

Памяти первооткрывателя
Хибинских ледников
Вениамина Федоровича Перова
(1931–2017)

УДК 556.124.4

СТРОЕНИЕ И ДИНАМИКА СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ХИБИНСКИХ ГОРАХ В XXI ВЕКЕ

М.А. Викулина¹, Ф.А. Романенко², М.В. Зимин³, Л.Е. Ефимова⁴, Б.Г. Покровский⁵

^{1–4} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

⁵ Геологический институт РАН, лаборатория геохимии изотопов и геохронологии

¹ Кафедра криолитологии и гляциологии, науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: masanna2003@mail.ru

² Кафедра геоморфологии и палеогеографии, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: faromanenko@mail.ru

³ Кафедра картографии и геоинформатики, лаборатория аэрокосмических методов,
вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: zimintv@mail.ru

⁴ Кафедра гидрологии суши, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ef_river@mail.ru

⁵ Зав. лабораторией, д-р геол.-минерал. наук; e-mail: pokrov@ginras.ru

В 1958 г. сотрудник Хибинской учебно-научной станции Географического факультета МГУ В.Ф. Перов описал в Хибинских горах четыре снежно-ледяных образования, которые посчитал малыми ледниками. До 2005 г., когда начались наши исследования, эти объекты детально не изучались. Для выяснения строения ледников и оценки изменения их площади за 60 лет авторы провели полевые наблюдения, использовали геоинформационные методы и дистанционное зондирование. Впервые снежно-ледяные образования были пробурены насквозь, отобраны керны льда и проведены геохимический и изотопно-кислородный анализы. Толщина ледяных ядер колебалась от 0,2 до 1,6 м. Оказалось, что, несмотря на некоторую тенденцию к деградации, площадь этих объектов с 1958 г. остается относительно стабильной. Анализ климатических изменений в Хибинах показал, что в начале 2000-х гг. годовое количество твердых осадков уменьшалось. Так, максимальная мощность снежного покрова на метеоплощадке Хибинской учебно-научной базы зимой 2002–2003 гг. не превышала 55 см. Возможно, именно поэтому в 2000–2010 гг. площади снежно-ледяных образований сократились более чем в два раза по сравнению с измерениями В.Ф. Перова. Но после 2007 г. количество выпадающего снега увеличилось: максимальная мощность снежного покрова на той же метеоплощадке в 2020 г. достигла 180 см. Это максимальная толщина снежного покрова за все время наблюдений (1984–2020). Хотя по литературным данным повышение среднегодовой температуры на равнинах Кольского полуострова достигает $2,3 \pm 1^\circ\text{C}$ за последние 50 лет, средние температуры теплого периода не увеличиваются. Мы полагаем, что именно это, как и увеличение количества твердых осадков в последние годы, обуславливает достаточно стабильное состояние снежно-ледяных образований в Хибинах, которые, как выяснилось, оказываются более устойчивыми к потеплению климата, чем горные ледники.

Ключевые слова: снежно-ледяные тела, Кольский полуостров, космические снимки, малые ледники, снежники

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.8

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых актуальных вопросов горной гляциологии в настоящее время остается проблема динамики разных форм оледенения при потеплении климата. Обусловленной им деградации ледников посвящено множество работ по самым разным регионам, в том числе по Арктике [Сарана, 2012; Ананичева, 2014; Носенко и др., 2020; Ananicheva et al., 2020]. Измерены величины линейного и объемного уменьшения ледников на Шпицбергене, Новой Земле, Земле Франца-Иосифа и островах Карского моря,

в Гренландии. Это десятки метров и тысячи кубометров в год. Но в горах Арктики и Субарктики существует также большое количество так называемых малых форм оледенения, в том числе многолетних снежников и снежно-фирново-ледяных образований (СФЛО). Несмотря на современные небольшие (до сотен метров в поперечнике) размеры, они играют или могли играть важную палеогеографическую роль [Большаинов, 2006]. Изучение таких объектов на станции «Ледник Абрамова» на Алайском хребте, в Японии, Канаде и в Европе показало, что они

существуют многие десятки, возможно, сотни лет, т. е. слабо или совсем не реагируют на изменения климата [Глазырин и др., 1993; Kuhn, 1995; Glazirin et al., 2004; Debeer, Sharp, 2009]. В отличие от более крупных ледников, у них нельзя выделить зоны накопления и абляции, они не двигаются, но содержат ледяные ядра и сохраняются длительное время, то увеличиваясь, то уменьшаясь в размерах.

До сих пор грань между многолетними снежниками и ледниками остается дискуссионной. Не существует устоявшегося мнения, что считать многолетним снежником, а что малым ледником. Под последними часто имеются в виду объекты размером менее 0,1 км² без каких-то других пояснений [Гляциологический..., 1984].

Полвека назад М.В. Тронов [1966] относил к малым формам оледенения ледники склонов, не спускающиеся в главные долины, и «устойчивые снежно-фирновые скопления», которые хотя бы в малой степени сохраняют облик и свойства ледниковых образований. При этом он указывал на то, что малые и самые малые ледники оказываются универсальной формой оледенения на земном шаре, обладая значительной устойчивостью.

Г.Е. Глазырин [Глазырин и др., 1993] предлагал называть малым ледником такой ледник (или многолетний снежник), перераспределение массы которого за счет его собственного движения мало по сравнению с другими процессами массообмена. По его наблюдениям, некоторые многолетние снежники почти без последствий переносят существенные изменения климата, в отличие от крупных ледников. Именно приспособленность к условиям рельефа позволяет выживать небольшим многолетним снежникам, лежащим на 1 км и более ниже средней для района снеговой границы.

В.А. Сарана [2012], изучавший малые ледники на плато Путорана, дает такое определение: *малый ледник* – это малоподвижное фирново-ледяное тело, которое лежит ниже снеговой границы, занимает одну форму рельефа и существует благодаря благоприятному сочетанию орографических и климатических факторов в условиях повышенного метелевого переноса и лавинной деятельности.

Многочисленные наблюдения в горах разных широт показывают, таким образом, что снежно-фирновые или фирново-ледяные скопления возникают из-за повышенной концентрации снега на небольших участках земной поверхности. СФЛО отличаются большим разнообразием размеров и мощности, могут быть остаточными и эмбриональными, могут залегать выше или ниже климатической снеговой границы, их ледяное ядро может значительно меняться по морфологии. В современных климатических условиях эти образования остаются

весьма многочисленными, что вызывает значительный интерес к вопросам их существования, строения и классификации, которые могут быть решены лишь путем детального изучения.

СФЛО есть и в Хибинских горах в центральной части Кольского полуострова. Более 60 лет назад, во время Международного геофизического года (1957–1959) сотрудник Хибинской географической станции (сейчас – Хибинская учебно-научная база, ХУНБ) [Vikulina et al., 2021] В.Ф. Перов (1931–2017) открыл в Хибирах четыре небольших ледника [Перов, 1958; 1968]. Их существование ранее предполагали известные исследователи А.Ф. Миддендорф, И.К. Тихомиров и Г.К. Тушинский. Ледники вошли в Каталог ледников СССР [1966] под номерами в соответствии с порядком обнаружения. До начала XXI в. они детально не изучались и вопрос об их современном состоянии стал особенно актуален в условиях климатического потепления.

По данным наблюдений равнинных метеостанций, среднегодовая температура в Мурманской области за последние 50 лет повысилась на $2,3 \pm 1^\circ\text{C}$ [Marshall et al., 2016]. Если в некоторых других регионах (Полярный Урал) площадь ледников уменьшилась на 22% лишь за 10 последних лет [Носенко и др., 2020], то повышение температуры должно было привести к полному исчезновению малых форм оледенения и в Хибирах. И в начале XXI в. некоторые исследователи прогнозировали, что ледники в Хибирах вскоре полностью исчезнут [Зюзин, 2006].

Но наши многолетние (с 1995 г.) наблюдения показывают, что это не так. И главной целью принятых нами в 2007–2021 гг. исследований стало выявление динамики снежно-фирново-ледяных образований в Хибинских горах и процессов преобразования вещества в них, установление механизма их устойчивости. Вслед за первооткрывателем хибинских ледников В.Ф. Перовым и составителями Каталога ледников СССР [1966], мы будем здесь продолжать называть их ледниками, считая, что в данном случае СФЛО – это синоним данного объекта.

Условия существования малых форм оледенения в Хибинских горах. Хибинские горы (максимальная высота 1200 м, г. Юдычвумчорр) расположены за Полярным кругом на Кольском полуострове и отличаются платообразным рельефом. Четыре выявленных В.Ф. Перовым ледника (рис. 1, 2) очень невелики по площади и толщине (табл. 1, 2) и располагаются на высотах 900–1000 м в благоприятных для повышенного снегонакопления условиях: № 1 – в верхней части склона северной экспозиции (см. рис. 2А); № 2 – у подножья склона северной экспозиции (см. рис. 2Б); № 3 и 4 – в узких скальных трещинах склона восточной экспозиции (см. рис. 1, 2В).

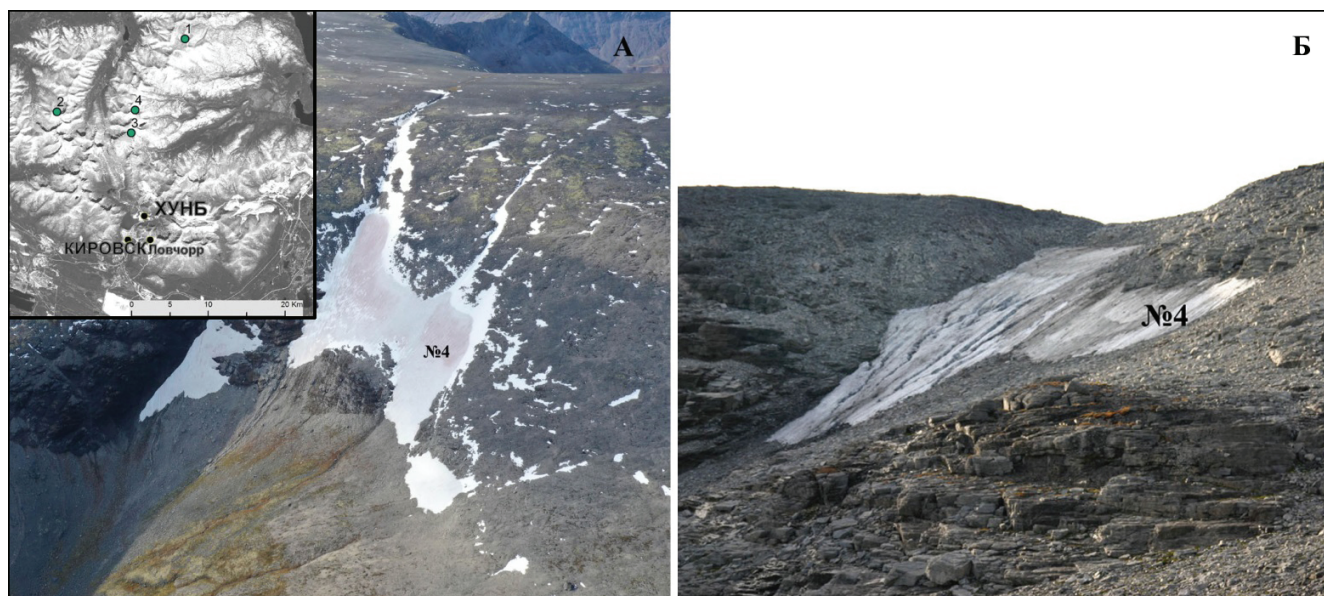


Рис. 1. Ледник № 4 в разные годы:

А – дата съемки 25.09.2020 (холодное лето, многоснежная зима) – длина и ширина ледника 230–250 м;
 Б – дата съемки 18.09.2006 (малоснежная зима) – ледник уменьшился до своих минимальных размеров (фото М.А. Викулиной).
 На врезке точками с цифрами показано расположение ледников в Хибинах. Черными точками показано местоположение:
 ХУНБ – Хибинской учебно-научной базы; Ловчорр – метеостанции на плато Ловчорр; г. Кировск

Fig. 1. Glacier No. 4 in different years:

А – September 25, 2020 (cold summer, snowy winter), the length and width of the glacier are 230–250 meters; Б – September 18, 2006 (winter with little snow), the glacier decreased to its minimum size (photo by M.A. Vikulina). The inset shows the location of glaciers in the Khibiny Mountains. Black points show the location: ХУНБ – Khibiny educational and scientific base;

Ловчорр – Lovchorr weather stations; Кировск – town Kirovsk

Таблица 1

Ледники Хибин

Номер ледника в [Каталог..., 1966]	Местоположение	Морфологический тип	Высотный диапазон, м
1	Верховья самого верхнего правого притока р. Кальйок, северо-восточный край плато Лявочорр	Карнизный ледник – навесный	1030–1100
2	Подножье плато Часначорр, кар в верховьях р. Часнайок	Лавинный ледник у подножия склона	890–980
3	Восточный край плато Кукисвумчорр, верховья р. Тульйок	Ледник кулуара – навесный	940–1070
4	Северо-восточный край плато Кукисвумчорр, верховья р. Южный Каскаснюйок	Ледник кулуара – навесный	910–1000

Все они лежат ниже теоретической снеговой границы на 800–1000 м. По расчетам Г.К. Тушинского [Тушинский, Малиновская, 1962], она проходит здесь на высотах 1600–1900 м, повышаясь в юго-восточном направлении. В связи с таким низким расположением ледники должны быть чувствительны к климатическим изменениям. Тем не менее, несмотря на повышение среднегодовой температуры, они продолжают существовать, значительно меняя свои размеры год от года и к концу периода абляции в конце сентября иногда почти исчезая.

Кольский полуостров находится в атлантико-арктической области умеренного пояса, и в Хибинах совмещаются черты регионального и местного горного климата. Переход среднесуточной температуры через 0°C на вершинных поверхностях плато (1000–1200 м) в среднем наблюдается 6 июля и 17 августа, т. е. продолжительность безморозного периода не превышает 41 день, а средняя температура летних месяцев не превышает +5,3°C [Мокров, 2008].

Устойчивый снежный покров на плато залегает с начала октября по начало июня. Осадки в виде снега могут выпадать в любое время года.

Характерная особенность Хибин – сильные ветры, которые сносят с плато на склоны большое количество снега. Скорость ветра закономерно растет с высотой и в зимний период усиливается при прохождении циклонов. Среднемесячная скорость ветра в зимние месяцы на плато достигает 6,5 м/с, а ветры свыше 15 м/с наблюдаются около 60 дней [Мокров, 2008].

Твердые осадки на плато составляют 70% от общего количества осадков. По многолетним данным в Хибинах в среднем выпадает около 700 мм твердых осадков в год [Зайка и др., 2012], что при пересчете дает высоту снежного покрова 296 см. Однако, реальные значения оказываются существенно меньше, так как 50–70% всего снега сносится с плато. Метели на плато отмечаются в среднем 154 дня в году [Мокров, 2008].

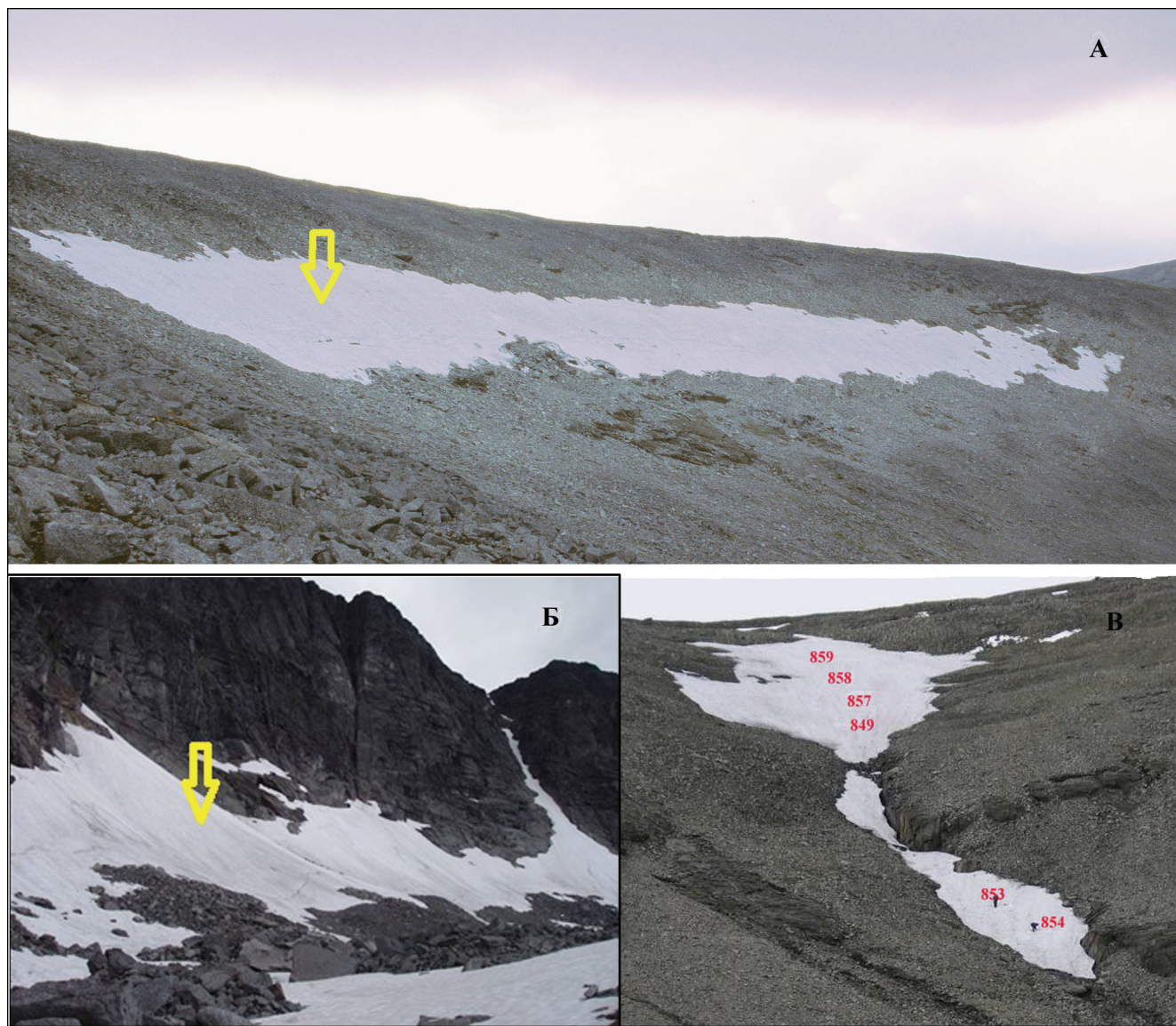


Рис. 2. Ледники Хибин:

А – ледник № 1, дата съемки 25.08.2005 г. (малоснежная зима, жаркое лето), толщина льда 5–10 см, стрелкой показано местоположение шурфа (фото М.А. Викулиной); Б – ледник № 2, дата съемки 3.07.2006 г. (малоснежная зима), стрелкой показано расположение шурфа, где проводилось бурение (фото Ф.А. Романенко); В – ледник № 3, дата съемки 28.09.2007 г. – лед найден в самой верхней и обширной части снежного тела, отделенного от нижележащих снежников скальным выступом. Цифрами обозначены номера шурфов (фото О.С. Олюниной)

Fig. 2. Khibiny glaciers:

A – glacier no. 1, August 25, 2005 (winter with little snow, hot summer), ice thickness is 5–10 cm, the arrow shows the location of the pit (photo by M.A. Vikulina); Б – glacier no. 2, July 3, 2006 (winter with little snow), the arrow shows the location of the borehole (photo by F.A. Romanenko); В – glacier no. 3, September 28, 2007, ice was found in the uppermost and most extensive part of the snow body, separated from the underlying snowfields by a rocky outcrop. Points indicate numbers of pits (photo by O.S. Olyunina)

Таблица 2

**Размеры ледников Хибин в конце периода абляции (конец августа – сентябрь)
и снежность предыдущей зимы**

	Sn	Ледник № 1			Ледник № 2			Ледник № 3			Ледник № 4		
		<i>L</i>	<i>W</i>	<i>S</i>	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>S</i>	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>S</i>	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>S</i>
1958*		80	360	0,03	420	50–150	0,03	350	40–90	0,02	240	40–90	0,015
2004**	м							270	50		195		
2005	м	50	350	0,01				300	90	0,02	185	108	0,01
2006	м	22	55	0,0008				60	15	0,0009	90	70	0,003
2007	с							200	30	0,002	100	60	0,004
2009	с							325	133	0,05	194	207	0,18
2012	с	57	411	0,02	126	266	0,015	200	40	0,003	178	50	0,009
2016	с	43	351	0,015	36	157	0,009	191	20	0,005	136	36	0,005
2017	мн	56	432	0,02				702	438	0,11	693	277	0,06
2018	с	28	135	0,003	73	55	0,002				93	68	0,004
2019	с	21	232	0,004	115	221	0,014	257	74	0,01	151	104	0,009
S_{cp}				0,01			0,01			0,03			0,03

Примечания. * По данным [Перов, 1968]. ** По данным [Зюзин, 2006]. Sn – снежность зимы (м – малоснежная; с – средне-снежная; мн – многоснежная); *L* – длина (м); *W* – ширина (м); *S* – площадь (км²); S_{cp} – среднее значение площади за время исследования (2005–2019).

Анализируя динамику температур и количества твердых осадков в центре Кольского полуострова, мы использовали данные трех метеостанций с непрерывными с 1966 г. рядами наблюдений, расположенных на разном расстоянии от Хибин: Мурманск (142 км к северу), Кандалакша (86 км на юго-запад), Краснощелье (130 км восточнее) [Булыгина и др., 2021]. На всех трех станциях заметно повышение среднегодовых температур, что подтверждается и другими исследованиями [Marshall et al., 2016]. Но средние температуры теплого периода меняются незначительно (рис. 3А), а потепление отмечается главным образом зимой, весной и осенью (см. рис. 3Б). Это обычная картина в Арктике и Субарктике – лето остается прохладным, а холодный период теплеет [Shilovtseva et al., 2011]. Сравнение коэффициентов регрессии, отражающих тренд средних сезонных температур на метеостанциях, расположенных в Хибинских горах и на прилегающих равнинах, не выявило статистически значимых различий [Демин, Волков, 2017]. Это позволяет говорить об одинаковых тенденциях и скорости потепления в горах и на равнинах Кольского полуострова.

Анализ суммарного количества твердых осадков на трех равнинных метеостанциях за 1966–2015 гг. (за последние семь лет нет данных) показывает некоторое статистически незначимое снижение. Преобладают зимы средней снежности, многоснежные и малоснежные зимы случаются достаточно редко [Зайка и др., 2012]. Но в расчеты не попадают дан-

ные последних двух многоснежных 2017 и 2020 гг. Поэтому нами были использованы результаты измерений высоты снежного покрова на метеоплощадке ХУНБ с 1984 г. До 2010 г. не наблюдалось какого-то тренда понижения или повышения толщины снежного покрова, как и на метеостанции «Центральная» на плато Ловчорр [Зайка и др., 2012]. Но после 2010 г. высота снежного покрова увеличивается, что подтверждают многоснежные зимы последних лет (рис. 4). За период наблюдений на ХУНБ (1984–2021) устойчивый снежный покров лежит в среднем 190 дней (см. рис. 4), в отдельные сезоны – до 228 дней (2019–2020).

За последние 20 лет по данным, полученным на площадке ХУНБ, многоснежными можно считать зимы 2013–2014, 2016–2017 и 2019–2020 гг. (см. рис. 4). Начало 2000-х гг., наоборот, характеризовалось малоснежными зимами при минимуме в 2002–2003 и 2005–2006 гг.

Таким образом, несмотря на рост среднегодовых температур воздуха на Кольском полуострове, средние температуры теплого периода меняются слабо, а количество твердых осадков в Хибинах незначительно увеличивается.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2005–2020 гг. в ходе комплексного исследования Хибинских ледников на первом этапе в 2005–2009 гг. мы наблюдали за ними визуально в течение всего периода абляции, измеряли их размеры в период мак-

симального снеготаяния в конце августа – сентябре, проходили шурфы в снегу, льду и фирне, создавали цифровые модели рельефа [Викулина, 2008]. Летом 2006 и осенью 2007 и 2008 гг. мы впервые пробурили насквозь два ледника (№ 2, 3) при помощи кольцево-

го ледового бура Черепанова (известного также как ПИ-8), достигнув скального ложа. До этого толщина ледников оценивалась только по косвенным данным. Бурение ледника № 4 пришлось прекратить из-за большой мощности снега в 2008 г.

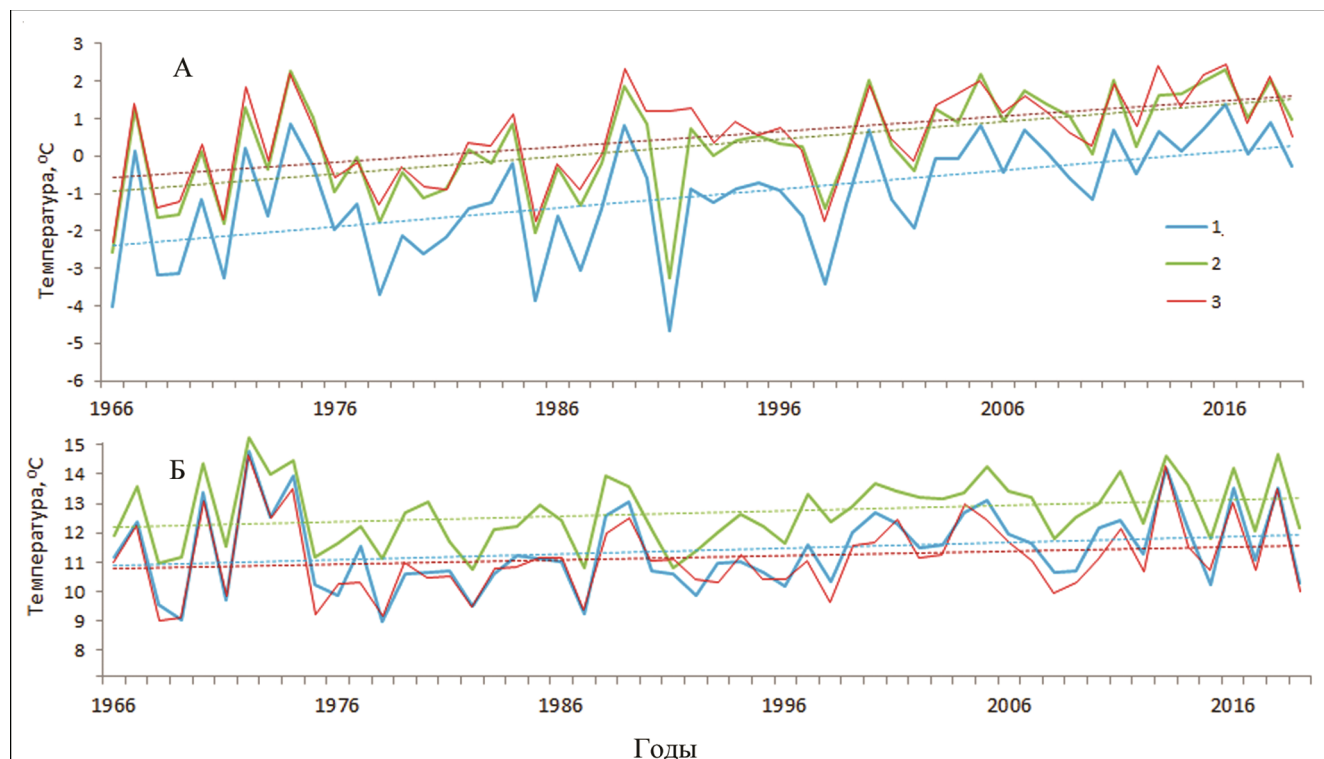


Рис. 3. Многолетнее изменение температуры воздуха на метеостанциях Мурманской области (по данным [Булыгина и др., 2021]):

А – средние годовые температуры; Б – средние летние температуры; станции: 1 – Мурманск; 2 – Кандалакша; 3 – Краснощелье. Пунктирными линиями показаны линии трендов, рассчитанные методом наименьших квадратов

Fig. 3. Long-term changes of air temperature at weather stations in the Murmansk region (according to [Bulygina et al., 2021]): А – average annual temperatures; Б – average summer temperatures; stations: 1 – Murmansk; 2 – Kandalaksha; 3 – Krasnoshchelye. The dotted lines show trend lines calculated by the least squares method

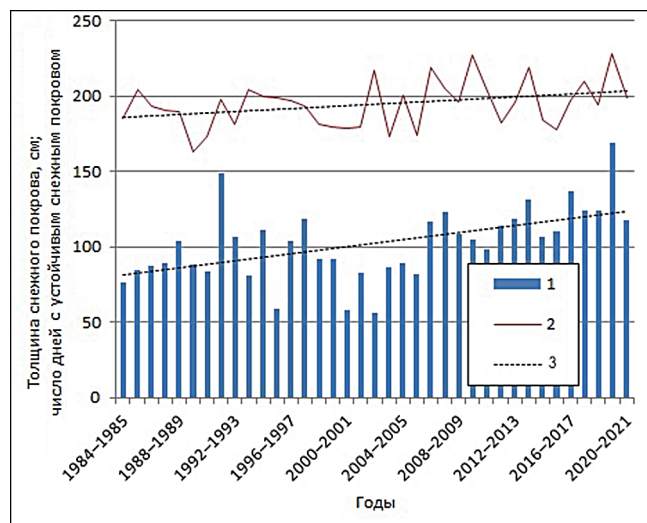


Рис. 4. Изменение максимальной толщины снежного покрова и продолжительности залегания устойчивого снежного покрова на метеоплощадке Хибинской учебно-научной базы:

1 – толщина снежного покрова; 2 – число дней с устойчивым снежным покровом; 3 – линии трендов, рассчитанные методом наименьших квадратов

Fig. 4. Change in the maximum thickness of the snow cover and the duration of stable snow cover at the meteorological site of the Khibiny Educational and Scientific station: 1 – thickness of the snow cover; 2 – number of days with stable snow cover; 3 – trend lines calculated by the least squares method

Всего на трех ледниках пройдено девять скважин (табл. 3), из которых скальное ложе достигнуто в шести. Как правило, бурение проводилось со дна предварительно выкопанных в снегу шурфов глубиной до 4,5 м, реже – с плотной поверхности фирнизированного снега. Снежно-фирновая толща, перекрывавшая лед, и сам лед опробовались по всей глубине. КERN разделялся на куски длиной 10–15 см, которые помещались в полиэтиленовые закрывающиеся пакеты. Снег и лед таяли при температуре окружающего воздуха, не превышавшей 10°C. После таяния вода переливалась в химически чистые банки и транспортировалась в лаборатории. Пробы воды были отфильтрованы через мембранный фильтр (0,45 мкм) и законсервированы для последующего определения в них микроэлементов. Лабораторный анализ содержания главных ионов в 2006 г. выполнен по стандартной методике [Комаров, Каменцев, 2006]. Пробы 2007–2008 гг. были проанализированы в лаборатории геологических явлений и процессов (*Laboratoire des Mécanismes et Transferts en Géologie (LMTG)*) Обсерватории *Midi-Pyrénées* (г. Тулуза, Франция). Содержание катионов определено на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой *Agilent 7700*, анионов – на

жидкостном хроматографе *Agilent 1290* производства фирмы *Agilent Technologies (Keysight)*. Изотопно-кислородный анализ проведен в лаборатории геохимии изотопов и геохронологии Геологического института РАН на измерительном комплексе *Finnigan Delta Advantage* с системой подготовки и ввода проб *Gas Bench II*.

В дальнейшем до 2020 г. мы анализировали динамику изменения площадей СФЛО с использованием космических снимков на период конца абляции. При выборе снимков мы руководствовались наличием безоблачных снимков на нужный период в разные по метеопараметрам годы: *GeoEye-1* (2009; 0,5 м), *WorldView-2* (2012; 0,5 м), *Spot7* (2016, 2019; 1,5 м), *Spot6* (2017, 2018; 1,5 м). В целях получения достоверных результатов измерений все материалы дистанционного зондирования были подвергнуты фотограмметрической обработке, направленной на устранение искажений, в большей степени связанных с условиями съемки, а также рельефом поверхности изучаемых объектов. В результате работ были получены разновременные ортофотопланы нужных участков, на основе которых с помощью методов экспертного дешифрирования средствами ГИС-технологий были выделены границы ледников.

Таблица 3

Сравнительная характеристика внутреннего строения и состава льда и снега ледников

Номер ледника	Номер шурфа	Абсолютная высота шурфа, м	Глубина шурфа, м	Толщина снега, м	Толщина льда, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰, SMOW	Содержание катионов, мг/л
2	2–2007	948	1,05	0,95	0,2	–12,0–13,1	Катионы 1,0–3,8
	1–2006	900	4,46	4–4,5	0,66	–	4–9
3	859	970	3,1	3,1	Нет	–	–
	858*	955	2,5	Более 2,5	Не вскрыт	–	–
	857*	953	2,5	2,05	Более 0,4	–	Катионы 0,9–1,5
	849	947	2,3	0,7	1,6	–11,3–14,0	Катионы 0,7–4,3
	853	898	1,9	1,9	Нет	–	–
	854	890	1,65	1,65	Нет	–	–
4	256*	950	2,22	Более 2,5	Не вскрыт	–	–

Примечание. * Шурфы и скважины не достигли ложа ледника.

2018 г. характеризовался аномально жарким летом, поэтому размеры ледников сравнивались с аналогичным жарким летом 2005 г. Анализировались снимки за 2012, 2017, 2019 гг. с холодным летом. 2017 г. был еще и многоснежным, снег в горах со-

хранялся до июля. 2009 и 2016 гг. были средними по значениям температур и количеству твердых осадков. Имевшиеся в нашем распоряжении аэрофотоснимки августа 1958 г. позволили сравнить распространение СФЛО за 60 лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Внутреннее строение СФЛО по данным бурения 2006–2008 гг. Первым объектом бурения стал лежащий у подножья г. Часначорр ледник № 2, путь к которому лежал через перевал Южный Чоргорр. В июле 2006 г. шурф на ледниковой поверхности был заложен практически в его центральной выпуклой части, где толщина льда предполагалась близкой к максимальной. Глубина пройденного в снегу и фирне шурфа достигла 4 м, где вскрылась кровля ледяного тела. Проникновение вглубь него производилось кольцевым буром с полным отбором керна.

В шурфе 1-2006 (см. рис. 2Б) под поверхностным слоем снега толщиной 0,9 м вскрылся слой прозрачного льда толщиной 0,10–0,13 м, видимо, образовавшийся в результате интенсивного таяния и замерзания воды в один из предыдущих летних се-

зонов. Ниже залегала неясно слоистая толща крупнозернистого влагонасыщенного (бурение производилось 2–3 июля) снега толщиной до 3–3,3 м. Она подстилалась пройденным скважиной горизонтом льда толщиной 0,66 м, лежащем на скальном ложе (рис. 5А). Верхние слои льда – прозрачные, ниже – мутные, с темно-серыми прослойками рассеянной пыли, с прослоями гладкого льда практически без воздушных пузырьков. В основании ледяного тела находится маломощный (5–8 см) прослой прозрачного льда с небольшим количеством пузырьков. В подошву льда вморожены щебень и глыбы нефелиновых сиенитов, которые в результате процессов замерзания и таяния обогащают нижние слои льда натрием, алюминием и железом [Озера и ледники..., 2013]. По скальному ложу струится вода. Наклон слоев в керне соответствует уклону (до 20°) поверхности ледника.

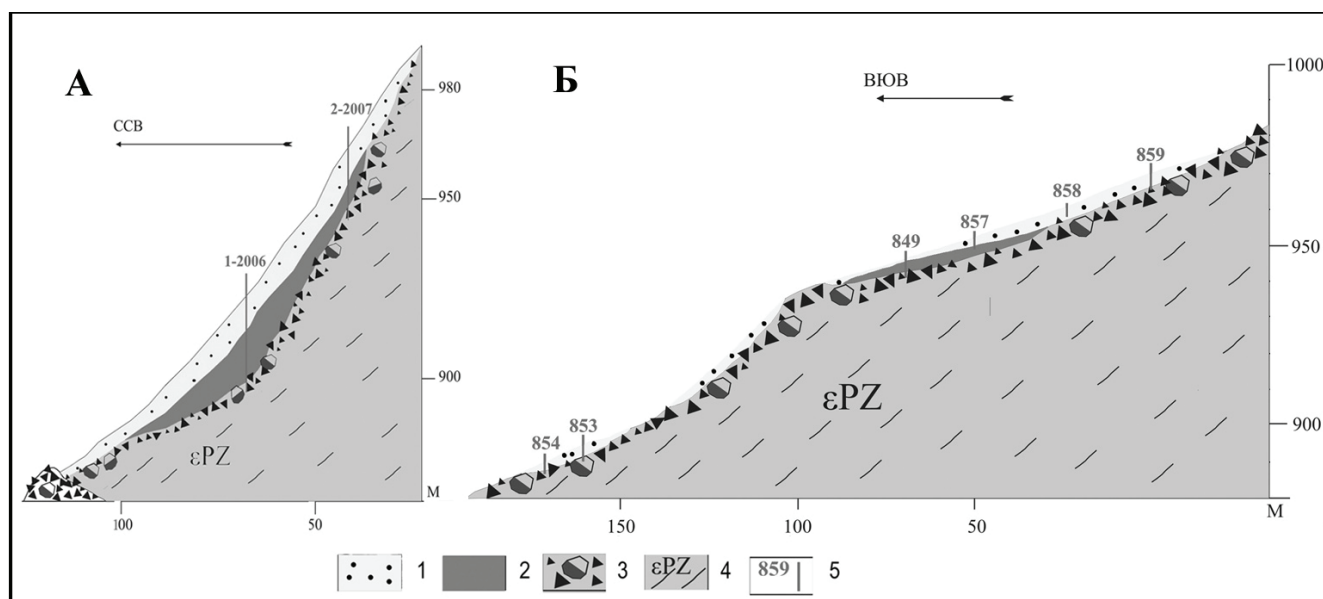


Рис. 5. Внутреннее строение ледников по результатам шурфования и бурения 2006–2007 гг.:

А – ледник № 2; Б – ледник № 3; 1 – снег; 2 – лед; 3 – щебень и глыбы; 4 – щелочные породы палеозоя; 5 – номера шурфов

Fig. 5. Internal structure of glaciers based on the results of pitting and drilling in 2006–2007:

А – glacier no. 2; Б – glacier no. 3; 1 – snow; 2 – ice; 3 – crushed stone and lumps; 4 – Paleozoic alkaline rocks; 5 – numbers of boreholes

В 50 м выше шурфа 1-2006 в сентябре 2007 г., когда толщина снега на поверхности ледника достигла минимума, мы пробурили скважину 2-2007. Под почти метровым слоем плотного фирнизированного крупнозернистого снега обнаружен маломощный (0,20 м) прослой слоистого льда, лежащий на скале. Прозрачные прослои с небольшим количеством воздушных включений перемежаются с мутными, содержащими большое количество воздушных включений, иногда загрязненными.

Результаты химических и изотопных анализов. Химические анализы льда ледника № 2 (скважина 2-2007) показали его крайне низкую минерализацию (4–9 мг/л) и хлоридно-натриево-кальциевый состав. Минерализация вышележащего снега меняется от 2 до 3,5 мг/л. В верхней части профиля снег имеет хлоридно-кальциево-натриевый состав. Ниже слоя прозрачного льда на глубине 0,9 м доля натрия увеличивается до 20% и более. В толще снега от 0,21 до 0,38 м вниз по профилю в 2–3 раза возрастает содержание гидрокарбонатов (см. табл. 3).

Сходным строением обладает и ледник № 3. В июле 2007 г. снежное поле, скрывавшее ледник, занимало практически весь восточный склон г. Кукисвумчорр, а сам он в период максимальной абляции в конце сентября 2007 г. состоял из трех изолированных частей, разделенных скальными выступами (см. рис. 2В). Две нижние части ледника образованы фирнизированным снегом толщиной до 1,9 м и только верхняя содержит ледяное тело толщиной 1,6 м. Такая морфология определена в первую очередь строением скального ложа. Лед перекрывает более пологую часть склона, выше и ниже которой уклоны увеличиваются, вода стекает, и лед не образуется. Таким образом, ледник лежит в пологой нивальной нише – характерной форме рельефа Хибинских гор.

В вертикальном профиле выделяются два слоя снега. Поверхностный слой снега обогащен тяжелыми металлами (Zn, Cu, Ni), нижележащий слой сильно запылен, содержит максимальное по профилю количество растворенных и взвешенных веществ (мутность составляет более 3 г/л). В запыленном слое снега повышена минерализация (13,7 мг/л) и концентрация гидрокарбонатных ионов (более чем в 5 раз превышает значения, характерные для всей толщи ледника). Между слоями запыленного снега и лежащим ниже слоем льда значительны градиенты концентраций большей части химических компонентов (рис. 6). В слое льда полностью отсутствуют гидрокарбонатные ионы, снижена величина pH (от 6,4 до 5,3) и общая минерализации (в 7,2 раза). Для снежно-ледяной толщи ледника характерно повышенное содержание цинка, причем в снеге оно сравнимо с содержанием магния (0,04–0,06 мг/л), во льду в среднем равно 0,02 мг/л.

Обобщая данные бурения, можно видеть, что в строении ледников № 2–4 под поверхностным слоем снега с ледяными прослоями и линзами толщиной 2–5 мм вскрывается слоистая толща крупнозернистого влагонасыщенного снега. Контакт с нижележащим льдом различен – иногда здесь находится маломощный (до 0,2–0,3 м) слой фирна, иногда снег непосредственно лежит на льду (см. рис. 5Б). В леднике № 3 верхние слои льда сильно загрязнены пылью, в леднике № 2 – прозрачные. Ниже лед в основном полосчатый, состоит из чередования более светлых прозрачных и более темных (мутных) прослоев, с наклонными темно-серыми прослоями рассеянной пыли и прозрачного льда практически без воздушных пузырьков (см. рис. 6).

Пытаясь выявить межгодовые температурные различия условий ледообразования мы провели изотопно-кислородный анализ. Выяснилось, что изотопный состав кислорода снега и льда закономерно облегчается вниз по профилю, что говорит о

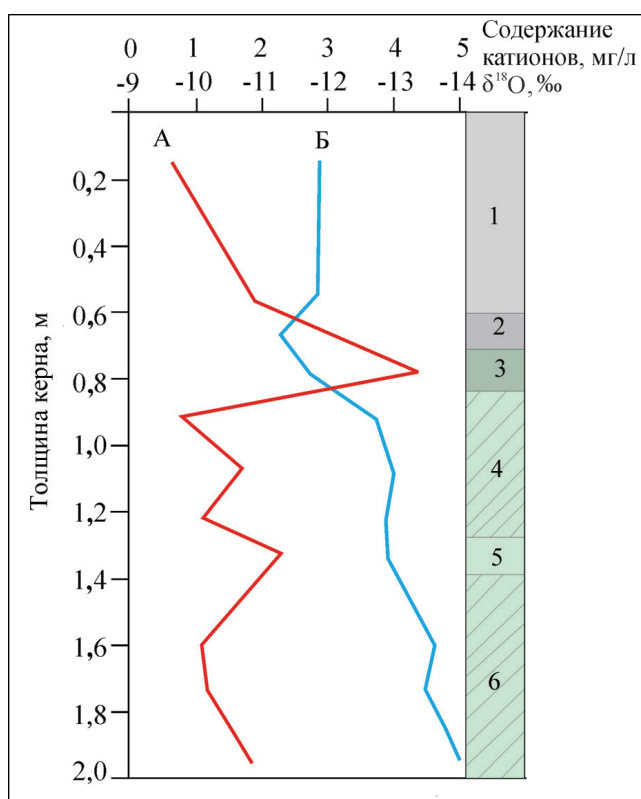


Рис. 6. Изотопный состав и суммарное содержание катионов (кальция, магния, натрия, калия) в снеге и льде ледника № 3, 28.09.2007: А – содержание катионов; Б – изотопный состав кислорода; 1 – снег с ледяными прослоями и линзами; 2 – снег сильно запыленный; 3 – лед мутный, серый; 4, 6 – лед с чередованием прозрачных и мутных прослоев; 5 – лед прозрачный

Fig. 6. Isotopic composition and the total content of cations in snow and ice of glacier no. 3 as of September 28, 2007: А – content of cations; Б – oxygen isotope composition. 1 – snow with ice layers and lenses; 2 – very dusty snow; 3 – muddy ice, gray; 4, 6 – ice with alternating transparent and muddy layers; 5 – transparent ice

том, что более глубокие слои льда формировались при более низких температурах, чем вышележащие. Значение $\delta^{18}\text{O}$ меняется от $-11,3$ до -14‰ , что говорит о заметных различиях температурных условий формирования льда. Согласно [Fricke, O'Neil, 1999], в арктических широтах значения $\delta^{18}\text{O}$ уменьшаются в среднем на $\sim 0,5\text{‰}$ с уменьшением среднегодовых температур поверхности Земли на 1°C . Из этого можно заключить, что подошва ледника формировалась при температуре на $\sim 4^\circ\text{C}$ ниже современной. Наиболее тяжелый изотопный состав имеет сильно загрязненный верхний прослой льда, где максимально содержание катионов, особенно калия, магния и натрия, наиболее легкий – донный лед, лежащий непосредственно на покрытом щебнем и глыбами ложе ледника. Значение $\delta^{18}\text{O}$ в свежем снеге ($-14,3\text{‰}$) заметно меньше, чем в слежавшемся

снеге, пережившем многочисленные преобразования в период абляции (см. рис. 6, табл. 3).

Толща снега обоих ледников насыщена водой, постепенно фильтрующейся вниз, т. е. в летний период идет постоянная миграция воды в снежной толще. Ледяное ядро подтаивает у подошвы, нарастая на кровле за счет намерзания фильтрующейся сверху воды. Этот обмен, судя по скорости таяния, идет очень быстро, и вся толща обновляется, вероятно, за несколько лет. Но ледяное ядро сохраняется, находясь в теплый период года в своеобразном водяном «кольце»: сверху, с боков по краям ледяного ядра и по скальному ложу стекает вода тающего снега и фирна. Как только температура падает ниже нуля, толща начинает промерзать, превращая СФЛО в единый массив. Зимой он становится очагом аккумуляции снега, поддерживающего жизненный цикл подобных объектов, что мы наблюдали в ходе прямых наблюдений.

В.Ф. Перов [1968] предполагал, что хибинские ледники возникли в ходе похолодания стадии фернау (XIII–XIX вв.), а в последующие периоды неоднократно исчезали и возникали вновь. Размеры таких образований оставались небольшими, а их геоморфологическая деятельность – весьма слабой. Об этом говорит практическое отсутствие признаков движения вышеописанных объектов. Только у подножия ледника № 2 обнаружены валы – скопления неокатанного несортированного материала высотой 2–4 м, которые В.Ф. Перов считал следствием движения снежно-фирново-ледяной массы. Но нам представляется, что они сформированы не движением ледника, а накоплением скатывающихся по его поверхности обломков, в изобилии падающих из рассекающего вышележащий склон тектонического рва с сильно трещиноватыми бортами. Мы постоянно наблюдали падение обломков на верхнюю часть ледника и их перемещение талыми водами и силой тяжести.

Дистанционные методы. Анализ августовских космических и аэрофотоснимков 1958–2020 гг. показал, что самые благоприятные условия для формирования и сохранения снежников в Хибинах складываются на северных, северо-восточных и восточных склонах скальных массивов в отрицательных формах рельефа – рвах, нишах, основаниях уступов и др. В карах и цирках лежит около 60% от общего числа снежников, причем чаще всего на склонах восточной экспозиции (подветренных). Примерно четверть снежников находится в долинах ручьев и в ложбинах, остальные – в перевальных ущельях и седловинах.

Сравнение площадей СФЛО за последние 15 лет показывает, что они постоянно меняют свои размеры, что соотносится со снежностью предше-

ствующей зимы и средними температурами лета (см. табл. 2). Малоснежное начало 2000-х гг., жаркое лето 2005 г. привели к сильному уменьшению размеров СФЛО, в то время как рост количества твердых осадков в последующие годы, повторение холодных лет, например 2008 и 2017 гг., стали причиной их нового увеличения (см. табл. 2).

В настоящее время ледники № 3 и 4 стабильны и в среднем превышают размеры 1958 г. Так, в сентябре 2020 г. в конце периода снеготаяния площадь ледника № 4 в два раза превышала его размеры в 1958 г. (см. рис. 1). Ледники № 1 и 2 в среднем уменьшились по сравнению с 1958 г. Но, несмотря на то что, например, в 2005 г. ледник № 1 даже распался на несколько разрозненных снежно-фирново-ледяных пятен площадью десятки квадратных метров в связи с малоснежностью зим начала 2000-х гг., он продолжал существовать на прежнем месте в виде единого образования даже после аномально жаркого лета 2018 г. Это подтверждает вывод о том, что на СФЛО Хибин количество твердых осадков оказывает большее влияние, чем повышение температуры воздуха.

Таким образом, возникновение СФЛО (малых ледников) в Хибинских горах (а существование подобных образований можно предполагать и в Ловозерских тундрах (высота 1116 м) и в массивах Монче- и Чуна-тундр (1072 м)) обуславливается значительным количеством осадков и чрезвычайно благоприятными условиями снегонакопления за долгую (7–9 месяцев) зиму на подветренных склонах и в понижениях, куда снег сдувается ветрами при метелях. Так, в июле 2007 г., после начала таяния, мощность толщи снега у подножия ледника № 3 еще превышала 6 м, т. е. в апреле – мае она могла достигать и 10 м. А на плато Лявочорр в районе ледника № 1 после первого же снегопада 24 сентября 2007 г. толщина снежных надувов превысила 1,2 м, и снег полностью скрыл сам ледник. Такие скопления снега, имеющие метелевое (№ 1, 3, 4) и лавинное (№ 2) питание, не успевают растаять за прохладное лето и превращаются в СФЛО или малые ледники.

Подобные объекты обнаружены и в других горных системах [Глазырин и др., 1993; Kuhn, 1995; Glazirin et al., 2004; Debeer, Sharp, 2009; Сарана, 2012]. Правомерно ли называть их малыми ледниками? Это снежно-фирново-ледяные образования, сохраняющиеся в течение длительного времени, обладающие высокой динамичностью. Они имеют ледяное ядро, что отличает их от обычных снежников, но не двигаются, как ледники. Для таких объектов на равнинах Арктики уже давно [Большаянов, 2006] существует специальный термин – «пассивные ледники», хотя и термин СФЛО, по сути, – их синоним.

Длительное существование таких объектов в Хибинах подтверждает гипотезу об их устойчивом состоянии, несмотря на изменения природных условий. При малой площади (менее $0,05 \text{ км}^2$) они не могут считаться индикаторами изменения климата, потому что оказываются более устойчивыми, чем крупные ледники. Они сохраняют стабильность, периодически сокращаясь до малых размеров, когда сходит весь накопленный за предыдущие годы снег, фирн и частично лед, чтобы в следующем году или через год восстановить свои размеры. Тенденция их развития зависит от сочетания количества твердых осадков и температур конкретного лета. Огромное влияние на накопление снега оказывает ветровой перенос – локальные изменения направления и скорости ветра, которые трудно «поймать» и непосредственно измерить рядом с каждым ледником, но которые могут существенно увеличить количество снега в отрицательных формах рельефа.

Ведущую роль в формировании ледяного ядра играет количество поступающей в период таяния воды, фильтрующейся через снежную толщу, и осенние температуры. Чем теплее лето (чем больше воды поступает) и чем быстрее и «резче» наступит осень, тем мощнее будет ледяная толща. То есть размеры и толщина хибинских ледников сильно колеблются, увеличиваясь при благоприятных условиях и сильно сокращаясь при неблагоприятных.

ВЫВОДЫ

Со времени обнаружения малых форм оледенения в Хибинах прошло больше 60 лет. В.Ф. Перов считал их ледниками и именно под таким названием они вошли в Каталог ледников СССР. В начале XXI в. впервые удалось получить прямые данные о строении снежно-фирновой толщи и мощности ледяного ядра этих образований. Мощность льда в 2006–2007 гг. оказалась незначительной и колебалась от 0,1 м (ледник № 1) до 1,6 м (ледник № 3).

Снег, фирн и лед хибинских ледников имеют низкую минерализацию (4–9 мг/л) хлоридно-натриево-кальциевого состава. В толще периодически повторяются сильно запыленные прослои, минерализация которых гораздо выше. Их образование можно связать с сухими теплыми периодами лета, когда эоловый перенос пыли максимально активен.

Его активизация происходит не каждый год, поэтому возраст снежно-ледяной толщи по количеству таких прослоев рассчитывать нельзя. Изотопный состав кислорода снега и льда говорит о том, что более глубокие слои льда формировались при более низких температурах, чем вышележащие: глубинные слои промерзают зимой, позже приповерхностных, промерзающих осенью.

Мониторинг площади ледников Хибин по космическим снимкам показал, что ледники № 3 и 4 сохраняются в стабильном состоянии (средняя площадь каждого около $0,03 \text{ км}^2$), в отдельные годы превышая размеры времен открытия в 1958 г. Ледники № 1 и 2 постепенно уменьшаются: их средняя площадь сократилась в три раза по сравнению с 1958 г., не превышая $0,01 \text{ км}^2$.

Несмотря на увеличение среднегодовых температур на $2,3 \pm 1^\circ\text{C}$ за последние 50 лет, средние температуры теплого периода существенно не увеличиваются, но заметные колебания испытывает количество снега. Малоснежные зимы начала 2000-х гг., когда максимальная толщина снежного покрова не превышала 55 см, сменились многоснежными (2013–2014, 2016–2017, 2019–2020 гг.). Особенно много снега выпало зимой 2019–2020 гг., когда максимальная толщина снежного покрова достигла на метеоплощадке ХУНБ 180 см.

Именно эти колебания снежности зим и обусловили изменения размеров ледников. Их сокращение до 2007 г. и очень небольшие мощности льда, обнаруженные бурением, определены предыдущими малоснежными годами и жарким летом 2005 г. Последующее увеличение количества твердых осадков привело к восстановлению размеров части ледников.

В.Ф. Перов предположил, что ледники (или СФЛО) Хибин возникли в малом ледниковом периоде (стадия фернау, XIII–XIX вв.). Но можно предположить, что они, в силу обнаруженного нами механизма образования, могли сохраниться и с конца валдайской ледниковой эпохи, периодически почти исчезая и возникая вновь. То есть наличие в горах таких объектов не может служить индикатором климатических изменений из-за их практически «мгновенной» (2–3 года) реакции на локальные изменения количества осадков, температуры воздуха и даже ветрового режима.

Благодарности. Участие М.А. Викулиной осуществлялось в рамках госзадания «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (№ 121051100164-0), М.В. Зимина – поддерживалось РФФИ (проект № 18-05-60221), Ф.А. Романенко – госзаданием «Эволюция природной среды в кайнозое, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования» (№ 121040100323-5), Л.Е. Ефимовой – госзаданием «Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши» (№ 121051400038-1). Материалы космической съемки были получены при поддержке ЦКП МГУ имени М.В. Ломоносова – «Гео-портал».

Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам географического факультета МГУ, принимавшим участие в бурении ледников в 2006–2008 гг.: канд. геогр. наук О.В. Кокину, канд. геогр. наук Е.В. Гаранкиной, канд. геогр. наук О.С. Шиловой, Д.А. Соколову, сотруднику Института географии РАН канд. геогр. наук Е.А. Константинову и сотруднику Геологического института РАН канд. геол.-минерал. наук Е.А. Морозу, а также А.А. Чесноковой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананичева М.Д. Оценка площадей, объемов и высот границы питания ледниковых систем Северо-Востока России по космическим снимкам начала XXI в. // *Лед и Снег*. 2014. № 1(125). С. 35–47.
- Большаинов Д.Ю. Пассивное оледенение Арктики и Антарктиды. СПб.: ААНИИ, 2006. 296 с.
- Викулина М.А. Использование геоинформационных систем для исследования гляциально-нивальных явлений // *МГИ*. 2008. Вып. 105. С. 120–124.
- Глазырин Г.Е., Камнянский Г.М., Перцигер Ф.И. Режим ледника Абрамова. Л.: Гидрометеиздат, 1993. 228 с.
- Гляциологический словарь / под ред. В.М. Котлякова. Л.: ГИМИЗ, 1984. 528 с.
- Демин В.И., Волков А.В. Сравнение изменений температуры воздуха в Хибинах и на окружающей предгорной равнине // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. № 3. С. 16–27. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-3-16-27.
- Зайка Ю.В., Викулина М.А., Черноус П.А. Многолетняя динамика нивальных процессов в Хибинах // *Лед и снег*. 2012. № 1. С. 69–74.
- Зюзин Ю.Л. Суровый лик Хибин. Мурманск: Реклам. полиграфия, 2006. 236 с.
- Каталог ледников СССР. Т. 1. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1966. С. 45–51.
- Комарова Н.В., Каменцев Я.С. Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза «Капель». СПб.: Веда, 2006. 212 с.
- Мокров Е.Г. Сейсмические факторы лавинообразования. М.: Научный мир, 2008. 126 с.
- Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Иванов М.Н., Синицкий А.И., Кобелев В.О., Никитин С.А. Реакция ледников Полярного Урала на современные изменения климата // *Лед и снег*. 2020. Т. 60. № 1. С. 42–57.
- Озера и ледники / Влияние изменений климата и опасных природных явлений на природопользование Европейского Севера. СПб.: РГГМУ, 2013. С. 80–81.
- Перов В.Ф. Первый ледник в Хибинах // *Природа*. 1958. № 7. С. 88.
- Перов В.Ф. Снежники, ледники и мерзлотный рельеф Хибинских гор. М.: Наука, 1968. 120 с.
- Сарана В.А. Малые ледники Российского сектора Арктики и Субарктики // *Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2012. № 2. С. 82–87.
- Тронов М.В. Еще о малых формах оледенения // *МГИ*. 1966. Вып. 12. С. 250–253.
- Тушинский Г.К., Малиновская Н.В. Положение уровня «365» над территорией СССР и связь этого уровня с оледенением // *Информ. сб. о работах МГУ*. 1962. № 9. С. 5–9.
- Ananicheva M.D., Kononov Y.M., Belozarov E.V. Contemporary state of glaciers in Chukotka and Kolyma highlands, *Bulletin of Geography, Physical Geography Series*, 2020, vol. 19, p. 5–18, DOI: 10.2478/bgeo-2020-0006.
- Fricke H.C., O'Neil J.R. The correlation between $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time, *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, vol. 170, p. 181–196.
- Glazirin G., Kodama Y., Ohata T. Stability of drifting snow-type perennial snow patches, *Bull. of Glaciol. Res.*, 2004, no. 21, p. 1–8.
- Debeer C.M., Sharp M.J. Topographic influences on recent changes of very small glaciers in the Monashee Mountains, British Columbia, Canada, *Journal of Glaciology*, 2009, vol. 55, no. 192, p. 691–700, DOI: 10.3189/002214309789470851.
- Kuhn M. The mass balance of very small glaciers, *Zeitschrift für Gletscherrunde und Glazialgeologie*, 1995, band 31, p. 171–179.
- Marshall G.J., Vignols R.M., Rees W.G. Climate Change in the Kola Peninsula, Arctic Russia, during the Last 50 Years from Meteorological Observations, *Americ. Meteorol. Society*, 2016, vol. 29, p. 6823–6840, DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0179.1.
- Shilovtseva O.A., Kononova N.K., Romanenko F.A. Climate Change in the Arctic Regions of Russia, *Climate change adaptation: ecology, mitigation and management*, New York, Nova Science Publishers, 2011, p. 35–63.
- Vikulina M., Vashchalova T., Tutubalina O., Rees W., Zaika Y. Moscow University's field station in the Khibiny Mountains, Russian Arctic, A 70-year history to the present day, *Polar Record*, Cambridge University Press, 2021, no. 57, p. 1–12, DOI: 10.1017/S0032247421000012.
- Электронный ресурс*
Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394. URL: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (даты обращения 01.02.2021–31.03.2021).

Поступила в редакцию 21.02.2022

После доработки 14.07.2022

Принята к публикации 22.09.2022

STRUCTURE AND DYNAMICS OF SNOW AND ICE FORMATIONS IN THE Khibiny MOUNTAINS IN THE 21ST CENTURY

M.A. Vikulina¹, F.A. Romanenko², M.V. Zimin³, L.E. Efimova⁴, B.G. Pokrovskiy⁵

¹⁻⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

⁵ Geological Institute of the RAS, Laboratory of Isotope Geochemistry and Geochronology

¹ Department of Cryolithology and Glaciology, Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: masanna2003@mail.ru

² Department of Geomorphology and Paleogeography, Leading Scientific Researcher,

Ph.D. in Geography; e-mail: faromanenko@mail.ru

³ Department of Cartography and Geoinformatics, Laboratory of Aerospace Methods and Remote Sensing,

Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ziminmv@mail.ru

⁴ Department of Land Hydrology, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ef_river@mail.ru

⁵ Head of the laboratory, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: pokrov@ginras.ru

In 1958 V.F. Perov, staff member of the Khibiny Research and Training Station of the MSU Faculty of Geography, described four snow-ice formations in the Khibiny Mountains and classified them as very small glaciers. Until our research began in 2005, these glaciers were not studied in detail. We used field observations, drilling, GIS and remote sensing methods to study the structure of the glaciers and evaluate changes in their geometry during 60 years. The snow-ice formations were drilled through for the first time and the ice cores underwent geochemical and isotope-oxygen analyses. The thickness of ice kernels varies from 0.2 to 1.6 m. Our investigations showed that despite a slight degradation, the glaciers' area remains relatively stable since 1958. This fact may be caused by the increase in solid precipitation in recent years. According to the analysis of climatic changes, in the early 2000s a decrease in snowfall was observed in the Khibiny Mountains. The maximum snow thickness at the meteorological site of the Khibiny station in 2002–2003 winter period was 55 cm. This could be a factor of more than 2 times decrease of glacier areas during 2000–2010. After 2007 there has been an increase in snow precipitation, and the maximum snow depth of 180 cm was observed in 2020, the absolute maximum for the whole period of observations (1984–2020). According to published data the increase in mean annual temperature at the plains of the Kola Peninsula is $2.3 \pm 1^\circ\text{C}$ during the last 50 years. However, mean monthly temperatures of the summer do not rise. We consider that, along with recently increasing snow precipitation, this is exactly what determine rather stable state of snow-ice formations in the Khibiny Mountains, which appeared to be more resistant to climate warming than mountain glaciers.

Keywords: snow and ice formations, Kola Peninsula, satellite imagery, small glaciers, snowfields

Acknowledgements. Participation of M.A. Vikulina was carried out within the framework of the state assignment "Evolution of the cryosphere under climate change and anthropogenic impact" (No. 121051100164-0), M.V. Zimin was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-05-60221), F.A. Romanenko – the state task "Evolution of the natural environment in the Cenozoic, topography dynamics, geomorphological hazards and risks of nature management" (No. 121040100323-5), L.E. Efimova – state task "Analysis, modeling and forecasting of changes in hydrological systems, water resources and land water quality" (No. 121051400038-1). Space imagery was obtained with support of the Geoportal Research Equipment Sharing Center of the Lomonosov Moscow State University.

The authors express their sincere gratitude to Ph.D. O.V. Kokin, Ph.D. E.V. Garankina, Ph.D. O.S. Shilova and D.A. Sokolov, staff members of the MSU Faculty of Geography; to Ph.D. E.A. Konstantinov, Institute of Geography of the RAS, and Ph.D. E.A. Moroz, Geological Institute of the RAS, as well as to A.A. Chesnokova for their participation in glacier drilling in 2006–2008.

REFERENCES

- Ananicheva M.D. Otsenka ploshchadei, ob'emov i vysot granitsy pitaniya lednikovyx sistem Severo-Vostoka Rossii po kosmicheskim snimkam nachala XXI v. [Estimation of the areas, volumes and heights of the recharge boundary of the glacial systems of the North-East of Russia based on satellite images of the beginning of the 21st century], *Led i Sneg*, 2014, no. 1(125), p. 35–47. (In Russian)
- Ananicheva M.D., Kononov Y.M., Belozerov E.V. Contemporary state of glaciers in Chukotka and Kolyma highlands, *Bulletin of Geography, Ser. Physical Geogr.*, 2020, vol. 19, p. 5–18, DOI: 10.2478/bgeo-2020-0006.
- Bol'shiyanov D.Yu. *Passivnoe oledenenie Arktiki i Antarktidy* [Passive glaciation of the Arctic and Antarctica], Saint Petersburg, Arctic and Antarctic Research Institute Publ., 2006, 296 p. (In Russian)
- Debeer C.M., Sharp M.J. Topographic influences on recent changes of very small glaciers in the Monashee Mountains, British Columbia, Canada, *Journ. of Glaciology*, 2009, no. 192, p. 691–700, DOI: 10.3189/002214309789470851.
- Demin V.I., Volkov A.V. Svravnenie izmenenii temperatury vozdukh v Khibinakh i na okruzhayushchei predgornoi ravnine [Comparison of changes in air temperature

- in the Khibiny and on the surrounding foothill plain], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2017, no. 3, p. 16–27, DOI: 10.21513/2410-8758-2017-3-16-27. (In Russian)
- Fricke H.C., O'Neil J.R. The correlation between $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time, *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, vol. 170, p. 181–196.
- Glazirin G., Kodama Y., Ohata T. Stability of drifting snow-type perennial snow patches, *Bull. of Glaciol. Res.*, 2004, no. 21, p. 1–8.
- Glazyrin G.E., Kamnyanskii G.M., Pertsiger F.I. *Rezhim lednika Abramova* [Abramov glacier regime], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1993, 228 p. (In Russian)
- Glyatsiologicheskii slovar'* [Glaciological Dictionary], V.M. Kotlyakov (ed.), Leningrad, GIMIZ Publ., 1984, 528 p. (In Russian)
- Katalog lednikov SSSR* [Catalog of glaciers of the USSR], vol. 1(1), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1966, p. 45–51. (In Russian)
- Komarov N.V., Kamentsev Ya.S. *Prakticheskoe rukovodstvo po ispol'zovaniyu sistem kapillyarnogo elektroforeza "Kapel'"* [A practical guide to using capillary electrophoresis systems "Kapel'"], Saint Petersburg, Veda Publ., 2006, 212 p. (In Russian)
- Kuhn M. The mass balance of very small glaciers, *Zeitschrift für Gletscherrunde und Glazialgeologie*, 1995, no. 31, p. 171–179.
- [Lake and glaciers], *Vliyanie izmenenii klimata i opasnykh prirodnykh yavlenii na prirodopol'zovanie Evropeiskogo Severa* [Impact of climate change and natural hazards on the nature management in the European North], Saint Petersburg, Russian State Hydrometeorological University Publ., 2013, p. 80–81. (In Russian)
- Marshall G.J., Vignols R.M., Rees W.G. Climate Change in the Kola Peninsula, Arctic Russia, during the Last 50 Years from Meteorological Observations, *Americ. Meteorol. Society*, 2016, no. 29, p. 6823–6840, DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0179.1.
- Mokrov E.G. *Seismicheskie faktory lavinoobrazovaniya* [Seismic factors of avalanche formation], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2008, 126 p. (In Russian)
- Nosenko G.A., Murav'ev A.Ya., Ivanov M.N., Sinitskii A.I., Kobelev V.O., Nikitin S.A. Reaktsiya lednikov Polyarnogo Urala na sovremennye izmeneniya klimata [The response of the glaciers of the Polar Urals to modern climate changes], *Led i Sneg*, 2020, vol. 60, no. 1, p. 42–57. (In Russian)
- Perov V.F. Pervyi lednik v Khibinakh [The first glacier in the Khibiny mountains], *Priroda*, 1958, no. 7, p. 88. (In Russian)
- Perov V.F. *Snezhniki, ledniki i merzlotnyi rel'ef Khibinskikh gor* [Snowfields, glaciers and permafrost relief of the Khibiny mountains], Moscow, Nauka Publ., 1968, 120 p. (In Russian)
- Sarana V.A. Malye ledniki Rossiiskogo sektora Arktiki i Subarktiki [Very small glaciers of the Russian sector of the Arctic and Subarctic], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2012, no. 2, p. 82–87. (In Russian)
- Shilovtseva O.A., Kononova N.K., Romanenko F.A. Climate Change in the Arctic Regions of Russia. Climate change adaptation: ecology, mitigation and management, New York, Nova Science Publ., 2011, p. 35–63.
- Tronov M.V. Eshche o malykh formakh oledneniya [More about small forms of glaciation], *Materialy Glyaciol. Issled.*, 1966, no. 12, p. 250–253. (In Russian)
- Tushinskii G.K., Malinovskaya N.V. Polozhenie urovnya "365" nad territoriei SSSR i svyaz' etogo urovnya s oledneniem [The position of the "365" level over the territory of the USSR and the connection of this level with glaciation], *Inform. sborn. o rabotakh Mosk. un-ta*, 1962, no. 9, p. 5–9. (In Russian)
- Vikulina M.A. Ispol'zovanie geoinformatsionnykh sistem dlya issledovaniya glyatsial'no-nival'nykh yavlenii [The use of geographic information systems for the study of snow-nival phenomena], *Materialy Glyaciol. Issled.*, 2008, no. 105, p. 120–124.
- Vikulina M.A., Vashchalova T.V., Tutubalina O.V., Rees W.G., Zaika Y.V. Moscow University's field station in the Khibiny Mountains, Russian Arctic, A 70-year history to the present day, *Polar Record*, Cambridge University Press, 2021, 57, p. 1–12, DOI: 10.1017/S0032247421000012.
- Zaika Yu.V., Vikulina M.A., Chernous P.A. Mnogoletnyaya dinamika nival'nykh protsessov v Khibinakh [Long-term dynamics of nival processes in the Khibiny mountains], *Led i sneg*, 2012, no. 1, p. 69–74. (In Russian)
- Zyuzin Yu.L. *Surovyi lik Khibin* [The severe face of Khibiny mountains], Murmansk, Reklam, Poligrafiya Publ., 2006, 236 p. (In Russian)

Web source

- Buligins O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvez N.V. Opisanie massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov na stantsiyah Rossii. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh no. 2015620394 [Description of the data array of monthly precipitation totals at stations in Russia. Certificate of state registration of the database no. 2015620394], URL: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (access date 01.02.2021–31.03.2021). (In Russian)

Received 21.02.2022

Revised 14.07.2022

Accepted 22.09.2022