

ЛЕДНИКИ В ГОРАХ РОССИИ (КАВКАЗ, АЛТАЙ, КАМЧАТКА) В ПЕРВОЙ ЧЕТВЕРТИ XXI ВЕКА

© 2023 г. В. М. Котляков¹, Т. Е. Хромова^{1,*}, Г. А. Носенко¹,
А. Я. Муравьев¹, С. А. Никитин¹

¹ Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: tkhromova@gmail.com

Поступила в редакцию 21.02.2023 г.

После доработки 09.03.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2023 г.

Проведённые в последнее время исследования позволили получить детальную картину изменений ледников в наиболее обеспеченных данными горных районах России. Для оледенения Кавказа получены данные на временные срезы 1911, 1952, 2000, 2014, 2018 и 2020 г.; для Алтая – на 1850, 1952, 2003 и 2018 г. Для крупных узлов оледенения Центрального Алтая – Катунского, Южно- и Северо-Чуйского хребтов дополнительно на 1968, 2008, 2017 г. В обоих районах выявлены устойчивое сокращение площади ледников с начала XX в. и ускорение темпов сокращения в начале XXI в. Для исследования ледников Камчатки были использованы данные Каталога ледников СССР и снимки с разных спутников и за разные годы (2007–2019). Выявлено множество ледников, ранее не зарегистрированных в Каталоге ледников СССР. Площадь оледенения в разных районах Камчатки со времени первой каталогизации изменялась крайне неравномерно, что связано со значительными различиями в морфологии ледников. Ледники вулканических районов увеличили свои размеры или оставались стационарными; здесь нет тенденции к сокращению ледников из-за мощной поверхностной морены, состоящей из вулканогенного материала. Сравнение данных Каталога ледников СССР (1965–1982) и Каталога ледников России (2017–2019) показывает сокращение площади оледенения с середины XX в. до конца второй декады XXI в. во всех горных районах России за исключением вулканических областей Камчатки.

Ключевые слова: горные ледники, Россия, изменения ледников, космические изображения

DOI: 10.31857/S2076673423020114, **EDN:** RVBDMJ

На Кавказе и Алтае выявлены устойчивое сокращение площади ледников с начала XX в. и ускорение темпов сокращения в начале XXI в. На Камчатке в районах, удалённых от активных вулканов, также наблюдалось сокращение площади ледников, но в вулканических областях ледники увеличили свои размеры или оставались стационарными из-за бронирования поверхности мощной толщей морены, состоящей из вулканогенного материала.

ВВЕДЕНИЕ

Современное потепление климата повсеместно приводит к возрастанию таяния ледников, что усиливает риск катастрофических природных явлений в горах и вызывает трансформацию приледниковых ландшафтов, изменяющую уклад жизни и хозяйства местных жителей. Всё это придаёт актуальность информации о состоянии ледниковых систем и прогноза их изменений в ближайшем будущем.

На территории России в настоящее время ледники располагаются в Арктической зоне, Субарктике и в умеренных широтах. Первая системная оценка ледников на территории России была дана в Каталоге ледников СССР (Каталог ледников, 1965–1982; Виноградов, 1984) – многотомном издании 1965–1982, созданном большим коллективом советских ученых в 1965–1982 гг. Это был первый в мире каталог ледников, покрывающих обширную территорию; впоследствии, в соответствии с программой Международного гидрологического десятилетия он стал её частью. Каталог был создан на основе аэрофотоснимков середины XX века, топографических карт 1960-х годов и данных полевых наблюдений. Каталог не содержит цифровых контуров ледников, а включает только таблицы с параметрами ледников, схемы их расположения и описания.

По данным этого Каталога в середине XX в. на территории России насчитывалось 8538 ледников общей площадью 60099.71 км² (Каталог ледников, 1965–1982). Несколько небольших по разме-

ру ледниковых систем не представлены в Каталоге ледников СССР, так как были исследованы позже. Эти ледниковые системы находятся в Чукотском и Колымском нагорьях, в Байкальском и Баргузинском хребтах (Котляков и др., 2011; Чернова и др., 2011); в них насчитывалось всего 252 ледника общей площадью 69.16 км² (Котляков и др., 2015). Следующим после Каталога ледников СССР источником данных о ледниках стал Атлас снежно-ледовых ресурсов мира (1997), в котором десятки карт посвящены ледниковым системам России и отдельным ледникам.

С начала 1990-х годов широкое распространение получила спутниковая информация, активно используемая для массовых оценок состояния оледенения. В середине 1990-х годов был инициирован международный проект “Глобальные измерения наземного льда и космоса” (GLIMS – Global Land Ice Measurements from Space) (<http://www.glims.org/About/regionoverview>), в рамках которого космическая информация стала доступна широкому кругу исследователей. Один из региональных центров проекта GLIMS создан в Институте географии РАН. В зону ответственности этого центра входят районы оледенения на территории России и других стран бывшего СССР, обеспеченные данными Каталога ледников СССР.

Результаты исследования горных ледников России с использованием космических изображений, полученных в рамках проекта GLIMS с 2000 по 2015 г., легли в основу монографии “Современные изменения ледников горных районов России” (Котляков и др., 2015). В этой книге детально рассмотрены районы горного оледенения на территории России, история исследования ледников и их современные изменения, происшедшие с середины XX в. вплоть до начала второго десятилетия нынешнего столетия. Особое внимание авторы обращали на методы получения новых данных и способы их обработки, точность получаемых результатов и возможности их сопоставления с результатами, полученными в прошлом. В процессе подготовки монографии стало понятно, что к середине второго десятилетия XXI в. территория России была обеспечена результатами таких исследований неравномерно.

На сайтах международного проекта GLIMS (<https://www.glims.org/>) и всемирного каталога ледников RGI (The Randolph Glacier Inventory) (<https://www.glims.org/RGI/index.html>) для большинства горных районов России можно найти в основном результаты автоматического дешифрирования снимков Landsat, полученных в разные годы в период 2000–2013 гг. Эти данные превышают количество ледников и площадь оледенения в районах широкого распространения крупных многолетних снежников и снежников-перелет-

ков и недооценивают площади оледенения районов, где на ледниках широко развита поверхностная морена. Использование космических снимков разного разрешения, полученных в разное время, применение разных методов и подходов к процессу дешифрирования и анализу полученных результатов усложняло сравнительную оценку современного состояния ледников в разных районах.

Для системной оценки современного состояния и изменений ледниковых систем на территории России в Институте географии РАН был создан новый каталог ледников, основанный на единых исходных данных, подходах и методах обработки спутниковых снимков и организации данных с использованием геоинформационных технологий (Хромова и др., 2021). Каталог аккумулирует результаты анализа снимков Sentinel-1-2, полученных в основном в 2017–2019 гг. и представляет собой информационную основу для дальнейшего исследования ледниковых районов России. Структура базы данных включает основные параметры ледников и совместима с глобальными и национальными архивами. Дополнительно разработана классификация возможных катастрофических явлений ледникового генезиса: динамически неустойчивые ледники, ледниковые озера, айсберги. Созданная база данных (www.glacru.ru) дала возможность оценить современное состояние и изменения ледников на территории России. В конце второй декады XXI века в России насчитывались 22 ледниковые системы общей площадью $54\,531 \pm 1039.55$ км². Со времени составления Каталога ледников СССР по материалам середины XX века, площадь сократилась на 5603.9 км², или на 9.3% (Хромова и др., 2021).

Накопленные к настоящему времени данные позволили провести детальный анализ оледенения крупнейших горно-ледниковых районов России. Результаты представлены в данной статье.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГОРНОМ ОЛЕДЕНЕНИИ РОССИИ

Для получения актуальной информации о ледниках России в качестве основного массива данных использованы снимки со спутника Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м за 2017–2019 гг., свободные от облачности и полученные в конце периода абляции. В сложных случаях привлекались дополнительные данные более высокого разрешения (WorldView-2, GeoEye). При отсутствии снимков Sentinel-2 надлежащего качества использовали снимки с других спутников за годы, близкие к основному периоду исследований (Landsat, ASTER). Границы ледников по спутниковым снимкам дешифрировали в ручном экспертном режиме, так как автоматическое

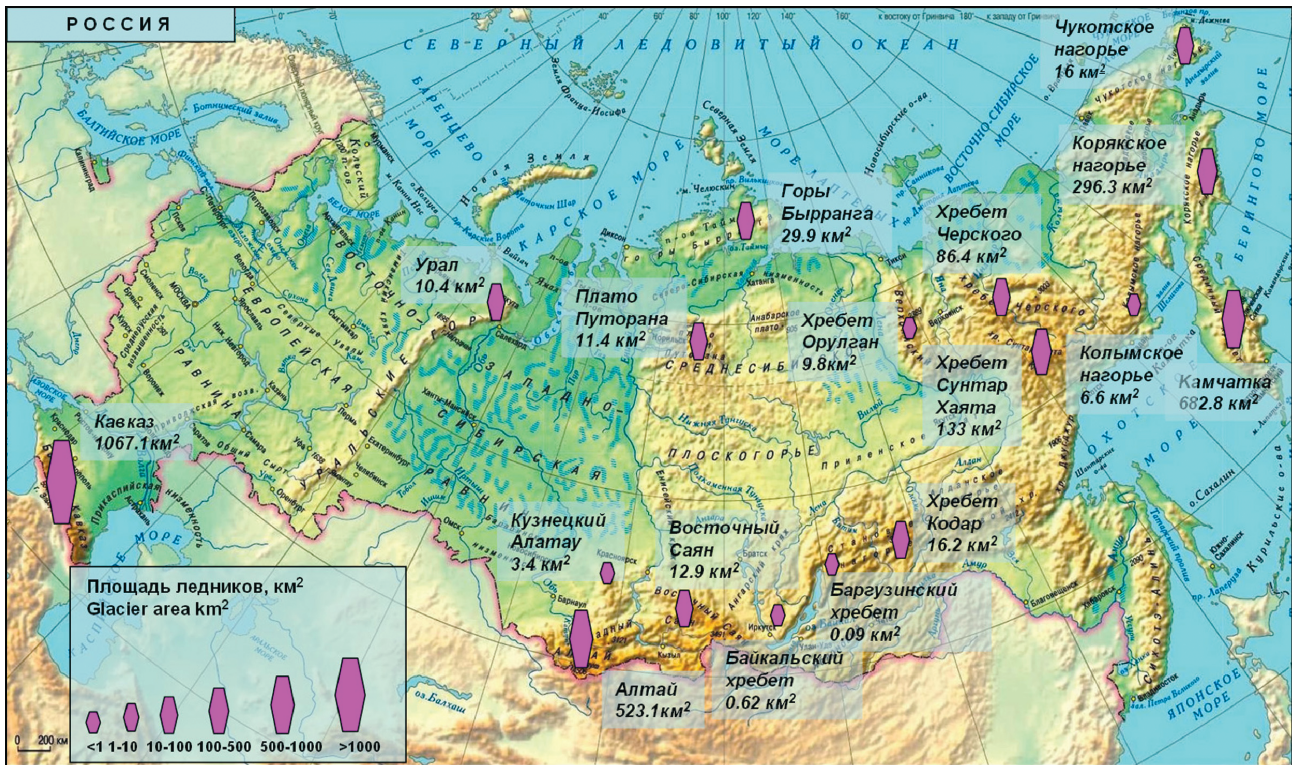


Рис. 1. Оледенение горных районов России по данным спутниковых снимков 2017–2019 гг. (Хромова и др., 2021).

Fig. 1. Glaciation of mountain regions of Russia according to satellite images 2017–2019 (Хромова и др., 2021).

дешифрирование, особенно в районах распространения малых ледников, дает результаты с большой степенью неопределенности.

По результатам дешифрирования космических снимков на территории континентальной России во втором десятилетии XXI в. насчитывается 5877 ледников общей площадью $2906 \pm \pm 205.95 \text{ км}^2$ (табл. 1). Самые крупные по площади ледниковые системы располагаются в горах Кавказа ($1067.1 \pm 79.7 \text{ км}^2$), Камчатки ($682.8 \pm \pm 29.0 \text{ км}^2$) и Алтая ($523.1 \pm 38.3 \text{ км}^2$) (рис. 1) (Хромова и др., 2021).

Самая многочисленная группа – это небольшие ледниковые системы, площадь которых не превышает 100 км^2 . В нее входят Урал ($10.4 \pm 1.7 \text{ км}^2$), плато Путорана ($11.4 \pm 1.7 \text{ км}^2$), горы Бырранга ($29.9 \pm 4.4 \text{ км}^2$), хребет Черского ($86.4 \pm 7.7 \text{ км}^2$), Чукотское нагорье ($16 \pm 1.4 \text{ км}^2$), хребет Кодар ($16.2 \pm 1.2 \text{ км}^2$) и Восточный Саян ($12.9 \pm 1.5 \text{ км}^2$). Ледниковые системы площадью менее 1 км^2 располагаются в хребте Орулган и Колымском нагорье на северо-востоке России, Кузнецком Алатау на юге Западной Сибири, Баргузинском и Байкальском хребтах в Прибайкалье.

Горные ледниковые системы в континентальной части России представлены преимущественно небольшими ледниками. Основное количе-

ство ледников на территории Алтая и Кавказа – это ледники от 0.01 до 1 км^2 . Размеры ледников на Урале, в ледниковых системах хребтов Черского, Сунтар-Хаята, Орулган, Кодар, Восточного Саяна, Корякского нагорья, Колымского нагорья, Чукотского нагорья находится в диапазоне от 0.01 до 0.5 км^2 .

В континентальных ледниковых системах преобладают ледники северных и северо-восточных экспозиций, как по площади, так и по количеству. Ледники Полярного Урала, хребтов Орулган и Кодар расположены преимущественно на восточных склонах и получают питание при западных ветрах. Ледники хребтов Черского и Сунтар-Хаята, расположенные на северных склонах, – при южных ветрах с Охотского моря. Оледенение Срединного хребта на Камчатке относительно равномерно распределено между восточными и западными экспозициями, что говорит о примерно равном питании с Охотского и Берингова морей. На юго-восточной Камчатке преобладает питание с востока. Ледниковые системы Алтая и Восточного Саяна имеют максимумы распределения оледенения на северо-восточной стороне хребтов, что отражает питание ледников при юго-западных ветрах.

Каровые ледники по численности доминируют практически во всех ледниковых районах кон-

Таблица 1. Ледники горных районов России по спутниковым данным 2017–2019 гг.

Ледниковая система	Общее число ледников	Площадь ледников, км ²	Средние высоты ледников, м над ур. моря			Преобладающий морфологический тип (по количеству ледников)	Преобладающая экспозиция (по количеству ледников)	Приледниковые озера (число)	Нестабильные ледники (число)	Спутник, год съёмки
			минимальные	максимальные	средние					
1 Урал	97	10.4 ± 1.7	400	1440	833	присклоновые, каровые	восток, северо-восток, юго-восток	38	0	Sentinel-2, 2018 г.
2 Плато Путорана	71	11.4 ± 1.7	320	1540	890	присклоновые, каровые	северо-восток	17	0	Sentinel-2, 2018–2019 гг.
3 Горы Бырранга	213	29.9 ± 4.4	180	1110	722	присклоновые	восток, северо-восток	9	0	Sentinel-2, 2019 г.
4 Хребет Орулан	72	9.8 ± 1.1	1660	2060	1860	каровые, карово-долинные	северо-восток	0	0	Sentinel-2, 2018 г.
5 Хребет Черского	188	86.4 ± 7.7	1540	2980	2108	каровые, висячие, долинные	северо-восток, восток	0	0	Sentinel-2, 2016–2017 гг. Landsat 8 2014–2016 гг. ASTER 2017 г.
6 Хребет Сунгар-Хаяга	251	133.0 ± 10.1	2130	2760	2428	каровые, карово-висячие	запад, северо-запад	4	0	Sentinel-2, 2018 г.
7 Кольмское нагорье	39	6.6 ± 0.7	490	1830	906	каровые, карово-долинные	запад, восток	0	0	Sentinel-2, 2016–2019 гг.
8 Корякское нагорье	890	296.3 ± 26.5	190	2420	845	каровые, карово-долинные	запад, северо-запад	158	0	Sentinel-2, 2018–2019 гг.
9 Чукотское нагорье	63	16.0 ± 1.4	160	1110	541	каровые, карово-долинные	запад, восток	21	0	Sentinel-2, 2017–2019 гг.

Таблица 1. Окончание

Ледниковая система	Общее число ледников	Площадь ледников, км ²	Средние высоты ледников, м над ур. моря			Преобладающий морфологический тип (по количеству ледников)	Преобладающая экспозиция (по количеству ледников)	Приледниковые озера (число)	Нестабильные ледники (число)	Спутник, год съёмки
			минимальные	максимальные	средние					
10 Кавказ	2046	1067.1 ± 79.7	1690	5650	3353	каровые, висячие, карово-висячие	северо-восток, северо-запад	1830	23	Sentinel-2, 2017–2018 г.
11 Алтай	988	523.1 ± 38.3	2050	4480	3000	каровые, висячие, карово-висячие	северо-восток, северо-запад, восток	640	0	Sentinel-2, 2016–2019 г.
12 Кузнецкий Алатау	101	3.4 ± 0.9	1180	2080	1480	присклоновые	восток, северо-восток	34	0	Sentinel-2, 2018–2019 г.
13 Восточный Саян	78	12.9 ± 1.5	1480	3460	2374	каровые, присклоновые	восток, северо-восток	19	0	Sentinel-2, 2018–2019 г.
14 Байкальский хребет	8	0.62 ± 0.04	1490	2200	1853	каровые	восток, юго-восток	1	0	WorldView-2, 2012 г.
15 Баргузинский хребет	1	0.09 ± 0.01	1990	2160	2075	карово-долинные	северо-восток	1	0	Sentinel-2, 2018 г.
16 Хребет Кодар	39	16.2 ± 1.2	1860	2710	2230	карово-долинные, каровые	восток	20	0	Sentinel-2, 2019 г.
17 Камчатка	732	682.8 ± 29.0	330	4510	1555	каровые, склоновые	северо-запад, запад	18	2	Sentinel-2, 2016–2019 г., WorldView-2, 2010–2014 г., GeoEye-1, 2011–2013 г., ASTER, 2012–2013 г., Landsat 8, 2013–2015 г., IKONOS, 2007 г.
Всего	5877	2906 ± 205.9						2810	25	

тинентальной России. Особенности морфологии ледников Камчатки связаны с вулканической деятельностью: здесь распространены кратерные и кальдерные ледники. Кроме “обычных” ледников, колебания которых обусловлены изменениями климата, в ледниковых системах на территории России встречаются и нестабильные ледники. Режим таких ледников (в том числе пульсирующих) определяется в первую очередь их динамической неустойчивостью, связанной с морфологическим строением. Такие ледники встречаются в горах Кавказа и Камчатки.

Прорывы приледниковых озёр и, как следствие, образование селевых потоков относятся к опасным явлениям гляциального генезиса. Приледниковые озёра существуют почти во всех ледниковых районах России. Самое большое их количество (1830) идентифицировано на Кавказе. Немало их и на Алтае (640). На Полярном Урале приледниковые озёра известны у трети ледников, встречаются они и в Корякском нагорье (известно 158 озёр). Лучше всего такие озёра изучены на Кавказе и Алтае. Приледниковые озёра не были обнаружены лишь в хребтах Орулган и Черского, а также на Колымском нагорье.

Сравнение данных, полученных в ходе подготовки последнего Каталога ледников, с данными Каталога ледников СССР позволили оценить изменения основных параметров горных ледников с середины XX в. до середины второй декады XXI в. (Хромова и др., 2021). Не были обнаружены маленькие ледники, существовавшие ранее в Хибинах. Для ряда районов, находящихся в субарктической зоне, получены совсем небольшие значения сокращения общей площади или даже её увеличения. Это связано, в первую очередь, с тем, что в Каталог ледников СССР и в итоги последующих исследований вошли данные не обо всех ледниках в этих районах. Позже были обнаружены новые ледники в горах Бырранга, Колымского нагорья, гор Путорана.

Сокращение площади ледниковых систем горных районов России находится в диапазоне от 63% (Урал) до 13% (Кодар). Самые крупные ледниковые системы Кавказа, Камчатки и Алтая уменьшили свои площади соответственно на 25, 22 и 39%. Уже после выхода в свет всех частей Каталога ледников СССР были обнаружены не учтенные ледники общей площадью 69 км², которая, по нашим данным, уменьшилась на 9.7 км², или на 12.3%.

В настоящее время в горных районах России ледниковые системы Кавказа, Алтая и Камчатки наиболее обеспечены результатами гляциологических исследований. Полученные многочисленные данные позволяют оценить состояние ледников в этих районах во второй декаде XXI века и их изменения с середины XX века.

КАВКАЗ

Горная система Большого Кавказа шириной от 30 до 180 км, расположенная между Черным и Каспийским морями, протянулась примерно на 1300 км с запада-северо-запада на восток-юго-восток. Большой Кавказ подразделяется на западный, центральный и восточный сектора со средней высотой 3200, 4100 и 3700 м соответственно. Самый высокий центральный сектор расположен между вершинами Эльбрус (5642 м) и Казбеги (5047 м). Большой Кавказ находится на пути средиземноморских и атлантических циклонов, которые несут влагу с запада и юго-запада. Почти 70% ледников Кавказа расположено в его центральном секторе. Максимальное количество осадков (около 3200 мм за год) выпадает на южном склоне западного региона. Их годовое количество уменьшается до 2000 мм в центральной части и до 1000 мм в восточной части Большого Кавказа (Volodicheva, 2002).

Кавказ наравне с Альпами остаётся одним из самых изученных в гляциологическом отношении районов земного шара. История инвентаризации ледников в этом районе начинается с топографической съёмки конца XIX века. Первый каталог ледников Кавказа был подготовлен военными топографами с 1881 по 1910 г. и опубликован в начале XX в. (Подозерский, 1911). В нём дано описание 1329 ледников общей площадью 1967.4 км². Следующая масштабная инвентаризация была проведена спустя более полувека, когда по данным аэрофотосъёмки середины XX в. был составлен Каталог ледников СССР (1965–1982), где были зафиксированы 2002 ледника общей площадью 1421.78 км².

Созданная в Институте географии РАН база данных о состоянии ледников Кавказа на 2018 г. представляет собой часть нового Каталога ледников России. По результатам обработки спутниковых снимков Sentinel 2, полученных в июле и сентябре 2017 г. и в августе и сентябре 2018 г., на Кавказе обнаружено 2046 ледников общей площадью 1067 ± 79.7 км². На 97 крупных ледников (площадью более 5 км²) приходится более трети (440 км²) площади оледенения Кавказа. Больше половины ледников (и по площади, и по количеству) расположены на северном макросклоне Большого Кавказа. За время, прошедшее после составления Каталога ледников СССР, оледенение Кавказа сократилось на 28.2%. При этом площадь ледников северного макросклона Большого Кавказа уменьшилась немного больше (на 28.5%), чем южного (27.6%). По другим данным (Tielidze, Wheate, 2018) в 2014 г. на Кавказе было 2020 ледников общей площадью 1193.2 ± 54 км², а оледенение сокращалось на 0.44% в год в 1960–1986 гг. и на 0.69% в год в 1986–2014 гг. Полученные нами результаты показывают, что за 1986–2018 гг. оле-

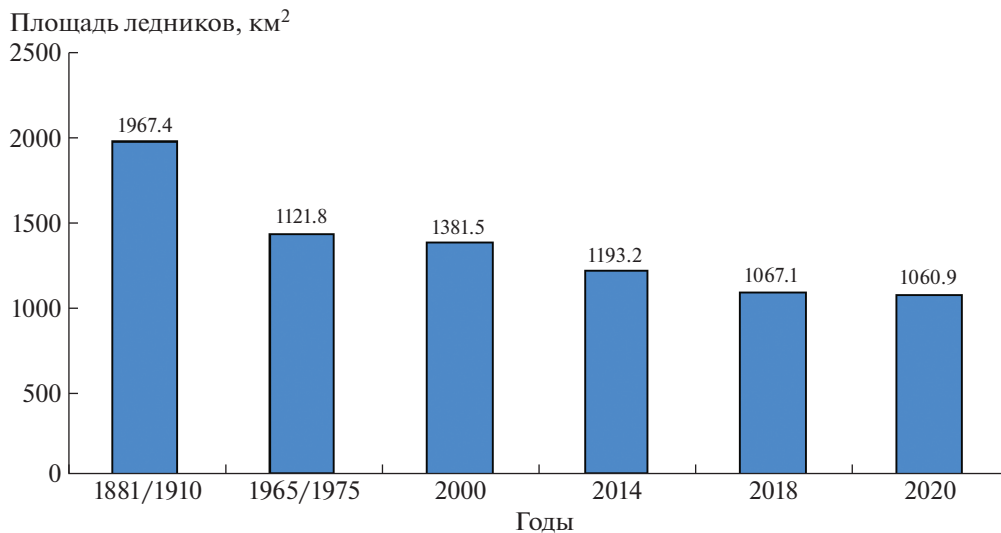


Рис. 2. Сокращение площади ледников Кавказа за 1881/1910–2020 гг.
Fig. 2. Reduction of the area of the glaciers of the Caucasus for 1881/1910–2020.

денение сократилось на 415 км² (0.87% в год), что показывает ускорение деградации ледников Кавказа. С 1997 по 2017 г. общая площадь ледников Эльбруса уменьшилась с 125.76 ± 0.65 до 112.20 ± 0.58 км², со скоростью сокращения 0.54% в год. Сокращение площади происходило не только из-за отступления языков ледников, но и из-за увеличения площади существующих нунатаков и появления новых скальных выходов ниже 4500 м (Ледники и климат Эльбруса, 2020).

Для всей территории Кавказа по результатам дешифрирования космической съёмки к настоящему времени получены данные о площади ледников на 2000, 2014, 2018 и 2020 г. (Хромова и др. 2021; Tielidze et al., 2022). В сочетании с историческими базами данных Подозерского и Каталога ледников СССР мы имеем возможность проследить динамику изменения площади ледников с конца XIX до конца второй декады XXI века (рис. 2).

Ледники Кавказа уменьшили свои размеры за это время на 46%, теряя в среднем в XX в. около 0.2% площади в год, а в начале XXI в. 1.15%. Ледники на севере Большого Кавказа имеют относительно меньшую скорость изменения площади, чем ледники на юге. Такие свидетельства можно объяснить разными экспозициями и высотами. Показано значительное сокращение ледников на Большом Кавказе в период с 2000 по 2020 г. Общая потеря площади льда между этими двумя периодами составила $-1.16\%/г.$ В восточной части наблюдалось самое высокое абсолютное сокращение $-1.82\%/г.$, в то время как в массиве Эльбрус самое низкое $-0.57\%/г.$, в западном регионе также были несколько более высокие темпы изменений ($-1.45\%/г.$). Эльбрусский массив имеет са-

мую большую среднюю площадь ледников, которая изменилась с 6.07 км² в 2000 г. до 3.98 км² в 2020 г. (Tielidze et al., 2022). Новые данные подтверждают выводы об ускорении отступления ледников Кавказа, начавшемся на рубеже XX и XXI в. Эти результаты хорошо соотносятся с данными об изменении высоты поверхности ледников Кавказа, которые показывают, что скорость потери массы ледников увеличилась с 0.42 ± 0.61 м в.э. год⁻¹ за 2000–2010 гг., до 0.64 ± 0.66 м в.э. год⁻¹ за 2010–2019 гг. (Hugonnet et al., 2021).

Метеорологические данные свидетельствуют о том, что летние температуры воздуха повысились и почти достигли максимума 50-х годов прошлого века (12.5°C) в 2000–2019 гг. В то же время в зимних осадках в эти годы четко обозначился отрицательный тренд. А сроки окончания периода абляции в последнее десятилетие сместились на более позднее время, увеличив продолжительность периода таяния. (Рототаева и др., 2019). В целом также возможно, что увеличение приходящей коротковолновой солнечной радиации в высокие горы Кавказа, наблюдаемое с 1980-х годов (10 Вт/м² за 10 лет), сыграло значительную роль в ускоренной потере площади ледников в последние годы. Эта тенденция связана с ослаблением процессов образования высокой и низкой облачности, что связано с увеличением повторяемости антициклонов в теплое время года (Тогоров et al., 2019).

На основе визуального дешифрирования космических снимков Sentinel-2 MSI было выявлено 368 озёр, расположенных на высотах от 1000 до 3300 м над ур. моря в пределах российской части Кавказа. 12 озёр расположены в Республике Ады-

гея, 71 – в Краснодарском крае, 194 – в Карачаево-Черкессии, 60 – в Осетии, 3 – в Чечне и 5 – в Дагестане. 226 озёр находятся не далее 5 км от краевых частей ледников и представляют наибольшую потенциальную опасность. Большинство приледниковых озёр расположены на Западном и Центральном Кавказе. Всего в пределах Большого Кавказа насчитывается около 1830 озёр общей площадью около 95.8 км² (при подсчёте не учитывались озёра площадью менее 500 м², кроме карстовых областей) (Khromova et al., 2019).

На Кавказе 23 ледника известны своими подвижками (в их числе четыре пульсирующих – Колка, Девдоракский, Хрумкол и Муркар) (Котляков и др., 2014а). Самый крупный из таких ледников Большой Азау (16.42 км²), самый маленький (0.14 км²) – ледник № 267 по Каталогу ледников СССР. В диапазоне от 0.14 до 7 км² находятся 10 ледников. Площадь трех ледников превышает 10 км²: Большой Азау, Уллучиран и Мижиргичиран. Морфологические типы этих ледников – долинные, карово-долинные, сложно-долинные, конических вершин.

Самый известный пульсирующий ледник на Кавказе – ледник Колка, небольшой карово-долинный ледник, расположенный на северном склоне массива Казбек–Джимарай–Хох в верховьях реки Геналдон. Он известен своими подвижками, которые происходили неоднократно – в 1834, 1902, 1969 г. (Рототаев и др., 1983) и последняя из них – в 2002 г. (Котляков и др., 2014а). Такому режиму способствует строение ледника, который расположен в глубоком цирке и питается лавинами и обвалами с крутого правого склона. Поверхность ледника покрыта мощным слоем обломочного материала, который предохраняет его от интенсивного таяния, а незначительный уклон ложа и сужение на выходе из кара препятствуют плавному перемещению льда вниз по долине. Эти обстоятельства способствуют постепенному накоплению избыточных масс льда и, при достижении критической величины, приводят к резкой разгрузке, которая сопровождается быстрым продвижением языка ледника вниз по долине со скоростью, на порядок превышающей прежнюю.

В 2022 г. исполнилось 20 лет со дня катастрофы, произошедшей в Кармадонской долине в сентябре 2002 г., когда ледник был выброшен целиком из своего ложа, и по Геналдонской долине на 16 км пронесся на огромной скорости разрушительный ледово-водно-каменный сель. Разносторонние исследования геологов и гляциологов определили предпосылкой уникального события сочетание ряда экстремальных факторов, и в первую очередь – активизацию эндогенных процессов, связанных с вулканическим аппаратом

Казбека (Котляков и др., 2014а). До сих пор продолжают попытки найти объяснение произошедшей катастрофы, но в настоящее время первоочередным становится вопрос о возможности её повторения. Практически сразу после подвижки в опустевшем цирке ледника Колка начался процесс формирования нового ледникового тела. Институт географии РАН продолжает проводить наблюдения за необычным в настоящее время явлением – восстановлением этого опасного ледника.

Для оценки актуальных изменений границ ледника Колка использовались космические снимки Sentinel-2, полученные на протяжении периода абляции 2022 г., результаты наблюдений предыдущих лет, а также снимок WorldView-2 2019 г. Для определения изменений, произошедших за 2021/22 балансовый год, был выбран снимок от 16.09.2022, практически совпадающий с завершением периода абляции (последующие съёмки показали появление устойчивого снежного покрова на поверхности ледника). По сравнению с 2021 г. фронт ледника продвинулся на 57 м (средняя величина продвижения по 6 линиям тока на языке). Это свидетельствует о том, что восстановление ледника Колка продолжается с постепенно возрастающей скоростью: за 2021 г. ледник продвинулся на 43 м, несмотря на неблагоприятные метеорологические условия последних лет (рис. 3).

Летние температуры воздуха, определяющие интенсивность процессов абляции, остаются высокими. Хотя зимние осадки находятся на среднем многолетнем уровне, период абляции ледника Колка закончился в 2022 г. практически в то же время, что и в прошлом, и это не способствует накоплению его массы. Главными факторами формирования баланса массы ледника остаются лавинное питание, усиленная абляция льда и нестабильный процесс бронирования ледника обломочным материалом. В условиях неопределённости дальнейшего развития ситуации необходимо продолжение мониторинга процесса его восстановления с использованием современных наземных и дистанционных методов.

АЛТАЙ

Горный Алтай – самая высокая часть Алтае-Саянской горной системы – располагается на стыке границ четырех стран: Монголии, Китая, Казахстана и России. В центральной его части горные хребты и массивы поднимаются до 3000–4000 м над ур. моря и несут на себе многочисленные и разнообразие формы современного оледенения. Ледники по территории распределяются неравномерно, группируясь вокруг наиболее высоких горных вершин и массивов (Тронов, 1925; Атлас..., 1997).

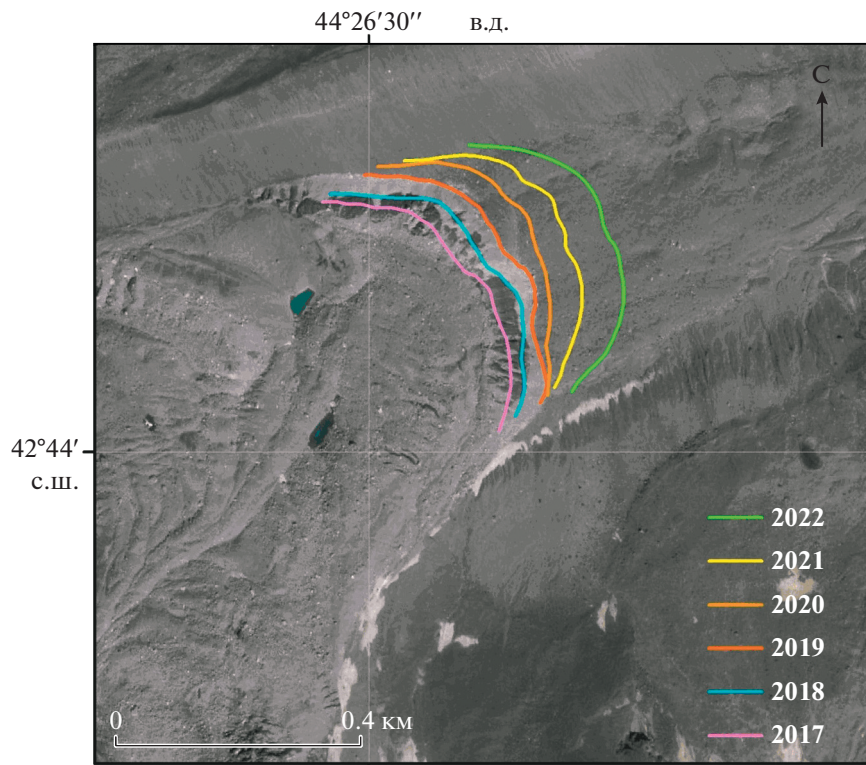


Рис. 3. Положение фронта возрожденного после катастрофы 2002 г. ледника Колка в 2017–2022 гг. (в качестве подложки использован снимок WorldView-2 от 08.09.2019).

Fig. 3. The position of the front of the Kolka Glacier revived after the 2002 catastrophe in 2017–2022 (WorldView-2 image from 08.09.2019 was used as a substrate).

Климат Алтая определяется тремя основными факторами: положением в умеренных широтах Северного полушария, господством западного переноса воздушных масс с Атлантики и влиянием в зимнее время мощного азиатского антициклона с малооблачной морозной погодой. Количество осадков уменьшается с запада на восток, а высота границы питания ледников увеличивается в этом направлении от 2200 до 3200 м. По данным трех метеостанций – Аккем (2050 м), Кара-Тюрек (2600 м) и Актру (2025 м), расположенных в непосредственной близости от ледниковой зоны, во второй половине XX в. и в начале XXI в. в этом регионе происходило устойчивое повышение летних температур и рост годовой суммы осадков (Котляков и др., 2015).

По данным Каталога ледников СССР, оледенение Алтая в 1960–70-х годах занимало более 1500 км², в том числе около 800 км² в северо-восточном секторе этого горного региона – в России. В рамках подготовки нового каталога ледников России были исследованы космические снимки Sentinel 2, полученные в августе 2018 и августе 2019 гг. Обнаружено 988 ледников общей площадью 523.14 ± 38.3 км². Размеры ледников

колеблются от 0.01 до 20.46 км² (Большой Талдуринский ледник).

Преобладают небольшие ледники площадью до 0.5 км². При этом половина всей площади оледенения приходится на 5% ледников площадью более 2 км² каждый. Такое распределение оледенения характерно для большинства горно-ледниковых районов на территории России. Высотный диапазон современных ледников Алтая составляет 2050–4480 м над ур. моря, что свидетельствует о благоприятных орографических условиях. Наибольшее количество ледников располагаются на северо-восточных, северо-западных и восточных склонах. Морфология ледников Алтая типична для горных ледниковых районов России. В пределах российской части Алтая наиболее распространены каровые и висячие ледники, но площадь их в целом существенно меньше, чем уступающих по количеству долинных и карово-долинных ледников. На Алтае обнаружено 640 приледниковых озёр. Идентифицировано 82 прорывоопасных озера общей площадью 2.7 км².

Современное оледенение российского Алтая – это ледниковая система, состоящая из 15 узлов оледенения (рис. 4, табл. 2). Самое крупное скоп-

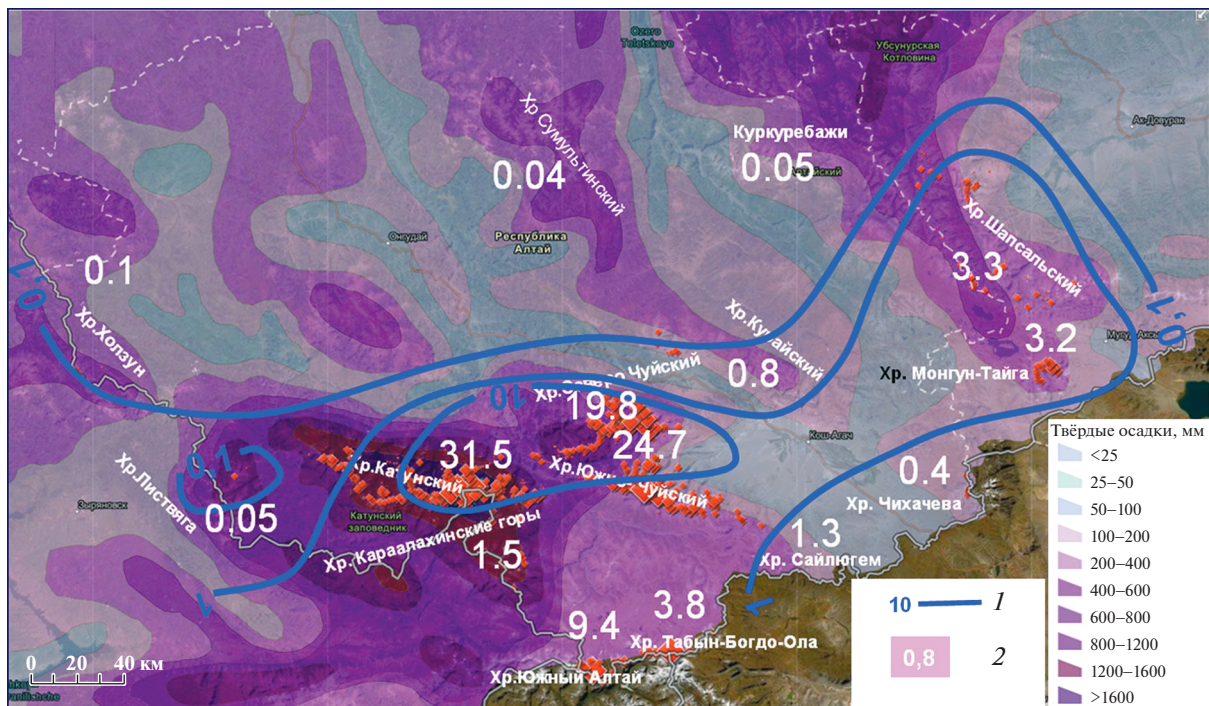


Рис. 4. Распределение площади оледенения на территории Алтая по отдельным хребтам (показано на основе карты твердых осадков из Атласа снежно-ледовых ресурсов мира). 1 – изолинии распределения площади ледников на отдельных хребтах, %; 2 – их доля в общей площади ледниковой системы российского Алтая, %.

Fig. 4. Distribution of glaciation area in the Altai glacier systems (shown based on the map of solid precipitation from the Atlas of Snow and Ice Resources of the World). 1 – isolines of the area distribution of glaciers on individual ridges, %; 2 – their share in the total area of the glacial system of the Russian Altai, %.

ление ледников (76% площади оледенения Алтая) находится в Центральном Алтае в хребтах Катунский, Северо-Чуйский, Южно-Чуйский, Кара-Алахинский. Лишь 0.15% ледников лежит к западу в хребтах Холзун, Листвяга, 1% – в четырёх небольших группах к северо-востоку от центральной части, 3.3% – на хребте Шапшальский, 3.7% – к югу от него в хребтах Сайлюгем, Чихачева и массиве Монгун-Тайга, 13% на хребте Южный Алтай и горном узле Табын-Богдо-Ола на границе России с Монголией.

Хребты, несущие эти ледниковые системы, имеют разную ориентацию и распределены неравномерно на площади около 1 тыс. км² (Котляков и др., 2014б). Наибольший вес (31.5%) имеет площадь оледенения Катунского хребта. На расположенные в непосредственной близости Северо- и Южно-Чуйские хребты приходится 44.3% площади оледенения российского Алтая. На карте эти хребты попадают в область “больше 10%”. Доля остальных ледниковых систем изменяется симметрично оси ЗЮЗ–ВСВ, проходящей через массив Белухи. К ССЗ от этой оси доля каждой из систем уменьшается сначала до целых и десятых процента (ледниковые системы Холзун – 0.1%, Курайского – 0.8%, Шапшала – 3.2%), а еще далее к север-северо-западу – до сотых долей про-

цента: хребты Сумультинский, Куркюребажи – по 0.04–0.05%. К ЮЮВ от основной оси располагаются системы массива Монгун-Тайга (3.1%), Табын-Богдо-Ола (3.7%), Южный Алтай (9.3%), а далее к юг-юго-востоку – системы хребтов Сайлюгем (0.2%), Чихачева (0.4%).

Такое распределение соответствует субширотному направлению хребтов и уменьшению их высот к северу и югу от Катунского поднятия. Это происходит на фоне увеличения твердых осадков на юго-запад и северо-запад от Катунского хребта, которое зафиксировано на карте твердых осадков из Атласа снежно-ледовых ресурсов мира (см. рис. 4). Таким образом, понижение высот несущих хребтов не компенсируется увеличением аккумуляции и приводит к уменьшению размеров ледниковых узлов. Это подтверждается и определенной устойчивостью во времени пространственной структуры оледенения Алтая (см. табл. 2).

Оледенение Алтая во вторую декаду XXI в. сохраняет в целом структуру, соответствующую орографии региона. Можно отметить лишь рост вклада крупных узлов оледенения в общую площадь ледниковой системы Алтая. Это относится к Катунскому, Северо-Чуйскому хребтам и Южному Алтаю. Исключение составляет Южно-Чуй-

Таблица 2. Распределение площади ледников по узлам оледенения Алтая в разные годы

Номер	Название хребта	1850 км ²	1952 км ²	2003 км ²	2018 км ²	1850%	1952%	2003%	2018%
1	Катунский	328.7	281.5	266.9	199	31.1	31.5	32.3	36.3
2	Южно-Чуйский	262.3	220.7	201.8	118.1	24.8	24.7	24.4	21.6
3	Северо-Чуйский	208.2	177.0	164.2	112.8	19.7	19.8	19.9	20.6
4	Южный Алтай	96.7	82.7	77.1	57.20	9.1	9.3	9.3	10.4
5	Табын-Богдо-Ола	39.9	33.4	28.1	20.90	3.8	3.7	3.4	3.8
6	Шапшальский	37.5	29.1	26.3	12.46	3.5	3.3	3.2	2.3
7	Монгун-Тайга	34.0	27.8	25.5	16.50	3.2	3.1	3.1	3.0
8	Караалахинские горы	16.8	13.5	12.2	2.90	1.6	1.5	1.5	0.53
9	Сарымсақты	12.9	10.3	9.3	4.32	1.2	1.2	1.1	0.8
10	Курайский	9.2	7.0	6.4	1.60	0.9	0.8	0.8	0.3
11	Чихачева	4.8	4.0	3.7	1.30	0.4	0.4	0.4	0.2
12	Холзун	1.2	0.9	0.8	0.60	0.1	0.1	0.1	0.1
13	Куркуребажи	0.7	0.5	0.4	0	0.07	0.06	0.04	0
14	Сумультинский	0.5	0.4	0.4	0	0.06	0.05	0.04	0
15	Листвяга	0.5	0.4	0.4	0.2	0.06	0.05	0.04	0.04
В целом		1058.6	892.8	826.8	547.9	100	100	100	100

Таблица 3. Изменения среднегодовой скорости изменений сокращения площади ледников Горного Алтая ΔS (%/год) в разные периоды времени с 1968 по 2017 г.

Название хребта	$\Delta S_{1968-2008}$ (%/год)	$\Delta S_{1968-2017}$ (%/год)	$\Delta S_{2008-2017}$ (%/год)
Катунский	0.47	0.53	0.81
Южно-Чуйский	0.52	0.58	0.87
Северо-Чуйский	0.37	0.52	1.21
Всего	0.46	0.54	0.93

ский хребет. Доля небольших очагов оледенения в общей площади оледенения Алтая незначительно сократилась, так как преобладающие в этих районах маленькие ледники в последнее время тают ускоренными темпами (см. табл. 2).

Данные на разные временные срезы получены по различным методикам и с разной точностью: для 1850 г. реконструкция размеров ледников выполнена по конечным моренам (Окишев, 2011); Каталог ледников СССР предоставляет данные за 1952 г., полученные на основе анализа аэрофото-съёмки и топографических карт, значения площади для 2003 г. получены путём коррекции данных Каталога (1952 г) с учетом темпов деградации оледенения на основе данных дистанционного зондирования для отдельных ледников (Никитин, 2009); снимки высокого разрешения позволили получить наиболее точную картину состояния оледенения Алтая на 2018 г. (Хромова и др., 2021).

Для более корректной оценки изменений площади ледников были проведены специальные исследования (Торопов и др., 2020). Для этого выбра-

ны наиболее изученные и обеспеченные данными дистанционного зондирования узлы оледенения Центрального Алтая – Катунский, Южно- и Северо-Чуйские хребты. Были использованы данные космических съёмок Sentinel-2, выполненных 15 августа 2017 г. Для оценки скорости изменений ледников в пределах этой территории были подобраны космические снимки CORONA (3 сентября 1968 г.) и ALOS PRISM (13 августа 2008 г.). Пространственное разрешение снимков Sentinel-2, CORONA и ALOS PRISM составляет 10, 3 и 2.5 м соответственно.

Результаты исследования космических снимков показывают, что сокращение ледников Горного Алтая наблюдалось на всем протяжении второй половины XX в. и в начале текущего столетия. За период, прошедший после составления Каталога ледников СССР (1952–2018 гг.), ледники российского Алтая сократились на 40%. За 65 лет исчезли 143 ледника, а 108 разделилось на 2–5 частей. Скорость деградации ледников в 2008–2017 гг. увеличилась вдвое (рис. 5). Оледенение трёх основных хребтов Алтая сократилось на 37.7%. Са-

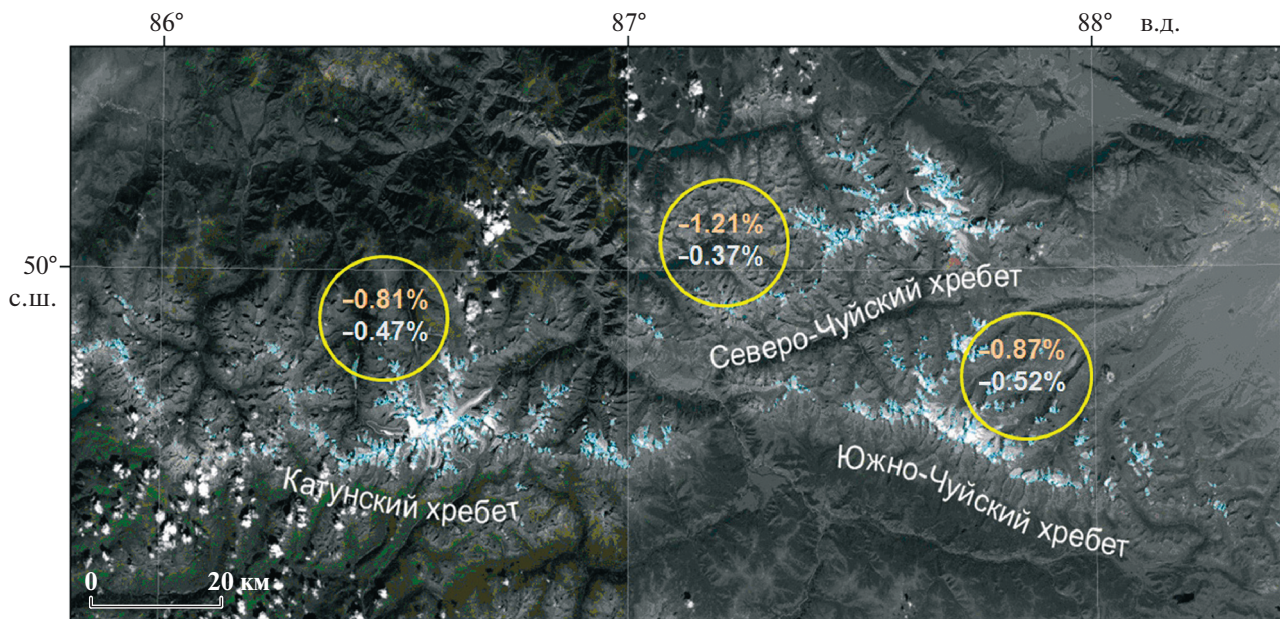


Рис. 5. Изменения скорости сокращения ледников Центрального Алтая с 1968 по 2017 г. (цифры в кружках: белого цвета – 1968–2008 гг., оранжевого цвета – 2008–2017 гг.).

Fig. 5. Changes in the rate of reduction of the Central Altai glaciers from 1968 to 2017 (figures in circles: white – 1968–2008, orange – 2008–2017).

мая большая доля сокращения площади наблюдается в Южно-Чуйском хребте – 46.5%; ледники Северо-Чуйского хребта сократились на 37.7%, а Катунского – на 31.9%. Различия в динамике ледников демонстрируют влияние местных морфологических и климатических особенностей на этот процесс.

Сокращение ледников в горах Алтая согласуется с результатами долгосрочной программы измерения баланса массы на трех ледниках: Малый Актру, Левый Актру и Водопадный (ледник № 125). Эти ледники входят в “эталонную” сеть ледников, где уже более 30 лет измерения баланса массы проводятся в рамках Всемирной службы мониторинга ледников (WGMS 2017). В 2012 г. наблюдения были приостановлены, но ныне запущена программа восстановления наблюдений.

Тенденция усиления таяния ледников хорошо согласуется с наблюдаемым увеличением расхода воды в р. Катунь на 9% в 2008–2017 гг. по сравнению с 1940–1968 гг. (при неизменной сумме осадков). Анализ трендов метеорологических величин на основе стационарных данных и результатов реанализа ERA-Interim показал, что статистически значимое потепление в регионе происходит только в теплое полугодие и не превышает $0.5^{\circ}\text{C}/10$ лет. Вследствие этого турбулентный теплообмен атмосферы с ледниками за последние 40 лет увеличился на $4 \text{ Вт}/\text{м}^2$, что вызвало увеличение за год слоя стаивания на 100 мм в водном эквиваленте (в.э.). Однако основной причиной сокращения

ледников Алтая служит рост приходящей коротковолновой радиации, который составил $5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ за 10 лет и увеличил слой стаивания на 365 мм в.э. в год. Положительный тренд радиационного баланса хорошо согласуется с уменьшением количества общей облачности, что связано с увеличением дивергенции влаги, геопотенциала и ослаблением зональной циркуляции в средней тропосфере (Торопов и др., 2020).

КАМЧАТКА

Полуостров Камчатка расположен в средних широтах, вытянут в меридиональном направлении и соединен с материком к северу от 60° с.ш. сравнительно узким перешейком. Западное побережье полуострова омывает Охотское море, восточное – Тихий океан. Камчатка относится к зоне избыточного увлажнения. Источники поступления осадков – Охотское и Берингово моря. Климатические условия района определяются особенностями атмосферной циркуляции над Беринговым морем и северо-восточной частью Охотского моря. В зимний период здесь развивается антициклоническая деятельность, определяемая Колымским гребнем Сибирского антициклона, а в остальное время господствует активная циклоническая деятельность, обусловленная Алеутским минимумом, достигающая максимума в сентябре и октябре. Отопляющее влияние океана зимой обеспечивает на Камчатке сравнительно высокую среднюю годовую температуру воздуха

(Глазырин и др., 1985). Климатический фон и рельеф полуострова благоприятствуют существованию современного оледенения.

В рамках подготовки каталога ледников России были актуализированы данные о современном состоянии оледенения Камчатки (Хромова и др., 2021). Районы и узлы оледенения Камчатки рассредоточены по большей части полуострова, площадь которого составляет порядка 270 тыс. км². В сочетании с высокой повторяемостью дней с облачностью это делает практически невозможным получение по космическим снимкам информации о пространственном положении границ ледников всей Камчатки за короткий период порядка 1–2 лет. Дополнительно процесс дешифрирования границ ледников усложняется наличием развитой поверхностной морены на ледниках в районах активного вулканизма, что существенно повышает требования к техническим параметрам используемых снимков. Разрешающей способности снимков Sentinel-2, Landsat и ASTER часто недостаточно для качественного дешифрирования границ здешних ледников. Пространственное положение границ большей части (72%) ледников Камчатки было определено в результате дешифрирования снимков Sentinel-2 2016–2019 гг. Границы остальных 28% ледников, расположенных преимущественно в районах активного вулканизма, дешифрировались по широкому спектру спутниковых снимков (WorldView-2, GeoEye-1, Landsat 8, ASTER) 2010–2015 гг. Границы пяти ледников Валагинского хребта были определены по спутниковым снимкам IKONOS 2007 г.

В результате на Камчатке обнаружено 732 ледника общей площадью около 680 км² (Хромова и др., 2021). По данным Каталога ледников СССР в середине XX в. на Камчатке насчитывалось 405 ледников общей площадью 874 км². Исследования оледенения Камчатки в последние годы выявили множество ледников, ранее не зарегистрированных в Каталоге, поэтому прямое сравнение количества и площади ледников с данными современных исследований затруднено. Из 465 ледников северной части Срединного хребта, идентифицированных на современных спутниковых снимках, 216 не были учтены в Каталоге ледников СССР. Площадь оледенения в разных районах Камчатки со времени каталогизации изменялась крайне неравномерно. Так, оледенение Кроноцкого полуострова за 1957–2013 гг. сократилось на 27.6% (Муравьев, 2017), а оледенение вулканического массива Алней-Чашаконджа потеряло за 1950–2010 гг. 19.5% площади. На Ичинском вулкане с 1950 по 2010–2014 гг. площадь ледников практически не изменилась благодаря мощному моренному покрову, бронирующему языки ледников. На Ключевской группе вулканов площадь оледенения по той же причине воз-

росла с 1950 по 2010–2015 гг. на 4.3% (8.7 км²) (А.Я. Муравьев, Я.Д. Муравьев, 2016).

Динамика ледников районов активного вулканизма Камчатки принципиально отличается от динамики ледников районов, удаленных от активных вулканов (например, Кроноцкий полуостров и северная часть Срединного хребта). Изменения ледников, расположенных вблизи активных вулканов, зависят, прежде всего, от вулканической деятельности (Муравьев, 2017). Мы не наблюдаем сокращения площади ледников районов активного вулканизма (Ключевская и Авачинская группы вулканов) в период с середины XX по начало XXI в. Более того, в районе Ключевского вулкана некоторые ледники непрерывно наступают с середины XX в. (например, Эрмана и Богдановича). При этом фронты большинства ледников Ключевской группы вулканов в настоящее время находятся в квазистационарном состоянии (Муравьев, Муравьев, 2016). Это происходит, в первую очередь, благодаря мощной поверхностной морене, сложенной вулканогенным материалом, которая предохраняет языки ледников от поверхностной абляции. По аналогичной причине с 1971 г. почти непрерывно наступает расположенный в Авачинской группе вулканов ледник Козельский (Муравьев, 2020).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена детальная картина изменений ледников в горных районах России, наиболее обеспеченных сведениями о ледниках в XX веке и материалами современных космических съёмок. Для оледенения Кавказа получены данные на временные срезы 1911, 1952, 2000, 2014, 2018 и 2020 г.; для Алтая – на 1850, 1952, 2003 и 2018 г. Для крупных узлов оледенения Центрального Алтая – Катунского, Южно- и Северо-Чуйского хребтов дополнительно на 1968, 2008, 2017 г. В обоих районах выявлено сокращение площади ледников с начала XX в. и ускорение темпов сокращения в начале XXI в. Ледники Кавказа и Алтая уменьшили свои размеры за это время на 46% и 48% соответственно. В среднем ледники Кавказа в XX в. теряли около 0.2% в год, Алтая – 0.15%, а в начале XXI века 1.15 и 1.7% соответственно. Выявлены различия в темпах сокращения площади внутри регионов. Ледники на севере Большого Кавказа имеют относительно меньшую скорость изменения, чем ледники на юге. В восточной части Кавказа за 2000–2020 гг. наблюдалось самое высокое абсолютное сокращение –1.82%/г, в то время как в массиве Эльбрус самое низкое – 0.57%/г. В западном регионе также были несколько более высокие темпы изменений (–1.45%/г).

В горах Алтая самая большая доля сокращения площади (1968–2017 гг.) наблюдается в Южно-Чуйском хребте – 46.5%; ледники Северо-Чуй-

ского хребта сократились на 37.7%, а Катунского — на 31.9%. Различия в динамике ледников демонстрируют влияние местных морфологических и климатических особенностей на этот процесс. Сокращение площади оледенения в обоих регионах проходило на фоне ухудшения метеоусловий, определяющих существование ледников. На Кавказе отмечены повышение летней температуры воздуха и сокращение количества зимних осадков. На Алтае также происходит потепление в летний период, что приводит к увеличению турбулентного теплообмена атмосферы с ледниками, которое в свою очередь вызывает увеличение годового слоя стаивания. В обоих регионах отмечен рост коротковолновой радиации, что вносит существенный вклад в ускорение таяния ледников в последние годы.

Для исследования ледников Камчатки были использованы данные Каталога ледников СССР (1950/1957) и снимки с разных спутников в период 2007–2019 гг. Выявлены ледники, ранее не зарегистрированные в Каталоге ледников СССР. Из 465 ледников северной части Срединного хребта, идентифицированных на современных спутниковых снимках, 216 не были учтены в Каталоге ледников СССР. Площадь оледенения в разных районах Камчатки со времени первой каталогизации изменялась крайне неравномерно, что связано со значительными различиями в морфологии ледников. Ледники вулканических районов увеличили свои размеры или остались стационарными; здесь нет тенденции к сокращению ледников из-за мощной поверхностной морены, состоящей из вулканогенного материала.

Сравнение данных Каталога ледников СССР (по состоянию на 1950–70-е годы) и Каталога ледников России (2017–2019 гг.) показывает сокращение площади оледенения с середины XX в. до конца второй декады XXI в. во всех горных районах России за исключением вулканических областей Камчатки. Сокращение площади находится в диапазоне от 63% (Урал) до 13% (Кодар). Самые крупные ледниковые системы Кавказа, Камчатки и Алтая уменьшили свои площади соответственно на 25, 22 и 39%.

Ускорение темпов сокращения размеров ледников требует совершенствования методов исследования, выбора оптимальных сроков повторных инвентаризаций, которые могут различаться от региона к региону или даже внутри региона в зависимости от трендов скорости изменений ледников. Получение массовых данных в короткие сроки невозможно без усовершенствования методов дешифрирования спутниковых снимков, включая комбинирование автоматизированных и экспертных подходов. Увеличение объемов данных, рост количества информации требуют рас-

ширение информационной инфраструктуры для их хранения и анализа.

Благодарности. В статье использованы результаты, полученные по теме госзадания № FMGE-2019-0004.

Acknowledgments. The paper includes the results obtained in the framework of the following research projects: State assignment № FMGE-2019-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Ред. В.М. Котляков. М.: Российская академия наук, 1997. 392 с.
- Виноградов О.Н.* Завершение работ по созданию Каталога ледников СССР // МГИ. 1984. Вып. 51. С. 10–16.
- Глазырин Г.Е., Муравьев Я.Д., Виноградов В.Н.* О климатическом фоне оледенения Камчатки // Гляциологические исследования. 1985. № 27. С. 51–66.
- Каталог ледников СССР. М.: Л.: Гидрометеоздат, 1965–1982.
- Котляков В.М., Хромова Т.Е., Зверкова Н.М., Чернова Л.П., Носенко Г.А.* Две новые ледниковые системы на северо-востоке Евразии // ДАН. 2011. Т. 437. № 1. С. 108–113.
- Котляков В.М., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Десинев Л.В., Осокин Н.И., Чернов Р.А.* Кармадонская катастрофа: что случилось и чего ждать дальше. М.: Издат. дом “Кодекс”, 2014а. 184 с.
- Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Рототаева О.В., Никитин С.А., Зверкова Н.М.* Современные изменения ледников горных районов России. М., Тов-во научных изданий КМК, 2015. 288 с.
- Котляков В.М., Чернова Л.П., Зверкова Н.М., Хромова Т.Е.* Полтора столетия сокращения ледников Казахстанского и Российского Алтая // ДАН. 2014б. Т. 458. № 6. С. 701–705.
- Ледники и климат Эльбруса / Ред. В.Н. Михаленко. М.; СПб.: Нестор-История, 2020. 372 с.
- Муравьев А.Я.* Колебания ледников Камчатки во второй половине XX — начале XXI вв. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: “Реглет”, 2017. 23 с.
- Муравьев А.Я.* Распределение и морфология современных ледников Камчатки // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 3. С. 325–342.
<https://doi.org/10.31857/S2076673420030043>
- Муравьев А.Я., Муравьев Я.Д.* Колебания ледников Ключевской группы вулканов во второй половине XX — начале XXI века // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 480–492.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4>
- Никитин С.А.* Закономерности распределения ледниковых льдов в Русском Алтае, оценка их запасов и динамика // МГИ. 2009. Вып. 107. С. 87–96.
- Окишев П.А.* Рельеф и оледенение Русского Алтая. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2011. 380 с.
- Подозерский К.И.* Ледники Кавказского хребта // Зап. Кавказского отдела РГО. Кн. 29. Вып. 1. 1911. С. 1–200.

- Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н. Исследование пульсирующего ледника Колка. М.: Наука, 1983. 169 с.
- Рототаева О.В., Носенко Г.А., Керимов А.М., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Никитин С.А., Керимов А.А., Тарасова Л.Н. Изменения баланса массы ледника Гарабаши (Эльбрус) на рубеже XX–XXI вв. Лёд и Снег. 2019; 59 (1): 5–22.
https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-5-22
- 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. Вып. 5. С. 118–130.
- Тронов Б.В. Каталог ледников Алтая // Изв. РГО. 1925. Т. 57. Вып. 2. С. 107–159.
- Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаврентьев И.И. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 341–358.
https://doi.org/10.31857/S2076673421030093
- Чернова Л.П., Хромова Т.Е., Зверкова Н.М., Носенко Г.А., Муравьев А.Я. Гляциологические провинции России и пояс минимальной снежности континента // Лёд и Снег. 2011. № 2 (114). С. 5–11.
- GLIMS – Global Land Ice Measurements from Space // Электронный ресурс.
http://www.glims.org/About/regionoverview (Дата обращения: 11.03.2023)
- Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F. et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century // Nature. 2021. 592. P. 726–731.
https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z
- Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyayeva V. Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries // Regional Environment Change. 2019. No 19. P. 1229–1247.
https://doi.org/10.1007/s10113-018-1446-z
- RGI (The Randolph Glacier Inventory) // Электронный ресурс. https://www.glims.org/RGI/index.html (Дата обращения: 11.03.2023)
- Tielidze L.G., Wheate R.D. The Greater Caucasus Glacier Inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan) // The Cryosphere. 2018. № 12. P. 81–94
https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018
- Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E., Paul F. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020 // The Cryosphere. 2022. V. 16. P. 489–504,
https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M. Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century // Intern. Journ. of Climatology, 2019. V. 39. P. 4703–4720.
- Volodicheva N. The Caucasus. The Physical Geography of Northern Eurasia / Ed. M. Shahgedanova. Oxford: Oxford University Press, 2002. P. 350–376.

Citation: Kotlyakov V.M., Khromova T.Y., Nosenko G.A., Muraviev A.Y., Nikitin S.A. Glaciers in the Russian mountains (Caucasus, Altai, Kamchatka) in the first quarter of the 21st century. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2023, 63 (2): 157–173. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423020114

Glaciers in the Russian Mountains (Caucasus, Altai, Kamchatka) in the First Quarter of the 21st Century

V. M. Kotlyakov^a, T. Y. Khromova^{a, #}, G. A. Nosenko^a, A. Y. Muraviev^a, and S. A. Nikitin^a

^a Institute of geography RAS, Moscow, Russia

[#]e-mail: tkhromova@gmail.com

The conducted studies allowed us to obtain a detailed picture of glaciation changes in the mountain regions of Russia, most provided with information about glaciers in the twentieth century. For the Caucasus glaciation, the data were obtained for the time periods 1911, 1952, 2000, 2014, 2018 and 2020; for Altai – for 1850, 1952, 2003 and 2018. For large glaciation nodes of the Central Altai – Katun, South and North Chuya Ridges additionally for 1968, 2008, and 2017. In both areas, a decrease in the area of glaciers since the beginning of the twentieth century and acceleration of the rate of reduction in the early twenty-first century have been revealed. The glaciers of the Caucasus and Altai reduced their size during this time by 46% and 48%, respectively. On average, in the twentieth century the glaciers of the Caucasus lost about 0.2% of the area per year, in the Altai – 0.15%, and in the early twentieth century 1.15 and 1.7% respectively. To study Kamchatka glaciers, we used data from the Glacier Inventory of the USSR (1950/1957) and images from different satellites in the period 2007–2019. The glaciers that were not previously registered in the Glacier Inventory of the USSR were identified. The greatest number of such glaciers is in the northern part of the Midnight Ridge, where out of 465 glaciers identified on modern satellite images, 216 were not included in the Glacier Inventory of the USSR. The area of glaciation in different regions of Kamchatka has changed extremely unevenly since the first cataloguing, which is associated with significant differences in glacier morphology. Glaciers of volcanic areas increased their size or remained stationary; here there is no tendency for glaciers to decrease due to the thick surface moraine consisting of volcanogenic material. Comparison of data from the Glacier

Inventory of the USSR (as of the 1950s–70s) and the Glacier Inventory of Russia (2017–2019) shows a decrease in glaciation area from the mid-20th century to the end of the second decade of the 21st century in all mountainous regions of Russia except only the volcanic regions of Kamchatka. The area reduction ranges from 63% (Ural) to 13% (Kodar). The largest glacial systems of the Caucasus, Kamchatka and Altai have reduced their areas by 25, 22 and 39%, respectively

Keywords: mountain glaciers, Russia, glacier changes, space images

REFERENCES

- Atlas snezhno-ledovykh resursov mira*. World Atlas of Snow and Ice Resources. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 392 p [In Russian].
- Vinogradov O.N. Completion of works on creation of Catalogue of glaciers of the USSR. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1984. 51: 10–16 [In Russian].
- Glazyrin G.E., Muravyev Ya.D., Vinogradov V.N. On the climatic background of Kamchatka glaciation. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1985, 27: 51–66 [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. Moscow, Leningrad: Hydrometeoizdat, 1965–1982 [In Russian].
- Kotlyakov V.M., Khromova T.E., Zverkova N.M., Chernova L.P., Nosenko G.A. Two new glacial systems in northeastern Eurasia. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2011, 437 (1): 108–113 [In Russian].
- Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Desinov L.V., Osokin N.I., Chernov R.A. *Karmadonskaya katastrofa: chto slychilos i chto zhdet dalshe*. The Karmadon catastrophe: what happened and what to expect next. Moscow: Publishing house “Kodeks”, 2014a: 184 p [In Russian].
- Kotlyakov V.M., Khromova T.E., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Muravyev A.Ya. *Sovremennye izmeneniya lednikov v gornyykh rayonakh Rossii*. Modern changes in glaciers in mountainous regions of Russia. Moscow: KMC Scientific Publishing House, 2015: 288 p [In Russian].
- Kotlyakov V.M., Chernova L.P., Zverkova N.M., Khromova T.E. A century and a half of glacier reduction in the Kazakhstan and Russian Altai *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2014b, 458(6): 701–705 [In Russian].
- Ledniki i klimat Elbrusa*. Glaciers and climate of Elbrus. Moscow: Sankt Peterburg: Nestor-History, 2020: 372 p. [In Russian].
- Muravyev A.Ya. *Kolebaniya lednikov Kamchatki vo vtoroi chasti XX – nachale XXI veka*. Fluctuations of Kamchatka glaciers in the second half of XX – early XXI centuries. D. thesis for the degree of Candidate of Geographical Sciences. Moscow: Reglet, 2017: 23 p. [In Russian].
- Muravyev A.Ya. Distribution and morphology of modern Kamchatka glaciers. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 3(60): 325–342 [In Russian].
<https://doi.org/10.31857/S2076673420030043>
- Muravyev A.Ya., Muravyev Ya.D. Fluctuations of glaciers of the Klyuchevskaya group of volcanoes in the second half of XX – the beginning of XXI centuries. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016. 4 (56): 480–492 [In Russian].
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4>
- Nikitin S.A. Regularities of distribution of glacial ice in the Russian Altai, assessment of its reserves and dynamics *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2009, 107: 87–96 [In Russian].
- Okishev P.A. *Relief i oledenenie Rossiiskogo Altaya*. Relief and glaciation of the Russian Altai. Tomsk: Publishing house of Tomsk State University, 2011: 380 p. [In Russian].
- Podozersky K.I. *Ledniki Kavkazskogo khrehta*. Glaciers of the Caucasus Range. Notes of the Caucasian department of the Russian Geographical Society Book 29. V. 1. 1911: 1–200 [In Russian].
- Rototaev K.P., Khodakov V.G., Krenin A.N. *Issledovanie pulsiruyushchego lednika Kolka*. Study of the pulsating Kolka glacier. Moscow: Nauka, 1983: 169 p. [In Russian].
- Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Kerimov A.M., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I., Nikitin S.A., Kerimov A.A., Tarasova L.N. Changes of the mass balance of the Garabashy Glacier, Mount Elbrus, at the turn of 20th and 21st centuries. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019. 1 (59): 5–22 [In Russian].
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-5-22>
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Nosenko G.A., Khromova T.E., Nikitin S.A. Modern degradation of mountain glaciation of Altai, its consequences and possible causes. *Meteorologia i gidrologia*. Meteorology and hydrology. 2020, 5: 118–130 [In Russian].
- Tronov B.V. *Katalog lednikov Kavkaza*. Catalogue of glaciers of Altai. *Izvestiya RGO*. V. 57. Issue. 2. 1925: 107–159 [In Russian].
- Khromova T.E., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muravyev A.Ya., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I. New Catalogue of Russian Glaciers by Satellite Data (2016–2019). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021. 3 (61): 341–358 [In Russian].
<https://doi.org/10.31857/S2076673421030093>
- Chernova L.P., Khromova T.E., Zverkova N.M., Nosenko G.A., Muravyev A.Ya. Glaciological provinces of Russia and the belt of minimum continental snowiness. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2011. 2 (114): 5–11 [In Russian].
- GLIMS – Global Land Ice Measurements from Space. Retrieved from: <http://www.glims.org/About/regionoverview> (Last access: 11 March 2023)
- Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant L., Brun F. et al. Accelerated global glacier mass loss in the early

- twenty-first century. *Nature*. 2021, 592: 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyayeva V.* Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries. *Regional Environment Change*. 2019, 19: 1229–1247. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1446-z>
- RGI (The Randolph Glacier Inventory) Retrieved from: <https://www.glims.org/RGI/index.html> (Last access: 11 March 2023).
- Tielidze L.G., Wheate R.D.* The Greater Caucasus Glacier Inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan). *The Cryosphere*. 2018, 12: 81–94. <https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>
- Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E., Paul F.* Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020. *The Cryosphere*. 2022, 16: 489–504. <https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022>
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century. *Intern. Journ. of Climatology*. 2019, 39: 4703–4720.
- Volodicheva N.* The Caucasus. *The Physical Geography of Northern Eurasia* Ed. M. Shahgedanova. Oxford: Oxford University Press, 2002: 350–376.