

Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.324.43

doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-5-22

Изменения баланса массы ледника Гарабаша (Эльбрус) на рубеже XX–XXI вв.

© 2019 г. О.В. Рототаева^{1*}, Г.А. Носенко¹, А.М. Керимов², С.С. Кутузов¹,
И.И. Лаврентьев¹, С.А. Никитин¹, А.А. Керимов³, Л.Н. Тарасова¹

¹Институт географии РАН, Москва, Россия; ²Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия;

³Отдел географических исследований Кабардино-Балкарского научного центра РАН, Нальчик, Россия

*rototaeva@mail.ru

Changes of the mass balance of the Garabashy Glacier, Mount Elbrus, at the turn of 20th and 21st centuries

O.V. Rototaeva^{1*}, G.A. Nosenko¹, A.M. Kerimov², S.S. Kutuzov¹, I.I. Lavrentiev¹,
S.A. Nikitin¹, A.A. Kerimov³, L.N. Tarasova¹

¹Institute of Geography RAS, Moscow, Russia; ²High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia;

³Department of Geographical Research of the Kabardino-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russia.

*rototaeva@mail.ru

Received May 20, 2018 / Revised October 4, 2018 / Accepted December 21, 2018

Keywords: *air temperature, glacier reduction, mass balance of glacier, intensive melting, precipitation, southern slope of Mount Elbrus, two climatic periods.*

Summary

Long-term series of observations on the glacier of the southern slope of Elbrus manifest the change of two climatic periods in the highlands of the Caucasus. During the first one, relatively cold and snowy period of 1982–1997 with a small positive mass balance, the Garabashi Glacier accumulated a layer of 0.8 m.e. The second period (1998–2017) is characterized by rising summer air temperatures and increasing precipitation in the first decade, and catastrophic melting in 2010–2017. The mass balance of the glacier averaged $-0.63 \text{ m w.e. yr}^{-1}$, and in some years it reached $-1.00 \div -1.50 \text{ m w.e. yr}^{-1}$. In the last ten years, frequency of vast anticyclones covering the southern part of the European part of Russia and the North Caucasus increased. Summer temperatures in the Elbrus region rose to almost the level of the 1950s that was the hottest decade of the XX century. Duration of the summer season on the glaciers increased. Active melting resulted in elevation of the equilibrium line of the Garabashy Glacier by 200 m. In the main part of the glacier alimentation area, i.e. at heights of 3800–4000 m, the large parts of the firn area had disappeared, but open ice of the ablation zone had appeared. The former areas of the "warm" firn zone, where up to 35% of melt water retained within the 20-meter firn thickness, were replaced by the firn-ice zone, and the ice discharge increased. The glacier alimentation is decreased, and its tongue retreats with increasing velocity. Rocks and entire lava ridges release from ice at different levels of the glacier. The inter-annual variations of the glacier mass balance are controlled by intensity of ablation. In the second period, the correlation coefficient of these values reached 0.97 compared to 0.82 in the first one. In total over 36 years of observations, reduction of the glacier mass during the second period resulted in loss of volume (0.05 km^3 or 14%), area (0.51 km^2 or 11.4%), and of ice layer (11.4 m).

Citation: Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Kerimov A.M., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I., Nikitin S.A., Kerimov A.A., Tarasova L.N. Changes of the mass balance of the Garabashy Glacier, Mount Elbrus, at the turn of 20th and 21st centuries. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (1): 5–22. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-5-22.

Поступила 20 мая 2018 г. / После доработки 4 октября 2018 г. / Принята к печати 21 декабря 2018 г.

Ключевые слова: *баланс массы ледника, два климатических периода, интенсивное таяние, осадки, сокращение ледника, температура воздуха, южный склон Эльбруса.*

На основе 36-летнего ряда ежегодных наблюдений за балансом массы и состоянием ледника Гарабаша на Эльбрусе выделены два периода: 1982–1997 и 1998–2017 гг. В первом периоде отмечен небольшой положительный баланс массы (+0,8 м в.э.), а во втором летние температуры в Приэльбрусье повысились на 1 °С, граница питания поднялась на 200 м. За все годы наблюдений ледник потерял 14% своего объема и 11,4% площади.

Введение

Ледник Гарабаши – часть южного склона ледникового массива Эльбруса, пятого по высоте вулкана мира (5642 м). Ледник начинается на высоте около 4900 м и оканчивается на 3330 м, его площадь в 1980–90-х годах составляла 4,47 км². В период МГГ (1957–1959 гг.) большие комплексные исследования в Приэльбрусье проводила экспедиция МГУ имени М.В. Ломоносова под руководством Г.К. Тушинского. Обширные наблюдения на ледниках Эльбруса были дополнены фототеодолитной съёмкой всего массива. Результаты работ опубликованы в монографии «Оледенение Эльбруса» [1] и нашли отражение в более поздних изданиях – Каталоге ледников СССР [2], работе А.П. Волошиной [3] и др. В 1961–1964 гг. на южном склоне вёл исследования Институт географии АН СССР – с двумя зимовками и стационаром на Ледовой базе (3860 м). Изучались процессы формирования ледникового климата, аккумуляции и абляции, строение фирновой толщи и др. [4].

Через 20 лет работы Института географии возобновились под руководством А.Б. Бажева. Главной задачей было изучение процессов массообмена и многолетней динамики балансового состояния ледников. Ежегодные наблюдения за балансом массы ледника Гарабаши начались в 1982 г. и не прерываются до настоящего времени. Ледник включён в систему наблюдений Международной службы мониторинга ледников, данные по нему публикуются в бюллетенях службы. В 1987 г. у правого края ледника, на высоте 3850 м был построен домик стационара, что намного облегчило дальнейшие работы. До сих пор в нашей стране это – единственная научная станция на ледниках на таких высотах.

Наблюдения за балансом массы ледника дополнялись другими исследованиями. В 1987–1990 гг. в области питания Гарабаши пробурены глубокие скважины до ложа (73–77 м) в «тёплой» фирновой и фирново-ледяной зонах [5], а также в правой части ледника Большой Азау на нижней границе «холодной» фирновой зоны. Выполнялись лабораторные анализы кернa. Ленинградский горный институт проводил испытания новой малогабаритной термобуровой установки. В 1988 г. совместно с коллегами Томского университета выполнена маршрутная радиолокационная

съёмка ледников Гарабаши, Большой и Малый Азау. Построена карта толщины льда, рассчитаны объёмы ледников [6]. Во второй половине 1990-х годов в программу работ включился отдел географии Кабардино-Балкарского научного центра РАН, расширились геохимические исследования. Высота ледниковых склонов Эльбруса даёт возможность оценки дальнего переноса химических веществ в свободной атмосфере [7].

С 2004 г. Институт географии РАН проводит исследования на Западном привершинном плато Эльбруса, расположенном на ледоразделе ледников Большой Азау и Кюкюртлю на высоте 5150 м. Впервые на Кавказе открыта и изучается толща в снежно-фирновой зоне с минимальным таянием, проникающим всего на несколько сантиметров. В 2004–2009 гг. выполнены радиолокационная съёмка плато и керновое бурение до ложа ледника (182 м). Анализ изотопного и геохимического состава кернa используется для палеоклиматических реконструкций [8].

В настоящей работе рассматриваются процессы формирования баланса массы ледника южного склона Эльбруса на фоне изменений климатических условий в регионе.

Методика исследований

Составляющие баланса массы ледника определяются прямыми измерениями на поверхности и в толще. Основные наблюдения ведутся вдоль двух опорных продольных профилей на леднике, отмеченных постоянными дюралевыми вехами, забуренными в лёд (рис. 1), а также в дополнительных шурфах и скважинах. В начале работ, в 1987–1991 гг., проводился наибольший комплекс наблюдений: весенние и осенние снегосъёмки на всей площади ледника; измерения таяния в течение всего сезона абляции; метеорологические восьмисрочные наблюдения на специально оборудованной площадке на высоте 3830 м, примерно на высоте границы питания; там же на снегомерной площадке вели измерения таяния и летнего накопления снега; измерения и расчёт внутреннего питания в толще снега и фирна на разных высотах.

Построение в течение пяти лет карт всех составляющих водно-ледового баланса, а также высотных балансовых кривых за 10 лет позво-

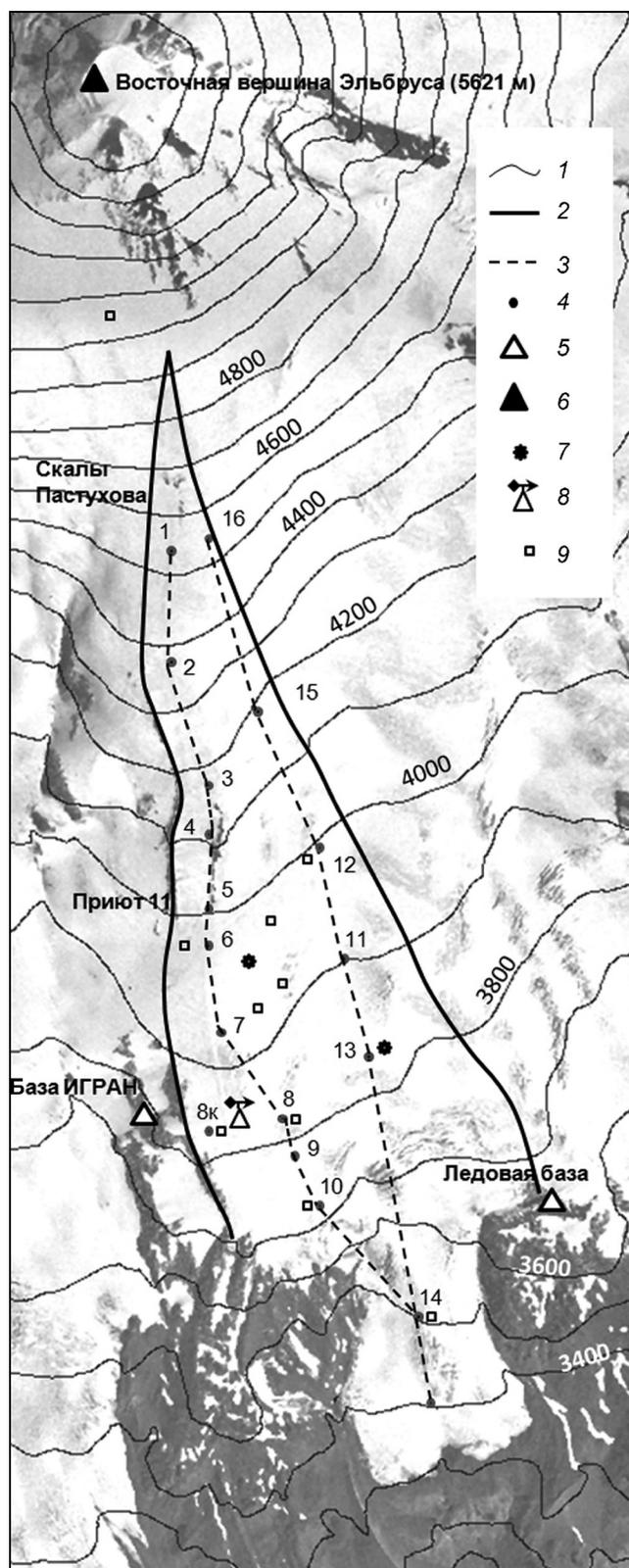


Рис. 1. Схема ледника Гарабаша:

1 – горизонтали; 2 – границы ледника; 3 – линии опорных продольных профилей; 4 – постоянные веши; 5 – гляциологические стационары; 6 – вершина Эльбруса; 7 – глубокие скважины; 8 – метеоплощадка; 9 – дополнительные шурфы; на подложке – аэрофотоснимок 08.09.1997 г.

Fig. 1. The scheme of the Garabashi Glacier:

1 – contour lines; 2 – glacier boundaries; 3 – lines of supporting longitudinal profiles; 4 – permanent landmarks; 5 – glaciological base; 6 – the top of the mountain; 7 – deep wells; 8 – the meteorological site; 9 – additional holes; on the substrate – aerial photograph 09.08.1997

на площади ледника получены путём расчёта нормированных коэффициентов – отношением значений в точках вдоль опорных профилей к средним величинам в 100-метровых высотных зонах, а также на всём леднике. Коэффициенты межгодовой вариации нормированных показателей не превысили 20% [9]. В дальнейшем ежегодный расчёт баланса массы ледника был основан на детальных измерениях на леднике в начале и конце периода таяния, построении по этим данным высотных кривых аккумуляции и абляции вдоль профилей и переходе через нормированные коэффициенты от профилей к средним величинам в каждой 100-метровой зоне и на площади ледника. В начале XXI в. в условиях резкого увеличения таяния расчёты пришлось корректировать с учётом данных прямых измерений на леднике.

В долине Азау, ниже ледника, с 1951 г. на высоте 2143 м работает сетевая метеостанция Терскол. Её данные использовались для получения ряда эмпирических связей – температуры воздуха на леднике и в долине, таяния на площадке 3830 м с температурой на леднике, а также с температурой в Терсколе. Это позволило по суточным значениям температуры воздуха в долине определять таяние на площадке весной до начала наших наблюдений или осенью после их окончания. От опорной площадки через установленные уравнения регрессии рассчитывалась абляция на профиле и в высотных зонах. На основе связи аккумуляции и абляции на леднике с температурой и осадками в Терсколе и на других метеостанциях в окружении Эльбруса выполнена реконструкция ежегодных значений баланса массы ледника с начала XX в. до 1995 г. [10]. В этом ряду 1940–50-е годы выделяются как период наибольшей потери массы ледником.

лили определить подобие этих характеристик из года в год. Количественные показатели типового распределения аккумуляции и абляции

Метеорологические условия в Приэльбрусье

Данные метеостанции Терскол характеризуют климатические условия в Приэльбрусье во второй половине XX – начале XXI вв. Для оценки балансового состояния ледников определяющий показатель – изменения летних температур воздуха и зимних осадков. За все годы наблюдений в Терсколе (1951–2017 гг.) средняя летняя температура воздуха (июнь–август) составила 11,6 °С; максимальный диапазон её колебаний – от 9,4 °С (1967 г.) до 13,6 °С (1957 г.). Изменчивость летних температур σ , как и на всей высокогорной части Кавказа [11], незначительна (табл. 1). Межгодовые отклонения для отдельных периодов наблюдений составляли 0,7–0,9 °С при коэффициенте вариации $C_v = 0,06 \div 0,08$. Вариации средних годовых температур больше – $C_v = 0,2 \div 0,25$.

Все средние годовые данные в статье приводятся за гидрологический год: с сентября по август. Зимний период на высоком леднике Эльбруса мы определяем в среднем с сентября, когда обычно заканчивается таяние, до мая включительно, когда снегопады ещё обеспечивают превышение аккумуляции над начавшимся таянием. Но ежегодно баланс массы определяется действительными сроками: сезон абляции может начаться в конце мая или продолжаться до середины сентября. Диапазон высот ледника на склоне Эльбруса велик, и сроки сезонов сменяются, мы принимаем средние по леднику.

О скорости снижения температуры воздуха с высотой в ледниковой зоне Эльбруса дают представление расчёты вертикальных температурных градиентов. По методике, разработанной при составлении карт Атласа снежно-ледовых ресурсов мира [12, 13], мы пересчитали градиенты летних температур воздуха на Кавказе для периода 1960–1987 гг. (позже данных метеостанций было слишком мало). Оказалось, что по сравнению с прошлым периодом (1955–1965 гг.) [14] они практически не изменились. Средний склоновый градиент в верховьях Малки–Терека составляет 0,58–0,60 °С на 100 м подъёма.

На протяжении трёх лет (2014–2016 гг.) мы круглогодично или в отдельные месяцы выполняли наблюдения за изменением температуры воздуха с высотой с помощью автоматических датчиков Thermochron iButton, установленных на Поляне

Таблица 1. Изменения основных статистических характеристик: температуры воздуха, осадков на метеостанции Терскол за 1951–2017 гг. и элементов баланса массы ледника Гарабаши за годы наблюдений*

Параметры	Период, годы	Среднее значение	Средне-квадратические отклонения σ	Коэффициент вариации C_v
<i>Показатели метеоусловий</i>				
Средняя температура за гидрологический год, °С	1951–2017	2,7	0,67	0,25
	1951–1962	3,3	0,63	0,19
	1963–1997	2,4	0,49	0,2
	1998–2017	2,8	0,69	0,25
Средняя летняя температура за июнь–август, °С	1951–2017	11,6	0,92	0,08
	1951–1962	12,3	0,80	0,06
	1963–1997	11	0,64	0,06
	1998–2017	12,2	0,69	0,06
Средние зимние осадки за сентябрь–май, мм	1951–2017	655	143	0,22
	1951–1962	573	57	0,1
	1963–1997	641	148	0,23
	1998–2017	729	135	0,18
Средние летние осадки за июнь–август, мм	1951–2017	289	69	0,24
	1951–1962	236	50	0,21
	1963–1997	306	73	0,24
	1998–2017	292	54	0,18
<i>Элементы баланса массы</i>				
Аккумуляция, см в.э.	1982–2017	122	16,41	0,14
	1982–1997	124	17,96	0,15
	1998–2017	120	14,64	0,12
Абляция, см в.э.	1982–2017	153	50,40	0,33
	1982–1997	115	23,12	0,20
	1998–2017	183	45,35	0,25
Баланс массы ледника, см в.э.	1982–2017	–31	56,08	–1,81
	1982–1997	9	31,77	3,53
	1998–2017	–63	50,67	–0,80

*Жирным шрифтом выделены итоговые данные за весь период наблюдений.

Азау (база МГУ, 2300 м), Пике Терскол (3127 м, обсерватория), у Базы Гарабаши ИГРАН (3850 м, на скальной гряде в 120 м от правого края ледника), а также на скалах в фирновой области ледника на высоте 4000 м. В 2013/14 г. на каменистой поверхности восточного кратера Эльбруса (5600 м) в течение года работал датчик с радиационной защитой, установленный экспедицией ИГРАН.

По средним суточным данным 2016 г. рассчитан температурный градиент на склоне между Поляной Азау и Пиком Терскол, который снижался с мая по август с 0,71 до 0,53 °С/100 м, а для июня–августа он был равен в среднем 0,6 °С/100 м. Гра-

диент между Поляной Азау и Базой Гарабаши, которая находится в зоне прямого охлаждающего влияния ледника, увеличивался до 0,69–0,73, составляя в среднем 0,71 °C/100 м. Средний градиент в июне–августе 2014 г. между Поляной Азау и вершиной Эльбруса оказался равным 0,67 °C/100 м, а между 4000 м и вершиной в мае–июне – 0,56 °C/100 м. Наблюдения вдоль склона за суточным ходом температур в июле–августе 2013 г. [15] показали градиент в полуденные часы между Терсколом и Базой Гарабаши 0,84 °C/100 м, а между Базой и вершиной – 0,69 °C/100 м.

Сравнения целого ряда измерений в разные годы на разных уровнях, несмотря на большой разброс величин градиентов, позволяют предполагать, что в верхней зоне области питания ледников, на «куполе» Эльбруса, снижение температуры с высотой замедляется по сравнению с нижележащей частью склона. Величина температурного скачка при переходе на ледниковую поверхность также весьма изменчива. По измерениям 1988–1991 гг. получены величины скачка 1–2 °C при средней суточной температуре на леднике в диапазоне от –2 до +5 °C. Это согласуется с данными А.П. Волошиной по наблюдениям в районе «Ледовой базы» в 1958–1960 гг.: тогда скачок составлял от 1,2 до 2,8 °C в зависимости от температуры внеледниковой поверхности соответственно от 2 до 10 °C [3].

Данных о распределении осадков на склоне Эльбруса мало из-за недостатка прямых измерений. Наблюдения по осадкомерам в 1951–1958 гг. показали годовую величину осадков в среднем от 790 мм в Терсколе до 810 мм на 3020 м (Пик Терскол) и 1130 мм на 4200 м у Приюта 11 [16]. Однако зимой из-за сильных ветров на больших высотах показания осадкомеров сильно занижены; при частых метелях недоучёт осадков может достигать 60–75% [17]. Осадки в долине и выпадение снега на ледниках далеко не всегда синхронны. На станции Терскол средний многолетний уровень годовой суммы осадков – около 950 мм, почти треть их выпадает за три летних месяца. Зимой при средней величине 655 мм основной диапазон значений разных лет – 500–900 мм. 56% осадков выпадает в сентябре–октябре и апреле–мае, в эти месяцы суммы осадков составляют в среднем около 100 мм. Межгодовые колебания зимних и летних осадков мало отличаются, коэффициент вариации C_v составляет порядка 0,23 (см. табл. 1).

В целом за вторую половину XX – начало XXI в. тренды показывают увеличение летней температуры воздуха в Терсколе на 0,7 °C и зимних осадков на 180 мм. Однако линейные тренды – условный показатель лишь общей направленности процесса за многолетний период. Для оценки условий существования ледников важнее изменения метеоусловий за разные годы, и в общем ряду данных такую картину показывают осреднение значений по десятилетиям и аппроксимация полиномом четвёртого порядка (рис. 2). За все годы наблюдений на метеостанции Терскол дважды происходила смена климатических условий.

Начало работы станции – 1950-е годы – совпали с максимумом самого жаркого тридцатилетия 1930–50-х годов на Кавказе. Температура лета в Приэльбрусье поднялась в среднем до 12,4 °C, на 0,8 °C выше многолетней нормы (1951–2017 гг.). Аномалии температур воздуха в 1951–1962 гг. были самыми высокими за 67 лет наблюдений во все четыре сезона (рис. 3). Температура трёх зимних месяцев оказалась даже положительной: +0,3 °C. Тогда же рекордными были отрицательные аномалии осадков, особенно летом и осенью. Все аномалии способствовали активному таянию ледников.

Затем наступила смена условий. Главной чертой тридцатилетия 1960–80-х годов и почти до конца 1990-х годов было значительное похолодание. В 1960-х годах летняя температура воздуха понизилась на 1,4 °C, затем она повышалась, но в среднем для всего периода осталась на 0,6 °C ниже нормы. Изменчивость её в эти годы минимальна – $\sigma = 0,6$ °C. С 1960-х годов начала увеличиваться снежность зим, постепенно приблизившись к многолетнему среднему. Изменчивость зимних осадков, как и летних, больше по сравнению с другими периодами. Особенно выделяется аномалия летних осадков.

Период с конца 1990-х до 2017 г. снова «повернул» климатическую кривую. Рост летней температуры начался во второй половине 1990-х годов, а с 1998 г. она резко поднялась, аномалия достигла 0,7 °C. При этом в начале XXI в. резко увеличились и зимние осадки, превысив норму на 200 мм, но затем они значительно уменьшились. Особенно заметна в этот период высокая аномалия весенних осадков, в противоположность прошлому периоду, когда она была отрицательной (см. рис. 2, 3). Таким образом, ряд наших работ на леднике Гарабаши, начавший-

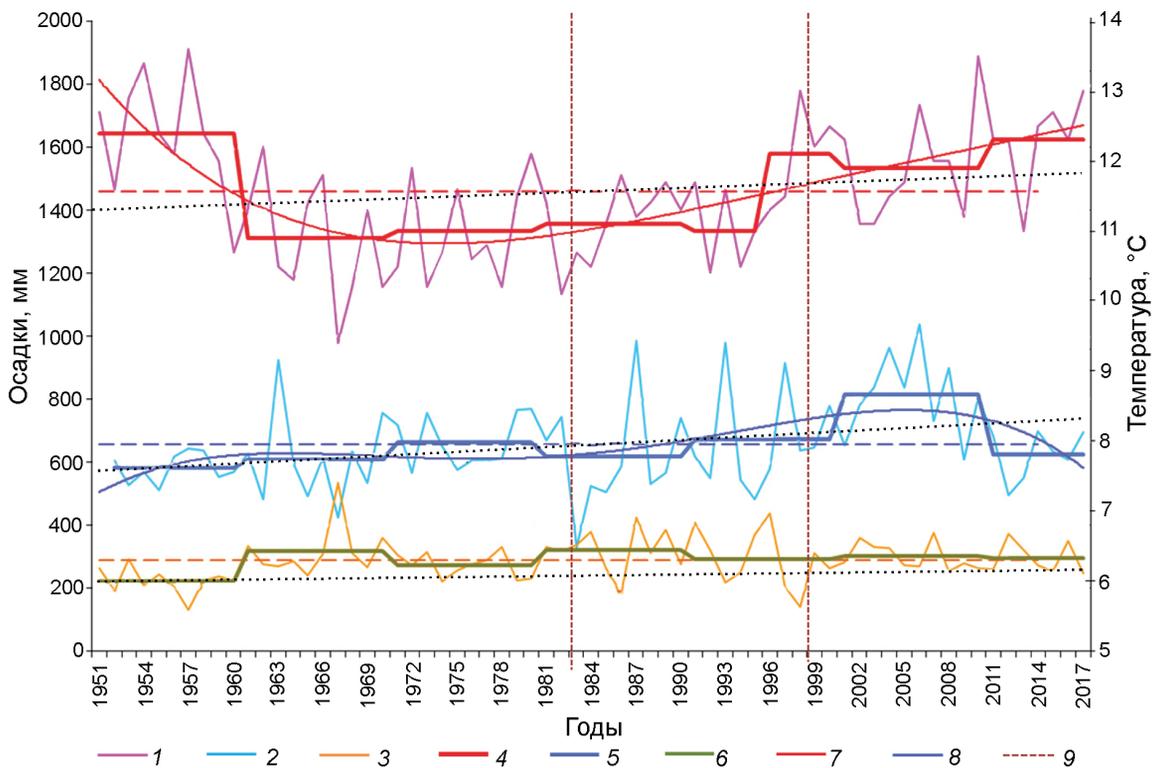


Рис. 2. Ход средней летней температуры воздуха и осадков за время работы метеостанции Терскол.

1–3 – ежегодные значения: 1 – летние температуры; 2 – зимние осадки; 3 – летние осадки; 4–6 – усреднение по десятилетиям: 4 – летние температуры; 5 – зимние осадки; 6 – летние осадки; 7–8 – аппроксимация полиномом 4-й степени: 7 – летние температуры; 8 – зимние осадки; 9 – границы периодов наблюдений; средние многолетние значения показаны пунктиром, линейные тренды – чёрными мелкими точками

Fig. 2. The course of the average summer air temperature, °C and precipitation, mm according to the Terskol weather station. 1–3 – annual values: 1 – summer temperatures; 2 – winter precipitation; 3 – summer precipitation; 4–6 – averaging over decades: 4 – year temperatures; 5 – winter precipitation; 6 – summer precipitation; 7–8 – approximation by a polynomial of the 4th degree: 7 – summer temperatures; 8 – winter precipitation; 9 – boundaries of the observation periods; perennial averages are shown by a dotted line, linear trends by black dots

ся в 1982 г, совпал со сменой двух климатических периодов в Кавказском регионе на рубеже XX–XXI вв. Первый период наблюдений – с 1982 до 1997 г. – холодный и достаточно снежный, благоприятный для ледников; второй – 1998–2017 гг. – с жаркими летними сезонами, в котором особенно выделяются последние восемь лет.

Первый период наблюдений, 1982–1997 гг.

Аккумуляция. Зимой основная масса снега поступает на поверхность ледников южного склона Эльбруса во время обильных снегопадов и метелей, наблюдающихся обычно 2–3 раза в месяц, когда накопление снега может достигать 50–70% месячной суммы [1]. Они связаны либо с холодными фронтами западно-европейских цикло-

нов, либо с мощными вторжениями средиземноморских циклонов, которые приносят весной на склоны Эльбруса наиболее интенсивные осадки. Потоки влаги со стороны Чёрного моря, поднимаясь вдоль открытой к югу широкой долины р. Ингури, достигают западных и южных склонов Эльбруса на высотах более 3,5 км. Величины аккумуляции на Гарабаши коррелируют с осадками на станциях южного склона Эльбруса [10].

В зимний период максимумы осадков в осенние и весенние месяцы играют разную роль в снегонакоплении на леднике. Осенние снегопады менее благоприятны, так как в сентябре часть снега успевает стаять, а в октябре почти весь выпадающий снег уносится с фирновых полей сильными ветрами, когда их средняя скорость на высоте 4000 м равна 13 м/с [1, 16]. В апреле–мае при уменьшении скорости ветра до 6–8 м/с и

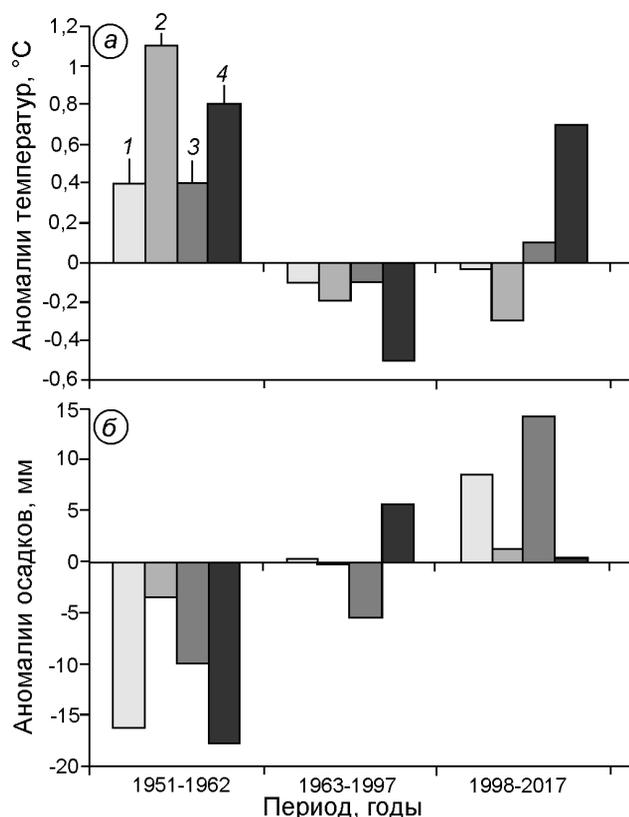


Рис. 3. Отклонения от многолетней нормы температуры воздуха (а) и осадков (б) в отдельные сезоны разных климатических периодов за время работы метеостанции Терскол.

1 – осень; 2 – зима; 3 – весна; 4 – лето

Fig. 3. Deviations from the multiyear norm of air temperature (a) and precipitation (b) in separate seasons of different climatic periods according to the Terskol weather station.

1 – autumn; 2 – winter; 3 – spring; 4 – summer

большой влажности снега он сохраняется на леднике до начала сезона абляции. В верхней части склонов Эльбруса процесс аккумуляции происходит в течение всего года. Зимой число дней с осадками на леднике велико – до 70% времени. Поле аккумуляции построено достаточно сложно, что вызвано переотложением снега западными ветрами, повторяемость которых здесь более 80% в году. Во время метелей скорость ветра часто достигает 20–30 м/с. Водозапас в областях сноса и накопления снега на леднике может отличаться в пять раз и более [17].

В целом на леднике аккумуляция растёт с высотой до пояса наибольшего накопления на высотах 3700–4100 м. В правой и центральной частях ледника максимум снега всегда наблюдается на

верхнем «плато» – 3900–4000 м, приуроченном к пологому выровненному участку склона, а также на втором, нижнем фирновом поле, на высотах 3650–3750 м. Левая часть ледника отличается значительно большей аккумуляцией – здесь в широкую продольную ложбину постоянно переметается снег с более возвышенной правой части. Наши ежегодные измерения на двух профилях вдоль ледника показали различия в величине накопления в два-три раза. Выше 4100 м, при крутизне склона «купола» Эльбруса до 20–30° и более, аккумуляция резко убывает. Здесь отложение снега наиболее зарегулировано ветрами. В левой части ледника оно постепенно снижается до 100 и 50 см в.э., тогда как в правой – до 50 и 20 см в.э., и в конце зимы обширные участки склона нередко лишены снега и покрыты льдом, отполированным ветрами. По нашим измерениям, в 1980-е годы до высоты 5100 м аккумуляция на склоне составляла в начале лета 25–35 см в.э. В седловине Эльбруса (5300 м) ветровой снос снега настолько силён, что баланс массы постоянно равен нулю: остатки хижины, построенной здесь ещё в 1933 г., сохранились до настоящего времени.

В 1980–90-е годы аккумуляция на леднике составила в среднем 124 см в.э. (табл. 2), что близко к норме за весь срок наблюдений на Гарабаши – 122 см в.э. Близ конца ледника слой снега весной обычно равен 100–120 см в.э., на верхнем и нижнем «плато» – в среднем 160–180 см в.э., а в отдельных ареалах максимального накопления – до 200–250 см в.э. Межгодовые колебания аккумуляции наблюдались в основном в пределах 110–130 см в.э., $C_v = 0,15$. Наименьшие её значения отмечались в 1982/83 г. (98 см в.э.), а также в 1984/85 и 1985/86 гг. – порядка 100 см в.э.

Необычно снежными в первый период были зимы 1986/87, 1992/93, 1996/97 гг., когда осадки в Приэльбрусье превышали 900 мм. Эти же зимы отличались и массовым сходом лавин. Зима 1986/87 г. оказалась в XX в. рекордной на Кавказе и по снежности, и по масштабу последствий схода катастрофических лавин [18]. В Приэльбрусье необычно интенсивные снегопады начались в декабре, а в январе осадки более 270 мм превысили месячную норму в 5 раз и привели к сходу особо крупных лавин в долине Баксана [19]. Экстремальные осадки наблюдались и в мае – более 250 мм. В эту зиму огромной силы лавины принесли небывалые разрушения и бед-

Таблица 2. Годовой баланс массы ледника Гарабаши, 1981/82–2016/17 гг., и средние значения за периоды наблюдений (выделены жирным шрифтом), см в.э.

Год	Аккумуляция	Абляция	Баланс массы
1981/82	142	80	62
1982/83	98	97	1
1983/84	129	95	34
1984/85	103	113	-10
1985/86	100	164	-64
1986/87	170	109	61
1987/88	119	92	27
1988/89	131	128	3
1989/90	132	123	9
1990/91	134	137	-3
1991/92	111	97	14
1992/93	140	105	35
1993/94	121	164	-43
1994/95	119	120	-1
1995/96	104	107	-3
1996/97	132	113	19
1982-1997	124	115	9
1997/98	107	258	-151
1998/99	116	198	-82
1999/2000	95	201	-106
2000/01	112	187	-75
2001/02	137	111	26
2002/03	133	117	16
2003/04	140	115	25
2004/05	135	115	20
2005/06	145	211	-66
2006/07	114	177	-63
2007/08	136	178	-42
2008/09	109	146	-37
2009/10	138	262	-124
2010/11	114	200	-86
2011/12	103	202	-99
2012/13	111	139	-28
2013/14	118	210	-92
2014/15	113	216	-103
2015/16	112	210	-98
2016/17	120	213	-93
1998-2017	120	183	-63
1982-2017	122	153	-31

ствия, особенно на южном склоне Кавказа. В Сванетии иногда над развалинами целых поселений возвышались только древние башни. На леднике Гарабаши в 1986/87 г. величина аккумуляции была максимальной за все годы наблюде-

ний – в среднем 170 см в.э., а на высотах 3900–4000 м – более 260 см в.э.

Абляция. Значительное похолодание 1960–90-х годов вместе с повышенной снежностью способствовало малой абляции на ледниках Эльбруса. В первый период наблюдений её величина на Гарабаши составляла в среднем 115 см в.э. Наибольшие значения – 130–160 см в.э. – отмечались в 1986, 1991 гг. (рис. 4), когда летние температуры в Приэльбрусье поднимались до 11,8 °С. Изменчивость абляции также мала – коэффициент вариации $C_v = 0,2$, но колебания летних температур в районе ещё меньше – $C_v = 0,06$; из этого следует, что изменения абляции зависят и от ряда других факторов. Таяние близ конца ледника обычно начинается в первых числах мая; в основной части области питания на высоте 3800–4000 м – в середине июня, но водоотдача из снежной толщи происходит здесь в конце месяца, а выше 4200 м – в июле. Весной таяние нередко задерживается из-за большого слоя зимнего снега. Так, после аномально снежной зимы и весны 1986/87 г. за лето растаяло сезонного снега в три раза больше, чем льда на постепенно освобождавшейся поверхности языка.

Месяцы наиболее активного таяния – июль и август, тогда как в июне на леднике ещё преобладает циклоническая погода, наблюдается большое число дней с осадками и отрицательными средними суточными температурами воздуха [20]. В июле–августе могут быть продолжительные периоды с высокой температурой воздуха, которые имеют решающее значение в повышении суммарной величины абляции. Это – по 5–7 и даже 9 ясных дней подряд с устойчивой антициклональной погодой и со значительной величиной радиационного баланса в условиях поступившей в Приэльбрусье тёплой воздушной массы. Такие дни отмечались в 1986, 1989, 1991 гг. Температура в Терсколе поднималась выше 14 °С, а на леднике суточное таяние превышало 35 мм, что в полтора раза больше средней величины в другие дни без осадков. Особая роль таких дней с непрерывным таянием отмечалась на Эльбрусе и ранее [3].

Продолжительность периода абляции зависит в первую очередь от погоды в сентябре. Обычно в первых числах сентября ледник уже окончательно покрывается новым зимним снегом, но иногда таяние наблюдается до конца месяца. Так было,

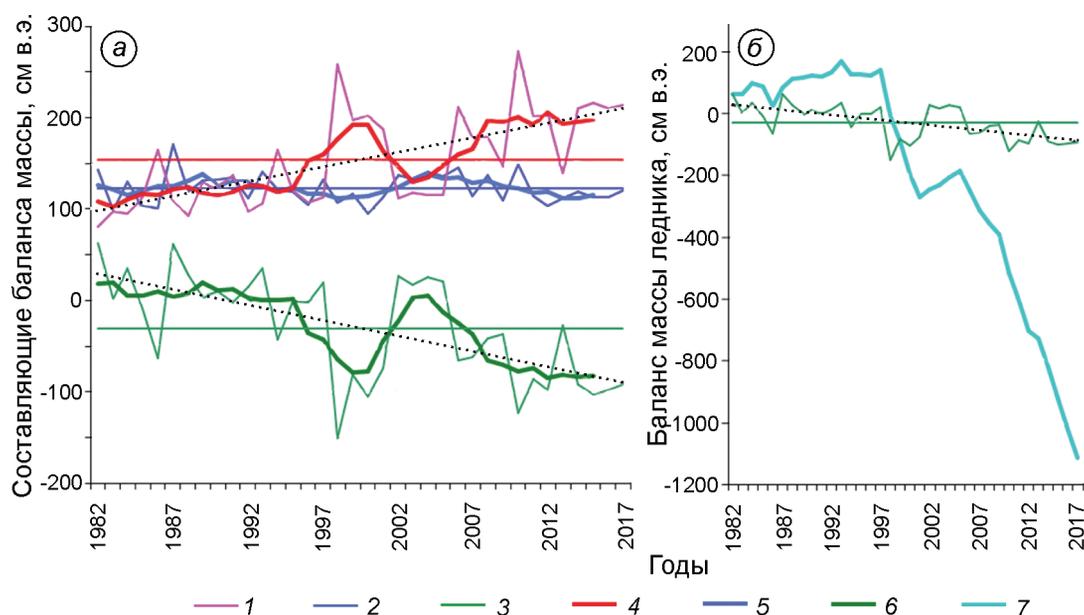


Рис. 4. Колебания баланса массы ледника Гарабаши за период наблюдений 1982–2017 гг. (а) и кумулятивная кривая баланса массы (б).

1–3 – годовые значения: 1 – абляции; 2 – аккумуляции; 3 – баланса массы; 4–6 – пятилетние скользящие средние: 4 – абляции; 5 – аккумуляции; 6 – баланса массы; 7 – кумулятивный баланс; средние значения показаны горизонтальными линиями, тренды – чёрными мелкими точками

Fig. 4. The mass balance fluctuations of the Garabashi Glacier over the observation period 1982–2017 (a) and cumulative mass balance (b).

1–3 – annual values: 1 – ablation; 2 – accumulation; 3 – mass balance; 4–6 – five-year moving averages: 4 – ablation; 5 – accumulation; 6 – mass balance; 7 – cumulative balance; mean values are shown by horizontal lines, trends by black dots

например, в 1986 и 1994 гг., когда в Терсколе температура сентября превышала $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ при норме $8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ для этого периода. В 1994 г. таяние продолжалось до 2 октября, что максимально повысило годовую абляцию, несмотря на температуру июня–августа не выше нормы.

На абляцию существенно влияет частота летних снегопадов. Больше всего снега выпадало летом 1987 и 1996 гг.; а в 1988 г. в июне–августе на леднике наблюдалось 63 дня с осадками [20] и годовая абляция оказалась минимальной – 92 см в.э. Обильные снегопады снизили общую абляцию также летом 1989 г., несмотря на тёплое лето. Суточные измерения на снегомерной площадке показали, что 23 дня со снегопадами в течение сезона прибавили к годовой аккумуляции $30,5\text{ см в.э.}$ Главное значение имеет не столько число дней со снегопадами, сколько дней, затраченных на таяние этого снега. В июле свежий снег обычно стаивал в течение 1–2 дней без осадков, но в конце летнего сезона оставался на поверхности до 4–5 дней. Суточное таяние свежего снега составляло в среднем $4\text{--}8\text{ мм в.э.}$, се-

зонного снега – $20\text{--}25\text{ мм в.э.}$, а открывшейся в августе поверхности фирна – до $40\text{--}45\text{ мм в.э.}$

Распределение таяния на леднике подчинено, как обычно, высотной зависимости. Диапазон величин летнего таяния в первом периоде – от $3\text{--}4\text{ м в.э.}$ слоя воды близ конца ледника до 10 см в.э. в верхних его зонах. Кроме того, на больших высотах таяние снижается из-за уменьшения колебаний температур воздуха, как средних месячных, так и суточных, в результате усиления влияния свободной атмосферы [11], а также уменьшения амплитуды радиационного баланса. Наблюдения на южном склоне Эльбруса на высотах 3850 и 5150 м показали уменьшение суточных колебаний температуры в 2–3 раза по сравнению с долинной станцией Терскол [15]. Снижение дневных температур объяснялось усилением потока отражённой радиации в высоких, постоянно заснеженных областях. Альbedo на разных участках поверхности ледника Гарабаши, по нашим измерениям, менялось от $7\text{--}22\%$ на мокром льду с частицами мелкозёма до $30\text{--}35\%$ на старом фирне (3900 м), до $40\text{--}60\%$ – на таю-

щем снеге (3950 м) и до 70–75% – на белом снеге с радиационной коркой (4500 м).

В целом скорость уменьшения таяния от конца ледника к высотам 3800–3900 м составляла в первом периоде около 30 см в.э./100 м [21]. В пределах зоны максимальной аккумуляции, на высоте 3900–4100 м, при сохранении градиента таяния градиент абляции повышался до 40–50 см в.э./100 м из-за больших потерь стока на повторное замерзание талой воды в мощной снежно-фирновой толще. В центральной её части, содержащей 17 годовых слоёв, оставалось 30–50% и более талых вод [9]. В верхних зонах ледника величина абляции мала и быстро снижается. Выше 4200 м её величина в среднем по леднику составляла около 20 см в.э., а выше 4600 м, при слабом таянии, сток постепенно прекращался.

Баланс массы ледника. В первом периоде обе составляющие баланса массы ледника были ниже многолетней нормы и при небольшом преобладании аккумуляции баланс в среднем оказался положительным (см. рис. 4). На ледниковом склоне с перепадом высот в 1,5 км условия формирования баланса массы меняются, следуя различиям в температуре воздуха, режиме выпадения осадков, особенностям их сохранения и таяния. Пространственная изменчивость баланса массы ледника соответствует в основном распределению аккумуляции. Максимальные значения баланса массы всегда измерялись в зоне 3900–4000 м, где годовой остаток в первом периоде составлял в правой части ледника порядка 50–80 см в.э., а в левой – 150–200 см в.э. Граница питания в левой части ледника постоянно находилась на 30–50 м ниже по сравнению с правой; в среднем её высота в первом периоде была 3800 м. При этом на поверхности ледника её положение проследить было невозможно из-за чередования пятен снега, фирна и льда в конце лета в зоне 3700–3850 м. Граница питания определялась ежегодно только расчётным способом при построении балансовых кривых.

В нижней части ледника, в области абляции, отрицательные значения баланса массы возрастали в среднем от –100 см в.э. на 3600 м до –200 см в.э. близ конца языка [21]. На высотах 4200–4600 м на выпуклой правой части крутого склона к концу лета стаявал почти весь снег. Его небольшой остаток, обычно около 20 см в.э., на больших участках был превращён в наложенный

лёд. Нередко выше Приюта 11 на протяжении 100–200 м наблюдались пятна области абляции. В левой части ледника, аккумулирующей зимой переметённый снег, на больших высотах годовой баланс превышал 50 см в.э. Таким образом, в высоких зонах изолинии баланса массы ледника вытягивались не поперёк, а вверх по склону. Распределение на леднике каждой из составляющих баланса в первый период наблюдений – аккумуляции, таяния, стока, снежного остатка, внутреннего питания и годового прихода – подробно рассмотрено в работе [9].

Второй период наблюдений, 1998–2017 гг.

Главная особенность второго периода – сильное повышение летних температур воздуха в Приэльбрусье – в среднем на 1,1 °С по сравнению с первым периодом. Абляция на леднике увеличилась в 1,6 раза и составила 183 см в.э., отрицательный баланс массы ледника приводил в среднем к потере более 60 см в.э. в год (см. табл. 2). Граница двух периодов была выражена чётко – четырьмя годами экстремального увеличения таяния на ледниках в 1998–2001 гг., вызванного особенно жаркими летними сезонами на Кавказе. На леднике Гарабаши абляция увеличилась до небывалых значений – в среднем 211 см в.э. Снежность зим резко понизилась, причём 2000 г. отличался самым малым накоплением на леднике во всём ряду 36-летних наблюдений (см. рис. 4). Особенно выделялся 1998 г., когда средняя летняя температура в Терсколе впервые поднялась до 13 °С и на леднике растаял слой 2,6 м в.э. Поверхность всей правой части ледника до высоты 4600 м представляла собой открытый лёд, залитый ручьями талой воды, а в области максимальной аккумуляции на больших участках растаяла часть многолетнего фирна. У Приюта 11 вытаяли на льду патроны – следы боёв за Эльбрус осенью 1942 г. Между домиком ИГРАН и метеоплощадкой на леднике показались камни – продолжение продольной лавовой гряды, которая через два года сомкнулась с нижней своей частью. 1998 г. отмечен максимальной потерей массы на всех опорных ледниках Международной службы мониторинга [22]; в Альпах потеря массы в 2,5 раза превысила среднее значение за 1980–90-е годы [23].

В начале XXI в. в Приэльбрусье быстро увеличились зимние осадки — в среднем за 2002–2006 гг. до 800 мм, а в отдельные годы до экстремальных значений — свыше 900–1000 мм. Аккумуляция на леднике достигла 140 см в.э. В зимний период осадки значительно превысили норму в месяцы наибольшего накопления на ледниках — осенью и весной; особенно высокой оказалась аномалия весенних осадков — более 17% нормы (см. рис. 2, 3). Снежные зимы 2001/02–2004/05 гг. сопровождались похолоданием летних сезонов, когда абляция на леднике уменьшилась до 114 см в.э. В эти четыре года ледник имел хотя и небольшой, но положительный баланс массы — около 20 см в.э., что было исключением для жаркого периода первых десятилетий XXI в.

После 2006 г. снежность зим в Приэльбрусье начала быстро снижаться, тогда как летние температуры росли, достигнув в 2010 г. 13,5 °С. Таяние на леднике в 2010 г. повторило рекордные показатели 1998 г. В правой части ледника область абляции поднялась до 4500 м, а таяние охватило склон выше 4800 м. Впервые на бывшем нижнем фирновом поле близ вехи 9 начали вытаивать из подо льда скальные обломки. В следующие годы здесь появилась и затем расширилась продольная лавовая гряда (рис. 5, а), в результате правый край ледника ниже 3850 м оказался отделённым от ледника. В зоне максимального баланса растаял слой 1,7 м в.э. снега и фирна, а в среднем на леднике — более 2,6 м в.э. Кумулятивная балансовая кривая после перерыва снова резко направилась вниз (см. рис. 4).

Для периода 1998–2017 гг. особенно характерны длительные периоды ясной погоды в Приэльбрусье, с наибольшей абляцией на леднике. Если в первом периоде они наблюдались лишь в нескольких летних сезонах, то во втором — почти каждый год. Увеличилась их продолжительность — по 8–10 дней, как и значения температур воздуха — до 16–18 °С.

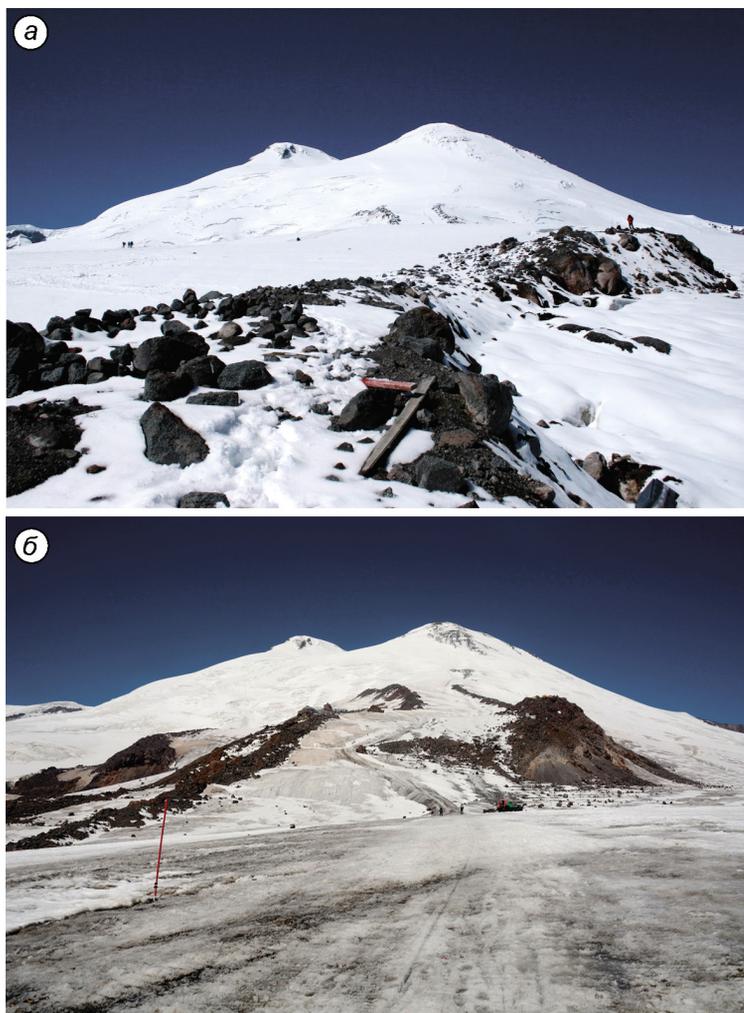


Рис. 5. Результаты экстремального таяния ледника в последние годы наблюдений.

Новая скальная гряда посреди ледника на высоте 3700–3830 м, 27.08.2015 г. (а); открытый лёд на поверхности прежнего верхнего фирнового «плато» и обнажившиеся скалы на подъёме к Приюту 11, 14.09.2017 г. (б). Фото С.А. Никитина

Fig. 5. Results of extreme melting of the glacier in recent years of observations.

New rocky ridge in the middle of the glacier at an altitude of 3700–3830 m, 08.27.2015 (а); open ice on the surface of the former upper firn «plateau» and exposed rocks on the rise to the Shelter of Eleven, 09.14.2017 (б). Photo by S.A. Nikitin

В последние семь лет после максимума 2010 г. здесь постоянно держатся высокая летняя температура — в среднем 12,3 °С и абляция на леднике на уровне 200 см в.э. В эти же годы резко уменьшилась аккумуляция — до 113 см в.э., как в самые малоснежные зимы. Небольшой слой зимнего накопления и заметное повышение температур в июне приводят к быстрому освобождению ледника от снега, что ещё больше способствует расходу массы. Продолжительность периода абляции

Таблица 3. Изменения балансовых характеристик ледника Гарабаши в разные периоды, 1984–2017 гг.*

Части ледника	S, км ²	Баланс массы						Баланс массы			Баланс массы			Суммарный				
		1983/84–1996/97 гг.		1997/98–1999/2000 гг.		2000/01–2008/09 гг.		2009/10–2016/17 гг.		S, км ²	объём за 34 года, км ³	слой за 34 года, м в.э.	за 8 лет, км ³	за 8 лет, м в.э.	А	Б	В	
		за 14 лет, км ³	А	Б	В	за 3 года, км ³	А	Б	В									за 9 лет, км ³
Верхняя часть склона, 4100–5000 м	1,150	0,0046	4,0	29	-0,0002	-0,2	-5	0,0029	2,5	27,9	1,150	0,0017	1,45	18,1	0,0091	7,9		
Пояс максимального баланса, 3800–4100 м	1,685	0,0205	12,1	87	-0,0013	-0,7	-25	0,0101	6,0	66,2	1,685	-0,0003	-0,15	-1,9	0,029	17,2		
Область питания, вся основная часть, 3800–5000 м	2,835	+0,0251	+8,8	+63	-0,0015	-0,5	-17	+0,0129	+4,56	+50,7	2,835	+0,0014	+0,5	+6,2	+0,038	+13,4		
Нижняя часть ледника, 3300–3800 м	1,637	-0,0215	-13,1	-94	-0,0137	-8,4	-279	-0,0232	-14,63	-162,5	1,587	-0,0308	-20,8	-260	-0,0892	-54,5		
Ледник в целом, 3300–5000 м	4,472	+0,0036	+0,8	+6	-0,0152	-3,4	-113	-0,0103	-2,3	-25,6	4,422	-0,0293	-6,9	-85	-0,0512	-11,4		

*А – суммарный объём; Б – суммарный слой; В – средний годовой слой; S – площадь.

увеличивается и за счёт таяния в сентябре, который стал теплее на 0,4 °С по сравнению с первым периодом. Граница питания на леднике впервые поднялась до 4050 м в 1998 г., и в последние годы держится на этом уровне постоянно. В левой части ледника она находится в среднем на высоте 3850–3900 м, а в правой поднимается до 4300 м. Область максимальной аккумуляции сохранилась на тех же высотах, что и в первом периоде, – 3900–4000 м, но таяние в этой зоне теперь в 3 раза выше, а область максимального баланса сместилась на 100 м вверх и осталась только в центре и в левой частях ледника. Большая часть поверхности прежнего верхнего фирнового «плато» заменилась открытым льдом (см. рис. 5, б). Совсем узкий поток льда между скальными грядами в районе Приюта 11 едва достигает пологой части «плато». На языке ледника ежегодно стает до 4–6 м в.э. льда.

Обсуждение

По данным Всемирной службы мониторинга ледников, с 1960–70-х и до середины 1980-х годов баланс массы ледников относительно стабилизировался во многих районах земного шара – в Канаде, на Аляске, в Альпах, Тянь-Шанском регионе и др. [23]. На высоких ледниках Эльбруса этот процесс продлился почти до конца 1990-х годов. К концу 1980-х годов в областях питания многих ледников Эльбруса наблюдалось повышение поверхности. На Гарабаши она повысилась до 5–10 м в основных питающих зонах – на 3650–3800 и 3900–4100 м, а выше – местами более чем на 10 м [24]. Повышение поверхности отмечалось также на втором эталонном леднике Кавказа – Джанкуат. В 1974–1992 гг. на 40–48% площади этого ледника происходило повышение поверхности [25].

Анализ балансового состояния ледника Гарабаши показывает, что ледник с 1960-х годов наращивал свой объём [10], и в первый период наших наблюдений его баланс массы, хотя постепенно снижался, но в целом остался выше нуля, прибавив в сумме около 1 м в.э. слоя льда (табл. 3). Однако на рубеже веков за четыре жарких года ледник потерял в 4 раза больше льда, чем накопилось за предыдущие 20 лет. В первое десятилетие XXI в. запасы ледника уменьшились ещё на 2 м в.э., а в годы максимального таяния 2010–2017 гг. – ещё почти на 7 м. В целом за все годы наблюдений ледник по-

Таблица 4. Коэффициенты корреляции r показателей баланса массы ледника Гарабаши и метеоданных станции Терскол в разные периоды наблюдений

Метеоданные и показатели баланса массы ледника	1982–2017 гг.	1982–1997 гг.	1998–2017 гг.
Аккумуляция – зимние осадки (сентябрь–май)	0,72	0,78	0,80
Абляция – летняя температура воздуха (июнь–август)	0,89	0,80	0,93
Абляция – летняя температура воздуха (июнь–сентябрь)	0,88	0,72	0,85
Абляция – летние осадки (июнь–август)	–0,42	–0,30	–0,51
Баланс массы – аккумуляция	0,55	0,70	0,51
Баланс массы – абляция	–0,96	–0,82	–0,97

терял 11,4 м в.э. слоя льда и более $0,05 \text{ км}^3$ своего объёма, который в 1989 г. был определён как $0,36 \text{ км}^3$ [6]. Тренд абляции за все годы наблюдений показал её увеличение на 120 см в.э., примерно таким же было значение отрицательного тренда баланса массы ледника.

В колебаниях баланса массы во все периоды основная роль принадлежала абляции (табл. 4), но в первом, холодном и многоснежном периоде связь баланса с аккумуляцией и абляцией различалась несильно: коэффициенты корреляции r были равны 0,7 и 0,82 соответственно. Во втором периоде, когда таяние в 1,5 раза превысило накопление и изменчивость абляции увеличилась в два раза, колебания баланса почти полностью стали определяться абляцией ($r = 0,97$). Также наиболее высока связь абляции с летними температурами, в том числе с четырьмя месяцами, включая сентябрь. Заметно повышение её отклика на летние снегопады по сравнению с постоянно снежными летними сезонами первого периода. При этом абляция – многофакторный процесс, который зависит не только от температуры трёх летних месяцев, но и от прочих условий летнего сезона. Особенно показательны годы с экстремальными значениями абляции в оба периода наблюдений – 1986, 1994, 1998, 2010, 2015 гг. и др. Они всегда отличались сочетанием всех факторов, способствующих увеличению таяния; основные из них – длительность сезона абляции, быстрый сход зимнего снега весной и особенно высокие температуры сентября; малая частота летних снегопадов; продолжительность периодов ясной погоды с непрерывающимся таянием, которая обеспечивает наибольшую его интенсивность, и др.

Главный источник тепла для таяния ледников Эльбруса – солнечная радиация, и максимальное таяние отвечает условиям, когда над Кавказом располагается южная периферия ан-

тициклонов, обычно занимающих большую часть Европейской России. При этом воздух прогревается до больших высот и на ледники поступает непрерывный поток солнечной радиации [3]. Именно такие условия характерны для начала XXI в. В отчётных докладах Росгидромета отмечен восходящий тренд изменения потока прямой солнечной радиации, наиболее выраженный в последние годы на юге Европейской части России [26]. Так, лето 2017 г. было жарким везде в России, но более всего на Северном Кавказе, где зафиксирован повышенный приход прямой солнечной радиации, и на станциях всех высотных зон наблюдались 95% экстремумы температуры. Результаты реанализа для ледника Гарабаши показали увеличение радиационного баланса в 2001–2010 гг. на 4–5% по сравнению с предыдущими двумя десятилетиями [15].

Повышение температур привело к увеличению темпов сокращения ледников. По данным наблюдений Ростовского УГМС, концы ледников на Кавказе отступали в первом десятилетии XXI в. в 2–3 раза быстрее, чем в 1980–90-х годах [27]. Сокращение площади ледников Эльбруса в эти периоды возросло с $0,16$ до $0,49 \text{ км}^2/\text{год}$ [28], а оценка по космическим снимкам ASTER и Landsat показала её убыль в 1999–2012 гг. на 5% [29] Ледник Гарабаши также сокращался с возрастающей скоростью (рис. 6). По материалам съёмки ASTER разных лет определено, что скорость отступления его конца в 2001–2010 гг. составляла порядка 10 м/год, а скорость потери площади увеличилась почти втрое по сравнению с 1990-ми годами. В следующие пять лет (2011–2015 гг.) скорость отступления возросла до 20 м/год, а за семь лет (2011–2017 гг.) его площадь сократилась на $0,245 \text{ км}^2$, что составило около половины потери за все годы наблюдений – $0,51 \text{ км}^2$. Площадь ледника на 2017 г., по

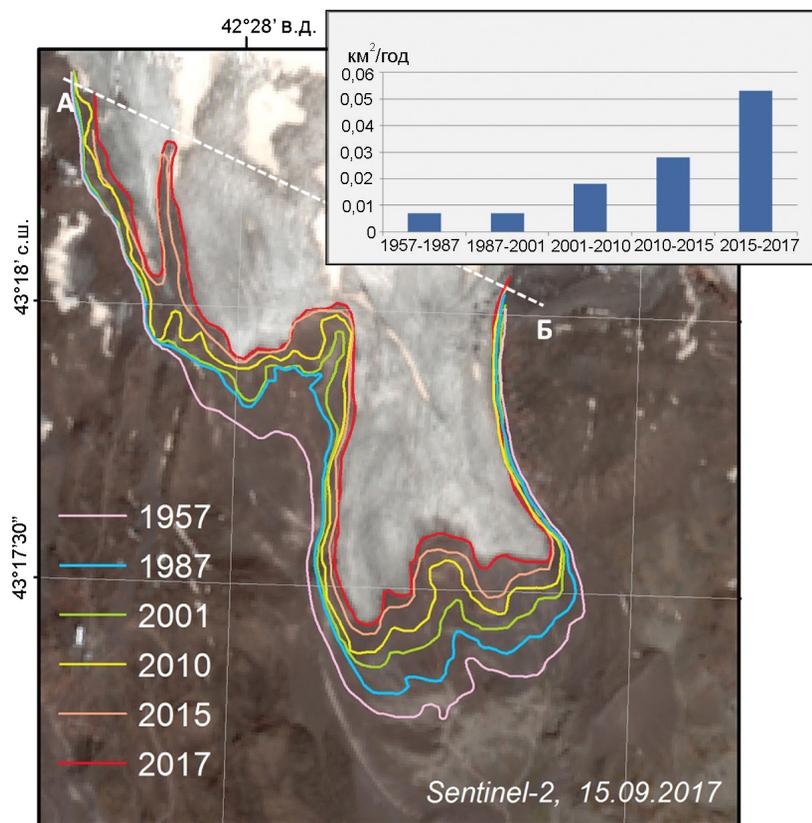


Рис. 6. Изменение границ языка ледника Гарабаша за 60 лет.

Линия А–Б – граница участка ледника с оценкой изменений площади; на врезке – скорость сокращения площади ледника, км²/год

Fig. 6. The boundaries changes of the Garabashi Glacier tongue for 60 years.

Line А–В is the boundary of the glacier section with an estimate of the area changes; in the inset – the rate of glacier area reduction, km²/year

нашим оценкам, составляет 3,96 км². Высокие темпы сокращения массы ледника в последние годы нельзя объяснить ускорением роста летних температур, так как после 2010 г. их значения, как и величин абляции, высоки, но не растут (см. рис. 2 и 4). Главная проблема ледника Гарабаша в настоящее время – изменение поверхностной и глубинной структуры области его питания.

В первом периоде главный высотный пояс, питающий ледник осадками, – 3700–4100 м – занимал наибольшую площадь и содержал 52% объёма льда в леднике [6]. В «тёплой» фирновой зоне на высотах 3900–4000 м сохранялось до половины талых вод [9]. На крутом склоне Эльбруса эта зона замещалась фирново-ледяной, а выше 4600 м в левой части ледника в холодной толще снега и фирна замерзал весь небольшой объём талых вод. По мере потепления границы зон смещались, и к 2010–2017 г. состояние ледника кардинально изменилось. Нижнее фирновое поле исчезло, а на верхнем площадь фирна неуклонно сокращается. Здесь из-за повышения температур в начале лета быстро поднимается граница сезонного снега. Под ним сначала обнажается фирн, который тает в два раза интенсив-

нее снега. В следующий год граница фирна ещё отступает и появляется полоса льда с ещё более высоким коэффициентом таяния. В дальнейшем под слоем зимнего снега уже сразу открывается лёд, а к концу сезона абляции его верхняя граница ещё более расширяется, чему способствует также малый уклон поверхности. И при постоянно высокой из года в год летней температуре воздуха этот процесс прогрессирует.

Зона максимального баланса теряет всё новые площади. Прежняя «тёплая» фирновая зона постепенно заменилась фирново-ледяной, которая не удерживает воду как раньше, и сток возрастает. К языку поступает всё меньше льда, и скорость его отступления растёт. С уменьшением толщины льда меняется морфология ледника. Вытаивают новые лавовые гряды, местами изменяются уклоны поверхности и направление тока льда, отдельные участки ледника лишаются питания, открываются обширные поля трещин. Быстрая потеря массы ледником Гарабаша объясняется относительно небольшой высотой основной области его питания. Соседние с ним ледники имеют обширные площади в холодных верхних зонах Эльбруса, где сохраняются мощ-

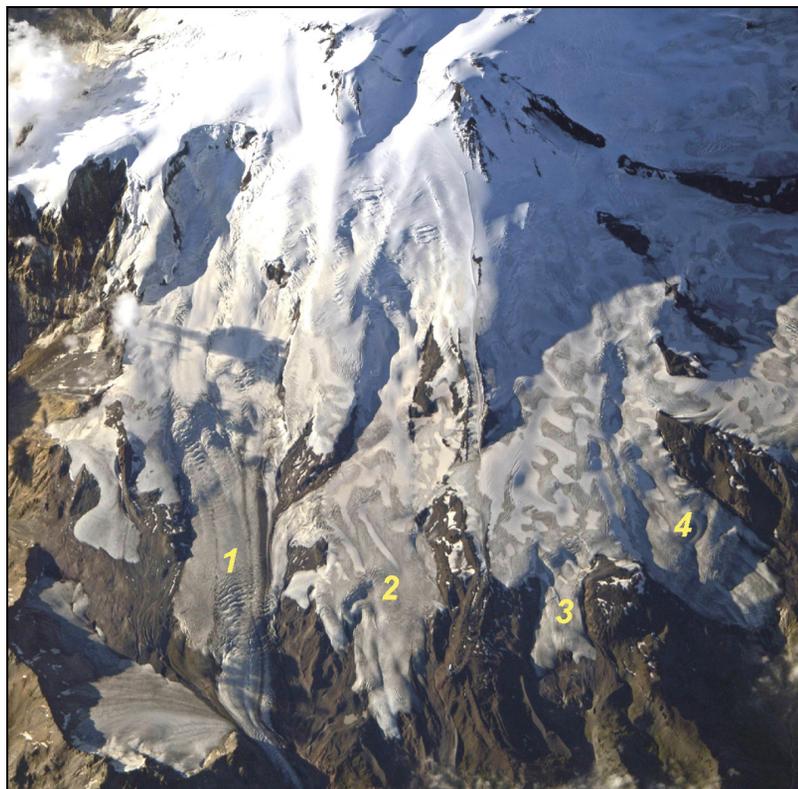


Рис. 7. Современное состояние ледников южного склона Эльбруса, потерявших значительные участки площади в зонах абляции. Снимок с Международной космической станции 9 августа 2015 г.

Ледники: 1 – Большой Азау; 2 – Малый Азау; 3 – Гарабаш; 4 – Терскол

Fig. 7. The current state of the Elbrus southern slope glaciers, which have lost significant portions of the area in the ablation zones. Space image from the International Space Station on August 9, 2015.

Glaciers: 1 – Bolshoy Azau; 2 – Maly Azau; 3 – Garabashi; 4 – Terskol

ные толщи фирна. Ледник Гарабаш в этой высокой зоне имеет менее 14% площади, где аккумуляция мала. Однако в последние годы и на других ледниках южного склона Эльбруса поверхность в области абляции также сильно понизилась – на 20–30 м. Расширяются участки скал и морен, освободившиеся ото льда, что видно на космических снимках разных лет (рис. 7).

Подобная картина в последние годы наблюдается и в Альпах [23]. На леднике Каресер в Италии, который начинается с высоты 3275 м, уже в течение трёх десятилетий граница питания поднимается «выше ледника». Его средний годовой баланс в 2002–2015 гг. составил –180 см в.э., обнажились коренные породы, ледник разделился на несколько частей. Крупный ледник Австрийских Альп Хинтерайсфернер в 2014/15 г. имел минимальный за все годы наблюдений баланс массы: –168 см в.э., и граница питания тоже «превысила» его высшую отметку – 3740 м. В 2015 г. ледники Альп имели самый резко отрицательный баланс массы за весь период наблюдений.

Швейцарские ледники, согласно [30], потеряли за последние 10 лет, самые «жаркие» за столетие, 9 км³, или 12% объёма. На одном из самых крупных Ронском леднике, постоянно посеща-

емом туристами, в течение восьми лет местные жители каждое лето укрывают часть языка специальными белыми полотнами, пытаясь спасти его от катастрофического таяния. Однако уже за эти 8 лет ледник отступил на 40 м [31]. Во Французских Альпах площадь ледников сократилась за последние 40 лет на 26%. В некоторых южных районах с высотой гор около 3000 м ледники уже исчезли, а в горах высотой до 4000 м они тают в три раза быстрее, чем в массиве Монблан с высотой питающих ледниковых склонов до 4800 м [32].

Заключение

На рубеже столетий существенно изменилось балансовое состояние ледников южного склона Эльбруса. Первый период наблюдений, 1982–1997 гг., был достаточно благоприятным для ледника Гарабаш при небольшом, но положительном балансе массы. Во втором периоде, 1998–2017 гг., при повышении летних температур в Приэльбрусье на 1 °С, резко отрицательный баланс массы ледника привёл к потере слоя в 15 раз больше, чем накопилось в первом периоде. Степень деградации ледников во время замет-

ных потеплений зависит от длительности интервала, в течение которого баланс массы не меняет своего знака, и от амплитуды его отклонений от нормы. За последние 20 лет баланс массы ледника на южном склоне Эльбруса оказался в два раза ниже нормы за весь период наблюдений и составил -63 см в.э., а за восемь лет, с 2010 г., его среднее значение было равно уже $-90,4$ см в.э.

В настоящее время запасы льда и многолетних фирнов, накопленные во второй половине XX в., тают с небывалой прежде скоростью; на значительной площади в зоне 3700–4000 м они почти исчерпаны. Граница питания на леднике поднялась на 200 м, расход фирна возрастает. В области абляции вытаивают лавовые гряды. Кумулятивный баланс массы достиг минимального значения за прошедшие 50 лет. Главная причина ускоренного сокращения конца ледника Гарабаша – потеря массы в области его питания, основная часть которой находится на более низких высотах по сравнению с соседними ледниками, поэтому она подвержена интенсивному таянию. Реакция этого ледника на потепление более выражена, тогда как устойчивость всей гигантской ледниковой системы Эльбруса к изменениям климата, очевидно, значительно выше.

В Приэльбрусье в последнем десятилетии (2008–2017 гг.) средняя летняя температура $12,28$ °С ещё не достигла уровня десятилетия 1950-х годов – $12,38$ °С. Однако, считая с макси-

мумом 2010 г., за восемь лет она уже превысила это значение ($12,45$ °С). В то же время средняя годовая температура не повышается настолько быстро. Относительно нормы 1951–2017 гг. положительная аномалия средней годовой температуры последнего десятилетия равна $0,2$ °С, тогда как аномалия 1950-х годов составляла $0,7$ °С.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-00838 и программы РАН № 0148-2018-0008. Авторы выражают благодарность постоянному участнику всех работ на леднике И.Ф. Хмелевскому, а также В.Н. Михаленко, Р.А. Чернову, Г.Б. Осиповой, О.А. Носенко за участие в полевых наблюдениях и руководителям учебно-научной станции МГУ в Азау А.Д. Олейникову и Н.А. Володичевой за неизменное содействие и помощь в работе.

Acknowledgments. This study is supported by the RFBR grant 18-05-00838 and the state assignment 0148-2018-0008 of the Russian Academy of Sciences. The authors are grateful to I.F. Khmelevskoy as a permanent participant in all works, as well as V.N. Mikhailenko, R.A. Chernov, G.B. Osipova, O.A. Nosenko, to assist in carrying out field observations; and also express their gratitude to the heads of the Moscow State University teaching and research station in Azau A.D. Oleinikov and N.A. Volodicheva for assistance in conducting field work.

Литература

1. Оледенение Эльбруса / Ред. Г.К. Тушинский. М.: Изд-во МГУ, 1968. 345 с.
2. Каталог ледников СССР. Т. 8. Ч. 5. Бассейны рек Малки, Баксана. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 146 с.
3. Волошина А.П. Метеорология горных ледников // МГИ. 2002. Вып. 92. С. 3–148.
4. Некоторые итоги исследований Института географии АН СССР на Эльбрусе // МГИ. 1964. Вып. 10. С. 55–103.
5. Загороднов В.С., Архипов С.М., Бажев А.Б., Востокова Т.А., Королев П.А., Рототаева О.В., Синькевич С.А., Хмелевской И.Ф. Строение, состав и гидротермический режим ледника Гарабаша на Эльбрусе // МГИ. 1992. Вып. 73. С. 109–117.
6. Рототаева О.В., Никитин С.А., Бажев А.Б., Носенко Г.А., Носенко О.А., Веснин А.В., Хмелевской И.Ф. Толщина льда на южном склоне Эльбруса // МГИ. 2002. Вып. 93. С. 143–151.

References

1. *Oledeniye El'brusa*. Elbrus glaciation. Ed. by G.K. Tushinsky. Moscow: Moscow State University, 1968: 345 p. [In Russian].
2. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 8. Pt. 5. River basins Malka, Baksan. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970: 146 p. [In Russian].
3. *Voloshina A.P.* Meteorology of mountain glaciers. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2002, 92: 3–148. [In Russian].
4. Some results of the research of the Institute of Geography, RAS on Elbrus. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1964, 10: 55–103. [In Russian].
5. *Zagorodnov V.S., Arkhipov S.M., Bazhev A.B., Vostokova T.A., Korolev P.A., Rototaeva O.V., Sin'kevich S.A., Khmelevskoy I.F.* Stroyeniye, sostav i gidrotermicheskiy rezhim lednika Garabashi na El'bruse. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1992, 73: 109–117. [In Russian].

7. Керимов А.М., Рототаева О.В., Хмелевской И.Ф. Распределение тяжёлых металлов в поверхностных слоях снежно-фирновой толщи на южном склоне Эльбруса // Лёд и Снег. 2011. № 2. С. 24–34.
8. Mikhalenko V., Sokratov S., Kutuzov S., Ginot P., Legrand M., Preunkert S., Lavrentiev I., Kozachek A., Ekaykin A., Faïn X., Lim S., Schotterer U., Lipenkov V., Toropov P. Investigation of a deep ice core from the Elbrus western plateau, the Caucasus, Russia // *The Cryosphere*. 2015. № 9. P. 2253–2270. doi: 10.5194/tc-9-2253-2015.
9. Бажев А.Б., Рототаева О.В., Хмелевской И.Ф. Анализ полей элементов водно-ледового баланса ледников Эльбруса // МГИ. 1995. Вып. 79. С. 98–108.
10. Рототаева О.В., Тарасова Л.Н. Реконструкция баланса массы ледника Гарабаша за последнее столетие // МГИ. 2000. Вып. 88. С. 16–26.
11. Давидович Н.В., Тарасова Л.Н. Межгодовая изменчивость температуры воздуха на Западном и Центральном Кавказе в летний сезон // МГИ. 1992. Вып. 73. С. 50–59.
12. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Ред. В.М. Котляков. М.: Изд. Российской Академии наук, 1997. 392 с.
13. Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 288 с.
14. Тареева А.М. Температура воздуха в высокогорной зоне Кавказа в летний период // МГИ. 1976. Вып. 28. С. 59–66.
15. Торопов П.А., Михаленко В.Н., Курузов 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.
16. Матюхин Г.Д. Климатические данные по высотным поясам южного склона Эльбруса. // Информ. сб. о работах по МГГ. 1960. № 5. С. 130–194.
17. Котляков В.М., Плам М.Я. Подсчёт количества твёрдых осадков на горных ледниках и роль метелевого переноса в их перераспределении (по исследованиям на Эльбрусе) // Тепловой и водный режим снежно-ледниковых толщ. М.: Наука, 1965. С. 87–117.
18. Володичева Н.А., Китаев Л.М., Кренке А.Н., Олейников А.Д. Динамика снегозапасов Кавказа и Предкавказья // МГИ. 2004. Вып. 97. С. 143–147.
19. Володичева Н.А., Олейников А.Д., Володичева Н.Н. Катастрофические лавины и методы
6. Rototaeva O.V., Nikitin S.A., Bazhev A.B., Nosenko G.A., Nosenko O.A., Vesnin A.V., Khmelevskoy I.F. Ice thickness on the southern slope of Elbrus. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2002, 93: 143–151. [In Russian].
7. Kerimov A.M., Rototaeva O.V., Khmelevskoy I.F. Distribution of heavy metals in the surface layers of the snow-firn stratum on the southern slope of Elbrus. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2011, 2 (114): 24–34. [In Russian].
8. Mikhalenko V., Sokratov S., Kutuzov S., Ginot P., Legrand M., Preunkert S., Lavrentiev I., Kozachek A., Ekaykin A., Faïn X., Lim S., Schotterer U., Lipenkov V., Toropov P. Investigation of a deep ice core from the Elbrus western plateau, the Caucasus, Russia. *The Cryosphere*, 2015, 9: 2253–2270. doi: 10.5194/tc-9-2253-2015.
9. Bazhev A.B., Rototaeva O.V., Khmelevskoy I.F. The analysis of the fields of the water-ice balance elements of the Elbrus glaciers. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1995, 79: 98–108. [In Russian].
10. Rototaeva O.V., Tarasova L.N. Reconstruction of the mass balance of the Garabashi glacier over the last century. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2000, 88: 16–26. [In Russian].
11. Davidovich N.V., Tarasova L.N. Interannual variability of air temperature on the Western and Central Caucasus in the summer season. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1992, 73: 50–59. [In Russian].
12. *Atlas snezhno-ledovykh resursov mira*. World Atlas of Snow and Ice Resources. Ed. by V.M. Kotlyakov. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 392 p. [In Russian].
13. Krenke A.N. Mass transfer in glacial systems in the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982: 288 p. [In Russian].
14. Tareeva A.M. Air temperature in the highland zone of the Caucasus in summer. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1976, 28: 59–66. [In Russian].
15. Toropov P.A., Mikhalenko V.N., Kutuzov S.S., Morozova P.A., Shestakova A.A. Temperature and radiation regime of glaciers on the slopes of Elbrus during the ablation period over the past 65 years. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (1): 5–19. doi: 10.15356/2076-6734-2016-1-5-19. [In Russian].
16. Matyukhin G.D. Climate data on the high-altitude zones of the southern slope of Elbrus. *Informatsionnyi sbornik o rabotakh po Mezhdunarodnomu geofizicheskomu godu*. Information Sat about the work on the IGY. 1960, 5: 130–194. [In Russian].
17. Kotlyakov V.M., Plam M.Ya. Podschot kolichestva tverdykh osadkov na gornyx lednikakh i rol' metelevogo perenosa v ikh pereraspredelenii (po issledovaniyam na El'bruse). Calculation of the amount of solid precipitation on mountain glaciers and the role of snowstorm transfer in their redistribution (according to studies on Elbrus). *Teplovoiy i vodnyy rezhim snezhno-lednikovoykh tolshch*. Thermal and water regime of snow-glacial strata. Moscow: Nauka, 1965: 87–117. [In Russian].
18. Volodicheva N.A., Kitaev L.M., Krenke A.N., Oleynikov A.D. Dynamics of snow reserves in the Caucasus and Ciscaucasia. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2004, 97: 143–147. [In Russian].

- борьбы с ними // Лёд и Снег. 2014. Т. 54. № 4. С. 63–71. doi: 10.15356/2076-6734-2014-4.
20. Тареева А.М. Метеорологические условия таяния на ледниках южного склона Эльбруса в 1988–1991 гг. // МГИ. 1996. Вып. 80. С. 150–153.
 21. Рототаева О.В., Носенко Г.А., Хмелевской И.Ф., Тарасова Л.Н. Балансовое состояние ледника Гарабаши (Эльбрус) в 80-х и 90-х годах XX столетия // МГИ. 2003. Вып. 95. С. 111–121.
 22. Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010–2011) / Eds. M. Zemp, S.U. Nussbaumer, K. Naegeli, I. Gärtner-Roer, F. Paul, M. Hoelzle, W. Haerberli. Zürich: World Glacier Monitoring Service, 2013. 106 p.
 23. Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014–2015) / Eds. M. Zemp, S.U. Nussbaumer, I. Gärtner-Roer, J. Huber, H. Machguth, F. Paul, M. Hoelzle. Zürich: World Glacier Monitoring Service, 2017. 244 p. doi: 10.5904/wgms-fog-2017-10.
 24. Золотарев Е.А. Эволюция оледенения Эльбруса. Картографо-аэрокосмические технологии гляциологического мониторинга. М.: Научный мир, 2009. 238 с.
 25. Поповнин В.В., Петраков Д.А. Ледник Джанкуат за минувшие 34 года (1967/68–2000/01 гг.) // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 167–174.
 26. Электронный ресурс: Изменения климата России. Ежегодные доклады о состоянии климата. М.: Росгидромет, 2005–2017. http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&Itemid=73&gid=27&lang=ru.
 27. Ильичев Ю.Г., Салпагаров А.Д. Снежный покров, снежники, ледники, горные озера – холодное богатство Карачаево-Черкессии // Тр. Тебердинского гос. заповедника. Вып. 49. Теберда: Северо-Кавк. изд-во «МИЛ», 2009. 224 с.
 28. Золотарев Е.А., Харьковец Е.Г. Эволюция оледенения Эльбруса после малого ледникового периода // Лёд и Снег. 2012. № 2 (118). С. 15–22.
 29. Shahgedanova M., Nosenko G., Kutuzov S., Rototaeva O., Khromova T. Deglaciation of the Caucasus Mountains, Russia/Georgia, in the 21st century observed with ASTER satellite imagery and aerial photography // Cryosphere. 2014. V. 8. № 6. P. 2367–2379. doi: 10.5194/tc-8-2367-2014.
 30. Электронный ресурс: <http://nashgazeta.ch/news/ma-suisse/7637>.
 31. Электронный ресурс: <https://4sport.ua/news?id=29585>.
 32. Электронный ресурс: <https://ria.ru/eco/20111207/509328263.html>.
 19. Volodicheva N.A., Oleynikov A.D., Volodicheva N.N. Catastrophic avalanches and methods of dealing with them. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2014, 54 (4): 63–71. doi: 10.15356/2076-6734-2014-4. [In Russian].
 20. Tareeva A.M. Meteorological conditions of melting on the glaciers of the southern slope of Elbrus. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 1996, 80: 150–153. [In Russian].
 21. Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Khmelevskoy I.F., Tarasova L.N. Balance condition of the Garabashi glacier (Elbrus) in the 80s and 90s of the XX century. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 2003, 95: 111–121. [In Russian].
 22. Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010–2011). Ed. M. Zemp, S.U. Nussbaumer, K. Naegeli, I. Gärtner-Roer, F. Paul, M. Hoelzle, W. Haerberli. Zürich: World Glacier Monitoring Service, 2013: 106 p.
 23. Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014–2015). Ed. M. Zemp, S.U. Nussbaumer, I. Gärtner-Roer, J. Huber, H. Machguth, F. Paul, M. Hoelzle. Zürich: World Glacier Monitoring Service, 2017: 244 p. doi: 10.5904/wgms-fog-2017-10.
 24. Zolotarev E.A. *Evolyutsiya oledeneniya El'brusa. Kartografo-aerokosmicheskiye tekhnologii glyatsiologicheskogo monitorin-ga*. Evolution of the glaciation of Elbrus. Cartographic and aerospace technology of glaciological monitoring. Moscow: Scientific world, 2009: 238 p. [In Russian].
 25. Popovnin V.V., Petrakov D.A. Glacier Djankuat for the past 34 years (1967/68–2000/01). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 2005, 98: 167–174. [In Russian].
 26. Electronic resource: Climate change in Russia. Annual climate reports. Moscow: Roshydromet, 2005–2017. [In Russian]. http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&Itemid=73&gid=27&lang=ru.
 27. Ilyichev Yu.G., Salpagarov A.D. Snow cover, snowfields, glaciers, mountain lakes are the cold riches of Karachay-Cherkessia. *Trudy Teberdinskogo gosudarstvennogo zapovednika*. Works of the Teberdinsky State Reserve. Teberda: North-Caucasus. MIL Publishing House, 2009 (49): 224 p. [In Russian].
 28. Zolotarev E.A., Kharkovets E.G. Evolution of the Elbrus Glaciation after the Little Ice Age. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2012, 2 (118): 15–22. [In Russian].
 29. Shahgedanova M., Nosenko G., Kutuzov S., Rototaeva O., Khromova T. Deglaciation of the Caucasus Mountains, Russia/Georgia, in the 21st century observed with ASTER satellite imagery and aerial photography. *Cryosphere*. 2014, 8 (6): 2367–2379. doi: 10.5194/tc-8-2367-2014.
 30. <http://nashgazeta.ch/news/ma-suisse/7637>.
 31. <https://4sport.ua/news?id=29585>.
 32. <https://ria.ru/eco/20111207/509328263.html>.