

Экспресс-информация

УДК 551.321

doi: 10.31857/S2076673421010078

Гляциоклиматические исследования Института географии РАН в кратере Восточной вершины Эльбруса в 2020 г.

© 2021 г. В.Н. Михаленко^{1*}, С.С. Кутузов¹, И.И. Лаврентьев¹, П.А. Торопов^{1,2},
Д.О. Владимиров¹, А.А. Абрамов³, В.В. Мацковский¹

¹Институт географии РАН, Москва, Россия; ²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ³Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия

*mikhalenko@igras.ru

Glacioclimatological investigations of the Institute of Geography, RAS, in the crater of Eastern Summit of Mt. Elbrus in 2020

V.N. Mikhalenko^{1*}, S.S. Kutuzov¹, I.I. Lavrentiev¹, P.A. Toropov^{1,2},
D.O. Vladimirova¹, A.A. Abramov³, V.V. Matskovsky¹

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; ²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

³Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia

*mikhalenko@igras.ru

Received November 1, 2020 / Revised November 24, 2020 / Accepted December 22, 2020

Keywords: *Elbrus, ice core, meteorological regime, heat budget, heat flux, methane, ground temperature.*

Summary

During the field campaign in August 18–30, 2020 the meteorological regime and heat balance of the glacier surface were investigated in the crater of Mt Elbrus Eastern Summit (5600 m a.s.l.) together with the GPR measurements of the ice thickness and seasonal snow cover. Preliminary data analysis allowed the following features: the predominance of synoptic fluctuations over the diurnal ones; the high values of average and maximum wind speed associated with the impact of jet streams and with influence of leeward storms; extremely high temporal variability of relative humidity and its very high deficit in cloudless conditions conducive to intensive evaporation and sublimation from the snow surface. The maximum thickness of ice in the crater reaches 100 m, and the average is 34 m. A new ice core with a length of 96.01 m from the glacier surface to its bed had been obtained. The drilling speed varied from 11 to 1 m/h, decreasing with depth from 4.5 to 4.0 m/h on average. The thickness of the snow-firn mass is about 20 m, which is three times less than on the Western Plateau of Mt Elbrus. According to measurements in the borehole, temperature at the glacier bed is -0.6°C . The calculated heat flux is 0.39 W/m^2 . Air sampling was carried out in the crater of the Eastern Summit of Elbrus and on the Garabashi glacier. Repeated measurements of the soil temperature in the fumarole field on the outer edge of the crater of the Elbrus Eastern Summit allow the conclusion that the temperature regime is stable.

Citation: Mikhalenko V.N., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I., Toropov P.A., Vladimirova D.O., Abramov A.A., Matskovsky V.V. Glacioclimatological investigations of the Institute of Geography, RAS, in the crater of Eastern Summit of Mt. Elbrus in 2020. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (1): 149–160. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421010078

Поступила 1 ноября 2020 г. / После доработки 24 ноября 2020 г. / Принята к печати 22 декабря 2020 г.

Ключевые слова: *Эльбрус, ледниковый керн, метеорологический режим, тепловой баланс, тепловой поток, метан, температура грунта.*

С 18 по 30 августа 2020 г. в кратере Восточной вершины Эльбруса впервые проводились наблюдения за метеорологическим режимом и тепловым балансом ледника. Выполнена также радиолокационная съёмка толщины льда и сезонного снежного покрова, пробурена скважина от поверхности до ложа с получением керна льда, измерены температуры в скважине, в шурфе из сезонной снежной толщи отобраны образцы для изотопного, химического и спорово-пыльцевого анализа, на поверхности фумарольного поля и в атмосфере над ледником взяты образцы газа, продолжен мониторинг температуры грунта на фумарольной площадке.

Введение

В августе 2020 г. сотрудниками Института географии РАН был выполнен комплекс исследований в кратере Восточной вершины Эльбру-

са на высоте 5600 м над ур. моря (все высоты в статье даны над ур. моря) (рис. 1). Работы по изучению глубинного строения ледников Эльбруса, их метеорологического режима и теплового баланса ведутся в Институте географии с 2004 г.,



Рис. 1. Ледник в кратере Восточной вершина Эльбруса. Фото И.И. Лаврентьева 30 августа 2020 г.
Fig. 1. Glacier in the crater of the Eastern summit of Elbrus. Photo by I.I. Lavrentiev, August 30, 2020

и их результаты опубликованы в недавно вышедшей монографии «Ледники и климат Эльбруса» [1]. На Западном плато Эльбруса в 2009 г. был получен ненарушенный керн льда от поверхности до ложа длиной 182 м. Из-за высокой скорости аккумуляции (около 1400 мм в.э.) возраст придонных слоёв льда составил около 2 тыс. лет [2].

Значительная величина теплового потока ($0,34 \text{ Вт/м}^2$) [3] и относительно невысокая температура на ложе ледника ($-2,4^\circ\text{C}$) не исключают возможности донного таяния в наиболее глубоких слоях и потери части информации. Поэтому было высказано предположение, что в кратере Восточной вершины Эльбруса, расположенном выше плато на 500 м, годовая аккумуляция снега может быть значительно ниже из-за ветрового перераспределения снега; температура воздуха здесь, по наблюдениям 2013–2015 гг., опускается до -40°C [1]. В ходе предварительных исследований на Восточной вершине была проведена серия радиолокационных съёмок, показавшая, что толщина льда достигает 100 м, и сделан анализ изотопного состава ледникового льда [4].

Согласно современным геологическим и геофизическим исследованиям, вулкан Эльбрус не утратил своей активности, но находится в

пассивной фазе. Кальдера Эльбруса образовалась около 800 тыс. лет тому назад, а затем периоды активной вулканической деятельности чередовались с затишьями продолжительностью до 50 тыс. лет. В этот период происходили отдельные извержения, в результате чего магматический очаг оставался в горячем состоянии [5–7]. В голоцене интенсивность вулканической деятельности Эльбруса усилилась, что привело к формированию Восточной вершины. Последнее сильное извержение Эльбруса происходило в I–II веках, а менее интенсивное — около 900 лет тому назад [8]. О современной вулканической активности Эльбруса косвенно свидетельствует наличие фумарольных полей на склонах Восточной вершины и тёплых минеральных источников вокруг вулкана.

С 18 по 30 августа 2020 г. в кратере Восточной вершины проводили наблюдения за метеорологическим режимом и тепловым балансом ледника, была выполнена радиолокационная съёмка толщины льда и сезонного снежного покрова, пробурена скважина от поверхности до ложа с получением керна льда, измерены температуры в скважине, в шурфе из сезонной снежной толщи отобраны образцы для изотопного, химического и спорово-пыльцевого анализов, проведён отбор образцов газа на поверхности

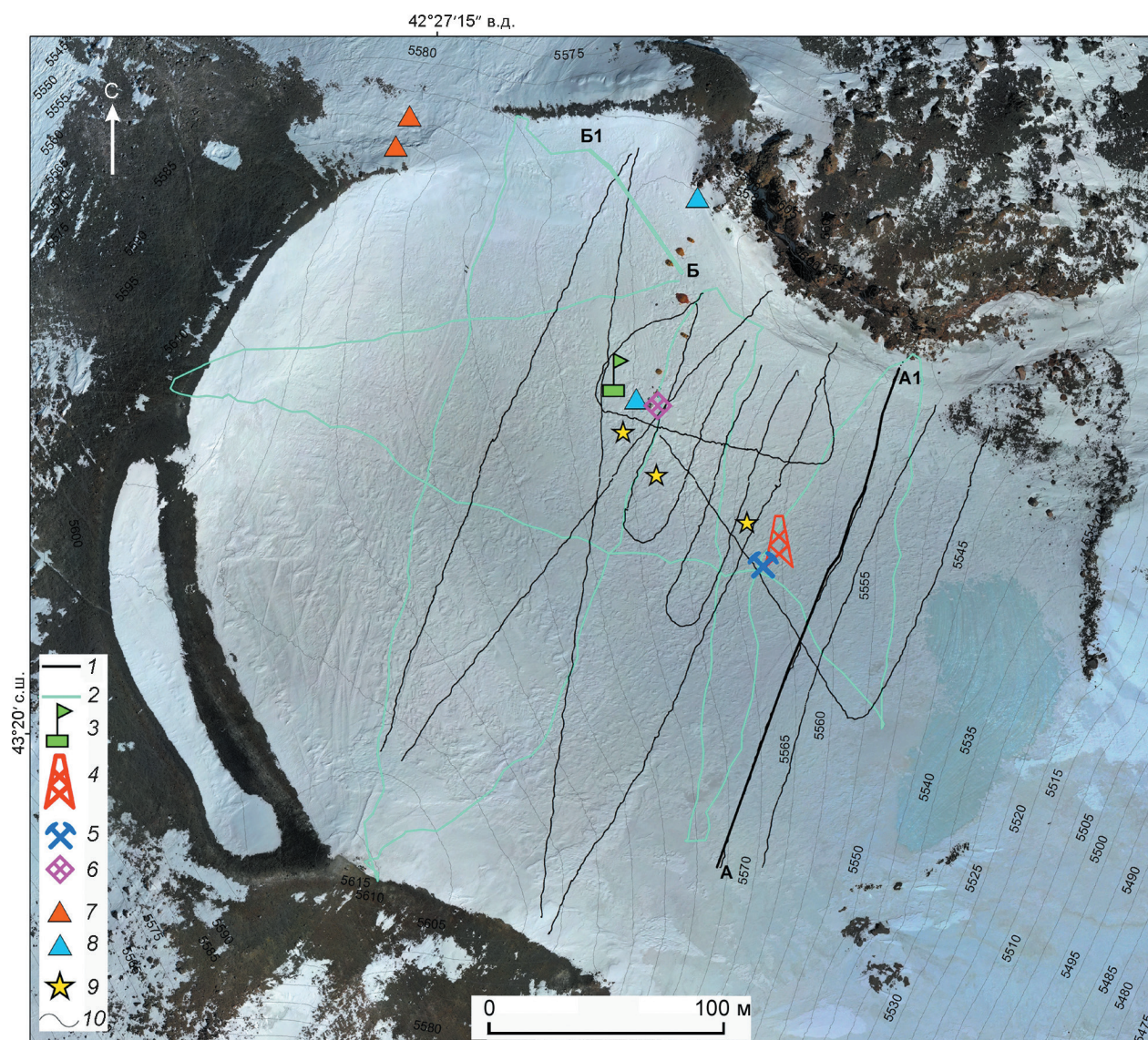


Рис. 2. Объекты исследования в кратере Восточной вершины Эльбруса в августе 2020 г.:

1 – профили радиозондирования на частоте 20 МГц; 2 – профили РЛЗ на частоте 1400 МГц; 3 – автоматическая метеостанция; 4 – скважина глубиной 96 м; 5 – снежный шурф; 6 – точка измерения температуры снежной толщи; 7 – точки отбора проб газа и измерения температуры грунта на fumarольной площадке; 8 – точки отбора проб газа на леднике; 9 – точки отбора образцов пыльцы с поверхности ледника; 10 – изогипсы поверхности ледника (проведены через 5 м). А–А1, Б–Б1 – профили, радарограммы вдоль которых приведены на рис. 4. В качестве подложки использован снимок 19 августа 2020 г. с дрона DJI MAVIC 2 Pro в нади́р с высоты 200 м (фото А.А. Абрамова); создание ортофотоплана и цифровой модели рельефа выполнено в программе Agisoft Metashape

Fig. 2. Research objects in the crater of the Eastern summit of Elbrus in August 2020:

1 – radar profiles at a frequency of 20 MHz; 2 – radar profiles at 1400 MHz; 3 – automatic weather station; 4 – borehole 96 m; 5 – snow pit; 6 – snow cover temperature measurement site; 7 – points of gas sampling and measurement of soil temperature at the fumarole site; 8 – points of gas sampling on the glacier; 9 – points of pollen sampling on the glacier surface; 10 – isohypses of the glacier surface (drawn every 5 m). A–A1, Б–Б1 – the profiles along which the radarograms are shown in Fig. 4. A photograph of August 19, 2020 from a DJI MAVIC 2 Pro unmanned aero vehicle in nadir from a height of 200 m (photo by A.A. Abramov) was used as a background, orthomosaic and digital elevation model creation in the Agisoft Metashape software

фумарольного поля и в атмосфере над ледником, продолжен мониторинг температуры грунта на фумарольной площадке, начатый в 2013 г.

(рис. 2). Кратер Восточной вершины Эльбруса заполнен ледником площадью 0,09 км², расположенном в диапазоне высот от 5621 до 5520 м.

Наклон поверхности льда в пределах кратера в среднем составляет 11° и меняется от $2-5^\circ$ в привершинной области до $25-30^\circ$ в восточной, крутонаклонённой части. Кратер Восточной вершины — самая верхняя часть области питания ледников Ирик и Джикиуганкез.

Метеорологические условия на Восточной вершине

Метеорологические наблюдения на Восточной вершине проводили с 20 по 30 августа 2020 г. с целью накопления рядов данных о типичных и экстремальных значениях метеорологических параметров в высокогорных зонах ледников, для валидации теплобалансовых блоков ледниковых моделей [9–11] и данных реанализов [12, 13], а также для физически обоснованной оценки потери массы снега во время сильных метелей за счёт возгонки ледяных кристаллов и изменений турбулентного теплообмена [14, 15]. Такие длительные и полные метеорологические измерения на Восточной вершине Эльбруса выполнены впервые. Они включали в себя: измерения температуры и влажности воздуха на уровнях 1 и 2 м над снежной поверхностью (ветровые датчики Campbell, Davis и акустический анемометр GILL), скорости, направления и порывистости ветра на высотах 0,25, 0,5 и 2 м (датчики Campbell и Davis), компонентов радиационного баланса (радиометры KIPP&Zonen), турбулентных пульсаций трёх компонентов скорости ветра и температуры (акустический анемометр GILL). Временная дискретность измерений составляла 1 мин, у акустического анемометра — 10 Гц. Результаты наблюдений представлены на рис. 3 и в таблице.

Первоначальный анализ данных позволил установить следующие особенности метеорологического режима на Восточной вершине: 1) амплитуда колебаний синоптического масштаба превышает амплитуду суточного хода основных величин; 2) высокие значения средней и максимальной скоростей ветра, связанные с прохождением атмосферных фронтов, переносом кинетической энергии струйного течения из верхней тропосферы в среднюю, а также с эффектами подветренных бурь, которые проявляются и в высокогорных районах Эльбруса [1]; 3) чрез-

Простейшие статистические характеристики основных метеорологических величин на Восточной вершине Эльбруса за период 20–30 августа 2020 г. (в скобках указано стандартное отклонение)

Параметры	Значения		
	средние	максимальные	минимальные
Температура, $^\circ\text{C}$	$-10,2(\pm 3,7)$	0,5	$-19,7$
Относительная влажность, %	$51(\pm 33)$	100	5
Парциальное давление пара, гПа	$1,3(\pm 0,9)$	5,6	0,2
Скорость ветра, м/с	$6,1(\pm 4,0)$	20,8	—

вычайно высокая временная изменчивость относительной влажности (стандартное отклонение вдвое выше, чем в среднегорных условиях) и очень высокий дефицит влажности в безоблачных условиях, что способствует интенсивному испарению и сублимации с поверхности снега.

Среди метеорологических явлений наиболее часто повторяется низовая метель, суммарная продолжительность которой в период экспедиции составила около 48 ч. В условиях безоблачной погоды во время низовой метели происходит интенсивная сублимация снежных кристаллов в воздухе [14], что может существенно увеличивать потерю массы в области аккумуляции эльбрусских ледников. Полученные данные позволят оценить этот эффект количественно.

Из компонентов теплового баланса преобладающую роль играет приходящая коротковолновая радиация, величина которой в околополуденные часы достигала 1150 Вт/м^2 . Однако при среднем альбедо 70% и слабоотрицательных значениях длинноволнового бюджета итоговый радиационный баланс не превышал 350 Вт/м^2 , что в среднем вдвое ниже, чем в области абляции ледников Кавказа [16]. Интересный результат — преобладание отрицательных значений турбулентных потоков тепла, среднее значение которых составило -35 Вт/м^2 . Особенно интенсивным отвод тепла от поверхности был в штормовых условиях 21 и 23–24 августа, когда максимальные значения турбулентного потока тепла по модулю превышали 200 Вт/м^2 . Таким образом, турбулентный теплообмен в условиях Восточной вершины представляет собой расходную составляющую теплового баланса. Похожие результаты для Западного плато Эльбруса на основе расчёта

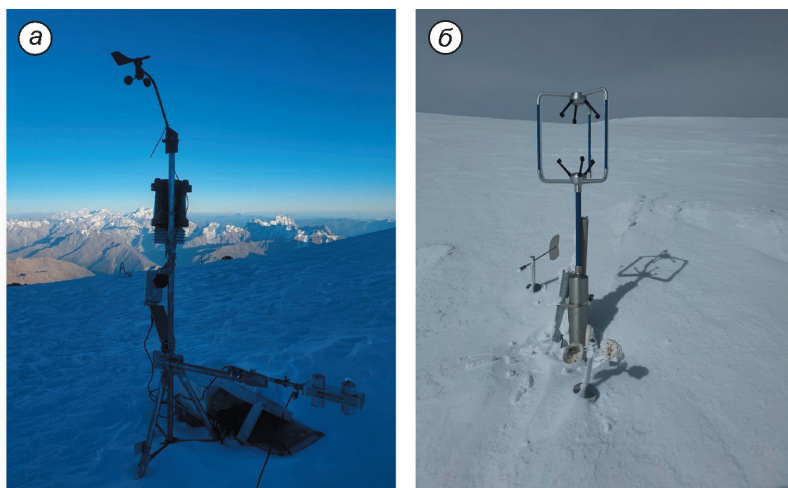
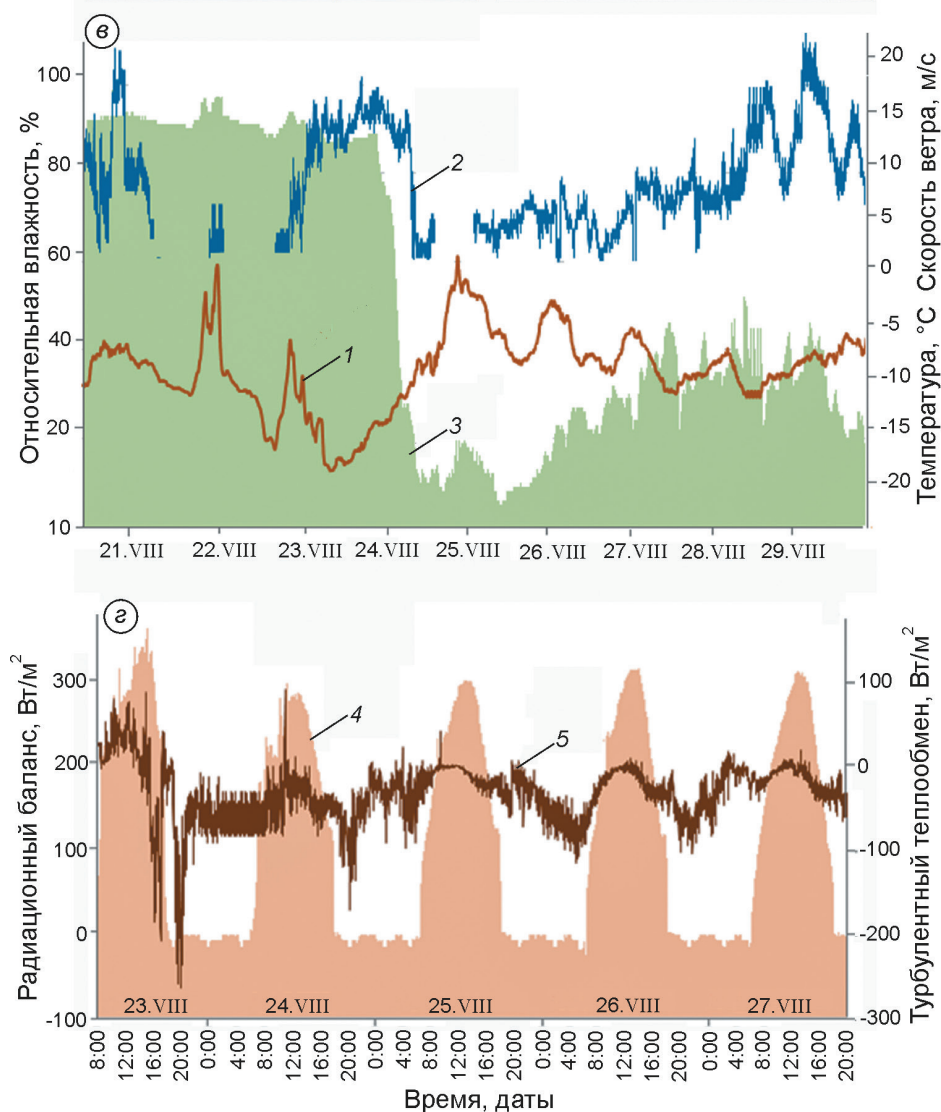


Рис. 3. Метеорологические наблюдения на Восточной вершине Эльбруса:

a – автоматизированный метеорологический комплекс, содержащий датчики температуры, влажности и скорости ветра Campbell и Davis, радиометры KIPP&ZONNEN; *б* – акустический анемометр GILL; *в* – ход основных метеорологических величин на уровне 2 м над поверхностью: 1 – температуры воздуха, °C; 2 – максимальной скорости ветра, м/с; 3 – относительной влажности, %; *г* – изменчивость основных компонент теплового бюджета: 4 – радиационного баланса R , Вт/м²; 5 – турбулентного потока тепла H , Вт/м²

Fig. 3. Meteorological observations at the Eastern Summit of Elbrus:

a – an automated meteorological complex, including Campbell and Davis temperature, humidity and wind speed sensors, KIPP & ZONNEN radiometers; *б* – the GILL acoustic anemometer; *в* – the course of the main meteorological values at the level of 2 meters above the surface: 1 – air temperature, °C; 2 – maximum wind speed, m/s; 3 – relative humidity, %; *г* – variability of main heat budget's components: 4 – radiation balance R , W/m²; 5 – turbulent heat flux, W/m²



потоков тепла по аэродинамическим формулам приведены в работе [17]. Отметим также значительный поток тепла в толщу снега, который по

предварительным оценкам данных температурных измерений в пятиметровой скважине на метеоплощадке достигал в отдельные дни 30 Вт/м².

Радиолокационные исследования

Наземные радиолокационные измерения толщины льда в кратере выполнены с помощью моноимпульсного георадара ВИРЛ-7 (20 МГц) по сети профилей общей протяжённостью 2,6 км (8700 точек измерений). Оборудование (приёмник, передатчик, блок управления, источники питания и GPS) было смонтировано на рюкзаках и перемещалось по леднику группой из трёх человек. Радарная и навигационная информация записывалась в автоматическом режиме с интервалом 0,5 с, или

примерно каждые 30 см. Предварительный анализ полученных данных в поле позволил правильно выбрать точку бурения: в 70 м к востоку от геометрического центра кратера, в самой глубокой его части. Пример радиолокационного разреза, проходящего вблизи скважины, приведён на рис. 4, а. На радарограмме хорошо видна геометрия подлёдного ложа — его форма типична для кратера вулкана и напоминает воронку с довольно крутыми бортами. По предварительным оценкам, максимальная толщина льда в кратере достигает 100 м, а в среднем составляет 45 м. Совмещение всех радиолокаци-

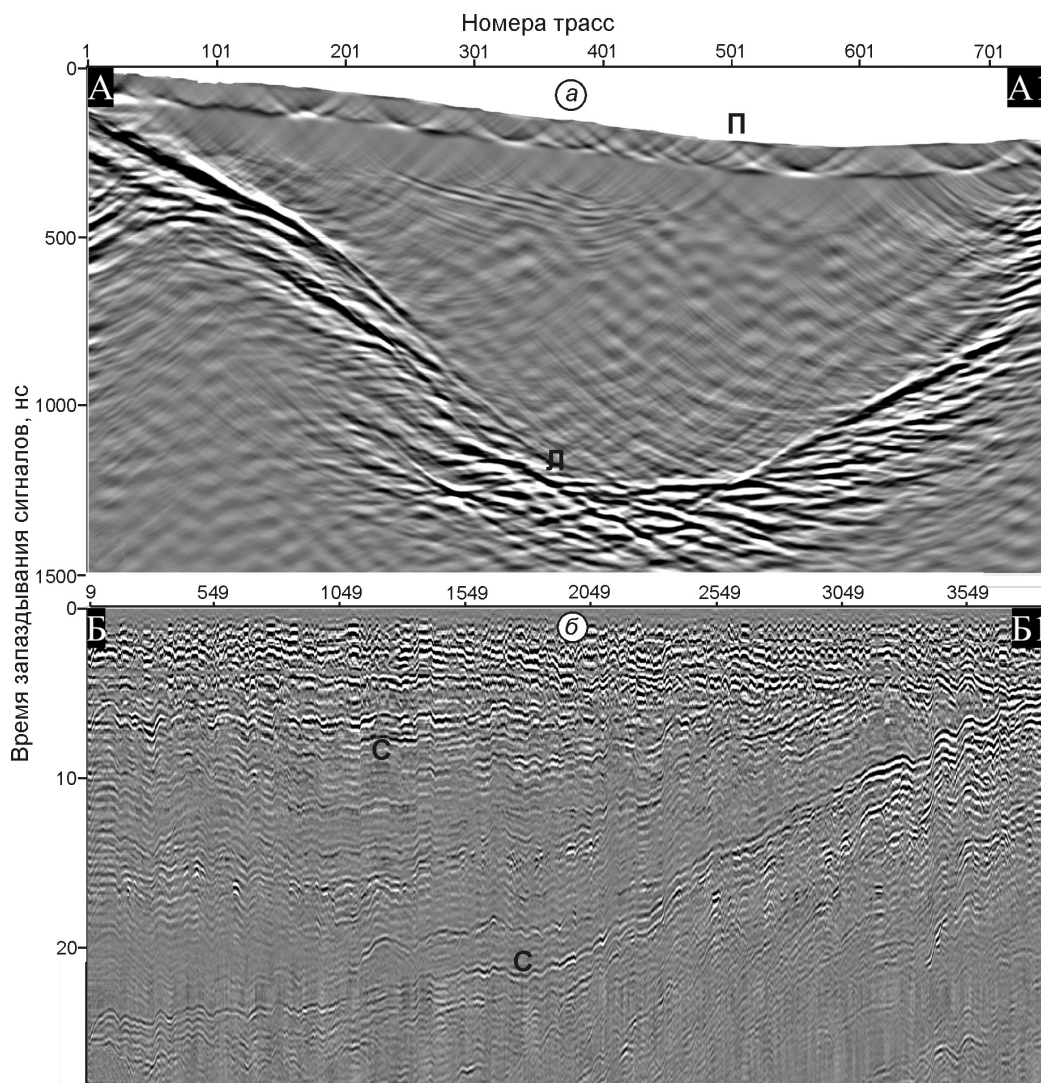


Рис. 4. Примеры радарограмм, полученных на частотах 20 МГц (а) и 1400 МГц (б) в кратере Восточной вершины Эльбруса.

П — поверхность ледника; Л — ложе ледника; С — слои в сезонной снежной толще. Положение разрезов приведено на рис. 2

Fig. 4. Examples of radarograms obtained at frequencies of 20 MHz (a) and 1400 MHz (b) in the crater of the Eastern summit of Elbrus.

П — glacier surface; Л — glacier bed; С — layers in the seasonal snow mass. The position of the sections is shown in Fig. 2

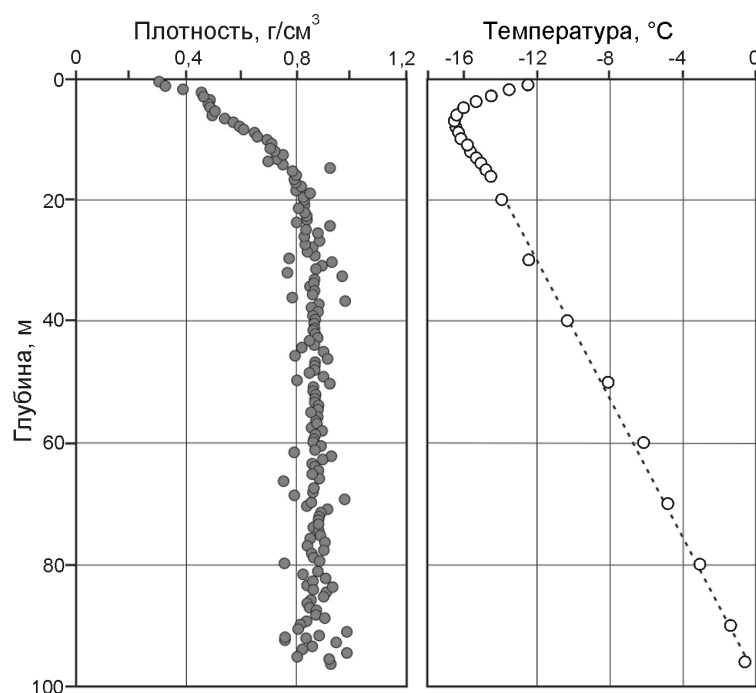


Рис. 5. Результаты измерения плотности и температуры в скважине на леднике в кратере Восточной вершины Эльбруса.

Пунктирной линией показана линейная аппроксимация температурного градиента

Fig. 5. Density and temperature measurements in a borehole on a glacier in the crater of the Eastern Summit of Elbrus.

The dotted line shows the linear approximation of the temperature gradient

онных данных позволит уточнить карты толщины льда и рельефа подлёдного ложа, построенные на основании данных предыдущих радиолокационных съёмок 2006 и 2017 гг. с локами ВИРЛ-6 и георадаром «Зонд 12-е» соответственно [1].

Кроме того, на Восточной вершине нами впервые была выполнена площадная радиолокационная съёмка толщины снежно-фирновой толщи с помощью высокочастотного (1400 МГц) георадара «Пикор-Лёд». На профилях общей длиной около 2 км хорошо различаются слои в снежно-фирновой толще до глубины около 5 м (см. рис. 4, б). Совместная обработка радиолокационных данных, керны и образцов сезонной снежной толщи из неглубокого шурфа позволит выделить годовые слои на радарограммах и оценить пространственно-временное распределение аккумуляции в этой области Эльбруса.

Бурение скважины

Скважина в леднике (43,34804° с.ш., 42,45606° в.д., $H = 5565$ м) была пробурена в период с 20 по 26 августа 2020 г. за пять рабочих дней с помощью электромеханической установки компании Geo Tech (Япония). Промывочные жидкости не применялись. Скорость бурения варьировала от 11 до 1 м/ч, в среднем уменьшаясь с глубиной от 4,5

до 4,0 м/ч. Скважина достигла ложа на глубине 96,01 м. В керне после стратиграфического описания измеряли плотность снега, фирна и льда (рис. 5). Керна льда лишён ледяных прослоев, что указывает на отсутствие поверхностного таяния. Мощность снежно-фирновой толщи составляет около 20 м, что в три раза меньше, чем на Западном плато. Переход фирна в лёд, в отличие от плато, происходит достаточно резко. Более того, значение глубины замыкания пор — одно из самых низких для сухих условий льдообразования. К основным факторам, вызывающим процесс уплотнения снежно-фирновой толщи, относятся среднегодовая температура и скорость аккумуляции снега; дополнительно на процесс уплотнения могут влиять и другие метеопараметры (скорость ветра, влажность, и т.п.). Вероятно, быстрый переход фирна в лёд может быть связан с постоянными сильными ветрами на Восточной вершине и повышенной ветровой упаковкой верхней части снежно-фирновой толщи. Однако не исключено влияние и других механизмов, например теплового потока.

Температурные измерения в скважине

После завершения бурения и выстаивания тампонирующей скважины в течение суток с помощью термистора в ней была измерена тем-

температура с точностью 0,1 °С. Результаты измерений приведены на рис. 5. На глубинах до 8 м отмечается резкое изменение температуры — примерно на 4 °С, связанное с сезонными колебаниями температуры на поверхности. Температура на ложе ледника составляла –0,6 °С. На глубинах от 20 м до ложа ледника изменение температуры практически линейно, что свидетельствует об установившемся режиме теплопереноса и позволяет определить величину теплового потока. Плотность теплового потока g (Вт/м²) пропорциональна вертикальному градиенту температуры и может быть записана в следующем виде:

$$g = -\lambda \text{grad} T \text{ или } g = -\lambda (T_1 - T_2) / \Delta h, \quad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности льда, Вт/м·К; T_1 и T_2 — температура в верхней и нижней частях линейного участка температур соответственно, °С; Δh — расстояние между точками 1 и 2, м [3].

Учитывая, что в диапазоне температур от –20 до 0 °С коэффициент теплопроводности льда $\lambda = 2,25$ Вт/м·К, получаем значение плотности теплового потока в точке измерений, равное 0,39 Вт/м². Оно несколько превосходит величину, полученную для Западного плато Эльбруса, которая составляет 0,34 Вт/м² [1]. Кратер Восточной вершины Эльбруса расположен примерно на 500 м выше Западного плато, поэтому средняя годовая температура воздуха на поверхности примерно на 3 °С ниже. Температура на ложе ледника в условиях Западного плато на глубине 181,8 м составляет –2,4 °С, при этом в кратере Восточной вершины при толщине льда около 100 м её значение существенно выше (–0,6 °С). Этот эффект можно объяснить большей плотностью геотермального теплового потока в кратере Восточной вершины по сравнению с Западным плато.

Отбор образцов газа на фумарольной площадке и на поверхности ледника

Концентрация метана в воздухе, заключённом во льду керна 2009 г., была измерена методом непрерывного потока (continuous flow analysis — CFA — [18]) в Институте наук

о Земле (IGE), Гренобль, Франция, в 2014 г. Получен сигнал, покрывающий 1815–1995 гг. и описывающий региональный рост концентрации метана в атмосфере в индустриальный и постиндустриальный периоды. Сравнение данных с другими региональными реконструкциями атмосферного метана по данным ледниковых кернов горных районов, а также Гренландии и Антарктиды показало отличия в образцах, вероятно, возникшие из-за разной антропогенной нагрузки на эти районы. Однако остался открытым вопрос о сравнении абсолютных значений концентрации метана и временной изменчивости широтного градиента этого парникового газа.

С целью калибровки абсолютных значений, полученных по керну 2009 г., мы провели отбор проб воздуха в кратере Восточной вершины Эльбруса (усл. обозначения 7 и 8 на рис. 2) и по высотному профилю ледника Гарабаши (не представлено на схеме). Всего отобрано 29 образцов воздуха на высотах 3387–5598 м. Газ отбирался 150-миллиметровым шприцем в стандартный пенициллиновый флакон вместимостью 10 мл с резиновой пробкой и металлической обсадкой. Флаконы предварительно были заполнены перенасыщенным солевым раствором. Образец газа вводился в перевёрнутый флакон, раствор сливался до половины через второй прокол пробки медицинской иглой (рис. 6, б). Вials хранились и транспортировались в перевёрнутом положении в ёмкостях для медицинских анализов, заполненных солевым раствором для создания гидрозатвора, удержания газовой пробы при наборе атмосферного давления на уровне г. Москва и предотвращения образования метана in-situ. Концентрация метана была измерена в ноябре 2020 г. в почвенно-экологической лаборатории Аграрно-технологического института РУДН (г. Москва) методом газовой хроматографии. Полученные данные планировалось использовать для калибровки абсолютных значений метанового ряда за последние два столетия по данным ледникового керна Эльбруса. Результаты анализов не позволяют сделать заключение об абсолютной концентрации метана в приземном слое атмосферы, поскольку разница между образцами-дубликатами в несколько раз превышает погрешность измерений. Отбор образцов воздуха планируется повторить в полевой сезон 2021 г.



Рис. 6. Фумарольное поле (показано жёлтым эллипсом) на внешней кромке кратера Восточной вершины Эльбруса (а) (фото А.А. Абрамова 19 августа 2020 г.). Д.О. Владимирова проводит отбор образцов для газового анализа (б) (фото В.Н. Михаленко).

1 – ледник Джикиуганкез; 2 – ледник Ирикчат

Fig. 6. Fumarole field (shown by a yellow ellipse) on the outer rim of the crater of the Eastern Summit of Elbrus (a) (photo by A.A. Abramov, August 19, 2020) and D.O. Vladimirova takes samples for gas analysis (b) (photo by V.N. Mikhalenko).

1 – glacier Djikiugankez; 2 – glacier Irikchat

Измерение температуры грунта на фумарольной площадке

О существовании фумарольных полей в вершинной части вулканической постройки Эльбруса известно давно. При этом инструментальные измерения температур, если и вели, то единоразово, поэтому организация пункта температурного мониторинга в 2013 г. стала одной из задач проводившихся исследований. Температурные датчики были размещены у поверхности и на глубинах 40 и 80 см. По результатам годового цикла замеров установлено, что температуры в пределах фумарольной площадки по-

ложительны (17–26 °С) в течение года и слабо зависят от температурного режима воздуха [1]. Данные с датчика, размещённого на глубине 80 см, считать не удалось. В 2020 г. для уточнения температурного режима более глубоких слоёв грунта в пределах фумарольной площадки прошли измерения с помощью термощупа (производства Криолаб, на базе датчика DS1920). Отверстие для щупа подготавливали с помощью перфоратора с буром длиной 120 см. Породы в пределах фумарольного поля – рыхлые, значительно преобразованные гидротермальными процессами. В период измерений поверхность была закрыта свежим снегом, а по южному краю

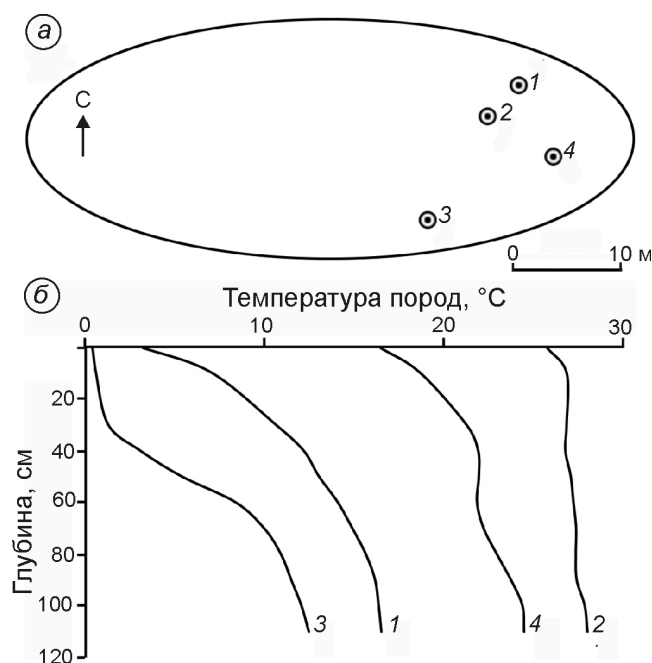


Рис. 7. Температурный режим пород в различных частях фумарольного поля на западном борту кратера Восточной вершины Эльбруса.

Измерения проводили 19 августа 2020. 1–4 – точки измерений на схеме (а) и соответствующие им температурные графики (б)

Fig. 7. Ground temperature regime in different parts of the fumarole field on the western side of the crater of the Elbrus Eastern Summit.

The measurements were taken on August 19, 2020. 1–4 – the measurement points on the plan (a) and the corresponding temperature graphs (b)

сформировалась снежная пещера. Область положительных температур занимает порядка 450 м². Результаты измерений в разных частях площадки приведены на рис. 7. Температура на глубине 120 см не превышала 30 °С, а в краевой части 10 °С. Сравнение с результатами, полученными в 2013–2014 гг., позволяет предположить стабильность температурного режима на фумарольном поле в районе Восточной вершины Эльбруса.

Благодарности. Работа выполнена на территории Национального парка «Приэльбрусье» при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-17-01270-П). Авторы благодарны А.Я. Арабову и К.А. Арабову (Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН) за помощь в организации работ, Д.В. Карелину и А.В. Долгих (Институт географии РАН) за методические рекомендации и предоставленное оборудование для отбора образ-



Участники экспедиции после завершения буровых работ.

Слева направо: С.С. Кутузов, И.И. Лаврентьев, В.Н. Михаленко, П.А. Торопов, Д.О. Владимирова, В.В. Мацковский. Фото В.Н. Михаленко

Expedition members after completion of drilling.

S.S. Kutuzov, I.I. Lavrentiev, V.N. Mikhalkenko, P.A. Toropov, D.O. Vladimirova, V.V. Matskovsky. Photo by V.N. Mikhalkenko

цов газа, В.И. Мицкевичу (Институт географии РАН), который координировал работы, компании Heliaction и А. Болдыреву за доставку вертолётом участников экспедиции, оборудования и снаряжения к месту проведения исследований, А.Ю. Артамонову (Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН) за содействие при подготовке метеорологического оборудования.

Acknowledgments. The research was carried out on the territory of the Elbrus National Park with the financial support of the Russian Science Foundation (project № 17-17-01270-П). The authors are grateful to A.Ya. Arabov and K.A. Arabov (Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences) for help in organizing the work, D.V. Karelin and A.V. Dolgikh (Institute of Geography, RAS) for methodological recommendations and equipment for gas sampling, V.I. Mitskevich (Institute of Geography RAS), who coordinated our work, Heliaction company and A. Boldyrev for the delivery of expedition members and equipment by helicopter to the research site, A.Yu. Artamonov (Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences) for assistance in preparing meteorological equipment.

Литература

References

1. Ледники и климат Эльбруса / Отв. ред. В.Н. Михаленко. Москва—СПб.: Нестор—История, 2020. 372 с.
2. Preunkert S., Legrand M., Kutuzov S., Ginot P., Mikhailenko V., Friedrich R. The Elbrus (Caucasus, Russia) ice core record — Part 1: reconstruction of past anthropogenic sulfur emissions in south-eastern Europe // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. V. 19. P. 14119–14132. doi: 10.5194/acp-19-14119-2019.
3. Лиходеев Д.В., Михаленко В.Н. Температура кровли магматической камеры вулкана Эльбрус // *Геофизические исследования*. 2012. Т. 13. № 4. С. 70–75.
4. Чижова Ю.Н., Михаленко В.Н., Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Козачек А.В., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И. Изотопно-кислородный состав снежно-фирновой толщи на Восточной вершине Эльбруса // *Лёд и Снег*. 2019. Т. 59. № 3. С. 293–305. doi: 10.15356/2076-6734-2019-3-426.
5. Богатилов О.А., Гурбанов А.Г., Кошуг Д.Г., Газеев В.М., Шабалин Р.В., Докучаев А.Я., Мелекестцев И.В., Сулержицкий Л.Д., Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Гришин С.Ю. Основные циклы эволюции вулкана Эльбрус (Северный Кавказ) по данным ЭПР датирования кварца // *Вулканология и сейсмология*. 2003. Т. 3. С. 3–14.
6. Лаверов Н.П., Добрецов Н.Л., Богатилов О.А., Бондур В.Г., Гурбанов А.Г., Карамурзов Б.С., Коваленко В.И., Мелекестцев И.В., Нечаев Ю.В., Пономарева В.В., Рогожин Е.А., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Федотов С.А., Хренов А.П., Ярмолюк В.В. Новейший и современный вулканизм на территории России / Отв. ред. Н.П. Лаверов. М.: Наука, 2005. 604 с.
7. Короновский Н.В., Мышенкова М.С., Брянцева Г.В. Вулкан Эльбрус. Северный Кавказ // *Жизнь Земли*. 2015. Т. 37. С. 12–20.
8. Богатилов О.А., Мелекестцев И.В., Гурбанов А.Г., Катов Д.М., Пурига А.А. Эльбрусская кальдера (Северный Кавказ) // *ДАН*. 1998. Т. 363. № 4. С. 515–517.
9. Mölg T., Hardy D.R. Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on Kilimanjaro // *Journ. of Geophys. Research*. 2004. V. 109 (D16). P. D16104. doi: 10.1029/2003JD004338.
10. Cullen N.J., Mölg T., Kaser J., Steffen K.I., Hardy D.R. Energy balance model validation on the top of Kilimanjaro, Tanzania, using eddy covariance data // *Annals of Glaciology*. 2007. V. 46. P. 227–233. doi: 10.3189/172756407782871224.
11. Huss M., Hock R. A new model for global glacier change and sea-level rise // *Frontiers in Earth Science*. 2015. V. 3. P. 1–22. doi: 10.3389/feart.2015.00054.
12. Hardy D.R., Vuille M., Bradley R.S. Variability of snow accumulation and isotopic composition on Nevado
1. *Ledniki i klimat Elbrusa*. Elbrus Glaciers and Climate. Ed. by V.N. Mikhaleiko. Moscow—St. Petersburg: Nestor—Istoriya, 2020: 372 p.
2. Preunkert S., Legrand M., Kutuzov S., Ginot P., Mikhailenko V., Friedrich R. The Elbrus (Caucasus, Russia) ice core record — Part 1: reconstruction of past anthropogenic sulfur emissions in south-eastern Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019, 19: 14119–14132. doi: 10.5194/acp-19-14119-2019.
3. Likhodeev D.V., Mikhaleiko V.N. Temperature estimation for the Most Upper Part of Magmatic Chamber of the Elbrus Volcano. *Geofizicheskie Issledovaniya*. Geophysical Research. 2012, 13 (4): 70–75. [In Russian].
4. Chizhova Yu.N., Mikhaleiko V.N., Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Kozachek A.V., Kutuzov S.S., Lavrent'yev I.I. Isotopic composition of oxygen in snow-and-firn thickness on the Eastern peak of Elbrus, the Caucasus. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019, 59 (3): 293–305. doi: 10.15356/2076-6734-2019-3-426. [In Russian].
5. Bogatikov O.A., Gurbanov A.G., Koshchug D.G., Gazeyev V.M., Shabalin R.V., Dokuchayev A.YA., Melekestsev I.V., Sulerzhitskiy L.D., Belousov A.B., Belousova M.G., Grishin S.YU. The main evolutionary cycles of Elbrus volcano (North Caucasus) according to EPR dating of quartz. *Vulkanologia i Seysmologia*. Volcanology and Seismology. 2003, 3: 3–14. [In Russian].
6. Laverov N.P., Dobretsov N.L., Bogatikov O.A., Bondur V.G., Gurbanov A.G., Karamurзов B.S., Kovalenko V.I., Melekestsev I.V., Nechayev Yu.V., Ponomareva V.V., Rogozhin Ye.A., Sobisevich A.L., Sobisevich L.Ye., Fedotov S.A., Khrenov A.P., Yarmolyuk V.V. Noveyshiy i sovremennyy vulkanizm na territorii Rossii. The newest and modern volcanism in Russia / Resp. editor N.P. Laverov. M.: Nauka, 2005: 604 p. [In Russian].
7. Koronovskiy N.V., Mysheikova M.S., Bryantseva G.V. *Vulkan El'brus. Severnyy Kavkaz*. Volcano Elbrus. North Caucasus. *Zhizn' Zemli*. Earth life. 2015, 37: 12–20. [In Russian].
8. Bogatikov O.A., Melekestsev I.V., Gurbanov A.G., Katov D.M., Puriga A.A. Elbrus caldera (North Caucasus). *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 1998, 363 (4): 515–517. [In Russian].
9. Mölg T., Hardy D.R. Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on Kilimanjaro. *Journ. of Geophys. Research*. 2004, 109 (D16): D16104. doi: 10.1029/2003JD004338.
10. Cullen N.J., Mölg T., Kaser J., Steffen K.I., Hardy D.R. Energy balance model validation on the top of Kilimanjaro, Tanzania, using eddy covariance data. *Annals of Glaciology*. 2007, 46: 227–233. doi: 10.3189/172756407782871224.
11. Huss M., Hock R. A new model for global glacier change and sea-level rise. *Frontiers in Earth Science*. 2015, 3: 1–22. doi: 10.3389/feart.2015.00054.

- Sajama, Bolivia // Journ. of Geophys. Research. 2003. V. 108 (D22). P. 4693. doi: 10.1029/2003JD003623.
13. Торопов П.А., Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Морозова П.А., Шестакова А.А. Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 1. С. 5–19. doi: 10.15356/2076-6734-2016-1-5-19.
14. Bintanja R. Modelling snowdrift sublimation and its effect on the moisture budget of the atmospheric boundary layer // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2001. V. 53 (2). P. 215–232. doi: 10.3402/tellusa.v53i2.12189.
15. Pomeroy J.W., Essery R. Turbulent fluxes during blowing snow: field tests of model sublimation of blowing snow in the atmospheric boundary layer. predictions // Hydrol. Proc. 1999. V. 13 (18). P. 2963–2975. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19991230)13:18<2963::AID-HYP11>3.0.CO;2-9.
16. Волошина А.П. Метеорология горных ледников // МГИ. 2001. Т. 92. С. 3–138.
17. Торопов П.А., Шестакова А.А., Полюхов А.А., Семенова А.А., Михаленко В.Н. Особенности летнего метеорологического режима Западного плато Эльбруса // Лёд и Снег. 2020. Т. 6. № 1. С. 58–76. doi: 10.31857/S2076673420010023.
18. Stowasser C., Buizert C., Gkinis V., Chappellaz J., Schüpbach S., Bigler M., Faïn X., Sperlich P., Baumgartner M., Schilt A., Blunier T. Continuous measurements of methane mixing ratios from ice cores // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5. № 5. P. 999–1013. doi: 10.5194/amt-5-999-2012.
12. Hardy D.R., Vuille M., Bradley R.S. Variability of snow accumulation and isotopic composition on Nevado Sajama, Bolivia. Journ. of Geophys. Research. 2003, 108 (D22): 4693. doi: 10.1029/2003JD003623.
13. Toropov P.A., Mikhailenko V.N., Kutuzov S.S., Morozova P.A., Shestakova A.A. Temperature and radiation regime of glaciers on slopes of the Mount Elbrus in the ablation period over the last 65 years. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (1): 5–19. doi: 10.15356/2076-6734-2016-1-5-19. [In Russian].
14. Bintanja R. Modelling snowdrift sublimation and its effect on the moisture budget of the atmospheric boundary layer. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2001, 53 (2): 215–232. doi: 10.3402/tellusa.v53i2.12189.
15. Pomeroy J.W., Essery R. Turbulent fluxes during blowing snow: field tests of model sublimation of blowing snow in the atmospheric boundary layer. predictions. Hydrol. Proc. 1999, 13 (18): 2963–2975. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19991230)13:18<2963::AID-HYP11>3.0.CO;2-9.
16. Voloshina A.P. Meteorology of mountain glaciers. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2001, 92: 3–138. [In Russian].
17. Toropov P.A., Shestakova A.A., Polyukhov A.A., Semenova A.A., Mikhailenko V.N. Character of the summer meteorological regime on the Western plateau of Elbrus (the Caucasus). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 58–76. doi: 10.31857/S2076673420010023. [In Russian].
18. Stowasser C., Buizert C., Gkinis V., Chappellaz J., Schüpbach S., Bigler M., Faïn X., Sperlich P., Baumgartner M., Schilt A., Blunier T. Continuous measurements of methane mixing ratios from ice cores. Atmos. Meas. Tech. 2012, 5 (5): 999–1013. doi: 10.5194/amt-5-999-2012.

Подписано в печать 18.02.2021 г. Дата выхода в свет 25.03.2021 г. Формат 60 × 88¹/₈. Цифровая печать.
Усл.печ.л. 19.56. Уч.-изд.л. 20.0. Бум.л. 10.0. Тираж 21 экз. Бесплатно. Заказ 3922.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-76744 от 24 сентября 2019 г.,
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Учредители: Российская академия наук, Институт географии Российской академии наук, Русское географическое общество.

Оригинал-макет подготовлен в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт географии Российской академии наук.

Издатель: Российская академия наук, 119991 Москва, Ленинский просп., 14.

Исполнитель по госконтракту № 4У-ЭА-068-20

ООО «Объединённая редакция», 109028, г. Москва, Подкопаевский пер., д. 5, каб. 6.

16+ Отпечатано в типографии «Book Jet» (ИП Коняхин А.В.), 390005, г. Рязань, ул. Пушкина, 18, тел. (4912) 466-151.