

Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.324

doi: 10.31857/S2076673421040103

Сокращение оледенения гор Сунтар-Хаята с середины XX века по 2018 год

© 2021 г. А.Я. Муравьев*, Г.А. Носенко, С.А. Никитин

Институт географии РАН, Москва, Россия

*anton-yar@rambler.ru

Reduction of glaciation in the Suntar-Khayata Mountains from the mid-20th century to 2018

A.Ya. Muraviev*, G.A. Nosenko, S.A. Nikitin

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

*anton-yar@rambler.ru

Received January 23, 2021 / Revised April 30, 2021 / Accepted October 4, 2021

Keywords: *mountain glaciers, area reduction, morphological types, altitude distribution, Suntar-Khayata.*

Summary

New data on the state of the Suntar-Khayata Mountains glaciers in 2018 are presented and changes in the area of glaciers in the second half of the 20th and early 21st centuries are estimated. In 2018, the glaciation of the Suntar-Khayata Mountains was represented by 251 glaciers with a total area of about 133 ± 10 km². Among the morphological types in this region, the corrie and corrie-hanging glaciers predominate. The largest areas are occupied by valley and compound valley glaciers. The main part (82.7%) of the total area of glaciers is concentrated in the altitude range of 2200–2600 m. The changes in the glaciation area were analyzed over three periods: 1) from 1944–1947 to 2018; 2) from 1944–1947 to 2003; and 3) from 2003 to 2018. During the first one, the area of the glaciers registered in the Glacier Inventory of the USSR decreased from 199 ± 10 km², that is, by 67 km² (33.6%). Of these, 28 km² was lost in the period from 1944–1947 to 2003, and another 39 km² in 2003–2018. By 2018, the largest reduction of the area occurred in small glaciers with an area of less than 0.1 km² (more than 80%), the smallest – in large glaciers with an area exceeding 2 km² (less than 21%). The glaciers with western aspect were the most reduced (39.9%), and with south-western aspect – the least (25.0%). As compared to the previous period, the significant increase in the rate of the area reduction was found in 2003–2018 – from 0.24% to 1.52% per year. At the beginning of the 21st century, the activation of the process of disintegration of glaciers into smaller fragments was recorded. Thus, the average size of the studied glaciers decreased from 1.03 km² in 1944–1947 to 0.88 km² in 2003 and to 0.59 km² in 2018. The increase in the rate of the area reduction in the Suntar-Khayata Mountains noted in the early 21st century agrees with a stable positive anomaly of summer air temperatures observed from 2007 to 2018. The mean summer air temperature during this period was 12.2 °C, which was by 1 °C higher its average value for 1981–2010; in 2008 and 2009, the difference reached 2 °C. In combination with the ongoing decrease in winter precipitation, this may be one of the main reasons for the increase in the rate of glacier reduction.

Citation: Muraviev A.Ya., Nosenko G.A., Nikitin S.A. Reduction of glaciation in the Suntar-Khayata Mountains from the mid-20th century to 2018. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (4): 485–499. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421040103.

Поступила 23 января 2021 г. / После доработки 30 апреля 2021 г. / Принята к печати 4 октября 2021 г.

Ключевые слова: *горные ледники, сокращение площади, морфологические типы, высотное распределение, Сунтар-Хаята.*

Приведены данные о морфометрических, морфологических и высотных характеристиках оледенения гор Сунтар-Хаята в 2018 г. Оценены изменения оледенения за три временных периода: с 1944–1947 по 2018 г., с 1944–1947 по 2003 г., с 2003 по 2018 г. Установлено существенное увеличение средней скорости сокращения площади ледников в 2003–2018 гг. по сравнению с периодом с 1944–1947 по 2003 г. В начале XXI в. зафиксирована активизация процесса распада ледников на фрагменты меньшего размера.

Введение

Один из труднодоступных и относительно слабо изученных ледниковых районов Евразии – горы Сунтар-Хаята, расположенные в

северо-восточной части России (рис. 1) и вытянутые более чем на 500 км в направлении с северо-запада на юго-восток от левобережья р. Томпо до водораздела рек Ини и Ульбеи. Они состоят из нескольких хребтов, крупнейшие из

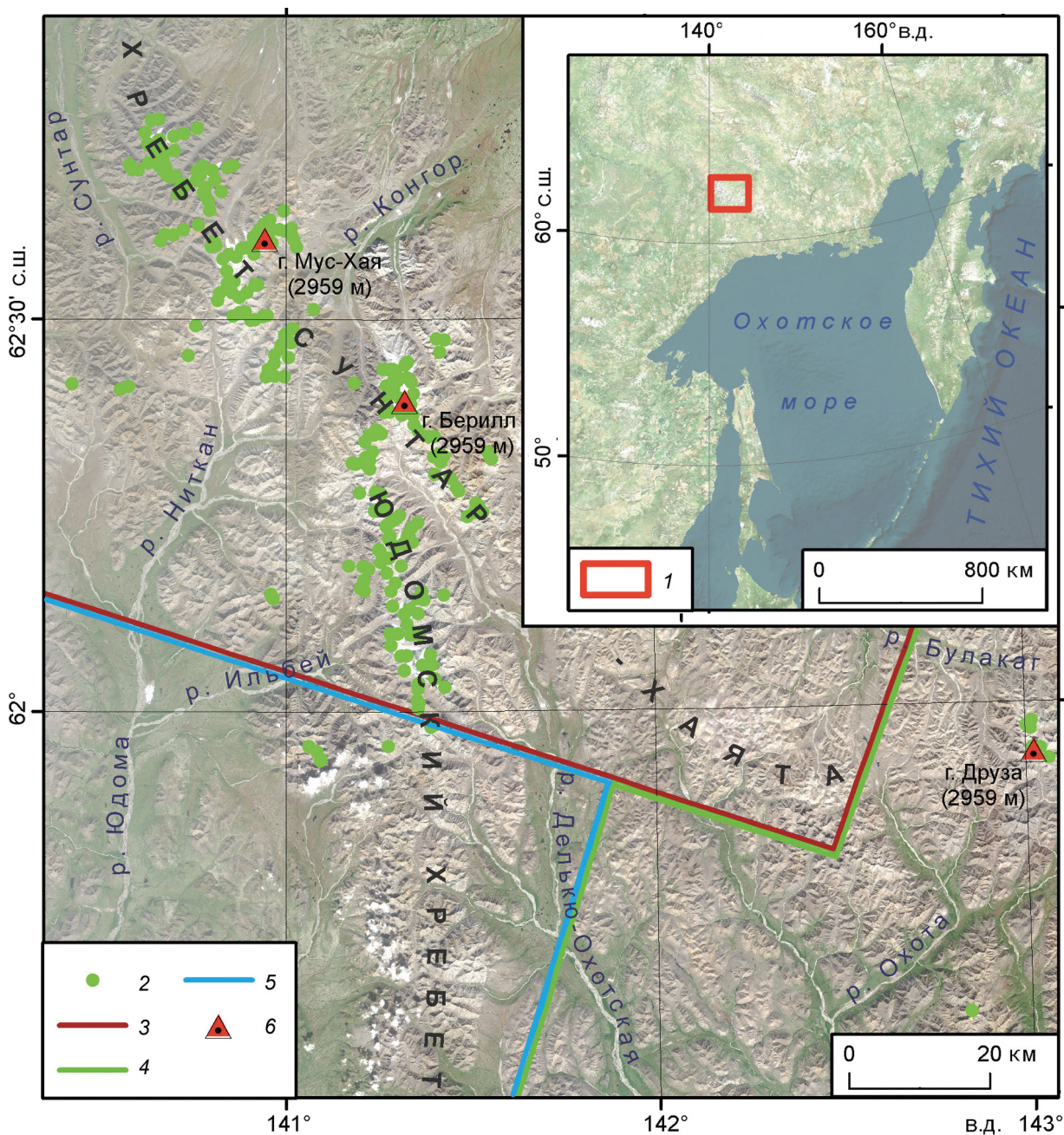


Рис. 1. Район исследований.

В подложке – мозаика спутниковых снимков Sentinel-2 от 28.08.2018. 1 – границы района исследований; 2 – местоположение ледников в 2018 г.; границы зоны покрытия данными спутникового снимка Landsat-7: 3 – от 14.08.2003; 4 – от 31.07.2003; 5 – от 04.09.2005; 6 – горные вершины

Fig. 1. Study area.

On the background – mosaic of satellite images Sentinel-2 28.08.2018. 1 – research area location; 2 – location of glaciers in 2018; boundaries of the Landsat-7 image coverage area: 3 – 14.08.2003; 4 – 31.07.2003; 5 – 04.09.2005; 6 – mountain peaks

которых — Сунтар-Хаята и Юдомский. Подробная физико-географическая характеристика гор Сунтар-Хаята дана в работе [1]. Некоторые данные о современных климатических изменениях этого района приведены в исследовании [2]. Ледники в горах Сунтар-Хаята обнаружены в 1939 г., а первая попытка оценить масштабы и характеристики оледенения района была сделана в работе [3], основу которой составляли данные масштабных аэрофотосъёмок 1944–1946 гг. и маршрутных наблюдений 1946 г. Каталог ледников Л.Л. Бермана [3] включал в себя 114 ледников общей площадью 358,9 км². Дальнейшие исследования показали, что оценка Л.Л. Берманом площади оледенения гор Сунтар-Хаята оказалась существенно завышенной — в работе [4] она оценивается в 246 км².

В 1956–1959 гг. в этом районе проводились полевые гляциологические исследования, результаты которых отражены в работах [5, 6]. В 1970 г. на хр. Сунтар-Хаята работала экспедиция Института географии АН СССР с целью составления Каталога ледников СССР [7]. Именно создание этого Каталога [1] стало важнейшим этапом в изучении оледенения гор Сунтар-Хаята. Согласно Каталогу [1], здесь насчитывалось 208 ледников общей площадью 201,6 км². Из них четыре ледника общей площадью 0,3 км² имели размер менее 0,1 км² и не были отмечены на схемах Каталога. Названный Каталог содержит сведения о размерах, морфологическом типе, высотном положении ледников, а также принадлежности их к конкретному речному бассейну; приведены и другие характеристики ледников, а также общие сведения о ледниковых исследованиях здесь до начала 1970-х годов.

В 2001 г. Международная экспедиция в районе ледника № 31 выполнила комплекс исследований, включавший балансовые работы и топографическую съёмку этого ледника, а также метеорологические исследования в его долине и маршрутные обследования других ледников северного массива хр. Сунтар-Хаята, в районе горы Мус-Хая [8, 9]. Во второй половине 2000-х годов предпринимались попытки оценить параметры оледенения гор Сунтар-Хаята и их изменение со времени каталогизации по результатам обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). По оценке авторов работы [10], общая площадь ледников гор Сун-

тар-Хаята, определённая преимущественно по результатам дешифрирования снимка со спутника Landsat, полученного в августе 2003 г., составляла 162,2 км², т.е. примерно на 20% меньше, чем в Каталоге [1]. В работе [11] исследовано изменение параметров оледенения северного массива гор Сунтар-Хаята со времени каталогизации по 2010 г. С использованием разновременных данных ДЗЗ и материалов полевых наблюдений 2012 г. авторы установили, что за исследуемый период площадь ледников сократилась здесь на 23 км², или на 27%. При этом площадь ледников на горе Мус-Хая с 1940-х годов по 2011 г. сократилась на 36%.

Возрастающая интенсивность сокращения оледенения во всём мире требует более высокой периодичности наблюдений за ледниками. Появление доступных источников информации высокого разрешения, например снимков со спутника Sentinel-2, позволяет решить эту задачу на новом качественном уровне. Задачи данного исследования — исследовать характеристики современного оледенения гор Сунтар-Хаята, а также обнаружить изменения ледников со времени создания Каталога ледников СССР по 2018 г. Удалось также оценить состояние оледенения в начале 2000-х годов, что позволило проследить процесс деградации оледенения во второй половине XX в. и в начале XXI в. и сравнить его с изменениями в других горных ледниковых районах Евразии.

Данные и методы

В нашем исследовании использованы следующие материалы: 1) четыре спутниковых снимка Sentinel-2 уровня обработки L1C от 28.08.2018 (табл. 1) с пространственным разрешением 10 м; 2) спутниковые снимки Landsat-7 уровня обработки L1TP от 14.08.2003, 31.07.2003 и 04.09.2005 для создания промежуточного временного слоя границ ледников; 3) мозаика цифровой модели рельефа (далее ЦМР) ArcticDEM v3.0 [12] с пространственным разрешением 2 м; 4) ЦМР ASTER GDEM V3 [13] с пространственным разрешением 30 м; 5) материалы Каталога ледников СССР [1]; 6) данные реанализа метеопараметров NCEP/NCAR [14]. Спутниковые снимки для обработки подбирались на конец периода абля-

Таблица 1. Материалы ДЗЗ, использованные в исследовании

Спутник	Дата съёмки	Идентификатор снимка (ID)
Sentinel-2	28.08.2018 г.	L1C_T54VVQ_A007708_20180828T020644
		L1C_T54VWQ_A007708_20180828T020644
		L1C_T54VWP_A007708_20180828T020644
		L1C_T54VVP_A007708_20180828T020644
Landsat-7	14.08.2003 г.	LE07_L1TP_114016_20030814_20170124_01_T1
	31.07.2003 г.	LE07_L1TP_112017_20030731_20170124_01_T1
	04.09.2005 г.	LE07_L1TP_114016_20050904_20170113_01_T1

ции — вторую половину августа и начало сентября — до первых снегопадов, что позволило минимизировать влияние сезонного снежного покрова и снежников на корректность определения границ ледников. Другим критерием отбора было отсутствие облачности над ледниками.

Дешифрирование границ ледников на спутниковых снимках Sentinel-2 и Landsat-7 проводили вручную по методике Международного проекта GLIMS [15]. Снимки Landsat-7 предварительно подготавливали следующим образом: из каналов В3, В4 и В5 с пространственным разрешением 30 м создавали синтезированное изображение, которое затем подвергали паншарпенингу (повышению детализации) данными панхроматического канала В8 с пространственным разрешением 15 м. Снимок Landsat-7 от 14.08.2003 охватывает почти всё оледенение хр. Сунтар-Хаята (см. рис. 1). Вне зоны охвата данного снимка находятся пять небольших ледников на юге и шесть ледников в восточной части района исследований. Для их исследования использованы снимки Landsat-7 от 31.07.2003 и 04.09.2005. Кроме дешифрирования границ шести ледников в восточной оконечности района исследований, с помощью снимка Landsat-7 от 04.09.2005 дешифрировали границы ледников на участках, где отсутствуют данные снимка Landsat-7 от 14.08.2003 (полосы из-за дефекта сенсора спутника, возникшего после 31.05.2003). Погрешность определения площади ледников по результатам дешифрирования снимков Sentinel-2 оценивалась как произведение протяжённости границ ледников на точность пространственной привязки данных снимков, составляющую 11 м с уровнем доверия 95,5% [16]. В случае со снимками Landsat-7 эта погрешность определялась как произведение протяжённости границ ледников на разреша-

ющую способность панхроматического канала В8 (15 м). Отметим хорошую пространственную корегистрацию снимков Sentinel-2 от 28.08.2018 и Landsat-7 от 14.08.2003 — расхождение в их пространственной привязке оказались меньше разрешающей способности (15 м) панхроматического канала снимка Landsat-7.

Информация о площадях, длинах, морфологии и экспозиции ледников в Каталоге [1] приведена по состоянию в 1944–1947 гг. Эти данные получены в результате обработки материалов аэрофотосъёмки. Судя по заполнению (без пропусков) графы «Фирновая линия» (способ определения и дата) таблицы Каталога «Основные сведения о ледниках», материалами аэрофотосъёмки были охвачены практически все ледники, представленные в Каталоге на район гор Сунтар-Хаята. При этом для ряда ледников некоторые параметры (например, высота фирновой линии) были уточнены или актуализированы по данным полевых наблюдений 1957–1959 и 1970 гг. Для всех ледников, идентифицированных на снимках Sentinel-2 2018 г., был определён морфологический тип с помощью классификации работы [17]. Высшие и низшие точки ледников, их средние высоты (средневзвешенные по площади) и вертикальную протяжённость определяли автоматизированным способом по мозаике ЦМР ArcticDEM v3.0 [12]. Для ледников, не покрытых данными мозаики ArcticDEM v3.0 (около 5%), эти параметры находили с использованием ЦМР ASTER GDEM V3 [13]. Расчёт распределения площади оледенения по высотам проводился с помощью ЦМР ArcticDEM v3.0, при этом участки с отсутствием данных заполнялись по данным ЦМР ASTER GDEM V3.

При анализе изменений ледников в зависимости от площади все ледники были распределены по группам согласно их площади в 2018 г.

Таблица 2. Морфологические типы ледников гор Сунтар-Хаята в 2018 г.

Морфологический тип ледников	Число ледников	Площадь ледников, км ²	Средний размер ледника, км ²	Доля ледников*
Сложный долинный	9	21,4±1,2	2,38	3,6/16,1
Долинный	42	65,3±3,8	1,56	16,7/49,1
Перемётно-долинный	3	4,9±0,3	1,62	1,2/3,7
Карово-долинный	37	19,3±1,8	0,52	14,8/14,5
Каровый	53	10,0±1,2	0,19	21,1/7,5
Карово-висячий	56	9,9±1,3	0,18	22,3/7,5
Висячий	45	1,9±0,5	0,04	17,9/1,4
Не определён	6	0,3±0,1	0,05	2,4/0,2
<i>Всего</i>	251	133,0±10,1	0,53	100/100

*Доля ледников данного морфологического типа в общем числе ледников/в общей площади, %.

Для распавшихся ледников, зарегистрированных в Каталоге [1], учитывали изменения суммарной площади всех фрагментов. Ряд ледников (например, ледники им. Н.К. Клюкина, № 30 и 31), зарегистрированных в Каталоге [1], имеют протяжённые ледоразделы с другими ледниками. Учитывая недоступность использованных для создания Каталога [1] исходных материалов, восстановить точное пространственное положение ледоразделов, проведённых его авторами, невозможно. В связи с этим положения ледоразделов в Каталоге [1] и в данном исследовании могут различаться. Мы при сравнении современных данных о площади ледников с данными Каталога [1] такие ледники рассматривали как единый комплекс. Все спутниковые снимки и ЦМР, использованные в исследовании, были зарегистрированы в проекции UTM (зона 54N) на эллипсоиде WGS 1984. Данные ДЗЗ обрабатывали в программных пакетах ESRI ArcGIS и QGIS, а статистическую обработку данных проводили в программе LibreOffice Calc.

Результаты исследований

В результате дешифрирования границ ледников на спутниковых снимках Sentinel-2 от 28.08.2018 в горах Сунтар-Хаята был идентифицирован 251 ледник общей площадью около 133±10 км². 168 из них представляли собой ледники, зарегистрированные в Каталоге [1] и сохранившие целостность; 54 ледника — фрагменты 24 распавшихся ледников, зарегистрированных в Каталоге; 29 ледников общей площадью 1,1±0,2 км² не представлены в Катало-

ге; 12 ледников, отмеченных на схемах Каталога и имеющих общую площадь 2,6 км², не были обнаружены на спутниковых снимках Sentinel-2.

Анализ современной *морфологии ледников* показал, что в количественном отношении в горах Сунтар-Хаята преобладают каровые и карово-висячие ледники (табл. 2). Меньше всего — перемётно-долинных и сложных долинных ледников, для которых характерны наибольшие средние размеры. Самые значительные площади заняты простыми долинными и сложными долинными ледниками. В 2018 г. 88,0% ледников гор Сунтар-Хаята полностью находились на *высотах* более 2100 м (все высоты в статье даны над уровнем моря), 61,4% — выше 2200 м, 37,8% — выше 2300 м, 17,1% — выше 2400 м. Наименьшая высота конца ледника (1930 м) зафиксирована у относительно крупного (3,2±0,2 км²) долинного ледника № 141 (№ 145 по Каталогу [1]). *Вертикальная протяжённость* 98,4% ледников гор Сунтар-Хаята составляет менее 800 м (рис. 2, а), 86,9% — менее 600 м, 61,0% — менее 400 м, 32,3% — менее 200 м. Наибольшая вертикальная протяжённость наблюдается у крупнейших сложных долинных и долинных ледников. Максимальное значение этого параметра (940 м) зафиксировано у сложного долинного ледника Берилл (№ 120 по Каталогу [1]). Средние высоты (средневзвешенные по площади) 98,4% ледников района исследований находятся в диапазоне 2100–2700 м (см. рис. 2, б), 90,8% — в диапазоне 2200–2600 м, 62,9% — в диапазоне 2300–2500 м. Медианное значение средней высоты ледников гор Сунтар-Хаята составило 2440 м.

Изменение ледников гор Сунтар-Хаята, зарегистрированных в Каталоге [1] и обнаруженных

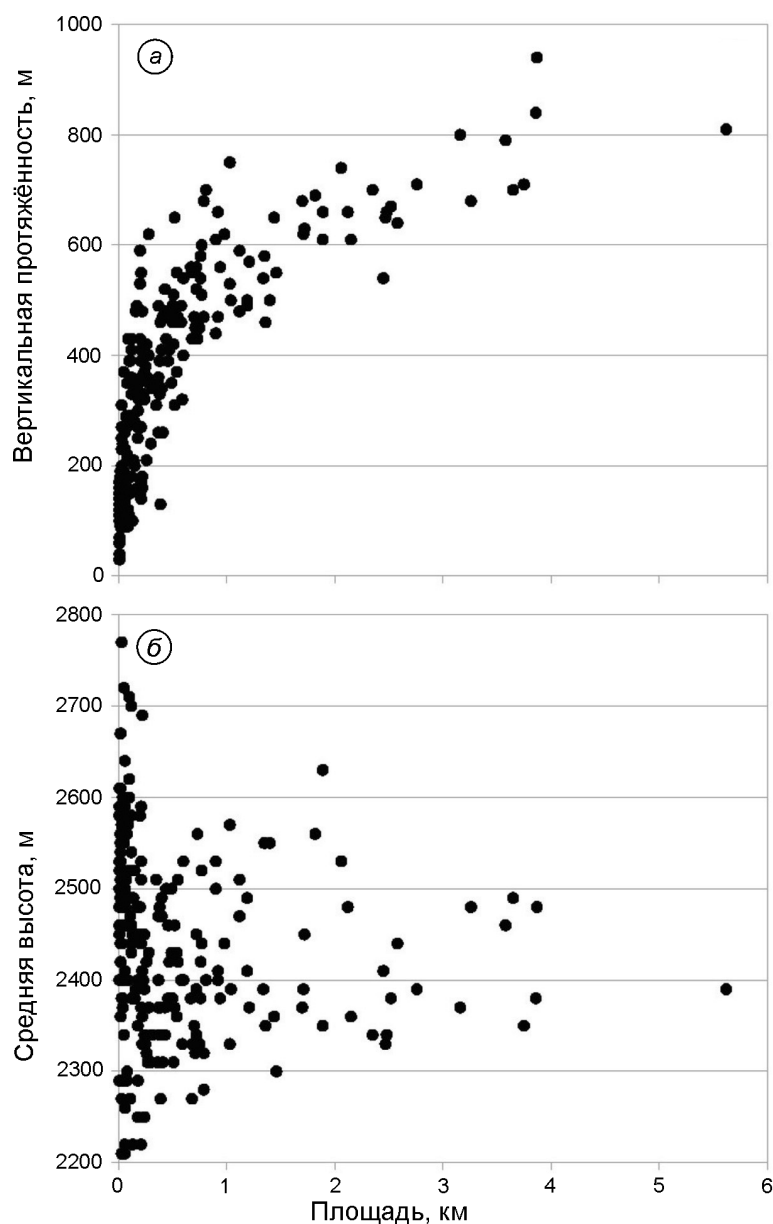


Рис. 2. Вертикальная протяжённость (а) и средние высоты (б) ледников разной площади в горах Сунтар-Хаята

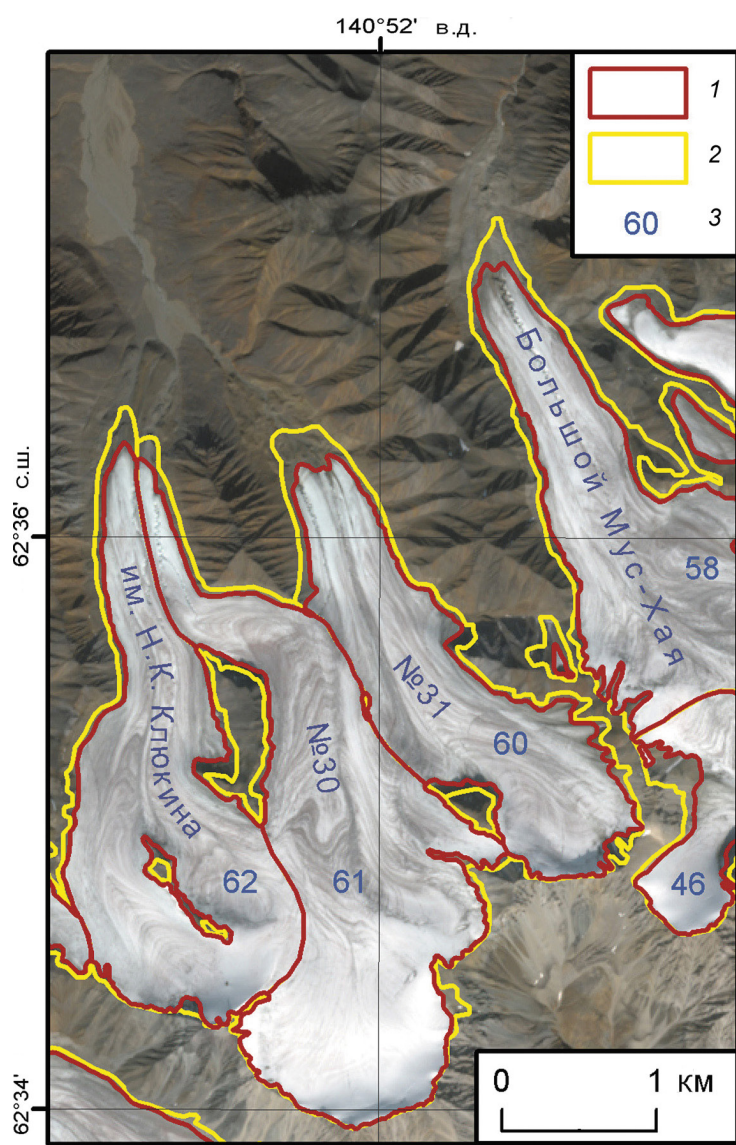
Fig. 2. Vertical extent (a) and mean heights of different size glaciers (b) in the Suntar-Khayata mountains

на современных спутниковых снимках, приведено в табл. 3. С 1944–1947 по 2018 г. сокращение площади оледенения данного района составило около 67 км², или 33,6%. Из них около 28 км² было потеряно в период с 1944–1947 по 2003 г., а оставшиеся почти 39 км² (в 1,4 раза больше) – в период 2003–2018 гг. При этом средняя скорость сокращения площади оледенения возросла с 0,24% (0,48 км²) в год в период с 1944–1947 по 2003 г. до 1,52% (2,59 км²) в год в период 2003–2018 гг., т.е. примерно в шесть раз. Степень сокращения ледников обратно пропорциональна их размерам. Наибольшее относительное сокращение со времени каталогизации испытали

самые мелкие (< 0,1 км²) ледники, а наименьшее сокращение площади – наиболее крупные (> 2 км²). Отметим, что в 2018 г. в горах Сунтар-Хаята остался всего один ледник площадью $5,6 \pm 0,3$ км² – сложный долинный ледник № 147 (№ 166 по Каталогу [1]). Сокращение ледников всех площадных групп наблюдалось в оба исследуемых периода – с 1944–1947 по 2003 г. и в 2003–2018 гг. (см. табл. 3). При этом во всех группах ледников зафиксировано резкое ускорение сокращения площади в 2003–2018 гг. После 2003 г. процесс распада ледников интенсифицируется: с 1944–1947 по 2003 г. распалось всего три ледника на шесть фрагментов, а в 2003–

Таблица 3. Изменение числа и площади ледников гор Сунтар-Хаята, зарегистрированных в Каталоге [1], с 1944–1947 по 2018 г.

Размер ледников в 2018 г., км ²	Число ледников			Площадь ледников, км ²			Изменение площади ледников, км ² /%		
	Каталог	2003 г.	2018 г.	Каталог	2003 г.	2018 г.	Каталог–2018 г.	Каталог–2003 г.	2003–2018 гг.
> 5	1	1	1	7,5	6,5±0,4	5,6±0,3	–1,9/–25,1	–1,0/–13,6	–0,9/–13,3
2–5	17	18	22	63,6	59,5±3,4	50,7±2,5	–12,9/–20,3	–4,1/–6,4	–8,8/–14,8
1–2	21	22	25	41,5	36,8±2,8	29,8±2,0	–11,7/–28,2	–4,7/–11,3	–7,0/–19,0
0,5–1	37	37	43	37,9	34,0±3,0	25,3±2,2	–12,6/–33,2	–3,9/–10,3	–8,7/–25,5
0,1–0,5	75	76	87	38,8	29,2±3,5	18,8±2,3	–20,1/–51,6	–9,8/–25,1	–10,3/–35,4
< 0,1	41	41	44	9,3	4,7±1,0	1,7±0,5	–7,6/–81,6	–4,6/–49,5	–3,0/–63,6
<i>Всего</i>	192	195	222	198,7	170,7±14,1	131,9±9,8	–66,8/–33,6	–28,1/–14,1	–38,7/–22,7

**Рис. 3.** Отступление границ ледников к западу от горы Мус-Хая в 2003–2018 гг.

В подложке – спутниковый снимок Sentinel-2 от 28.08.2018. 1 – границы ледников в 2018 г.; 2 – границы ледников в 2003 г.; 3 – номера ледников по Каталогу [1]

Fig. 3. Retreat of the glacier boundaries to the west of the Mus-Khaya Mountain in 2003–2018. On the background – the satellite image Sentinel-2 28.08.2018. 1 – glacier boundaries in 2018; 2 – glacier boundaries in 2003 g.; 3 – glacier numbers by the Glacier Inventory [1]

2018 гг. – 21 ледник на 48 фрагментов. Наибольшие изменения *границ ледников* за 2003–2018 гг. наблюдаются в их фронтальных частях (рис. 3). Так, фронт ледника № 31 отступил в данный

период примерно на 250 м, а фронт ледника Большой Мус-Хая – примерно на 290 м. Однако отступление границ ледников происходило не только в их фронтальной части, но и на протя-

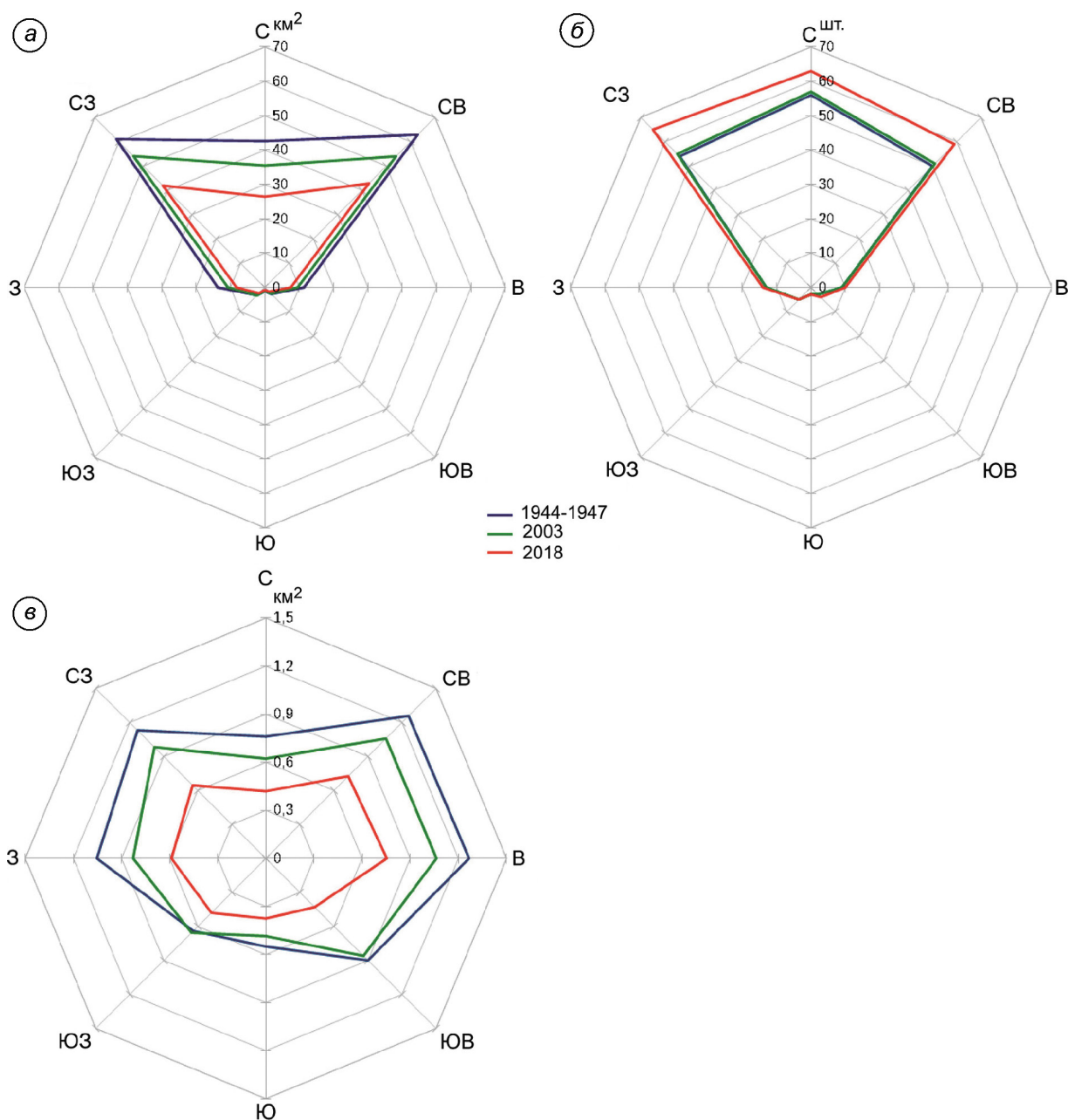


Рис. 4. Изменение площади (а), числа (б) и средних размеров (в) ледников гор Сунтар-Хаята, зарегистрированных в Каталоге [1], с 1944–1947 по 2018 г.

Fig. 4. Change in area (a), number (b) and average size (c) of glaciers in the Suntar-Khayata Mountains, by Inventory data [1], from 1944–1947 to 2018

жении большей части их периметра, что связано с понижением поверхности ледников.

Анализ изменений зарегистрированных в Каталоге [1] и обнаруженных на спутниковых снимках Sentinel-2 2018 г. ледников в зависимости от их экспозиции показал (рис. 4, а), что наибольшее относительное сокращение площади со времени каталогизации претерпели лед-

ники, ориентированные на запад (39,9%, или 5,5 км²) и север (38,0%, или 16,2 км²). При этом в абсолютных величинах наибольшие потери площади пришлось на ледники северо-восточной (20,1 км², или 31,9%) и северо-западной (19,1 км², или 31,3%) экспозиций. Меньше всего сократились ледники, ориентированные на юго-запад (25,0%, или 0,8 км²). Подавляющее

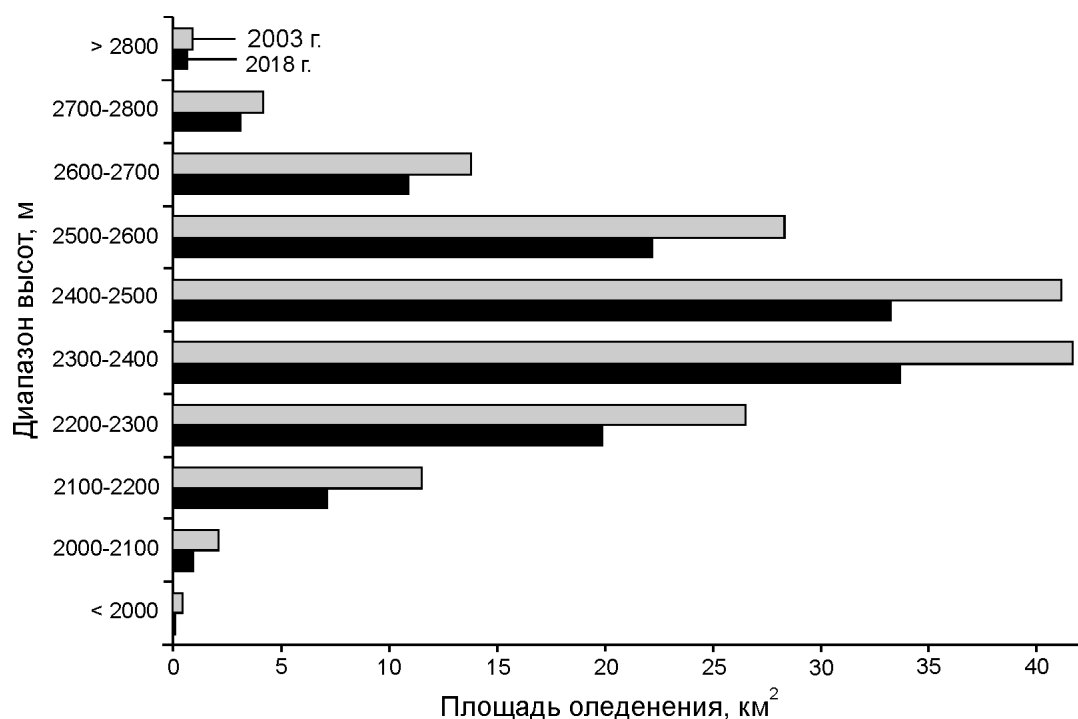


Рис. 5. Высотное распределение площади оледенения гор Сунтар-Хаята в 2003 и 2018 гг.

Fig. 5. Altitude distribution of glaciation area in the Suntar-Khayata Mountains via altitude in 2003 and 2018

большинство ледников гор Сунтар-Хаята в Каталоге [1] имеет северо-западную, северную или северо-восточную экспозицию (см. рис. 4, б). Интенсивность распада ледников северо-западной и северо-восточной экспозиций оказалась практически одинаковой – в период с 1944–1947 по 2003 г. распалось по одному леднику (на два фрагмента каждый), а в 2003–2018 гг. число ледников увеличилось с 55 до 65 и с 51 до 59 соответственно. Процесс фрагментации ледников северной экспозиции существенно менее интенсивен: за 2003–2018 гг. число ледников увеличилось с 57 до 63. Средние *размеры ледников* сократились с 1,03 км² в 1944–1947 гг. до 0,88 км² в 2003 г. и 0,59 км² в 2018 г. (см. рис. 4, в). Наибольшие средние размеры зафиксированы у ледников восточной (0,75 км² в 2018 г.) и северо-восточной (0,73 км² в 2018 г.) экспозиций, наименьшие – у ледников южной (0,38 км² в 2018 г.), северной (0,42 км² в 2018 г.) и юго-восточной (0,43 км² в 2018 г.) экспозиций. Подобные результаты зафиксированы не только в 2018 г., но и в 2003 и 1944–1947 гг.

В 2018 г. 82,7% (109 км²) площади оледенения было сосредоточено в высотном диапазоне 2200–2600 м (рис. 5). В 2003 г. на данный вы-

сотный диапазон приходилось 80,7% (137,7 км²) суммарной площади ледников района. Доля оледенения, расположенная ниже 2000 м, составляла около 0,1 и 0,3% в 2018 и 2003 г. соответственно. Доля площади оледенения, расположенного выше 2800 м, также мала (около 0,5% в 2018 и 2003 г.), что объясняется меньшими высотами основной части гор Сунтар-Хаята. Наибольшее относительное сокращение (74,6%) за 2003–2018 гг. претерпела часть оледенения, расположенная ниже 2000 м (см. рис. 5). Сокращение площади ледников на высотах 2000–2100 (55,9%) и 2100–2200 м (38,3%) также существенно превысило её сокращение на более высоких гипсометрических уровнях. Наименьшее относительное сокращение за период 2003–2018 гг. наблюдается в середине высотного диапазона, занимаемого ледниками района исследований, – на высотах 2300–2500 м (около 19%). На эти же высоты приходится около половины (50,7% в 2018 г. и 48,5% в 2003 г.) площади оледенения гор Сунтар-Хаята.

Как уже отмечалось, наибольшее *отступление границ ледников* в 2003–2018 гг. характерно для их фронтальных частей. Так, фронт ледника № 31 (см. рис. 3) за данный период отступил вверх по

долине примерно на 250 м в плане и 35 м по высоте. Это превышает его отступление за 1959–2001 г., составившее, по данным авторов работы [8], около 200 м в плане и 20 м по высоте. Фронты ледников им. Н.К. Ключкина (№ 62 по КATALOGу [1]) и № 30 (№ 61 по КATALOGу [1]) за 2003–2018 гг. отступили меньше — примерно на 230 и 150 м соответственно (см. рис. 3). Общая площадь группы ледников им. Н.К. Ключкина, № 30 и 31 сократилась с 11,4 км² (по данным КATALOGа [1]) до 9,6±0,5 км² в 2003 г. (на 15,8%) и до 8,6±0,4 км² в 2018 г. (на 24,6%). Сокращение их общей площади в 2003–2018 гг. составило около 1 км², или 10,4%.

Обсуждение результатов

Результаты оценки изменений размеров современного оледенения гор Сунтар-Хаята показывают почти шестикратное увеличение скорости сокращения площади ледников за период 2003–2018 гг. по сравнению с предыдущим интервалом времени — от создания КATALOGа ледников СССР до 2003 г. Возможные причины такого ускорения — неоднородность исходных данных и различия в технологиях их обработки. Кроме того, большой временной интервал осреднения (почти 60 лет) также может сглаживать происходящие за это время резкие, но кратковременные отклонения. Вместе с тем результаты исследований изменений ледников в других регионах за последние два десятилетия показывают важную роль климатических факторов в их повсеместно наблюдаемом сокращении.

Наблюдения за изменениями таких климатических показателей, как летние температуры воздуха и зимние осадки, проводили в районе исследований эпизодически. В 1956–1959 гг. в рамках программы Международного геофизического года у языка ледника № 31 работал круглогодичный стационар, были получены первые уникальные данные о метеорологических условиях и режиме ледников этого труднодоступного района [5]. Результаты исследований показали, что количество осадков существенно возрастает по мере увеличения высоты и достигает 900 мм/год в области питания ледников на уровне 2300–2400 м. В 1957–1959 гг. средняя температура июля на высоте ледников варьировала в интервале 2,2–7,0 °С.

После продолжительного перерыва на этом же леднике и прилегающей территории в 2001–2007 гг. были проведены исследования влияния современных климатических условий на режим и баланс массы ледников японскими и российскими гляциологами [8, 18]. Был выполнен комплекс метеорологических исследований, а с помощью автоматических интервальных фотокамер — съёмка процесса зимнего снегонакопления. Зафиксирован временной интервал формирования снежного покрова на леднике (с начала сентября по май) и определена максимальная величина снегонакопления — 720 мм в.э.

Чтобы представить характер изменения летней температуры воздуха и осадков зимнего периода на всём временном интервале от создания КATALOGа ледников СССР до настоящего времени мы использовали данные реанализа NCEP/NCAR [14] с 1948 по 2018 г. Они не вполне соответствуют реальным величинам исследуемых параметров на высотных уровнях ледников, но достаточно адекватно отражают характер их изменения во времени на интересующей нас территории. Изменения данных климатических факторов показаны на рис. 6. Горизонтальными прерывистыми линиями отмечены средние величины этих параметров за период 1981–2010 гг., которые используются для сравнения в качестве климатических норм. На графике изменений летней температуры воздуха видно, что с 1960-х годов наметился тренд постепенного повышения температуры, а после 1980 г. уже преобладают положительные аномалии. В 1998 г. средняя температура лета достигла максимальной величины за весь исследуемый период — 13,8 °С, превысив норму на 2,6 °С. После резкого похолодания на рубеже столетий этот тренд оформился в устойчивую положительную аномалию, которая продолжалась почти 10 лет — с 2007 по 2019 г. Из графика зимних осадков (см. рис. 6) следует, что они постепенно убывали до середины 1990-х годов. Можно предположить, что последовавшее за этим увеличение количества зимних осадков на фоне продолжающегося роста летних температур в конце XX в. могло несколько замедлить таяние ледников. Однако с 2007 г. количество осадков опять стало уменьшаться, а устойчивая положительная аномалия летних температур привела к сокращению ледников с большей скоростью. Неблагоприятное

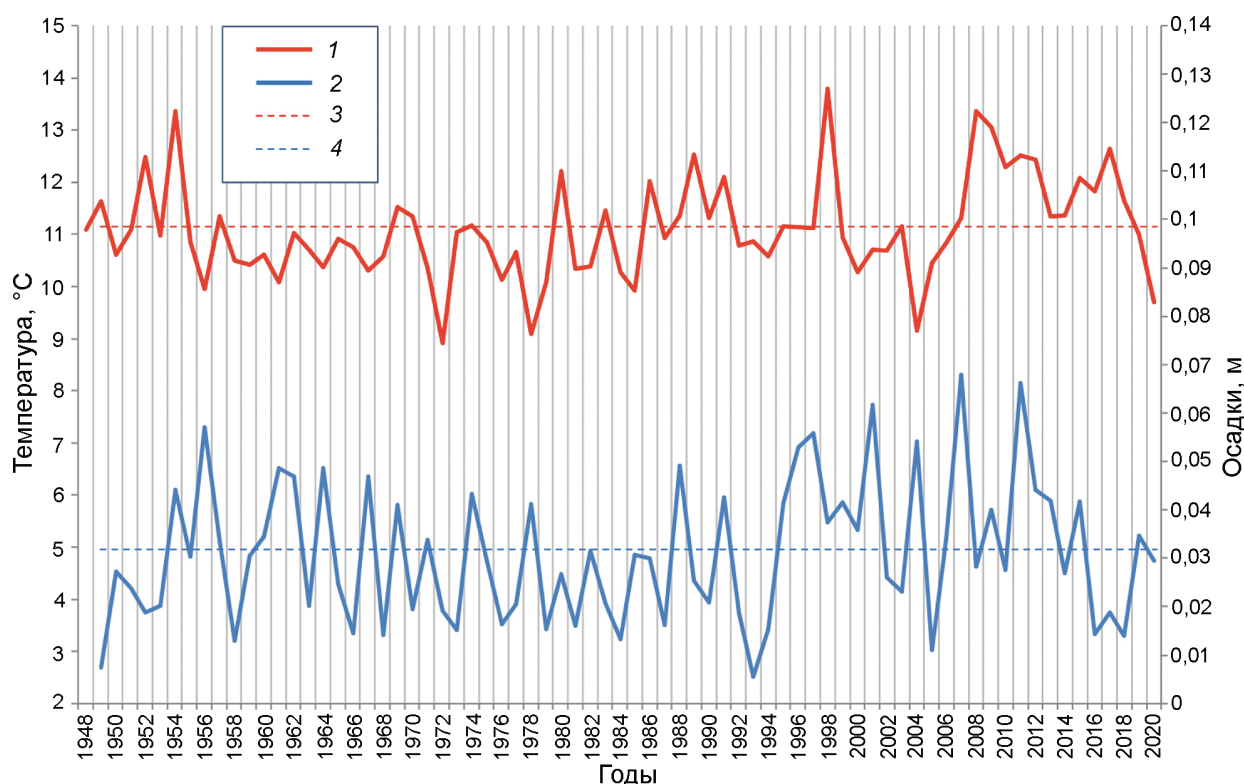


Рис. 6. Изменения средних летних температур воздуха (июнь–август) и сумм осадков за холодный период (октябрь–апрель) в районе исследований по данным реанализа NCEP/NCAR.

1 – температура; 2 – осадки; 3 – средняя величина летней температуры воздуха в период 1981–2010 гг.; 4 – средняя величина осадков за холодный период в 1981–2010 гг.

Fig. 6. Changes in mean summer air temperatures (JJA) and precipitation sum during the cold period (ONDJFMA) in the study area according to the NCEP/NCAR reanalysis data.

1 – summer air temperatures (JJA); 2 – winter precipitation (ONDJFMA); 3 – the average value of the summer air temperatures in the period 1981–2010; 4 – the mean value precipitation sum during the cold period in 1981–2010

сочетание этих климатических факторов соответствует второму временному интервалу нашей оценки изменений размеров ледников (2003–2018 гг.) и может быть одной из основных причин ускорения их сокращения.

По расчётам гляциологов, для ледника № 31 на основе данных 2004–2005 гг. [18] рост температуры на $1,8^{\circ}\text{C}$ должен привести к повышению высоты границы питания до 2600 м, в результате ледник может лишиться фирново-ледяной зоны питания. По графику температур на рис. 6 можно видеть, что в результате устойчивых температурных аномалий последнего десятилетия этот порог уже практически достигнут. Внешний вид поверхности ледника на снимках Sentinel-2 (см. рис. 3) это подтверждает – к 2018 г. ледник лишился последних остатков фирновых полей в области аккумуляции и фирновая граница отсутствует. В работе [2] приводятся сведения о том,

что уже в 2012 г. наблюдалось полное стаивание снега во всех высотных зонах ледников № 31 и 32. На снимках 2018 г. можно видеть аналогичную картину и на других ледниках гор Сунтар-Хаята. Исчезновение фирна также увеличивает интенсивность процессов таяния. При перемещении границы сезонного снега вверх по леднику сразу открывается поверхность льда, имеющая более низкое альбедо по сравнению с фирном и соответственно более высокий коэффициент таяния.

Согласно авторам работы [2], площадь группы ледников им. Н.К. Клюкина, № 30 и 31 в 2018 г. (см. рис. 3) практически совпадает с её площадью в 2011 г. ($8,55\text{ км}^2$). Проверить материалы этой публикации невозможно, так как её авторы не привели данных, достаточных для идентификации исходных материалов ДЗЗ, использованных для дешифрирования границ лед-

Таблица 4. Средняя скорость сокращения горного оледенения различных ледниковых районов во второй половине XX и начале XXI в.

Район горного оледенения	Временные периоды, годы	Средняя скорость сокращения площади оледенения, % в год	Источники данных
Горы Сунтар-Хаята	С 1944–1947 по 2003	0,24	Настоящая работа
	2003–2018	1,52	
Западная часть земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген)	С 1936 по 2002–2004	0,49	20
	С 1990 по 2002–2004	0,51	
	С 2002–2004 по 2016–2017	1,67	
Земля Принца Карла (архипелаг Шпицберген)	1990–2008	0,76	21
	2008–2017	1,83	
Полярный Урал	1953–2000	0,52	22
	2000–2018	1,54	
Бернские, Пеннинские и Грайанские Альпы	2000–2014	1,80	23
Северо-Чуйский хребет (Алтай)	1968–2008	0,37	24
	2008–2017	1,21	
Северная часть Срединного хребта (Камчатка)	1950–2002	0,34*	19
	С 2002 по 2016–2017	1,45*	

*Для ледников, зарегистрированных в Каталоге ледников СССР [1]. Если учитывать все ледники, отмеченные в работе [19], то средняя скорость сокращения площади оледенения района в период с 2002 по 2016–2017 гг. составит 1,73% в год.

ников. По сведениям авторов работы [2] «для дешифрирования современного состояния ледников северного массива, их границ и гидрологических объектов использовались космические снимки Bing Map 2011 г.». Здесь возникает несколько проблем. «Bing Maps» (<https://www.bing.com/maps>) – сетевой портал, принадлежащий коммерческой организации, не являющейся оператором искусственных спутников Земли. Спутниковые снимки в подложке карт данного сайта могут меняться.

По состоянию на 05.02.2021 северный массив гор Сунтар-Хаята покрыт тремя спутниковыми снимками (далее с запада на восток): WorldView-2 от 02.08.2011, WorldView-2 от 30.07.2011 и WorldView-2 от 26.06.2012. Центральная и восточная части данного района, включая район горы Мус-Хая, на картах «Bing Maps» были покрыты спутниковым снимком WorldView-2 от 26.06.2012, у которого есть два существенных недостатка. Во-первых, судя по данному снимку, сезонный снежный покров в эту дату ещё не сошёл; во-вторых, у данного снимка отсутствует ортотрансформация или она сделана некорректно. На это указывает существенное (местами более 70 м) смещение осевых частей горных хребтов относительно их положения на спутниковых снимках Landsat-7 и Sentinel-2, полученных в результате съёмки в

надир. В таких условиях при дешифрировании границ ледников неизбежны существенные искажения геометрии и, как следствие, измеренной площади ледников.

Средняя скорость сокращения площади оледенения гор Сунтар-Хаята в начале XXI в. (1,52% в год в период 2003–2018 гг.) оказалась близка к скоростям сокращения площади оледенения ряда других горных районов Евразии и островов Арктики за сопоставимые по продолжительности периоды (табл. 4). Существенное увеличение скорости сокращения ледников хребта Сунтар-Хаята в начале XXI в. сопровождалось активизацией процесса распада ледников на фрагменты меньшего размера. Похожая ситуация наблюдается в северной части Срединного хребта на Камчатке [19] и в западной части Земли Норденшельда на Шпицбергене [20].

Заключение

Оледенение гор Сунтар-Хаята в 2018 г. было представлено 251 ледником общей площадью около 133 ± 10 км². Здесь преобладают каровые, карово-висячие и висячие ледники, а наибольшие площади занимают долинные, сложные долинные и карово-долинные ледники (см. табл. 2). Основная часть (82,7%) площади

оледенения сосредоточена в высотном диапазоне 2200–2600 м. Сокращение размеров ледников гор Сунтар-Хаята в начале XXI в. существенно ускорилось по сравнению со второй половиной XX в., она увеличилась более чем в шесть раз — с 0,24% в год в период с 1944–1947 по 2003 г. до 1,52% в год в период 2003–2018 гг. Близкие по величине скорости сокращения площади горных ледников за сопоставимые временные периоды в начале XXI в. наблюдаются в ряде горных районов умеренных широт Евразии и в Арктике (см. табл. 4). Наибольшее сокращение размеров со времени каталогизации претерпели малые (< 0,1 км²) ледники, а наименьшее — относительно крупные (> 2 км²). Больше всего с середины XX в. сократились ледники, ориентированные на запад (39,9%), менее всего — на юго-запад (25,0%). В 2003–2018 гг. активизировался распад ледников на фрагменты меньшего размера.

Сравнению полученных в настоящем исследовании данных об изменениях оледенения гор Сунтар-Хаята в целом (или отдельных районов) с результатами других исследователей, опубликованными в более ранних работах 2000-х и 2010-х годов, препятствует недостаток сведений. В одних случаях отсутствуют даты съёмки или полные идентификаторы спутниковых снимков, не позволяющие точно определить исходные материалы ДЗЗ; в других — не ясны границы зон

территориального охвата различными материалами ДЗЗ и точные границы районов исследования. Всё это затрудняет создание корректной выборки ледников для сравнения полученных данных. Совокупность результатов исследования и данных реанализа NCEP/NCAR позволяет сделать вывод о климатической обусловленности изменений, произошедших с оледенением гор Сунтар-Хаята во второй половине XX и начале XXI в. Рост скорости сокращения площади ледников в начале XXI в. совпадает с устойчивой положительной аномалией летних температур воздуха, наблюдавшейся с 2007 по 2018 г. Средняя летняя температура воздуха в 2007–2018 гг. составляла 12,2 °С, что на 1 °С превышало её среднее значение за 1981–2010 гг., а в 2008 и 2009 г. разница достигала 2 °С. В сочетании с происшедшим уменьшением количества зимних осадков это может быть одной из основных причин увеличения скорости сокращения ледников.

Благодарности. Статья подготовлена по теме Государственного задания № 0148-2019-0004 (AAAA-A19-119022190172-5).

Acknowledgments. The paper includes the results obtained within the framework of the research project № 0148-2019-0004 (AAAA-A19-119022190172-5) of the Research Plan of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences.

Литература

1. Каталог ледников СССР. Т. 17. Вып. 3. Ч. 1; Вып. 7. Ч. 3; Т. 19. Ч. 3. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 58 с.
2. Мавлюдов Б.Р., Ананичева М.Д. Ледники северного массива гор Сунтар-Хаята: современное состояние и динамика с конца 1950-х годов // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 3. С. 345–357. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-345-358.
3. Берман Л.Л. Современное оледенение верховьев р. Индигирки (предварительное сообщение) // Вопросы географии. 1947. Вып. 4. С. 33–66.
4. Васильковский А.П. Современное оледенение Северо-Востока СССР // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Вып. 9. 1955. С. 71–91.
5. Корейша М.М. Современное оледенение хребта Сунтар-Хаята. Гляциология. № 11. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 170 с.
6. Граве Н.А., Гаврилова М.К., Гравис Г.Ф., Катаионов Е.М., Клюкин Н.К., Корейша М.М., Корни-

References

1. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 17. Is. 3. Pt. 1; Is. 7. Pt. 3; V. 19. Pt. 3. Leningrad: Hydro-meteoizdat, 1977: 58 p. [In Russian].
2. Mavlyudov B.R., Ananicheva M.D. Glaciers of the northern massif of the Suntar-Khayata Mountains: current state and dynamics since the end of 1950s. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (3): 345–357. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-345-358. [In Russian].
3. Berman L.L. Modern glaciation of the upper reaches of the Indigirka River (preliminary message). *Voprosy geografii*. Geography issues. 1947, 4: 33–66. [In Russian].
4. Vas'kovsky A.P. Modern glaciation of the North-East of the USSR. *Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Severo-Vostoka SSSR*. Materials of geology and mineral resources of the North-East of the USSR. 1955, 9: 71–91. [In Russian].
5. Koreysa M.M. *Sovremennoe oledenenie khrebta Suntar-Khayata*. Modern glaciation of Suntar-Khayata Ridge. *Glatsiologiya*. Glaciology. № 11. Moscow: USSR Academy of Sciences Publishing House, 1963: 170 p. [In Russian].

- лов Б.А., Чистотин Л.В. Промерзание земной поверхности и оледенение хребта Сунтар-Хаята. Гляциология. № 14. М.: Наука, 1964. 143 с.
7. Виноградов О.Н., Голодковская Н.А., Корейша М.М., Серебрянный Л.П. Новые данные о современном и древнем оледенении гор Сунтар-Хаята (по материалам исследований 1970 г.) // МГИ. Вып. 19. 1972. С. 80–91.
 8. Yamada T., Takahashi S., Shiraiwa T., Fujii Y., Kononov Yu.M., Ananicheva M.D., Koreisha M.M., Muravyev Y.D., Samborsky T.V. Reconnaissance on the № 31 Glacier in the Suntar-Khayata Range, Sakha Republic, Russia // Japanese Society of Snow and Ice. Bulletin of Glaciological research. 2002. № 19. P. 101–106.
 9. Ананичева М.Д., Давидович Н.В., Кононов Ю.М., Корейша М.М., Такахаши Ш., Ямада Т., Шираиwa Т. Ледники современного массива гор Сунтар-Хаята: изменения со времени МГГ // МГИ. 2003. Вып. 95. С. 86–92.
 10. Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Корейша М.М. Изменение ледников гор Сунтар-Хаята и хр. Черского по данным Каталога ледников СССР и космическим снимкам 2001–2003 гг. // МГИ. 2006. Вып. 101. С. 163–168.
 11. Галанин А.А., Лыткин В.М., Федоров А.Н., Кадо́та Т. Сокращение ледников гор Сунтар-Хаята и методические аспекты его оценки // Лёд и Снег. 2013. № 4 (124). С. 30–42.
 12. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. «ArcticDEM», Harvard Dataverse, VI. 2018. doi: 10.7910/DVN/OHHUKH. Архив данных от 29.08.2018–30.08.2018.
 13. NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, and U.S./Japan ASTER Science Team. ASTER Global Digital Elevation Model V003. 2018, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi: 10.5067/ASTER/ASTGTM.003.
 14. https://climateanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/.
 15. Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial. 2010. 15 p. http://www.glims.org/MapsAndDocs/as-sets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf.
 16. SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR. Is. 51. 2020. 50 p. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report.
 17. Руководство по составлению Каталога ледников СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 154 с.
 18. Takahashi S., Sugiura K., Kameda T., Enomoto H., Kononov Y., Ananicheva M., Kapustin G. Response of glaciers in the Suntar-Khayata range, 6. Grave N.A., Gavrilova M.K., Gravis G.F., Katsanov E.M., Klukin N.K., Koreysha M.M., Kornilov B.A., Chistotinov L.V. *Promerzanie zemnoi poverkhnosti i oledenenie khrebta Suntar-Khayata*. Freezing of the earth's surface and glaciation of the Suntar-Khayata Range. *Glatsiologiya*. Glaciology. № 14. Moscow: Nauka, 1964: 143 p. [In Russian].
 7. Vinogradov O.N., Golodkovskaya N.A., Koreysha M.M., Serebryanny L.P. The new data on present-day and ancient glaciation of the Suntan-Khayata Mountains (investigations of 1970). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1972, 19: 80–91. [In Russian].
 8. Yamada T., Takahashi S., Shiraiwa T., Fujii Y., Kononov Yu.M., Ananicheva M.D., Koreisha M.M., Muravyev Y.D., Samborsky T.V. Reconnaissance on the No 31 Glacier in the Suntar-Khayata Range, Sakha Republic, Russia. Japanese Society of Snow and Ice. Bulletin of Glaciological research. 2002, 19: 101–106.
 9. Ananicheva M.D., Davidovich N.V., Kononov Yu.M., Koreysha M.M., Yamada T., Takahashi S., Shiraiwa T. Glaciers of northern massif of Suntan-Khayata mountains: changes since the International Geophysical Year. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2003, 95: 86–92. [In Russian].
 10. Ananicheva M.D., Kapustin G.A., Koreysha M.M. Glacier changes in Suntan-Khayata mountains and Chersky Range from the Glacier Inventory of the USSR and satellite images 2001–2003 *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2006, 101: 163–168. [In Russian].
 11. Galanin A.A., Lytkin V.M., Fedorov A.N., Kadota T. Recession of glaciers in the Suntar-Khayata Mountains and methodological consideration of its assessments. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 4 (124): 30–42. [In Russian].
 12. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C.; Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. «ArcticDEM», Harvard Dataverse, 2018, VI. doi: 10.7910/DVN/OHHUKH. Archive of data from 29.08.2018–30.08.2018.
 13. NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, and U.S./Japan ASTER Science Team. ASTER Global Digital Elevation Model V003. 2018, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi: 10.5067/ASTER/ASTGTM.003.
 14. https://climateanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/.
 15. Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial. 2010: 15 p. http://www.glims.org/MapsAndDocs/as-sets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf.
 16. SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR. 2020. Is. 51: 50 p. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report.
 17. *Rukovodstvo po sostavleniyu Kataloga lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory guide. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1966: 154 p. [In Russian].

- eastern Siberia, to climate change // *Annals of Glaciology*. 2011. V. 52 (58). P. 185–192. doi: 10.3189/172756411797252086.
19. Муравьев А.Я. Сокращение ледников северной части Срединного хребта на Камчатке в период с 1950 по 2016–2017 гг. // *Лёд и Снег*. 2020. Т. 60. № 4. С. 498–512. doi: 10.31857/S2076673420040055.
 20. Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Современные изменения площади ледников западной части Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген) // *Лёд и Снег*. 2018. Т. 58. № 4. С. 462–472. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-462-472.
 21. Чернов Р.А., Муравьев А.Я., Тополева А.Н. Современное сокращение горного оледенения Земли Принца Карла (архипелаг Шпицберген) // *Криосфера Земли*. 2019. № 5. С. 73–81. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2019-5(73-81).
 22. 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 // *Лёд и Снег*. 2020. Т. 60. № 1. С. 42–57. doi: 10.31857/S2076673420010022.
 23. Sommer C., Malz P., Seehaus T.C., Lippl S., Zemp M., Braun M.H. Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21st century // *Nature Communications*. 2020. V. 11. № 3209. doi: 10.1038/s41467-020-16818-0.
 24. Торопов П.А., Алешина М.А., Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Никитин С.А. Современная деградация горного оледенения Алтая, её последствия и возможные причины // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 5. С. 118–130.
 18. Takahashi S., Sugiura K., Kameda T., Enomoto H., Kononov Y., Ananicheva M., Kapustin G. Response of glaciers in the Suntar–Khayata range, eastern Siberia, to climate change. *Annals of Glaciology*. 2011, 52 (58): 185–192. doi: 10.3189/172756411797252086.
 19. Muraviev A.Ya. Degradation of glaciers in the northern part of the Middle Range on Kamchatka Peninsula along the period from 1950 over 2016–2017. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020, 60 (4): 498–512. doi: 10.31857/S2076673420040055. [In Russian].
 20. Chernov R.A., Muraviev A.Y. Contemporary changes in the area of glaciers in the western part of the Nordenskjöld Land (Svalbard). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018, 58 (4): 462–472. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-462-472. [In Russian].
 21. Chernov R.A., Muraviev A.Ya., Topoleva A.N. Degradation of the mountain glaciation of Prins Karls Forland (Svalbard). *Earth's Cryosphere*. 2019, 23 (5): 62–69. doi: 10.21782/EC2541-9994-2019-5(62-69).
 22. Nosenko G.A., Muraviev A.Y., Ivanov M.N., Sinitsky A.I., Kobelev V.O., Nikitin S.A. Response of the Polar Urals glaciers to the modern climate changes. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020, 60 (1): 42–57. doi: 10.31857/S2076673420010022. [In Russian].
 23. Sommer C., Malz P., Seehaus T.C., Lippl S., Zemp M., Braun M.H. Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21st century. *Nature Communications*. 2020, 11: 3209. doi: 10.1038/s41467-020-16818-0.
 24. Toropov P.A., Aleshina M.A., Nosenko G.A., Khromova T.Y., Nikitin S.A. Modern Deglaciation of the Altai Mountains: Effects and Possible Causes. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020, 45 (5): 368–376. doi: 10.3103/S1068373920050088.