fundamental and Applied Climatology*. 2021. Vol. 7. No. 3. pp. 113–141. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-3-113-141. (In Russ.)

26. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. The impact of geodynamic processes on the geoecological load of a mountain region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014. (In Russ.)

27. Dolgova E.A., Matskovsky V.V., Solomina O.N., Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Khmelevskoy I.F. Reconstruction of the mass balance of the Garabashi glacier (1800–2005) based on dendrochronological data. *Ice and Snow*. 2013. Vol. 53. No. 1. pp. 34–42. (In Russ.)

28. Drozdov E.D., Toropov P.A., Avilov V.K., Artamonov A.Yu., Polyukhov A.A., Zheleznova I.V., Yarynich Yu.I. Meteorological regime of the high zone of Elbrus during the accumulation period. *Ice and Snow*. 2024. Vol. 64. No. 1. pp. 25–40. DOI: 10.31857/S2076673424010022. (In Russ.)

29. Kerimov A.M., Korchagina E.A. Temperature regime, precipitation, and snow content of the Garabashi glacier (southern sector of Elbrus) over the past 60 years. *Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center RAS*. 2015. No. 1 (63). pp. 97–104. (In Russ.)

30. Kerimov A.M., Kurasheva O.A. Features of the chemical composition of glacial-fed rivers in the Caucasus during intensive degradation of glaciation formation. *Meteorology and Hydrology*. 2023. No. 2. pp. 80–89. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-1-2-80-89. (In Russ.)

31. Klyuev R.V., Brigida V.S. Improving the monitoring of landslide processes on mountain slopes in the presence of transport infrastructure. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 3. pp. 66–78. DOI 10.46698/VNC.2025.39.32.001. (In Russ.)

32. Kononov V.G. Modeling and analysis of river runoff parameters and glacier mass balance in the North Caucasus. *Ice and Snow*. 2014. Vol. 54. No. 3. pp. 16–30. (In Russ.)

33. Lavrentyev I.I., Smirnov A.M., Toropov P.A., Elagina N.E., Kiseleva T.D., Drozdov E.D., Degtyarev A.I. Glaciological studies of the Institute of Geography of the Russian Academy of

Sciences on Elbrus in 2023. *Ice and Snow*. 2023. Vol. 63. No. 4. pp. 553–557. DOI: 10.31857/S2076673423040099. (In Russ.)

34. Nosenko G.A., Khromova T.E., Rototaeva O.V., Shakhgedanova M.V. Response of glaciers of the Central Caucasus in 2001–2010 to changes in temperature and precipitation. *Ice and Snow*. 2013. Vol. 53. No. 1. pp. 26–33. (In Russ.)

35. Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Kerimov A.M., Kutuzov S.S., Lavrentyev I.I., Nikitin S.A., Kerimov A.A., Tarasova L.N. Changes in the mass balance of the Garabashi (Elbrus) glacier at the turn of the 20th–21st centuries. *Ice and Snow*. 2019. Vol. 59. No. 1. pp. 5–22. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-5-22. (In Russ.)

36. Tatarenko N.V. Metal concentrations in seasonal layers of the Garabashi glacier on the southern slope of Elbrus. *Advances in Modern Natural Science*. 2022. No. 1. pp. 49–55. DOI: 10.17513/use.37769. (In Russ.)

37. Chotchaev H.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high-mountain territories by geoeological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 81–94. DOI 10.46698/VNC.2021.15.66.007. (In Russ.)

38. Abakumov E., Kushnov I., Polyakov V., Tembotov R. Micromorphology of cryoconite on Garabashi and Skhelda glaciers and soils of Baksan gorge, mt. Elbrus, Central Caucasus. *Polish Polar Research*. 2022. Vol. 43. No. 1. pp. 1–20. DOI: 10.24425/ppr.2021.138590.

39. Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Khatkutov A.V. Evolution of lakes at Dzhikiugankez glacier (Northern Elbrus region) in 1957–2020, taking into account subsurface flow channels. *Water Resources*. 2022. Vol. 49. No. S1. pp. S23–S36.

40. Frolov D.M., Rzhantsyn G.A., Koshurnikov A.V., Gagarin V.E. Thermal geophysical investigation of the snow cover, ice and frozen ground in the lite of climate variation. In: *Processes in GeoMedia*. Singapore. 2023. pp. 247–252.

41. Gladkov G.V., Kimeklis A.K., Tembotov R.Kh., Ivanov M.N., Andronov E.E., Abakumov E.V. Linking the composition of cryoconite prokaryotic communities in the arctic, Antarctic, and Central Caucasus with their chemical characteristics. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 15838. DOI: 10.1038/s41598-024-64452-3.

42. Kushnov I., Tembotov R., Nizamutdinov T., Abakumov E. Role of cryoconite translocation on the biogeochemical features of alpine soils at the Central Caucasus region, mount Elbrus. *Environmental Processes*. 2024. Vol. 11. No. 2. pp. 23. DOI: 10.1007/s40710-024-00706-6.

43. Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D. Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017. *Frontiers in Earth Science*. 2019. No. 7(153). pp. 1–16. DOI: 10.3389/feart.2019.00153.

44. Solomina O.N., Jomelli V., Bushueva I.S. First10be dates of late holocene moraines of the Kashkatash and Irik glaciers, Northern Caucasus. *Ice and Snow*. 2023. Vol. 63. No. 3. pp. 410–425. DOI: 10.31857/S2076673423030110.

45. 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. Vol. 16. No. 2. pp. 489–504. DOI: 10.5194/tc-16-489-2022.