

# Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.324.6

doi: 10.31857/S2076673421030093

## Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.)

© 2021 г. Т.Е. Хромова\*, Г.А. Носенко, А.Ф. Глазовский, А.Я. Муравьев,  
С.А. Никитин, И.И. Лаврентьев

Институт географии РАН, Москва, Россия  
\*tkhromova@gmail.com

## New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019)

T.Y. Khromova\*, G.A. Nosenko, A.F. Glazovsky, A.Y. Muraviev, S.A. Nikitin, I.I. Lavrentiev

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
\*tkhromova@gmail.com

Received April 4, 2021 / Revised May 16, 2021 / Accepted June 25, 2021

**Keywords:** *glacier inventory of Russia, 2016–2019, glacial changes, space images.*

### Summary

The new Inventory of the Russian glaciers has been created at the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences mainly on the basis of the Sentinel 2 satellite images for 2016–2019 with the aim of assessing the current state of glacier systems and as a basis for monitoring and re-inventorying. Delineation of glacier outlines was manually made to reduce uncertainties, especially for small glaciers. The database structure is compatible with the global and national glacier archives and includes the main glacial parameters. Additionally a classification of possible catastrophic phenomena of glacial genesis was developed: dynamically unstable glaciers, glacier lakes, icebergs, etc. The data base is available online ([www.glacrus.ru](http://www.glacrus.ru)). At present, there are 22 glacial systems in Russia with a total area of 54,518 km<sup>2</sup>. The largest glacial systems by area are located in the Arctic archipelagos: Novaya Zemlya, Severnaya Zemlya, and Franz Josef Land. The glacial systems of the Caucasus, Kamchatka, and Altai are the largest by area in the continental part of Russia. The main group consists of 13 small glacial systems, the area of which does not exceed 100 km<sup>2</sup>. They are located in different glaciological zones: from the De Long Islands in the Arctic to the Eastern Sayan in southern Siberia. Since the compilation of the USSR glacier Inventory (1965–1982), the area of glaciers has decreased by 5,594 km<sup>2</sup>, or 9.3%. The area of polar glaciers has decreased in smaller degree than that of glaciers in mountainous regions. The results of our research confirm the trend of reducing the area of glaciers throughout the Russian territory. The magnitude and rate of changes depend on local climatic and orographic features. The exception is the glaciers of the volcanic regions of Kamchatka, the area of which has increased or remained unchanged.

**Citation:** Khromova T.Y., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraviev A.Y., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I. New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (3): 341–358. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421030093.

*Поступила 4 апреля 2021 г. / После доработки 16 мая 2021 г. / Принята к печати 25 июня 2021 г.*

**Ключевые слова:** *Каталог ледников России, 2017–2019 гг., изменения ледников, космические изображения.*

Создан Каталог ледников России на основе спутниковых снимков Sentinel-2 (2016–2019 гг.) ([www.glacrus.ru](http://www.glacrus.ru)). Он содержит информацию о 22-х ледниковых системах общей площадью 54 518 км<sup>2</sup>. По сравнению с Каталогом ледников СССР (1965–1982 гг.) площадь ледников на территории России уменьшилась на 5594 км<sup>2</sup>, или на 9,3%. Величина и скорость изменений в разных районах сильно отличаются и зависят от местных климатических и орографических особенностей.

### Введение

Состояние ледников остаётся на повестке дня научных исследований и привлекает интерес общественности. Изменения ледников – на-

глядное следствие климатических реформаций. Они также играют важную индикационную роль. Как на локальном, так и на региональном уровнях этот процесс ведёт к изменению ландшафтов и активизации разрушительных при-

родных явлений, что серьёзно влияет на хозяйственную деятельность и нарушает привычный уклад жизни местных жителей. Всё это формирует запрос на актуальные данные о состоянии ледниковых систем.

Оценки и прогнозы изменения ледников требуют интеграции всех доступных методов исследования: дистанционных наблюдений с использованием спутниковых и аэроснимков; прямых наблюдений с помощью полевых измерений; численного моделирования. Мониторинг и каталогизация играют важную роль в комплексных исследованиях ледников и представляют собой быстро развивающиеся направления исследований. Актуальные границы ледников позволяют снизить неопределённости в гляциологических и климатических расчётах, оценить тенденции изменений ледников и связь их с изменениями климата. Международные проекты аккумулируют данные о ледниках на глобальном уровне. В XX в. такие работы были инициированы в рамках Гидрологического десятилетия. Результатом стал Мировой каталог ледников (WGI) ([https://nsidc.org/data/glacier\\_inventory/](https://nsidc.org/data/glacier_inventory/)). Международная служба мониторинга ледников (WGMS) собирает данные о балансе массы и изменениях положения фронта отдельных ледников (<https://wgms.ch/>). Международный проект «Измерение глобального льда из космоса» (GLIMS) (<https://www.glims.org/>) систематизирует данные о ледниках, полученные по материалам космических съёмки. Наряду с глобальными базами данных, активно создаются Национальные кадастры ледников, среди которых – Каталоги ледников Швейцарии, Австрии, Франции [1, 2], Норвегии [3, 4], Новой Зеландии [5] и др.

В России обширное покровное оледенение присутствует на островах и архипелагах Арктической зоны и в горных районах континентальных областей. До настоящего времени первой и единственной системной оценкой оледенения на этой территории был Каталог ледников СССР (1965–1982 гг.), по данным которого в середине XX в. на территории России насчитывалось 8538 ледников общей площадью 60 099,71 км<sup>2</sup> [6]. Уже после издания Каталога ледников СССР в конце 1990-х в ряде районов Севера и Северо-Востока России были исследованы и каталогизированы ранее неизвестные ледники – 252 ледника общей площадью 69,16 км<sup>2</sup> [7].

В последнее время для исследования ледников активно используют данные дистанционного зондирования, позволяющие анализировать состояние объектов в труднодоступных районах. К настоящему времени территория России обеспечена результатами таких исследований неравномерно. Данные отдельных исследований доступны на сайте Международного проекта «Глобальные измерения наземного льда из космоса» (<https://www.glims.org/>) и Всемирного каталога ледников RGI (The Randolph Glacier Inventory) (<https://www.glims.org/RGI/index.html>). В этих базах данных представлены результаты дешифрирования спутниковых снимков, включая дату, вид и разрешение съёмки, площадь, периметр и высотные параметры ледников.

Один из самых обеспеченных такой информацией ледниковых районов на территории России – Кавказ, для которого представлены данные, полученные российскими и грузинскими исследователями методом экспертного дешифрирования по снимкам ASTER 2001–2004 и Landsat 1985–1987, 2011–2014. Для ряда ледниковых районов России представлены данные американских и канадских учёных. Это – результаты автоматического дешифрирования снимков Landsat, полученных в разное время за период 2000–2013 гг., которые превышают число ледников и площадь оледенения в районах широкого распространения крупных многолетних снежников и снежников-перелетков и недооценивают площади оледенения районов, где на ледниках развита поверхностная морена. Исследователи использовали космические снимки разного разрешения, полученные в разное время. Разными были методы и подходы к процессу дешифрирования, а также анализу полученных результатов, что существенно затрудняет сравнительную оценку современного состояния ледниковых районов. Сложилась ситуация, когда, несмотря на постоянно увеличивающийся объём информации из космоса и экспериментальные исследования в ряде ледниковых районов, полной и достоверной картины состояния оледенения на территории России на начало XXI в. до настоящего момента не было.

Для оценки современного состояния ледниковых систем на территории России и их изменений в Институте географии РАН был создан Каталог ледников, основанный на единых ис-

ходных данных, подходах и методах обработки спутниковых снимков, а также организации данных с использованием геоинформационных технологий. Этот Каталог аккумулирует результаты анализа снимков Sentinel-2, полученных в основном в 2016–2019 гг., и представляет собой информационную основу для дальнейшего исследования ледниковых районов России.

### Данные и методы

При создании каталога использовались данные дистанционного зондирования ледников из космоса, которые в настоящее время служат эффективным инструментом получения информации о положении границ ледников и границы питания, высоте поверхности и наличии моренного покрова, а также динамике этих показателей во времени. Основным массивом данных были снимки со спутника Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м за 2016–2019 гг., свободные от облачности и полученные в конце периода абляции. Погрешности определения площадей ледников оценивались путём построения вдоль границ ледников буферной зоны, шириной в размере удвоенного значения пространственного разрешения спутниковых снимков. В сложных случаях привлекались дополнительные данные более высокого разрешения (WorldView-2, GeoEye). При отсутствии снимков Sentinel-2 надлежащего качества использовались иные спутниковые снимки за годы, близкие к основному периоду исследований (Landsat, ASTER). Границы ледников по спутниковым снимкам дешифрировали в ручном экспертном режиме, так как автоматическое дешифрирование, особенно в районах распространения малых ледников, даёт результаты с большой степенью неопределённости. Работа с данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) велась в программных продуктах ESRI ArcGIS и QGIS. Все данные ДЗЗ в ходе работы регистрировались в проекции UTM соответствующей зоны на эллипсоиде WGS 1984.

Одна из важных мотиваций проекта состоит в том, что происходящие изменения ледников активизируют разрушительные природные явления. Поэтому были выделены потенциальные источники катастрофических явлений гляциального генезиса, включая нестабильные ледники,

айсбергообразование, ледниковые озёра. Нестабильные ледники выделяли на основе визуального определения основных признаков, включая характерную структуру поверхности и конфигурацию поверхностных морен [8]. Основным фактором потенциального айсбергообразования – положение фронта ледника в море [9]. Наличие приледникового озера устанавливалось визуально в процессе дешифрирования контура ледника. Специальные исследования по оценке размеров озёр, морфометрических характеристик плотин и подпруд проведены для определения потенциальной опасности прорыва приледниковых озёр для Кавказа и Алтая с использованием разработанных ранее методов [10–12].

Полученные в результате дешифрирования границы ледников представляют собой основу формируемой базы данных. В рамках проекта была разработана структура базы данных «Ледники России». Ледникам, сведения о которых вошли в Мировой каталог ледников (WGI), присваивался соответствующий номер. Эксперт оценивал соответствие конкретного ледника на снимке и его аналога в WGI. Этот номер играет важную роль при дальнейшем анализе информации, так как служит связующим звеном с такими международными базами данных о ледниках, как WGI, база данных проекта GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) (<https://www.glims.org/>), Всемирный каталог ледников RGI (The Randolph Glacier Inventory) (<https://www.glims.org/RGI/index.html>).

Морфологический тип ледника определяется экспертом по изображению на космическом снимке с учётом разработанной ранее классификации [13, 14] и информации в Каталоге ледников СССР. Результат экспертной оценки – это также информация о том, является ли ледник пульсирующим, где ледник заканчивается, имеет ли приледниковые и подпруженные озёра. Площадь и периметр контуров определяли в автоматическом режиме в среде ArcGIS. Для выяснения высотного положения и экспозиции ледников использовали цифровые модели рельефа (ЦМР). Положение высших и низших точек ледников, а также их среднюю и медианную (высота 50% распределения площадей) высоту находили с помощью инструментария программного пакета QGIS путём автоматизированного анализа ячеек ЦМР в пределах границ ледников. Положение

фирновой линии на снимке определяли вручную. Экспозицию ледников диагностировали с помощью автоматизированного анализа растровых изображений экспозиции поверхности, созданных из ЦМР, в QGIS и ArcGIS. Полученные данные об экспозиции представляют собой медианное значение ориентации (азимут в градусах) всех ячеек ЦМР в пределах границ ледника. Подобный подход отличается существенно меньшей субъективностью по сравнению с методом определения экспозиции ледников, основанным на экспертной оценке.

Мозаика ЦМР ArcticDEM версии 3.0 с пространственным разрешением 2 м (10 м для крупных ледников арктических архипелагов) была использована в процессе обработки большей части результатов дешифрирования границ ледников. Для районов, не входящих в зону покрытия ArcticDEM v3.0, и участков в зоне покрытия ArcticDEM v 3.0 с пробелами в данных использовались ЦМР ASTER GDEM3, ASTER GDEM2 и SRTM4.

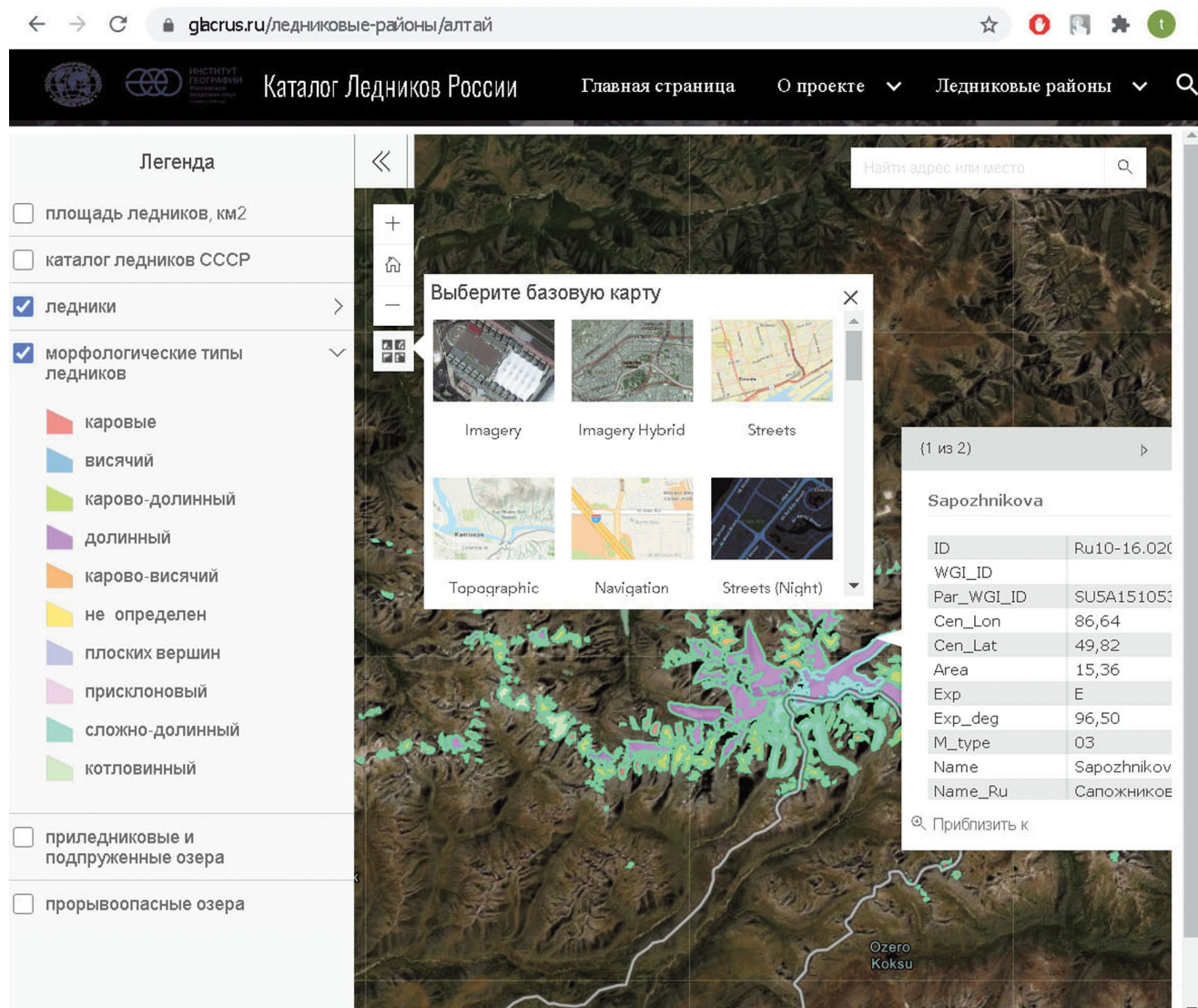
## Результаты

**Структура и содержание базы данных.** Электронная База данных «Ледники России» состоит из набора полигональных шейп-файлов, содержащих данные о пространственном положении границ ледников и таблицу атрибутивных данных в формате dBASE. Пространственные данные представлены в географических координатах на эллипсоиде WGS 1984. Сведения о пространственном положении границ ледников получены в результате дешифрирования спутниковых снимков, выполненного вручную в соответствии с основными положениями методики Международного проекта GLIMS [15]. Данные о положении фронта, длине, площади, объёме, экспозиции, максимальной и минимальной высоте, морфологическом типе и потенциальных рисках хранятся в качестве атрибутивной информации для каждого ледника в соответствующей базе данных. Всего в атрибутивной таблице представлено 30 позиций. 12 параметров несут информационный характер. Сюда входят цифровые идентификаторы и названия каждого ледника, сведения о снимках, по которым проводилось дешифрирование, данные ЦМР. Две позиции заняты значениями координат центральной точки ледника.

Геометрическим (площадь, периметр) и высотным (максимальные, средние, минимальные высоты и т.п.) параметрам отведено 12 позиций. Соответствующее место в базе данных занимает информация о морфологическом типе ледника, экспозиции, положении фронта, наличии приледниковых озёр. Полностью структура атрибутивной таблицы размещена на сайте Каталога ледников России ([www.glacrus.ru](http://www.glacrus.ru)).

**Интернет-ресурс «Каталог ледников России».** Для визуализации базы данных и организации доступа к информации создан сайт «Каталог ледников России» ([www.glacrus.ru](http://www.glacrus.ru)). Данные о ледниках, полученные в результате дешифрирования спутниковых изображений, хранятся в ГИС в виде векторных слоёв. Визуализация и доступ к базе данных организуется на платформе ArcGIS online. На главной странице дано название сайта, описание разделов сайта, организован доступ к разделам и страницам сайта. Раздел «О ПРОЕКТЕ» содержит краткую информацию о проекте, методах и используемых материалах, описание содержания и структуры базы данных, пояснения к страницам ледниковых районов. Раздел «ЛЕДНИКОВЫЕ РАЙОНЫ» обеспечивает доступ к страницам ледниковых районов. Для каждого ледникового района создана отдельная страница (рис. 1). При открытии страницы из ArcGIS online загружается интерактивная карта района. Легенда к карте открывается при нажатии курсором на стрелки в левом верхнем углу карты. Слои включаются и выключаются нажатием на квадрат слева от названия слоя и представляют собой визуализацию соответствующих полей атрибутивной таблицы. Условные знаки визуализируются нажатием стрелки справа от названия слоя. Возможен выбор фонового изображения нажатием на иконку под кнопками «увеличить/уменьшить». Атрибутивная таблица для каждого ледника открывается во всплывающем окне нажатием курсора на конкретный ледник на карте.

Основные картографические слои, представленные на сайте, – контуры ледников по результатам дешифрирования космических снимков, полученных в основном в 2016–2019 гг., морфологические типы ледников, площадь ледников, наличие приледниковых и подпруженных озёр, присутствие нестабильных (пульсирующих) ледников. Точечный слой «Каталог ледников



**Рис. 1.** Страница ледникового района «Алтай» на сайте «Каталога ледников России».

Показана интерактивная карта района оледенения. Слева – легенда к карте. Галочками отмечены активные слои. Зелёный контур – границы ледников. Фоном показаны морфологические типы ледников. Справа в поле карты приведена информация из атрибутивной базы данных для выделенного ледника. В центре показана возможность выбора фоновой карты. [www.glacrus.ru](http://www.glacrus.ru)

**Fig. 1.** Page of the glacial region «Altai» on the website of «The Glacier Inventory of Russia».

An interactive map of the glacier area is shown. On the left a legend for the map is shown. Active layers are marked with checkmarks. The green lines show the glaciers outlines. The morphological types of glaciers are shown in color. On the right, in the table information from the attribute database for the highlighted glacier is shown. The table in the center shows the ability to select a background map. [www.glacrus.ru](http://www.glacrus.ru)

СССР» представляет собой информацию о ледниках по состоянию на вторую половину XX в. На дополнительных страницах даётся информация о природных особенностях района и истории исследования ледников. Ледниковые районы приведены в алфавитном порядке. Краткая информация о ледниках, полученная в рамках проекта, дана под интерактивной картой района.

### Ледниковые системы на территории России

По результатам проведённых исследований в настоящее время на территории России находится 22 ледниковые системы. Обширное покровное оледенение присутствует в Арктической зоне на архипелагах Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), Новая Земля и Северная Земля.

## Ледниковые системы на территории России по состоянию на вторую декаду XXI в.

№ п/п	Ледниковая система	Общее число ледников	Площадь ледников, км <sup>2</sup>	Средние высоты ледников, м над ур. моря			Преобладающий морфологический тип (по числу ледников)	Преобладающая экспозиция (по числу ледников)	Приледниковые озёра (число)	Нестабильные ледники (число)	Айсбергообразующие ледники (число)	Спутник и год съёмки
				минимальные	максимальные	средние						
1	Земля Франца-Иосифа и о. Виктория	555	12 530±328	0	641	209	Ледниковые купола, выводные ледники	Юг, юго-восток	0	0	257	Landsat-8 2016 г.
2	Новая Земля	729	22 241±417	0	1280	542	Долинные, ледниковые купола, выводные ледники	Восток, юго-восток, северо-восток	41	27	42	Sentinel-2 2019 г. Landsat 2019 г.
3	О. Ушакова	4	283,1±1,5	0	320	145	Ледниковые купола	—	0	0	4	Sentinel-2 2020 г.
4	Северная Земля	226	16 775±85	0	730	394	Ледниковые купола, выводные ледники	Юг, юго-восток, восток	38	1	58	Sentinel-2 2019—2020 гг.
5	Острова Де-Лонга	20	65,2±2,1	0	420	153	Ледниковые купола	—	0	0	4	Sentinel-2 2018 г. Landsat-8 2018 г.
6	Урал	97	10,4±1,7	400	1440	833	Присклоновые, каровые	Восток, северо-восток, юго-восток	38	0	0	Sentinel-2 2018 г.
7	Плато Путорана	71	11,4±1,7	320	1540	890		Северо-восток	17	0	0	Sentinel-2 2018—2019 гг.
8	Горы Бырранга	213	29,9±4,4	180	1110	722	Присклоновые	Восток, северо-восток	9	0	0	Sentinel-2 2019 г.
9	Хр. Орулган	72	9,8±1,1	1660	2060	1860	Каровые, карово-долинные	Северо-восток	0	0	0	Sentinel-2 2018 г.
10	Хр. Черского	188	86,4±7,7	1540	2980	2108	Каровые, висячие, долинные	Северо-восток, восток	0	0	0	Sentinel-2, 2016—2017 гг. Landsat-8 2014—2016 гг. ASTER 2017 г.
11	Хр. Сунгар-Хаяга	251	133,0±10,1	2130	2760	2428	Каровые, карово-висячие	Запад, северо-запад	4	0	0	Sentinel-2 2018 г.
12	Кольмское нагорье	39	6,6±0,7	490	1830	906		Запад, восток	0	0	0	Sentinel-2 2016—2019 гг.
13	Корякское нагорье	890	296,3±26,5	190	2420	845	Каровые, карово-долинные	Запад, северо-запад	158	0	0	Sentinel-2 2018—2019 гг.
14	Чукотское нагорье	63	16,0±1,4	160	1110	541		Запад, восток	21	0	0	Sentinel-2 2017—2019 гг.
15	Кавказ	2046	1067,1±79,7	1690	5650	3353	Каровые, висячие, карово-висячие	Северо-восток, северо-запад	1830	23	0	Sentinel-2 2017—2018 гг.
16	Алтай	988	523,1±38,3	2050	4480	3000	Каровые, висячие, карово-висячие	Северо-восток, северо-запад, восток	640	0	0	Sentinel-2 2016—2019 гг.

17	Кузнецкий Алатау	101	3,4±0,9	1180	2080	1480	Присклоновые	Восток, северо-восток	34	0	0	Sentinel-2 2018–2019 г.
18	Восточный Саян	78	12,9±1,5	1480	3460	2374	Каровые, присклоновые	Восток, северо-восток	19	0	0	Sentinel-2 2018–2019 г.
19	Байкальский хребет	8	0,62±0,04	1490	2200	1853	Каровые	Восток, юго-восток	1	0	0	WorldView-2 2012 г.
20	Баргузинский хребет	1	0,09±0,01	1990	2160	2075	Карово-долинные	Северо-восток	1	0	0	Sentinel-2 2018 г.
21	Хр. Кодар	39	16,2±1,2	1860	2710	2230	Карово-долинные, каровые	Восток	20	0	0	Sentinel-2 2019 г.
22	Камчатка	732	682,8±29,0	330	4510	1555	Каровые, склоновые	Северо-запад, запад	18	2	0	Sentinel-2 2016–2019 гг., WorldView-2 2010–2014 гг., GeoEye-1 2011–2013 гг., ASTER 2012–2013 гг., Landsat-8 2013–2015 гг., IKONOS 2007 г.
<b>Всего</b>		<b>7411</b>	<b>54 518</b>						<b>2889</b>	<b>53</b>	<b>365</b>	

Льдом покрыты о. Ушакова и острова Де-Лонга. В континентальной части России находится 18 горно-ледниковых систем, 12 из которых питаются влагой Атлантики, а шесть – влагой, поступающей с Тихого океана [7]. Восемь ледниковых систем, расположенных на Камчатке, Кавказе, Алтае, Кузнецком Алатау, Восточном Саяне, Кодаре, Баргузинском и Байкальском хребтах, лежат в умеренной зоне, а другие девять ледниковых систем, располагающиеся в горах Урала, на плато Путорана, в горах Бырранга, хребтах Орулган и Черского, горах Сунтар-Хаята, Корякском, Чукотском и Колымском нагорьях, относятся к субарктической зоне [16]. Выполненные исследования позволили оценить основные параметры современных ледниковых систем на территории России (таблица).

**Площадь ледников.** По результатам дешифрирования космических снимков, полученных преимущественно в 2016–2019 гг., общая площадь оледенения на территории России в настоящее время составляет 54 518 км<sup>2</sup> (рис. 2). Согласно принятым подходам к классификации ледников, эту площадь занимают 7411 ледников. Самая крупная по площади ледниковая система расположена на архипелаге Новая Земля (22 241 км<sup>2</sup>). За ней идут Северная Земля (16 775 км<sup>2</sup>) и Земля Франца-Иосифа (12 530 км<sup>2</sup>). Следующая по размеру ледниковая система находится в горах Кавказа и занимает площадь 1067,1 км<sup>2</sup>. В настоящей работе мы рассматриваем ледниковую систему Кавказа как единый природный объект без учёта государственных границ для сохранения целостной картины оледенения, необходимой в гляциологических исследованиях. В диапазон от 500 до 1000 км<sup>2</sup> по площади попали два ледниковых района – Камчатка (682,8 км<sup>2</sup>) и Алтай (523,1 км<sup>2</sup>). Площадь оледенения Катунского хребта на Алтае, в настоящее время разделённого государственной границей, также подсчитана для всего хребта в целом. Площадь ледников на арктическом о. Ушакова (283,1 км<sup>2</sup>), в горах Сунтар-Хаята (133 км<sup>2</sup>) и Корякском нагорье (254,1 км<sup>2</sup>) примерно одного порядка и находится в диапазоне от 100 до 300 км<sup>2</sup>.

Самая многочисленная группа – небольшие ледниковые системы, площадь которых не превышает 100 км<sup>2</sup>. Они расположены в разных широтных зонах: в арктической – острова Де-Лонга (65,2 км<sup>2</sup>); в субарктической – Урал (10,4 км<sup>2</sup>), плато Путорана (11,4 км<sup>2</sup>), горы Бырранга (29,9 км<sup>2</sup>), хр. Черского (86,4 км<sup>2</sup>), Чукотское нагорье (16 км<sup>2</sup>), северо-восток Корякского нагорья (42,2 км<sup>2</sup>); в умеренной зоне – хр. Кодар (16,2 км<sup>2</sup>), Восточный Саян (12,9 км<sup>2</sup>). Оставшиеся четыре района

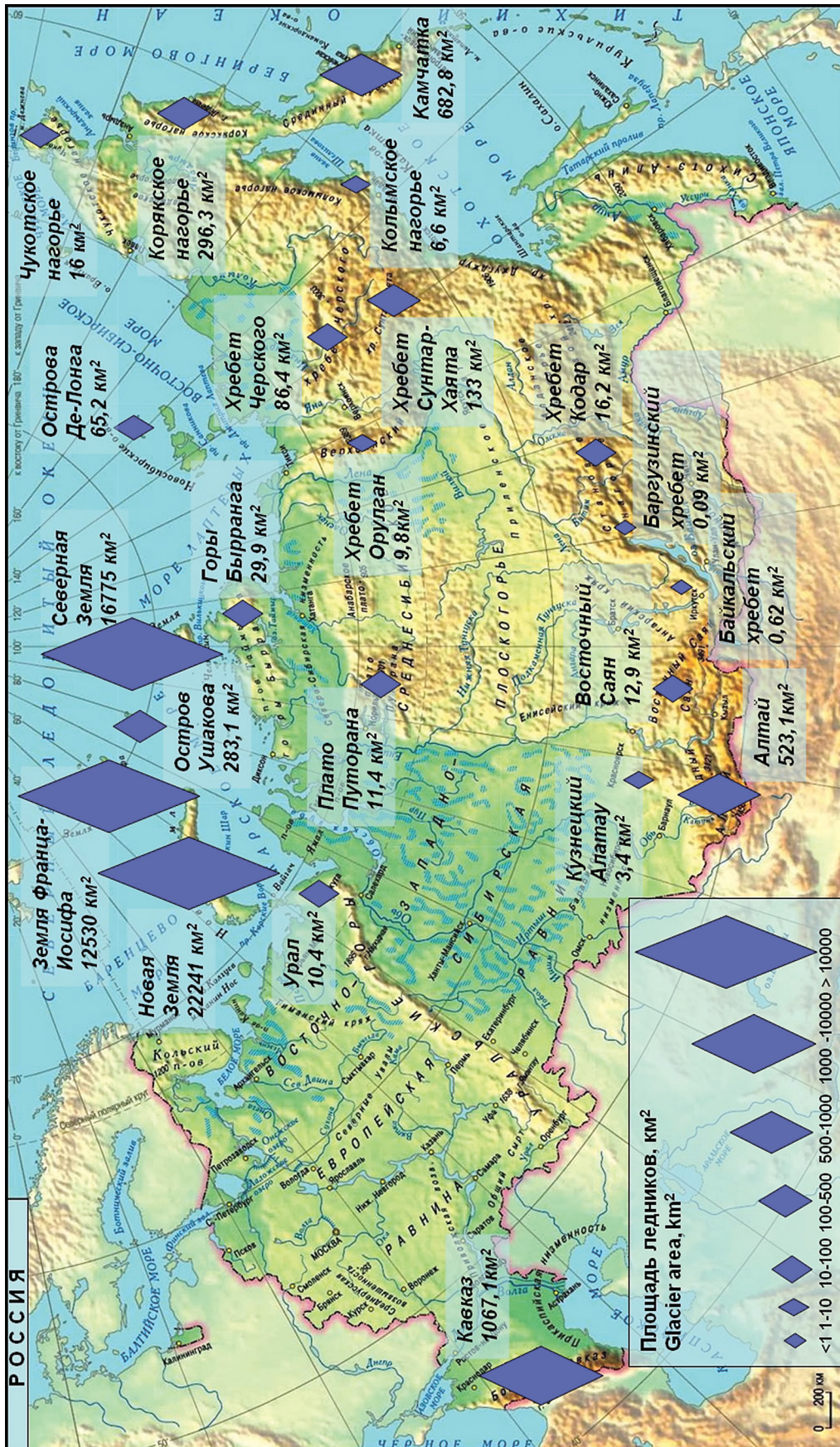


Рис. 2. Площадь ледников России, 2016–2019 гг.  
Fig. 2. Glacier area in Russia, 2016–2019



характеризуются самыми маленькими по площади ледниковыми системами. Это — хр. Орулган и Колымское нагорье на Северо-Востоке России, Кузнецкий Алатау на юге Западной Сибири и Баргузинский и Байкальский хребты в Прибайкалье. Несмотря на незначительные размеры, эти ледниковые системы имеют существенное индикаторное значение, фиксируя зону распространения оледенения на исследуемой территории.

Карты распределения ледников по площади, представленные на сайте «Ледники России», позволяют оценить структуру ледниковых систем. Изменение соотношения числа ледников разной площади отражает изменение типа ледниковой системы от арктических систем с преимущественно покровным типом оледенения к горному долинно-каровому и далее к карово-долинному и карово-висячему [16]. Так, площадь ледников архипелага Новая Земля колеблется от 0,01 до 1412 км<sup>2</sup>. По числу (416) преобладают ледники, площадь которых не превышает 50 км<sup>2</sup>. Вместе с тем основную площадь занимают ледники размером более 100 км<sup>2</sup>; так, площадь одного из них превышает 1000 км<sup>2</sup>. Если рассматривать ледниковые купола и слившиеся ледники как одно ледниковое тело, то картина изменится в пользу ледниковых образований большой площади. Это относится и к другим арктическим островам и архипелагам.

Горные ледниковые системы в континентальной части России представлены преимущественно небольшими ледниками. Основное число ледников (744) на территории российского Алтая — ледники площадью от 0,01 до 1 км<sup>2</sup>. В диапазоне от 15 до 21 км<sup>2</sup> находятся только четыре ледника. На Кавказе 1829 ледников из 2046 имеют площадь от 0,01 до 1 км<sup>2</sup>. Площадь ледников на Урале колеблется от 0,01 до 0,59 км<sup>2</sup>. Аналогичная ситуация и в ледниковых системах хребтов Черского, Сунтар-Хаята, Орулган, Кодар, Восточного Саяна, Корякского нагорья, Колымского нагорья, Чукотского нагорья. Площадь наибольшего числа ледников там лежит в диапазоне от 0,01 до 0,5 км<sup>2</sup>.

**Экспозиция ледников.** Индикатором направления переноса влаги, а точнее направления ветров, при которых происходит выпадение твёрдых осадков, может служить экспозиция ледников. Сведения о ней приводятся в соответствующем поле таблиц базы данных. В континентальных ледниковых системах преобладают северные и северо-восточные экспозиции как по площади, так и по числу ледников. Восточная экспозиция ледниковых систем Полярного Урала, хребтов Орулган и Кодара свидетельствует о питании при западных ветрах. Экспозиция ледников хребтов Черского и Сунтар-Хаята — о южных ветрах с Охотского моря при выпадении осадков. Оледенение Срединного хребта на Камчатке относительно равномерно распределено между восточными и западными экспозициями, что показывает примерно равное питание с Охотского и Берингова морей. Вместе с тем на юго-восточной Камчатке преобладает питание с востока. Ледниковые системы Алтая и Восточного Саяна имеют максимумы распределения оледенения на северо-востоке, отражая питание при юго-западных ветрах. Орографические особенности района также влияют на распределение оледенения по экспозициям. Например, на Новой Земле преобладание ледников северо-западной и юго-западной экспозиций определяется орографией. На Земле Франца-Иосифа оледенение в целом смещено на юго-восток, а на Новой Земле — на северо-запад. Распределение ледников по экспозициям даёт гораздо более верное представление о распределении ветров и переносе влаги, чем наблюдения на метеостанциях, где поле ветра искажается рельефом [16].

**Морфологические типы ледников.** Карты морфологических типов ледников позволяют оценить существующее в настоящее время их морфологическое разнообразие. По численности практически во всех ледниковых районах континентальной России доминируют каровые ледники. Так, на Кавказе по численности преобладают небольшие каровые и карово-висячие ледники. За ними идут долинные, карово-долинные и висячие. Наибольшие по площади ледники на Кавказе — сложно-долинные и ледники конических вершин; в пределах российской части Алтая наиболее распространены каровые и висячие ледники. Следующие по численности — карово-долинные и долинные, присутствует небольшое число карово-висячих и ледников плоских вершин. Редко встречаются присклоновые, котловинные, сложно-долинные ледники. На Урале также преобладают каровые ледники. За ними по численности следуют присклоновые, есть также карово-висячие и карово-долинные.

На карте морфологических типов ледников Камчатки хорошо видны особенности оледенения района, связанные с вулканической деятельностью. Наряду с часто встречающимися типами ледников — каровыми, карово-долинными и склоновыми, долинными и висячими, появляются ледники барранкосов, подножий, атрио, атрио-долинных, кальдерно-долинных, кратерные, кальдерные и т.п. В арктической зоне на архипелагах преобладают ледниковые купола. Исключение составляет Новая Земля, где также развито оледенение горного типа. Там существует много долинных ледников. По классификации, основанной на распределении морфологических типов по площади, оледенение Земли Франца-Иосифа и Новой Земли относится к покровно-сетчатому, Северной Земли и о. Ушакова — к покровному [16].

**Нестабильные ледники.** Кроме обычных ледников, колебания которых обусловлены изменениями климата, в ледниковых системах на территории России существуют нестабильные ледники. Режим нестабильных ледников (в том числе пульсирующих) определяется в первую очередь динамической неустойчивостью. Быстрые продвижения концов нестабильных ледников влекут за собой такие катастрофические явления, как сели, прорывы подпрудных озёр, обвалы льда и др. Выявление таких нестабильных ледников и наблюдения за их режимом имеют большое научное и практическое значение [17]. Созданная в рамках проекта геоинформационная система позволяет визуализировать информацию о нестабильных ледниках и анализировать её совместно с другими параметрами — площадью, морфологическим типом, длиной, экспозицией и т.д. (рис. 3).

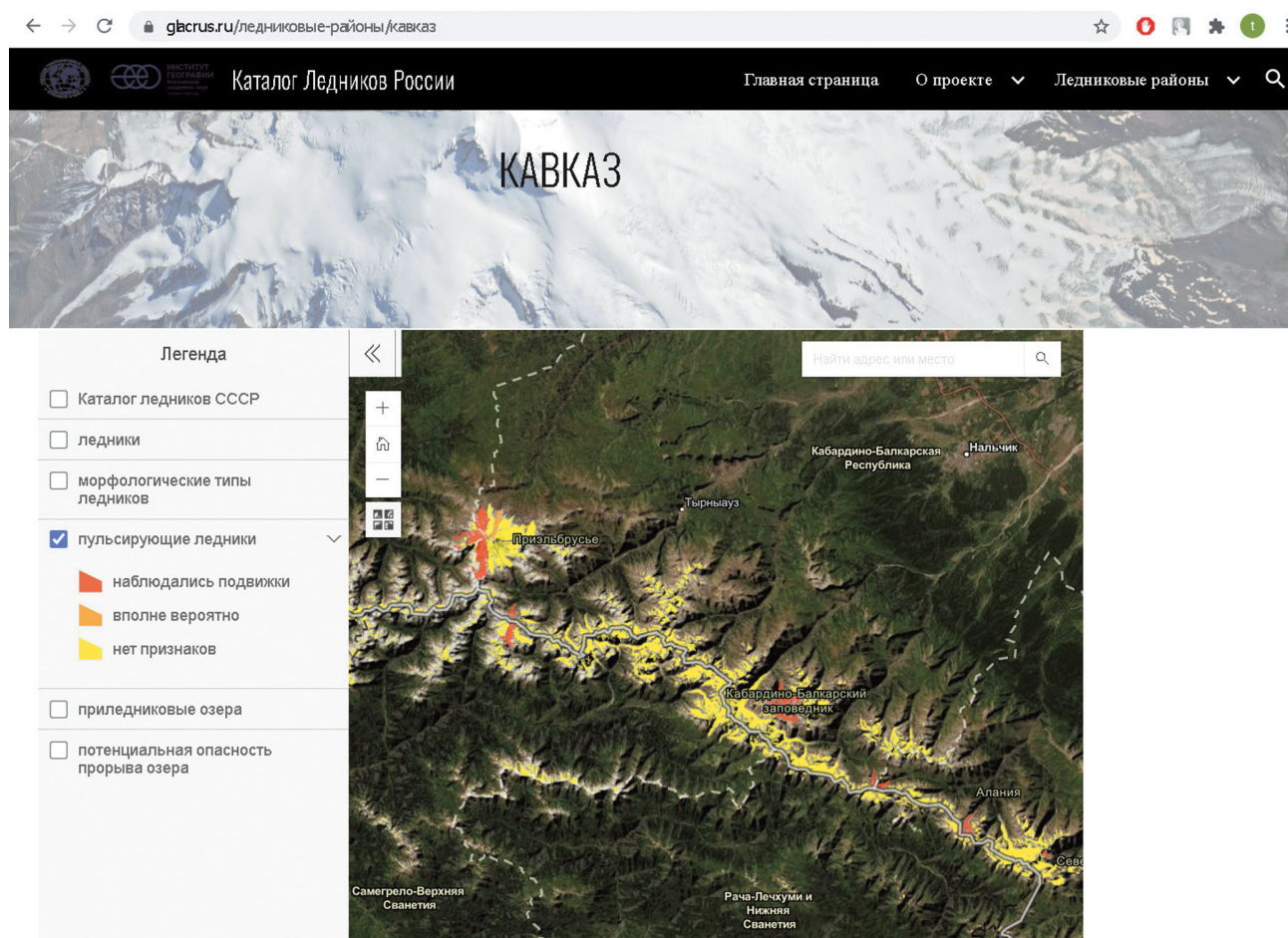
На Кавказе выделено 23 ледника, известных своими подвижками (в их числе четыре пульсирующих — Колка, Девдоракский, Хрумкол и Муркар) [18, 19]. Термин «пульсация» предполагает определённую периодичность резкой активации ледников. Однако у большинства выявленных нестабильных ледников не установлено признаков повторяемости этого явления, поэтому термин «подвижка ледника», применяемый как синоним ледниковой пульсации, более универсален. В настоящее время на Кавказе самый большой по площади ледник, для которого установлен факт подвижки, — лед-

ник Большой Азау (16,42 км<sup>2</sup>), а самый маленький (0,14 км<sup>2</sup>) — ледник № 267. В диапазоне от 0,14 до 7 км<sup>2</sup> находится 10 ледников. Площадь трёх ледников превышает 10 км<sup>2</sup>. Морфологические типы этих ледников — долинные, карово-долинные, сложно-долинные, конических вершин. Самый известный — долинный ледник Колка, расположенный на северном склоне Казбек-Джимарайского массива.

На арктических островах и архипелагах нестабильные ледники идентифицированы на Новой Земле, где наблюдалась подвижка на леднике Стройном. У 15 ледников обнаружены признаки нестабильности, среди которых — крупные неравномерности в конфигурации наложенных и вложенных потоков и петлеобразный рисунок срединных и боковых морен, что предполагает вполне вероятную возможность подвижки. У 11 ледников видимые на снимках признаки нестабильности выражены менее очевидно, что позволило отнести их к категории ледников, для которых возможно возникновение подвижки. В Арктике отмечается усиление динамической неустойчивости оледенения, развившееся в пульсациях выводных ледников и в крупных подвижках отдельных бассейнов ледниковых куполов [20]. Вероятно, такие изменения связаны с перестройкой внутреннего гидротермического режима ледников в результате общих изменений климата, а также прямого или косвенного взаимодействия с морем. Пример такой неустойчивости — развитие крупной подвижки в западном секторе ледникового купола Вавилова на Северной Земле [21].

Ещё один район, где существуют нестабильные ледники, — Камчатка. Здесь находятся ледник обвальных цирков Черемошный и один из самых больших и известных ледников на Камчатке — кальдерно-долинный ледник Бильченок. Это — самый крупный пульсирующий ледник в горах России, расположенный в северо-западной части Ключевской группы вулканов. Известны две его подвижки [22]: 1959–1960 гг. и меньшая по масштабу подвижка 1982–1984 гг.

**Приледниковые озёра.** Прорывы приледниковых озёр и последующие образования селевых потоков относятся к опасным явлениям гляциального генезиса. Наличие приледникового озера в горной долине — важный критерий селеопасности этой долины и, несмотря на то, что



**Рис. 3.** Страница ледникового района «Кавказ».

Карта пульсирующих ледников Кавказа: красным цветом показаны ледники, на которых наблюдались подвижки; оранжевым – ледники, для которых подвижки вполне вероятны; жёлтым – ледники без признаков нестабильности

**Fig. 3.** Page of the glacial region «Caucasus».

Map of the unstable glaciers: glaciers on which surges were observed are shown in red; glaciers with signs of instability are shown in orange; glaciers with no signs of instability – in yellow

точные прогнозы прорыва озёр единичны [23], это – более надёжный критерий чем наличие селевого очага. Кроме того, факторами усиления селевой активности традиционно считают наличие массивов мёртвых льдов с термокарстовыми процессами и существование внутриледниковых полостей [24]. Природные явления становятся опасными, если они вызывают экономический, экологический и социальный ущерб. Приледниковые озёра существуют почти во всех ледниковых районах России. Самое большое их число (1830) идентифицировано на Кавказе, где более двух третей ледников имеют озёра на своём предполье. Озёра встречаются и на Алтае (640). У трети ледников на Урале также есть приледниковые озёра. В данном исследо-

вании в трёх континентальных ледниковых системах приледниковые озёра не обнаружены: хр. Орулган, хр. Черского и Колымское нагорье. Приледниковые озёра распространены в Корякском нагорье (158), Кузнецком Алатау (34), Чукотском нагорье (21), на Новой Земле (41) и Северной Земле (38). Лучше всего они изучены на Кавказе и Алтае. Для этих регионов в Каталоге дана более подробная информация о приледниковых и подпруженных озёрах.

На основе визуального дешифрирования космических снимков Sentinel-2 MSI выявлено 368 озёр, расположенных на высотах от 1000 до 3300 м над ур. моря в пределах Российской части Кавказа: 12 озёр – в Республике Адыгея, 71 – в Краснодарском крае, 194 – в Карачаево-Черкес-

сии, 60 – в Осетии, 3 – в Чечне и 5 – в Дагестане. 226 озёр из 368 находятся в пределах 5 км от краевых частей ледников. Большинство приледниковых озёр расположено в пределах Западного и Центрального Кавказа, в восточной части Кавказа визуальное дешифрирование не позволило идентифицировать приледниковые озёра. Всего в пределах Большого Кавказа выявлено 1830 озёр общей площадью около 95,8 км<sup>2</sup> (при подсчёте не учитывались озёра площадью менее 500 м<sup>2</sup>, кроме карстовых областей).

На Алтае обнаружено 640 приледниковых озёр. В базе данных к каждому озеру привязан ледник, который лежит в верховьях, и дополнительно указан второй ледник, если в долине их несколько. Показаны только озёра, находящиеся не далее 2,5 км от ледников и которые точно имеют ледниковое питание и происхождение. Идентифицировано 82 прорывоопасных озера общей площадью 2,7 км<sup>2</sup>. Они были идентифицированы по следующим признакам: площадь более 5000 м<sup>2</sup>; наличие ледяной стенки, т.е. озеро непосредственно контактирует с ледником; образовалось в течение последних 20–40 лет по сравнению с топокартой 1992 г. и значительно увеличилось (более чем на 30%) по сравнению с топокартой 1992 г.

**Айсбергообразующие ледники.** В вопросе оценки опасности ледниковых систем и их компонентов особое внимание уделяется ледникам, заканчивающимся в море, где они в результате отёла сбрасывают айсберги. Такие ледники, а их называют приливными, ведут себя очень динамично, принципиально отличаясь от ледников, оканчивающихся на суше. Изменение их длины часто происходит асинхронно с климатическим воздействием и, по-видимому, сильно зависит от рельефа ледникового ложа. Такая динамическая нестабильность с внезапными фазами ускоренного отступления с усилением темпов отёла ледников и потери их массы опасна не только для судоходных путей и освоения минеральных ресурсов на морских шельфах, но и для экосистем фьордов и, что очень важно, способствует ускоренному повышению уровня моря.

На основе выработанных критериев оценено распространение айсбергообразующих ледников на территории России. Они отмечаются в Арктической зоне на архипелагах и островах Российской Арктики. Наибольшее их число (275)

обнаружено на архипелаге Земля Франца-Иосифа. Это – 45% общего числа (570) суммарной площадью 9315 км<sup>2</sup>, или 74% всей площади оледенения архипелага. На Северной Земле таких ледников 58, а на Новой Земле – 42.

### Изменения ледников на территории России

Сформированные базы данных позволили оценить изменения площади и числа ледников в ледниковых системах на территории России, произошедшие за последние 60 лет. Основной массив информации для оценки изменений предоставляет Каталог ледников СССР. Согласно его данным, в 23 ледниковых системах на территории России во второй половине XX в. насчитывалось 8422 ледника общей площадью 60 056 км<sup>2</sup>. По данным дешифрирования космических снимков, полученных преимущественно во второй декаде XXI в., площадь этих ледников сократилась на 5594 км<sup>2</sup>, или на 9,3%. Площадь ледников, которые были исследованы уже после выхода в свет всех частей Каталога ледников СССР, составляла 69 км<sup>2</sup>. По нашим данным, она уменьшилась на 9,7 км<sup>2</sup>, или на 12,3%. Величина изменения ледников существенно отличается для разных районов.

**Арктическая зона.** Площадь полярного оледенения сократилась менее значительно по сравнению с площадью ледников горных районов. Значения колеблются от 5,94% (Новая Земля) до 19,11% (острова Де-Лонга.). Меньше всего (5,94%) из полярных районов сократилось самое большое по площади оледенение Новой Земли. Исключение составляет о. Врангеля, где не было обнаружено ни одного ледника из помещённых в Каталог ледников СССР. Уже во время составления Каталога ледников СССР отмечалось, что маленькие ледники на острове существуют в предельно возможных условиях и отнесение к ледникам небольших сложенных фирном и льдом образований было спорным [6].

Небольшие изменения площади ледников арктических архипелагов не исключают потери массы льда за счёт понижения поверхности. Судя по имеющимся данным, потери массы льда на архипелаге Земля Франца-Иосифа оцениваются в  $-3,5 \pm 3,2$  Гт/год за период 2004–2008 гг. и  $-0,8 \pm 1,3$  Гт/год за 2008–2012 гг. С 2011 по 2015 г.

потери массы ледниками Земли Франца-Иосифа удвоились. По сравнению с 1953 – 2011–2015 гг. они увеличились с  $-2,18 \pm 0,72$  Гт/год до  $-4,43 \pm 0,78$  Гт/год (т.е. примерно от  $17,4 \pm 6,5$  см в.э. в год до  $35,4 \pm 6,2$  см в.э. в год) [25]. По последним оценкам, с апреля 2002 г. по сентябрь 2019 г. баланс массы ледников Земли Франца-Иосифа составлял  $-20,2 \pm 6$  Гт/год, причём потери ускорились с темпом  $-1,2 \pm 0,2$  Гт/год, что в слое воды составляет  $-39,2 \pm 11,6$  см в.э. в год [26].

**Субарктика.** Площадь ледников Российской Субарктики сократилась более существенно. Не были обнаружены маленькие ледники, существовавшие ранее в Хибинах. Ледники на Урале уменьшили свою площадь на 63%. Немного меньше сократились площади ледниковых систем хребтов Орулган (46,6%), Черского (44,4%), гор Сунтар-Хаята (34%). Для ряда районов, находящихся в субарктической зоне, получены совсем небольшие значения сокращения или даже увеличения площади. Это связано в первую очередь с тем, что в Каталог ледников СССР и в результаты последующих исследований вошли данные не обо всех ледниках этих районов. В рамках проекта были обнаружены новые ледники в горах Бырранга, Колымского нагорья, плато Путорана.

Так, в горах Бырранга из 66 ледников размером более  $0,1 \text{ км}^2$  общей площадью  $29,3 \text{ км}^2$ , занесённых в Каталог ледников СССР, на космических снимках был дешифрован 61 ледник общей площадью  $21,57 \text{ км}^2$ , т.е. площадь этих ледников сократилась на 26%. Высокое качество спутниковых снимков и удачная дата съёмки (отсутствие облачности и снежного покрова) позволили дополнительно дешифровать и оцифровать ещё 147 небольших ледников, размеры которых лежат в пределах от  $0,01$  до  $0,35 \text{ км}^2$ . Кроме 30 малых ледников, отмеченных в Каталоге, в это число вошли ледники северо-восточной части гор Бырранга, о которых упоминает Л.С. Говоруха [27]. Общая площадь этих 147 ледников составляет  $8,22 \text{ км}^2$ . Таким образом, суммарная площадь всех 213 дешифрованных и оцифрованных ледников гор Бырранга в 2019 г. составила  $29,97 \text{ км}^2$ .

Похожая ситуация с ледниковой системой плато Путорана. В работе В.А. Сараны фактически речь идёт только о 61 леднике, зафиксированном в 1999 г. [28]. На космических снимках был дешифрован 71 ледниковый полигон. В это число входит 52 ледника из 61, помещён-

ных в таблицу общих данных по ледникам плато Путорана. За 20 лет с 1999 по 2018–2019 гг. шесть ледников разделились на две части. Кроме того, на рассматриваемой территории было дополнительно дешифровано и оцифровано 13 ледников. Судить о динамике изменения площади оледенения сложно в связи с разнородностью использованных материалов на рассматриваемые срезы времени. По некоторым оценкам, суммарная площадь 16 ледников, присутствующих во всех трёх временных срезах, имеет тенденцию к незначительному увеличению. Площадь 71 ледника, оцифрованных по снимкам 2018–2019 гг., составила  $11,62 \text{ км}^2$ .

В оценке оледенения Корякского нагорья также есть много разночтений. Данные о ледниках хр. Малиновского (западное побережье Олюторского залива Берингова моря) и ледниках, расположенных вблизи побережья Берингова моря от  $60^\circ$  до  $62^\circ$  с.ш., приводятся в Каталоге [6]. Это – 1335 ледников общей площадью  $259,5 \text{ км}^2$ , из них 715 ледников имеют площадь больше  $0,1 \text{ км}^2$ , а общая их площадь составляет  $233,1 \text{ км}^2$ . По данным А.П. Васьковского [29], на первых двух участках имеется 461 ледник и снежник общей площадью  $185 \text{ км}^2$ . В 2001 г. был опубликован Каталог ледников Р.В. Седова на территорию северной части Корякского нагорья (Мэйныпыльгинский хр.) [30]. Лишь для этого участка твёрдо определены число (116) ледников и их площадь ( $44 \text{ км}^2$ ).

На космических снимках Sentinel-2 2018 г. было идентифицировано 90 ледников из 116, выявленных Р.В. Седовым. Установлено, что многие ледники, кроме открытых ледниковых поверхностей в их верховьях, имеют языковидные или лопастные образования, внешне похожие на каменные глетчеры или бронированные обломочным материалом ледники. Кроме того, дополнительно идентифицировано 17 ледников в карах, где Р.В. Седовым были отмечены снежники. В результате общая площадь 114 ледников составила  $42,19 \text{ км}^2$ , т.е. можно считать, что прошедшие десятилетия слабо отразились на размерах ледников этого района в результате бронирования их поверхности обломочным материалом. Сокращению могли подвергнуться открытые участки поверхности льда, но разрешение использованных космических снимков не позволяет получить информацию для таких оценок.

Всего на Корякском нагорье (включая Мэйны-пыльгинский хребет) обнаружено 890 ледников общей площадью 296,3 км<sup>2</sup>. Максимальный размер ледника – 5,1 км<sup>2</sup>. Преобладают (810) ледники площадью не более 0,7 км<sup>2</sup>. Характерная особенность ледников – наличие моренного чехла, полностью закрывающего поверхность ледника. Таких ледников обнаружено 796. Соответственно 94 ледника преимущественно карового типа (68) имеют участки открытого льда.

Для исследования ледников Колымского и Чукотского нагорий использованы космические снимки Sentinel-2 2016–2019 гг. и публикации Р.В. Седова [31–33]. На Колымском нагорье в 1990 и 1994 г. Седов отметил 19 ледников в карах, а на Чукотском нагорье в 1982–1989 гг. – 47 ледников. На снимках Sentinel-2 (2016–2019 гг.) ни в одном из каров не было установлено открытой ледовой поверхности. В некоторых карах наблюдались хаотические снежные пятна, а кое-где в тыловых частях на их склонах – остатки лавинных конусов. В Колымском нагорье обнаружены 38 каменно-ледовых образований и только один ледник с чистой ледовой поверхностью в зоне его питания с общей площадью 6,62 км<sup>2</sup>. В Чукотском нагорье отмечены 63 ледника общей площадью 16 км<sup>2</sup>, из них в хр. Искатень – 26 (8,8 км<sup>2</sup>), в горном массиве бухты Провидения – 34 (6,43 км<sup>2</sup>) и в хр. Пэкульней – 3 (0,76 км<sup>2</sup>).

**Умеренные широты.** Сокращение площади ледниковых систем умеренного пояса находится в диапазоне от 57% (Восточный Саян) до 13% (Кодар). Самые крупные ледниковые системы Кавказа, Камчатки и Алтая уменьшили свои площади соответственно на 25, 22 и 39%. По данным Каталога ледников СССР [6], в 1965–1975 гг. на Большом Кавказе насчитывалось 2048 ледников общей площадью 1408,7 км<sup>2</sup>. По состоянию на 2000 г. число ледников несколько возросло за счёт отчленения притоков крупных ледников, тогда как площадь оледенения уменьшилась до 1248 км<sup>2</sup>. К России относится территория Северного Кавказа, где в 2000 г. находилось 1521 ледник общей площадью около 854 км<sup>2</sup>.

По результатам обработки спутниковых снимков Sentinel-2, полученных в июле и сентябре 2017 г. и августе и сентябре 2018 г., на Кавказе обнаружено 2046 ледников общей площадью 1067 км<sup>2</sup>. На 97 крупных ледников (более 5 км<sup>2</sup>) приходится более трети (440 км<sup>2</sup>) площа-

ди оледенения Кавказа. Ледники, площадь которых находится в диапазоне 0,1–0,5 км<sup>2</sup>, в настоящее время – самые многочисленные (674) на Кавказе. Больше половины ледников по площади и по числу 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 (–28,5%) чем южного склона (–27,6%). По данным [34], в 2014 г. на Кавказе было 2020 ледников общей площадью 1193,2 км<sup>2</sup>, 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 период 1986–2018 гг. оледенение сократилось на 415 км<sup>2</sup> со скоростью 0,87% в год. Таким образом, мы видим ускорение таяния ледников Кавказа.

На Камчатке идентифицировано 732 ледника общей площадью около 680 км<sup>2</sup>. По данным Каталога ледников СССР, в середине XX в. на Камчатке насчитывалось 405 ледников общей площадью 874 км<sup>2</sup>. Отметим, что дальнейшие исследования оледенения данного района позволили обнаружить множество ледников, не зарегистрированных в Каталоге, поэтому прямое сравнение числа и площади ледников с данными современных исследований затруднено. Изменения площади оледенения различных районов Камчатки со времени каталогизации крайне неравномерны. Это связано с разнообразием природных условий полуострова. Так, площадь оледенения Кроноцкого полуострова за 1957–2013 гг. сократилась на 27,6% [35]. Оледенение вулканического массива Алней-Чашаконджа потеряло 19,5% площади за 1950–2010 гг. Площадь оледенения Ичинского вулкана с 1950 по 2010–2014 гг. практически не изменилась из-за мощного моренного покрова, бронирующего языки ледников. В пределах Ключевской группы вулканов, наоборот, наблюдается небольшой рост площади оледенения – на 4% (8,7 км<sup>2</sup>) с 1950 по 2010–2015 гг. [22]. Такая неоднородность в поведении ледников в разных районах Камчатки обусловлена разнообразием сочетаний форм макрорельефа, климатических характеристик и современной вулканической активностью.

Оледенение Алтая по данным Каталога ледников СССР занимало более 1500 км<sup>2</sup>. Из них на

Россию приходилось около 871 км<sup>2</sup> в северо-восточном секторе горной страны. По данным обработки снимков Sentinel-2 г. (2018 г.), на территории Алтая (российская часть) находится 720 ледников общей площадью 510,1 км<sup>2</sup>. За 65 лет исчезло 143 ледника, а 108 разделилось на 2–5 частей. Площадь оледенения сократилась на 39%.

Результаты выполненных исследований подтверждают тенденции сокращения площади ледников на всей территории России. Исключения составляют ледники вулканических районов Камчатки. Они увеличили свои размеры или остались прежними. Тенденции к сокращению не наблюдается, что обусловлено наличием мощной поверхностной морены из вулканогенного материала. Величина и скорость изменений параметров оледенения в разных районах России зависят от локальных климатических и орographicеских особенностей, а также от наличия или отсутствия активного вулканизма.

### Заключение

Создание нового Каталога позволило получить новые знания о состоянии ледников России в конце второй декады XXI в. и оценить изменения, произошедшие с ледниками с середины XX в. Каталог ледников России содержит информацию о 22-х ледниковых системах общей площадью 54 518 км<sup>2</sup>. По сравнению с Каталогом ледников СССР (1965–1982 гг.) площадь ледников на территории России уменьшилась на 5594 км<sup>2</sup>, или 9,3%. Величина и скорость изменений в разных районах сильно различаются и зависят от комплекса местных природных условий.

Сформированные по единой программе и в едином формате базы данных, а также разработанные алгоритмы анализа позволяют использовать приёмы геоинформационного моделирования для дальнейших исследований

взаимосвязей, состояния и происходящих изменений в ледниковых системах. Полученные данные находятся в открытом доступе на сайте «Каталог ледников России» ([www.glacrus.ru](http://www.glacrus.ru)). В рамках международного сотрудничества информация передана в базы данных Международного проекта «Глобальные измерения наземного льда из космоса» (GLIMS) и Мирового каталога ледников (RGI). Таким образом, Каталог ледников России стал составной частью мировой системы мониторинга ледников, вкладом в решение задачи формирования и развития массивов данных по всем компонентам климатической системы, что позволит делать научно обоснованные выводы о состоянии и изменениях климата и их влиянии на активизацию опасных стихийных процессов.

Созданный информационный ресурс – основа для развития системы мониторинга состояния ледников на территории России. К задачам дальнейших исследований относятся: определение оптимальных сроков повторных инвентаризаций, которые зависят от скорости изменений ледниковых параметров; совершенствование методов дешифрирования спутниковых снимков, включая комбинирование автоматизированных и экспертных подходов; расширение информационной инфраструктуры базы данных, в которую планируется включать результаты прямых наблюдений и дистанционных исследований на отдельных ледниках и узлах оледенения.

**Благодарности.** В статье использованы результаты, полученные по теме госзадания № 0148-2019-0004 и при поддержке РФФИ грант № 18-05-60067.

**Acknowledgments.** The paper includes the results obtained in the framework of the following research projects: № 0148-2019-0004 of the Research Plan of the Institute of Geography of RAS, № 18-05-60067 supported by RFBR.

### Литература

1. Paul F., Rastner P., Azzoni R.S., Diolaiuti G., Fugazza D., Le Bris R., Nemeč J., Rabatel A., Ramusovic M., Schwaizer G., Smiraglia C. Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2020. V. 12. P. 1805–1821. doi: [org/10.5194/essd-12-1805-2020](https://doi.org/10.5194/essd-12-1805-2020).

### References

1. Paul F., Rastner P., Azzoni R. S., Diolaiuti G., Fugazza D., Le Bris R., Nemeč, J., Rabatel A., Ramusovic M., Schwaizer G., Smiraglia C. Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2. *Earth Syst. Sci. Data*. 2020, 12: 1805–1821. doi: [org/10.5194/essd-12-1805-2020](https://doi.org/10.5194/essd-12-1805-2020).

2. Paul F., Frey H., Le Bris R. A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: Challenges and results // *Annals of Glaciology*. 2011. V. 52. P. 144–152.
3. Paul F., Andreassen L. A new glacier inventory for the Svartisen region, Norway, from Landsat ETM data: Challenges and change assessment // *Journ. of Glaciology*. 2009. V. 55 (192). P. 607–618. doi:10.3189/002214309789471003.
4. Andreassen L., Winsvold S., Paul F., Hausberg J. Inventory of Norwegian Glaciers. 2012. doi: 10.5167/uzh-73855.
5. Baumann S., Anderson B., Chinn T., Mackintosh A., Collier C., Lorrey A.M., Rack W., Purdie H., Eaves S. Updated inventory of glacier ice in New Zealand based on 2016 satellite imagery // *Journ. of Glaciology*. 2021. V. 67. № 261. P. 13–26. doi: org/10.1017/jog.2020.78.
6. Каталог ледников СССР. М.-Л.: Гидрометеоздат, 1965–1982.
7. 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.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. 288 с.
8. Осипова Г.Б., Цветков Д.Г., Щетинников А.С., Рудак М.С. Каталог пульсирующих ледников Памира // МГИ. 1998. Вып. 85. С. 3–136.
9. Сочнев О.Я., Корнишин К.А., Тарасов П.А., Сальман А.Л., Глазовский А.Ф., Лаврентьев И.И., Ефимов Я.О., Мамедов Т.Э. Исследование ледников Российской Арктики для обеспечения айсберговой безопасности работ на шельфе // *Нефтяное хозяйство*. 2018. Вып. 10. С. 92–97.
10. Докукин М.Д. Формирование гляциальных селевых очагов при деградации ледников Приэльбрусья // МГИ. 1985. Вып. 53. С. 62–71.
11. Ives J.D. Glacial lake outburst floods and risk engineering in the Himalaya // *ICIMOD occasional paper*. 1986. V. 5. 42 p.
12. Schuster R. Outburst debris-flows from failure of natural dams. Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, assessment. Rotterdam, 2000. P. 29–44.
13. Руководство по составлению Каталога ледников СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 154 с.
14. Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 528 с.
15. Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial. 2010: 15 p. [http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS\\_Analysis\\_Tutorial\\_a4.pdf](http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf).
16. Krenke A.N. *Massoobmen v lednikovyyh sistemah na territorii SSSR*. Mass balance in glacial systems on the territory of the USSR. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982: 288 p. [In Russian].
17. Osipova G.B., Khromova T.Y. Digital inventory of surging glaciers of Pamir. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2010, 4 (112): 15–24. [In Russian].
2. Paul F., Frey H., Le Bris R. A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: Challenges and results. *Annals of Glaciology*. 2011, 52: 144–152.
3. Paul F., Andreassen L. A new glacier inventory for the Svartisen region, Norway, from Landsat ETM data: Challenges and change assessment. *Journ. of Glaciology*. 2009, 55 (192): 607–618. doi: 10.3189/002214309789471003.
4. Andreassen L., Winsvold S., Paul F., Hausberg J. Inventory of Norwegian Glaciers. 2012. doi: 10.5167/uzh-73855.
5. Baumann S., Anderson B., Chinn T., Mackintosh A., Collier C., Lorrey A.M., Rack W., Purdie H., Eaves S. Updated inventory of glacier ice in New Zealand based on 2016 satellite imagery. *Journ. of Glaciology*. 2021, 67 (261): 13–26. doi: org/10.1017/jog.2020.78.
6. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. Moscow–Leningrad: Hydrometeoizdat, 1965–1982. [In Russian].
7. Kotlyakov V.M., Khromova T.E., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Muraviev A. Ya., Rototaeva O.V., Nikitin S.A., Zverkova N.M. *Sovremennyye izmeneniya lednikov gornyykh raionov Rossii*. Recent glacier changes in mountain regions of Russia. Moscow: KMK Scientific Press, 2015: 288 p. [In Russian].
8. Osipova G.B., Tzvetkov D.G., Shchetinnikov A.S. Inventory of surging glaciers of Pamirs. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1998, 85: 3–136. [In Russian].
9. Sochnev O.Y., Kornishin D.G., Tarasov P.A., Salman A.I., Glasovski A.F., Lavrentiev I.I., Efimov Y.O., Mamedov T.E. Study of glaciers in the Russian Arctic to ensure iceberg safety of offshore operations. *Neftyanoe khozyaistvo*. Oil industry. 2018, 10: 92–97. [In Russian].
10. Dokukin M.D. Glacier mudflow formation during glacier degradation. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1985, 53: 62–71. [In Russian].
11. Ives J.D. Glacial lake outburst floods and risk engineering in the Himalaya. *ICIMOD occasional paper*. 1986, 5: 42 p.
12. Schuster R. Outburst debris-flows from failure of natural dams. Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, assessment. Rotterdam, 2000: 29–44.
13. *Rukovodstvo po sostavleniyu Kataloga lednikov SSSR*. Guide to compiling USSR Glacier Inventory. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1966: 154 p. [In Russian].
14. *Glyatsiologicheskii slovar*. Glaciological dictionary. Ed. V.M. Kotlyakov. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1984: 528 p. [In Russian].
15. Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial. 2010: 15 p. [http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS\\_Analysis\\_Tutorial\\_a4.pdf](http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf).
16. Krenke A.N. *Massoobmen v lednikovyyh sistemah na territorii SSSR*. Mass balance in glacial systems on the territory of the USSR. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982: 288 p. [In Russian].
17. Osipova G.B., Khromova T.Y. Digital inventory of surging glaciers of Pamir. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2010, 4 (112): 15–24. [In Russian].



17. *Осипова Г.Б., Хромова Т.Е.* Электронный каталог пульсирующих ледников Памира // *Лёд и Снег*. 2010. № 4 (112). С. 15–24.
18. *Котляков В.М., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Десинов Л.В., Осокин Н.И., Чернов Р.А.* Кармадонская катастрофа: что случилось и чего ждать дальше. М.: Издательский дом «Кодекс», 2014. 184 с.
19. *Рототаева О.В., Котляков В.М., Носенко Г.А., Хмелевской И.Ф., Чернов Р.А.* Исторические данные о подвижках пульсирующих ледников на Северном Кавказе и Кармадонская катастрофа 2002 г. // *МГИ*. 2005. Вып. 98. С. 136–145.
20. *Strozzi T., Paul F., Wiesmann A., Schellenberger T., Kääb A.* Circum-Arctic Changes in the Flow of Glaciers and Ice Caps from Satellite SAR Data between the 1990s and 2017 // *Remote Sensing*. 2017. № 9 (9). 947 p. doi: 10.3390/rs9090947.
21. *Бушуева И.С., Глазовский А.Ф., Носенко Г.А.* Развитие подвижки в западной части ледникового купола Вавилова на Северной Земле в 1963–2017 гг. // *Лёд и Снег*. 2018. Т. 58. № 3. С. 293–306. doi:10.15356/2076-6734-2018-3-293-306.
22. *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. doi: 10.15356/2076-6734-2016-4.
23. *Шахмина М.С., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.* База данных современных приледниковых озер центральной части Северного Кавказа // *Инновационные технологии для устойчивого развития горных территорий*. Материалы VI Междунар. конф. 28–30 мая 2007 г. Владикавказ: Терек, 2007. С. 303–304.
24. *Квасов Д.Д.* Возрастно-генетическая классификация котловин озер Северной и Центральной Евразии // *Изв. ВГО*. 1988. Т. 118. Вып. 6. С. 487–492.
25. *Zheng W., Pritchard M.E., Willis M.J., Tepes P., Gourmelen N., Benham T.J., Dowdeswell J.A.* Accelerating glacier mass loss on Franz Josef land, Russian Arctic // *Remote Sensing of Environment*. 2018. № 211. С. 357–375. doi: 10.1016/j.rse.2018.04.004.
26. *Ciraci E., Velicogna I., Swenson S.* Continuity of the mass loss of the world's glaciers and ice caps from the GRACE and GRACE Follow – On missions // *Geophys. Research Letters*. 2020. № 47. doi: org/10.1029/2019GL086926.
27. *Говоруха Л.С.* Современное состояние оледенения гор Бырранга // *Изв. ВГО*. 1971. Т. 103. Вып. 6. С. 510–516.
18. *Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Desinov L.V., Osokin N.I., Chernov R.A.* *Karmadonskaya katastrofa: chto sluchilos i chto zhdad dalshe*. Karmadon catastrophe: what happened and what we should wait for in future. Moscow: «Kodeks» Publishing House, 2014: 184 p. [In Russian].
19. *Rototaeva O.V., Kotlyakov V.M., Nosenko G.A., Khmelevskoi I.F., Chernov R.A.* Historical data on glacier surges in North Caucasus and Karmadon catastrophe 2002 year. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2005, 98: 136–145. [In Russian].
20. *Strozzi T., Paul F., Wiesmann A., Schellenberger T., Kääb A.* Circum-Arctic Changes in the Flow of Glaciers and Ice Caps from Satellite SAR Data between the 1990s and 2017. *Remote Sensing*. 2017, 9 (9): 947 p. doi: 10.3390/rs9090947.
21. *Bushueva I.S., Glazovski A.F., Nosenko G.A.* Surge development in the western sector of the Vavilov Ice Cap, Severnaya Zemlya, 1963–2017. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (3): 293–306. [In Russian]. doi: org/10.15356/2076-6734-2018-3-293-306.
22. *Muraviev A.Ya., Muraviev Y.D.* Fluctuations of glaciers of the Klyuchevskaya group of volcanoes in the 20th – 21st centuries. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (4): 480–492. [In Russian]. doi: org/10.15356/2076-6734-2016-4-480-492.
23. *Shahmina M.S., Tutubalina O.V., Chernomortz S.S.* Database of modern glacier lakes in Central part of North Caucasus. *Innovatsionnye tehnologii dlya ustoichevogo razvitiya gornyh territorii. VI Mezhdunar. Konf. 28–30 maya 2007*. Innovative technologies for sustainable development of mountainous areas. Materials of the VI Intern. Conf. on May 28–30, 2007. Vladikavkaz: Terek, 2007: 303–304. [In Russian].
24. *Kvasov D.D.* Age-genetic classification of lake basins in Northern and Central Eurasia. *Izvestia VGO*. Bulletin of VGO. 1988, 118 (6): 487–492. [In Russian].
25. *Zheng W., Pritchard M.E., Willis M.J., Tepes P., Gourmelen N., Benham T.J., Dowdeswell J.A.* Accelerating glacier mass loss on Franz Josef land, Russian Arctic. *Remote Sensing of Environment*. 2018, 211: 357–375. doi: 10.1016/j.rse.2018.04.004.
26. *Ciraci E., Velicogna I., Swenson S.* Continuity of the mass loss of the world's glaciers and ice caps from the GRACE and GRACE Follow – On missions. *Geophys. Research Letters*. 2020, 47. doi: org/10.1029/2019GL086926.
27. *Govoruha L.S.* The current state of glaciation of the Byrranga mountains. *Izvestia VGO*. Bulletin of VGO. 1971, 103 (6): 510–516. [In Russian].
28. *Sarana V.A.* Modern state of glaciers of Putorana plateau. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2004, 96: 218–224. [In Russian].
29. *Vaskovski A.P.* Modern glaciation of North-East of USSR. *Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Severo-Vostoka SSSR*. Materials on geology and minerals of the North-East of the USSR. 1955, 9: 71–91. [In Russian].

28. Сарана В.А. Современное состояние ледников плато Путорана // МГИ. 2004. Вып. 96. С. 218–224.
29. Васильковский А.П. Современное оледенение Северо-Востока СССР // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Вып. 9. Магадан. 1955. С. 71–91.
30. Седов Р.В. Каталог ледников Северо-Восточной части Корякского нагорья // МГИ. 2001. Вып. 91. С. 195–224.
31. Седов Р.В. Ледники и снежники гор Охотского побережья // МГИ. 1995. Вып. 79. С. 139–144.
32. Седов Р.В. Ледники полуострова Тайгонос // МГИ. 1997. Вып. 82. С. 218–221.
33. Седов Р.В. Ледники Чукотки // МГИ. 1997. Вып. 82. С. 213–217.
34. Tielidze L.G., Wheate R. D. The Greater Caucasus Glacier Inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan) // The Cryosphere. 2018. № 12. P. 81–94. doi: org/10.5194/tc-12-81-2018.
35. Муравьев А.Я. Колебания ледников Камчатки во второй половине XX – начале XXI вв.: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Ин-т географии РАН, 2017. 23 с.
30. Sedov R.V. Glacier Inventory of the North-Eastern part of the Koryak Upland. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2001, 91: 195–224. [In Russian].
31. Sedov R.V. Glaciers and snowfields of the mountains of the Okhotsk coast. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1995, 79: 139–144. [In Russian].
32. Sedov R.V. Taigonos Peninsula glaciers. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1997, 82: 218–22. [In Russian].
33. Sedov R.V. Glaciers of Chukotka. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1997, 82: 213–217. [In Russian].
34. Tielidze L.G., Wheate R.D. The Greater Caucasus Glacier Inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan). *The Cryosphere*. 2018, 12: 81–94. doi: org/10.5194/tc-12-81-2018.
35. Muraviev A.Ya. *Kolebaniya lednikov Kamchatki vo vtoroy polovine XX – nachale XXI vekov*. Fluctuations in the glaciers of Kamchatka in the second half of the XX – the beginning of the XXI century. PhD-thesis. Moscow: Institute of Geography RAS, 2017: 23 p. [In Russian].