

УДК 551.32

ПРОВАЛЬНЫЕ ВОРОНКИ НА ЛЕДНИКЕ БОЛЬШОЙ АЗАУ (ПО СОСТОЯНИЮ НА 2025 г.)

© 2026 г. И. И. Лаврентьев*, А. А. Абрамов, Т. Д. Киселёва

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: lavrentiev@igras.ru*

Поступила в редакцию 07.11.2025 г.

После доработки 18.11.2025 г.

Принята к публикации 29.12.2025 г.

Проведён анализ динамики воронкообразных образований на поверхности ледника Большой Азау на Эльбрусе. Формирование данных образований связано с деформацией ледовой толщи над подлёдными полостями вследствие продолжающейся деградации оледенения. Наблюдения за динамикой образований начаты в 2022 г.; в 2025 г. одна из воронок достигла ложа ледника. Приводятся данные радиолокационного зондирования и морфометрического анализа ЦМР по данным АФС, спутниковой и БПЛА съёмки.

Ключевые слова: Эльбрус, ледник, Большой Азау, деградация, воронка, радиолокационное зондирование, морфометрия

DOI: 10.7868/S2412376526010143

Современное потепление климата приводит к сокращению оледенения во всём мире, и Кавказ — не исключение. За период 1986–2018 гг. ледники здесь теряли 0.87% площади ежегодно (Хромова и др., 2021), а ледники Эльбруса за период 1997–2017 гг. потеряли 10.8% площади и 22.8% в объёме (Kutuzov et al., 2019). Такие существенные изменения проявляются не только в виде отступления краёв ледников и их истончения, но и в стремительно меняющемся рельефе ледниковой поверхности в виде новых морен, провалов, проявлением нунатаков и образованием ледниковых озёр (Аджиев и др., 2023; Беккиев и др., 2024). Формирование концентрических трещин и оседание льда над внутриледниковыми полостями всё чаще наблюдается в нижних, языковых частях ледников, и обычно со временем это приводит к обрушению кровли воронкообразной депрессии (Stocker-Waldhuber et al., 2017; Hösli et al., 2025; Ruols et al., 2025). При сокращении ледника Большой Азау, расположенного на южном склоне Эльбруса в верховьях реки Баксан, как минимум с 2013 г. началось формирование ряда подобных структур (рисунок на обложке журнала), одна из которых в 2025 г. достигла ложа. Для наблюдения за динамикой

её деградации была произведена съёмка участка развития воронок с помощью беспилотного летательного аппарата (далее — БПЛА), а также выполнено георадарное профилирование.

Рассматриваемая часть ледника Большой Азау находится в высотном интервале 3250–3300 м над ур. моря на стыке ледника, текущего с массива Азаубаши (ледовое плато Хотютау), и основного потока Большого Азау (рис. 1, а, в). По данным аэрофотозондирования 2013 г. толщина льда здесь достигала 160 м (Kutuzov et al., 2019), а моделирование условий на коренном ложе, выполненное на основе этих данных и цифровой модели рельефа (далее — ЦМР) 2017 г., показало вероятное наличие подледниковых скоплений воды (Лаврентьев и др., 2020). Для проверки модели 15.08.2022 здесь была проведена наземная радиолокационная съёмка с 20 МГц радаром ВИРЛ-7 (Vasilenko et al., 2011), профили протяжённостью 5.3 км были заложены таким образом, чтобы пересечь подлёдную долину на всём её протяжении и попытаться обнаружить каналы стока воды и понижения в рельефе коренного ложа (см. рис. 1, б–в). На момент съёмки ярко выражена и заполнена водой была

только одна, самая восточная воронка, ещё одна читалась в рельефе, третья (в настоящее время — центральная) не определялась с поверхности. В 2023 г. читались уже все три воронки (Беккиев и др., 2024).

Для оценки вертикальной динамики поверхности ледника Большой Азау в районе исследуемых структур использовались архивные ЦМР Эльбруса за 1957 г. (получена оцифровкой топографической основы) и 1997 г. (на базе

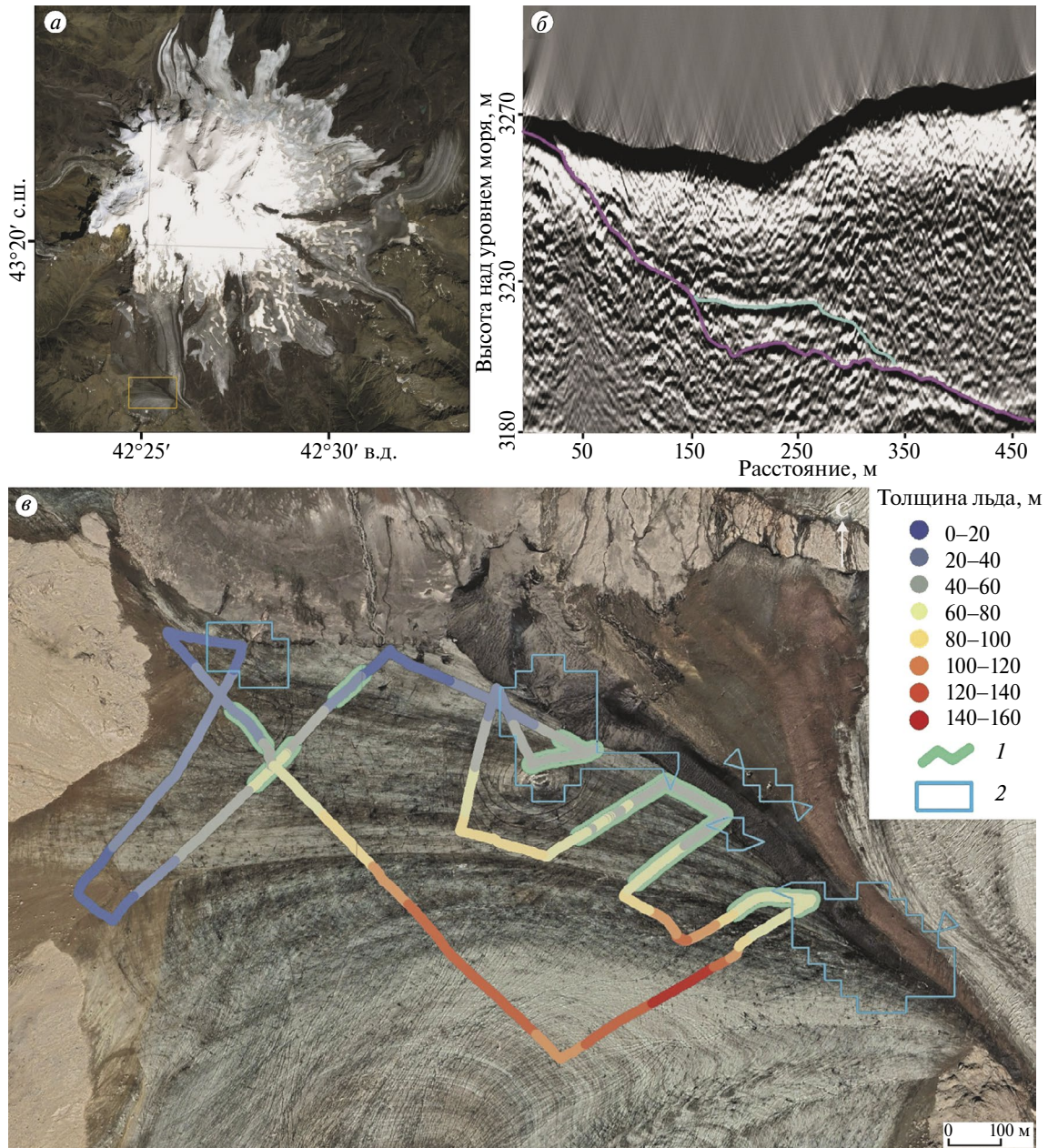


Рис. 1. Массив Эльбруса (подложка — снимок Planet Scope от 19.08.2024) (а); район исследований на леднике Большой Азау показан оранжевой рамкой; радарограмма вдоль линии 1–1' (показана на рис. 2, а), где лиловой линией показано коренное ложе, а голубой — подошва льда/кровля внутрiledниковой полости (б); маршрут радиолокационной съёмки и измеренные толщины льда (подложка — снимок WorldView-2 от 28.08.2022 базы данных Google Earth). Цифрами показаны участки плоского ложа (1) и предполагаемые контуры подлёдных озёр (2) (в)

Fig. 1. Overview of the Elbrus massif (the background is a Planet Scope image from August 19, 2024) (a); the study area on the Bolshoy Azau Glacier is outlined in orange; radargram along profile 1–1' (location shown in Fig. 2 a), where the bedrock surface is marked by the purple line and the ice base/roof of the intraglacial cavity by the blue line (b); ground-penetrating radar survey route and measured ice thicknesses (the background is a WorldView-2 image from August 28, 2022 from the Google Earth database). Numbers indicate areas of flat bed (1) and inferred outlines of subglacial lakes (2) (c)

аэрофотосъёмки, далее — АФС) (Золотарёв, Харьковец, 2000), и современные ЦМР на основе космического снимка *Pléiades* 2017 г. (предоставлено Французским космическим агентством, CNES), и по данным съёмки с БПЛА DJI Mavic 3 Enterprise в конце августа 2024 и 2025 гг. Обработка снимков с БПЛА для построения ортофотопланов и ЦМР, разрешение которых составило 15 см/пиксель, проводилась в программном пакете *MetashapePro 2.0* с корегистрацией по ЦМР 2017 г. в прямоугольных координатах проекции UTM WGS-1984, зона 38. В программной среде *ArcGIS* вдоль линии, пересекающей воронки с запада на восток, а также вдоль одного профиля радарной съёмки 2022 г. были сняты и проанализированы значения высот поверхности за указанные годы.

Анализ данных радиозондирования выявил большое количество внутренних отражений на радарограммах, часть которых, вероятно, относится к каналам стока внутри- и подледниковой воды. Также на ряде профилей с характерными толщинами льда 40–60 м были выявлены участки с плоским или вогнутым ложем, способствующим, за счёт своей геометрии, скоплению воды, что подтверждает корректность положения смоделированных подледниковых озёр (см. рис. 1, в). На нескольких профилях были дешифрованы пустоты, находящиеся между подошвой ледника и ложем (см. рис. 1, б). В случае, когда такие полости заполнены водой, из-за большой разницы в диэлектрической проницаемости ϵ (~3.2 у льда против ~81 у воды) на радарных записях будет видна лишь одна яркая плоская граница лёд/вода. В нашем случае на одной из радарограмм (вдоль профиля 1-1', пересекающего только начавшуюся формироваться воронку) хорошо прослеживаются две границы: лёд/воздух и воздух/коренные породы (соответственно голубая и лиловая линии на рис. 1, б), что говорит об отсутствии воды в полости, протяжённость и высота которой достигает ~150 и ~22 м соответственно. Косвенно на наличие подлёдных полостей (озёр) указывает морфологическое строение прилегающей территории, с ярко выраженными руслами водотоков, на оси которых располагаются воронкообразные понижения, по которым талая вода с поверхности морены и льда поступает в полости (рис. 2, а).

Сравнение высотных отметок поверхности ледника Большой Азау за разные годы наглядно показало деградационный тренд: с 1957 г. толщина льда в исследованной части ледника в среднем

уменьшилась на 132 м при максимальном значении 168 м (см. рис. 2, б). Начиная с 2017 г., когда, по данным ЦМР, началось формирование воронкообразных понижений (причём на центральной морене подобная структура наблюдалась ещё в 2013 г.) на профиле вдоль воронок поверхность понизилась в среднем на 36 м (при максимуме 66 м). Сравнение высотных отметок поверхности ледника с толщиной льда по данным радиолокационного зондирования свидетельствует о достижении одной из воронок ложа ледника, что также подтверждается визуально. Морфометрический анализ выявил интенсификацию углубления воронок в 2025 г., их диаметр на начало сентября составил 180–300 м, глубина 25–40 м, уклон 30–40 градусов. В основании восточной воронки выявляется колодец с вертикальными стенками высотой 5–7 м.

Отмечено, что выявленные ранее области вероятного присутствия двух подлёдных озёр площадью 42 и 51 тыс. м² (Лаврентьев и др., 2020) совпадают с расположением воронок и выявленными участками плоского ложа, косвенно подтверждая наличие под ними время от времени осушаемых полостей. О периодическом заполнении таких полостей талой водой и последующим её дренажом свидетельствует также анализ разновременных космических снимков *Sentinel-2* за 2021–2024 гг. На рис. 3 представлена серия изображений, на которых хорошо видно, что в июле–августе одна воронка заполнена водой (голубой цвет в центре воронки), а к концу августа–сентябрю — опорожнена. Вероятно, именно такой механизм объясняет формирование концентрических провалов над подледниковыми полостями, периодическое опорожнение которых приводит к просадкам льда с поверхности.

Формирование воронкообразных провальных структур на леднике Большой Азау наглядно демонстрирует деградационную фазу развития оледенения в районе массива Эльбруса. Согласно полученным результатам, уже в следующем году можно ожидать достижения двумя другими воронками ложа ледника с ускорением таяния, что может привести к повышению риска развития опасных явлений. Продолжение более детальных исследований с применением радара, дифференциального GPS и БПЛА планируется в 2026 г.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Института географии РАН (FMWS-2024-0004). Стереопара

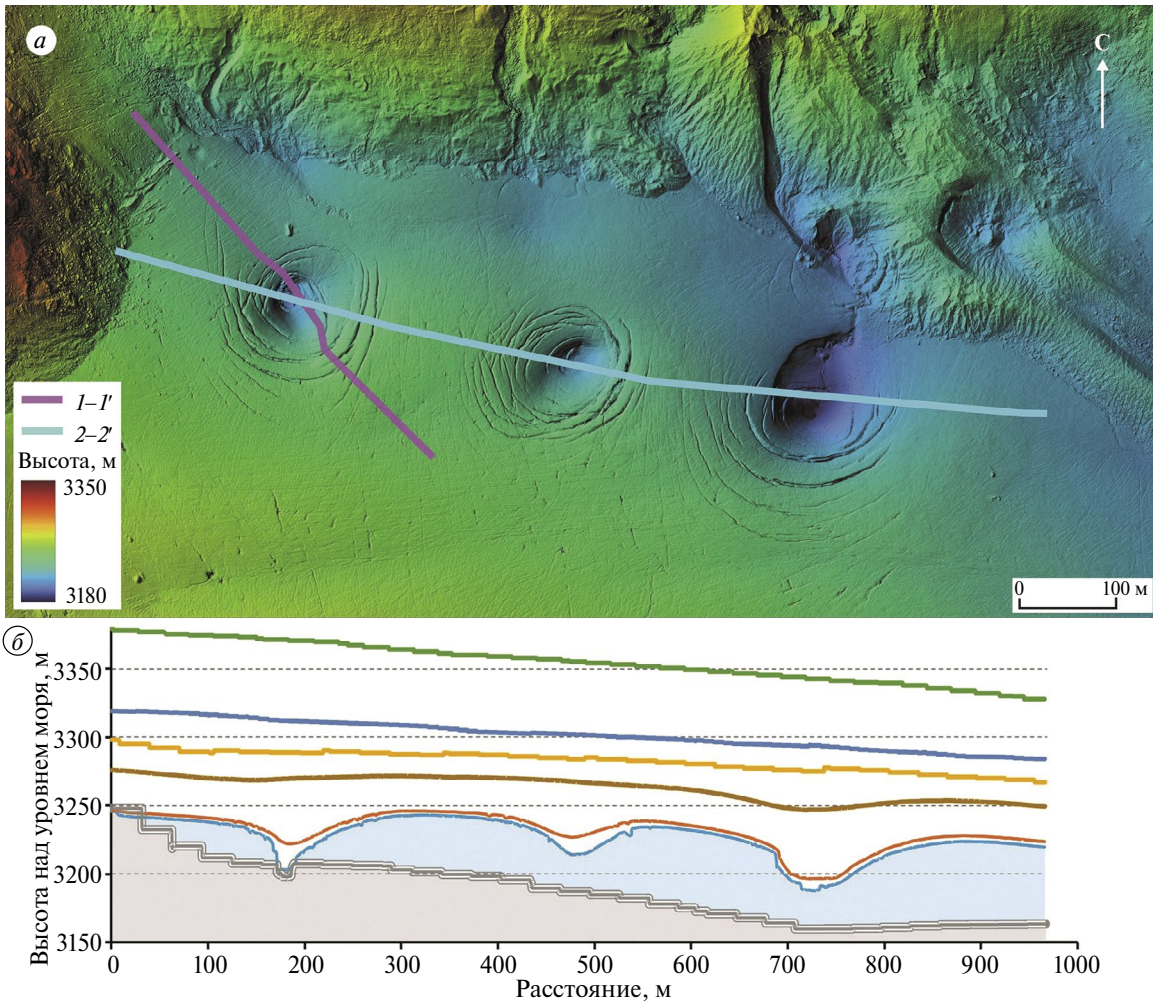


Рис. 2. ЦМР района образования провальных воронок на леднике Большой Азау (по состоянию на 05.09.2025), показаны линии профилей (а); профиль по линии 2–2', показано положение поверхности ледника в разные годы. Ложе отрисовано на основании данных радиолокационных измерений (б)

Fig. 2. DEM of the area of sinkhole formation on the Bolshoy Azau Glacier (as of September 5, 2025), profile lines are shown (a); interpretation of the profile along line 2–2': elevation of the glacier surface in different years and the bedrock (based on radar measurements) (b)

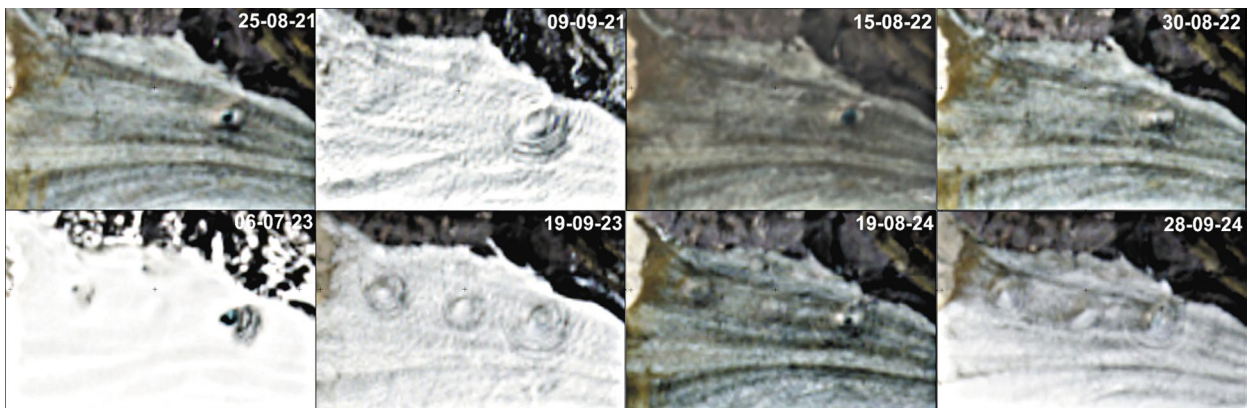


Рис. 3. Исследуемый район на разновременных космических снимках Sentinel-2. Голубой цвет в центре правой воронки свидетельствует о наполненности водой

Fig. 3. The study area on multi-temporal Sentinel-2 satellite images. The bluish color in the center of the right-hand depression indicates the presence of water

и ЦМР Pléiades на 2017 г. были предоставлены Французским Космическим Агентством (CNES) в рамках программы по наблюдениям ледников из космоса с использованием спутников “Плеяды” (Pléiades Glacier Observatory).

Acknowledgments. The work was carried out under a State Assignment No 2024-0004 of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences. The stereo pair and Pléiades DEM for 2017 were provided by the French Space Agency (CNES) as part of the Pléiades Glacier Observatory program for observing glaciers from space using Pléiades satellites.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Шагин С.И. Динамика озёр ледника Большой Азау на Эльбрусе // Криосфера Земли. 2023. Т. 27. № 1. С. 45–57.
<https://doi.org/10.15372/KZ20230105>
- Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Шагин С.И., Акаев А.Р. Механизмы прорывов озёр Эльбруса // Вестник Владикавказского научного центра. 2024. Т. 24. № 3. С. 73–84.
<https://doi.org/10.46698/VNC.2024.85.56.001>
- Золотарёв Е.А., Харьковец Е.Г. Оледенение Эльбруса в конце XX в. (цифровая ортофотокарта Эльбруса на 1997 г.) // МГИ. 2000. Вып. 89. С. 175–181.
- 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>
- Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаврентьев И.И. Новый каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 341–358.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421030093>
- Hösl L., Ogier C., Bauder A., Huss M., Werder M.A., Jacquemart M., Hodel E., Swift D., Cremona A., Walden J., Farinotti D. Subglacial Cavity Collapses on Swiss Glaciers: Spatiotemporal Distribution and Mass Loss Contribution // Journal of Glaciology. 2025. V. 71. P. e74.
<https://doi.org/10.1017/jog.2025.33>
- Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D. Volume Changes of Elbrus Glaciers from 1997 to 2017 // Frontiers in Earth Science. 2019. V. 7. No. 153. P. 1–16.
<https://doi.org/10.3389/feart.2019.00153>
- Ruols B., Klahold J., Farinotti D., Irving J. 4D GPR Imaging of a Near-Terminus Glacier Collapse Feature // The Cryosphere. 2025. V. 19. P. 4045–4059.
<https://doi.org/10.5194/tc-19-4045-2025>
- Stocker-Waldhuber M., Fischer A., Keller L., Morche D., Kuhn M. Funnel-Shaped Surface Depressions — Indicator or Accelerant of Rapid Glacier Disintegration? A Case Study in the Tyrolean Alps // Geomorphology. 2017. V. 287. P. 58–72.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.006>
- Vasilenko E.V., Machío F., Lapazarán J.J., Navarro F.J., Frolovskiy K. A Compact Lightweight Multipurpose Ground-Penetrating Radar for Glaciological Applications // Journal of Glaciology. 2011. T. 57. № 206. P. 1113–1118.
<https://doi.org/10.3189/002214311798843430>

Citation: Lavrentiev I.I., Abramov A.A., Kiseleva T.D. Collapse Funnels on the Bolshoy Azau Glacier (as of 2025). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (1): 203–208. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526010143

Collapse Funnels on the Bolshoy Azau Glacier (as of 2025)

© 2026 I. I. Lavrentiev[#], A. A. Abramov, T. D. Kiseleva

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]*e-mail: lavrentiev@igras.ru*

Received November 7, 2025; revised November 18, 2025; accepted December 29, 2025

This study analyzes the evolution of funnel-shaped depressions on the surface of the Bolshoy Azau Glacier on the Elbrus. The formation of these features is attributed to deformation of the ice body above subglacial cavities, driven by the ongoing degradation of the glacier. Systematic monitoring began in 2022; by 2025 one of the depressions had deepened to the glacier bed. The paper presents results of ground-penetrating radar survey and morphometric analyses of digital elevation models derived from aerial photogrammetry, satellite imagery, and UAV data.

Keywords: Elbrus, glacier, Bolshoy Azau, degradation, funnel, radio-echo sounding, morphometry

REFERENCES

- Adzhiev A.H., Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Savernyuk E.A., Shagin S.I.* Dynamics of Lakes of the Bolshoy Azau Glacier on Elbrus. *Kriosphera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2023, 27 (1): 45–57. <https://doi.org/10.15372/KZ20230105> [In Russian].
- Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Shagin S.I., Akaev A.R.* Mechanisms of Elbrus Lakes Outburst. *Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo centra. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2024, 24 (3): 73–84. <https://doi.org/10.46698/VNC.2024.85.56.001> [In Russian].
- Zolotarev E.A., Kharkovets E.G.* Glaciation of Elbrus at the End of the 20th Century (Digital Orthophotomap of Elbrus for 1997). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 2000, 89: 175–181 [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].
- Khromova T.E., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muravyev A. Ya., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I.* A New Catalog of Glaciers in Russia Based on Satellite Data (2016–2019). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021, 61 (3): 341–358. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030093> [In Russian].
- Hösli L., Ogier C., Bauder A., Huss M., Werder M.A., Jacquemart M., Hodel E., Swift D., Cremona A., Walden J., Farinotti D.* Subglacial Cavity Collapses on Swiss Glaciers: Spatiotemporal Distribution and Mass Loss Contribution. *Journ. of Glaciology*. 2025, 71: e74. <https://doi.org/10.1017/jog.2025.33>
- Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D.* Volume Changes of Elbrus Glaciers from 1997 to 2017. *Frontiers in Earth Science*. 2019, 7 (153): 1–16. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00153>
- Ruols B., Klahold J., Farinotti D., Irving J.* 4D GPR Imaging of a Near-Terminus Glacier Collapse Feature. *The Cryosphere*. 2025, 19: 4045–4059. <https://doi.org/10.5194/tc-19-4045-2025>
- Stocker-Waldhuber M., Fischer A., Keller L., Morche D., Kuhn M.* Funnel-Shaped Surface Depressions — Indicator or Accelerant of Rapid Glacier Disintegration? A case study in the Tyrolean Alps. *Geomorphology*. 2017, 287: 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.006>
- Vasilenko E.V., Machío F., Lapazarán J.J., Navarro F.J., Frolovskiy K.* A Compact Lightweight Multipurpose Ground-Penetrating Radar for Glaciological Applications. *Journ. of Glaciology*. 2011, 57 (206): 1113–1118. <https://doi.org/10.3189/002214311798843430>