

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.324
DOI: 10.15372/KZ20230503
EDN: ZBWVSM

ПРОВЕРКА ДАННЫХ КАТАЛОГА ЛЕДНИКОВ КОРЯКСКОГО НАГОРЬЯ
ПО АРХИВНЫМ СНИМКАМ CORONA И СРАВНЕНИЕ СО СНИМКАМИ
SENTINEL-2 НА ФОНЕ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

М.Д. Ананичева^{1,*}, А.А. Алейников², Ю.М. Кононов¹

¹ Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия

² ИТЦ СКАНЭКС, 121059, Москва, Бережковская наб., 20, стр. 10, Россия

*Автор для контакта, maranan@gmail.com

Последние десятилетия на севере Сибири и Дальнего Востока ледники находятся под влиянием изменения климата, особенно это относится к малым формам оледенения. Этот процесс характерен и для ледников Корякского нагорья. Для оценки динамики оледенения этого региона были привлечены данные снимков CORONA (1972 г.), Sentinel-2 (2019 г.), а также Каталог ледников СССР (середина 1960-х гг.). Каталог ледников СССР на Корякское нагорье был составлен по данным топокарт и аэрофотосъемок, указанное в нем количество ледников почти в 2.5 раза больше, чем было обнаружено на снимках. В новом электронном каталоге “Ледники России” зафиксировано 890 ледников площадью 296.29 км². Этот регион изобилует каменными глетчерами, и, по-видимому, в Каталоге ледников СССР (и в новом электронном каталоге) многие каменные глетчеры были приняты за живые ледники во время его составления. В статье была сделана новая оценка площадей ледников по снимкам CORONA. Определены расхождения площадей, указанных в Каталоге, по сравнению со снимками для групп ледников.

Ключевые слова: Корякское нагорье, ледник, площадь ледника, температура, осадки, тренд температуры, тренд осадков, каменный глетчер, CORONA, снимок Sentinel-2.

Ссылка для цитирования: Ананичева М.Д., Алейников А.А., Кононов Ю.М. Проверка данных каталога ледников Корякского нагорья по архивным снимкам CORONA и сравнение со снимками Sentinel-2 на фоне меняющегося климата // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 5, с. 29–38. DOI: 10.15372/KZ20230503. EDN: ZBWVSM.

REVISING THE CATALOG OF THE KORYAK HIGHLAND GLACIERS
USING ARCHIVAL CORONA IMAGES AND COMPARISON WITH SENTINEL-2 IMAGES
AGAINST THE BACKDROP OF CHANGING CLIMATE

M.D. Ananicheva^{1,*}, A.A. Aleinikov², Yu.M. Kononov¹

¹ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetny per. 29, Moscow, 119017 Russia

² ScanEx Research Center, Berezhkovskaya emb. 20, bldg. 10, Moscow, 121059 Russia

*Corresponding author, maranan@gmail.com

In recent decades, glaciers in Northern Siberia and the Far East have been influenced by climate change, especially small forms of glaciation. This process is also typical for the glaciers of the Koryak Highlands. To assess the dynamics of glaciation in this region, data from CORONA (1972), Sentinel-2 (2019) images, and the USSR Glacier Catalog (mid-1960s) were used. The USSR Glacier Catalog of the Koryak Highlands was compiled based on data from topographic maps and aerial photographs. The number of glaciers included in this catalog is almost 2.5 times higher than the number of glaciers identified on satellite images. For the studied region, the new electronic catalog *Glaciers of Russia* records 890 glaciers with a total area of 296.29 km². This region is abundant in rock glaciers, and apparently the USSR Glacier Catalog (and perhaps the new electronic inventory) mistook many rock glaciers for living glaciers at the time of its compilation. Therefore, the authors made a new estimate of glacier areas using CORONA images. The discrepancies between the areas of glaciers indicated in the Catalog and identified on satellite images were determined for groups of glaciers.

Keywords: the Koryak Highlands, glacier, glacier area, temperature, precipitation, temperature trend, precipitation trend, rock glacier, CORONA, Sentinel-2 images.

ВВЕДЕНИЕ

Ледники Корякского нагорья, которое находится на северо-востоке Азиатской части России,

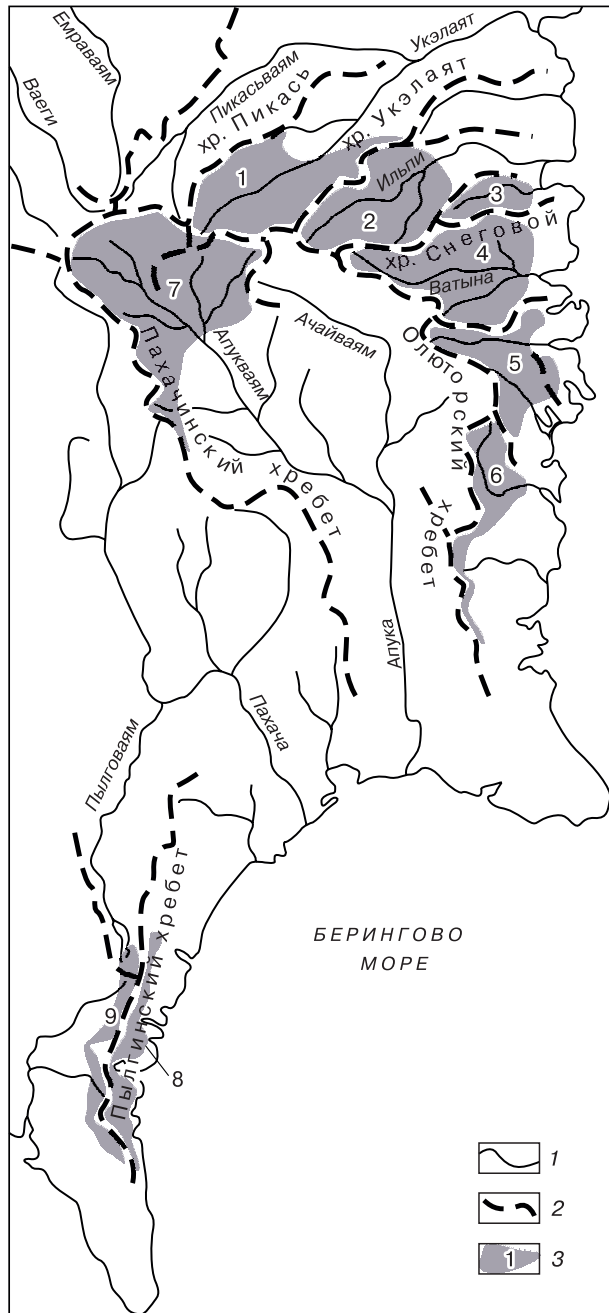


Рис. 1. Картограмма Корякского нагорья.

1 – реки; 2 – водоразделы; 3 – области распространения ледников.

1–9 – ледниковые районы в пределах речных бассейнов: 1 – между хребтами Пикась и Укалайт, 2 – между хребтами Укалайт и Снеговой, 3 – р. Ильпи – р. Имоканаваям, 4 – р. Ватына, 5 – р. Аниваям – бухта Мачевна, 6 – р. Мачевна – р. Алука, 7 – р. Алукаваям, 8 – р. Пылговаям – Олюторский залив, 9 – залив Корфа.

между Анадырским заливом и п-овом Камчатка, сейчас сохраняются в днищах каров и трогов. Последние десятилетия на севере Сибири и Дальнего Востока в связи с изменением климата в горах интенсивно тают ледники, как небольших, так и средних размеров [Takahashi et al., 2011], расположенные в горах. Особенно подвержены изменению малые формы оледенения [Ананичева и др., 2019; Ананичева, Кононов, 2020]. Они включают непосредственно малые ледники, многолетние снежники с ледяным ядром и перелетовывающие снежники. Этим термином можно обозначить совокупность свойств объектов, таких как небольшие размеры, наличие льда и фирна (что характерно для всех типов ледников), слабое разделение областей аккумуляции и абляции и пр.

После составления Каталога ледников на этот регион (конец 1960-х гг.) в Корякское нагорье исследователи пришли только в 1990-х гг. Они изучали различные геоморфологические объекты, среди которых были и каменные глетчеры. А.А. Галанин [2005] отмечает 282 ледника общей площадью 180 км², что близко к количеству, указанному для конца 1950-х гг. М.И. Малых [Каталог..., 1982]. Исследователь Северо-Востока России А.П. Васьковский также изучал хребты Корякского нагорья. Он по аэрофотоснимкам и картам привел данные о 461 леднике общей площадью 185 км², включая снежники [Васьковский, 1955; Каталог..., 1982].

Район нагорья недостаточно изучен, поэтому оценка изменений размеров ледников с помощью космических снимков и проверка этих данных на местности представляются весьма актуальными.

Каталог ледников СССР на территорию Корякского нагорья насчитывает 715 ледников, при учете ледников площадью менее 0.1 км² в каталоге упомянуто 1335 ледников, их общая площадь 259.7 км² [Каталог..., 1982]. Современное оледенение Корякского нагорья сосредоточено на трех обособленных участках. Несколько десятков ледников располагается в южной части нагорья, на склонах Пылгинского хребта. Около сотни ледников расположены в пределах Мейнышпыльгинского хребта, на самой северной оконечности Корякского нагорья. Наиболее многочисленная группа в несколько сотен ледников находится в центральной части Корякского нагорья, вблизи побережья Берингова моря, от 60 до 62° с.ш. По данным [Каталог..., 1982], здесь находилось 636 ледников. Автор каталога Н.М. Сватков работал на нескольких ледниках нагорья в начале 1960-х гг. в районе горы Ледяной, высшей точки Корякского нагорья.

В новом электронном каталоге “Ледники России” зафиксировано 890 ледников общей площадью 296.29 км². Авторами использовались снимки Sentinel-2 за сентябрь 2018 г. и август–сентябрь 2019 г. [Хромова и др., 2021].

В нагорье распространены каменные глетчеры, которые, возможно, ранее при работе над каталогом Н.М. Сватковым были приняты за ледники (в новом каталоге, по-видимому, это также имеет место). Поэтому сравнение с данными Каталога ледников по Корякскому нагорью следует делать выборочно и с определенными оговорками.

В работе [Ananicheva, Aleinikov, 2022] авторами с помощью снимков высокого разрешения Sentinel-2 (2019 г.) было оценено состояние ледников к этому времени на фоне климатических тенденций, влияющих на изменения оледенения.

В Корякском нагорье тогда были обнаружены 212 ледников, 279 каменных глетчеров, 112 объектов не идентифицированы (нет ледников или их площадь менее 0.001 км^2), общая площадь, покрытая льдом, составила 49.59 км^2 . Сокращение площадей ледников по сравнению с Каталогом ледников СССР, составленным в конце 1960-х гг., находится в среднем по выделенным бассейнам (рис. 1) в широких пределах – от 35 до 74 %. Средняя площадь ледника колеблется от бассейна к бассейну от 0.4 до 0.11 км^2 . В двух бассейнах по количеству преобладают долинны ледники (~53 %), в остальных – каровые ледники (от 48 до 91 % в группе).

В сентябре 2020 г. была проведена экспедиция в южную часть Корякского нагорья, к леднику Пыльгинского хребта. Цель экспедиции – оценить состояние ледников нагорья на примере Пыльгинского хребта (п-ов Говена) в сравнении с данными Sentinel-2.

Ранее по снимкам со спутников Landsat и Terra (снимки Landsat MSS, TM и ETM+ и Terralook ASTER) были получены предварительные данные о ледниках исследуемого района. Было обнаружено 237 ледников, среднее абсолютное изменение площади для ледника 0.54 км^2 [Ананичева, 2012].

В настоящей работе привлечен набор архивных снимков CORONA, датируемых 1967–1973 гг. Необходимо проверить данные Каталога ледников СССР на этот регион, поскольку даты снимков отличаются от данных каталога всего на 5 лет, это небольшой срок для ледников, учитывая, что климат в данный временной период был вполне стабилен (рис. 2). Как видно на рис. 2, в период с 1966 по 2021 г. устойчивый рост средней летней (T_{sum}) и средней годовой (T_{year}) температуры начался в этом регионе не ранее 1970-х гг. Таким образом, снимки CORONA отражают положение ледников нагорья, указанное в [Каталог..., 1982].

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В РЕГИОНЕ

Чтобы оценить общие тенденции изменения важных для ледников климатических параметров, по данным метеостанций были построены карты изменения средней годовой (T_{year} , °C) и средней

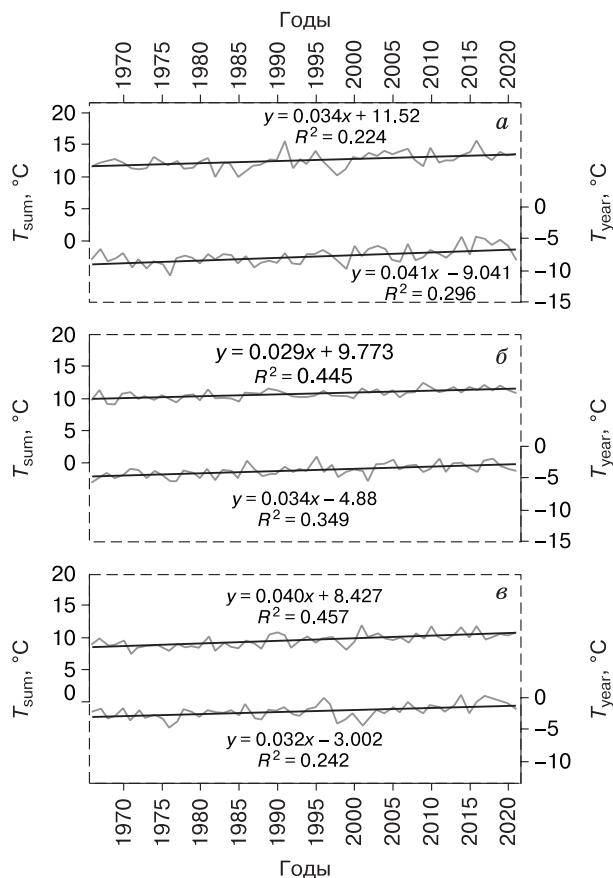


Рис. 2. Средняя годовая (T_{year}) и средняя летняя (T_{sum}) температуры по станциям Марково (а), Ямск (Брохово) (б) и Апука (в) (Корякское нагорье).

летней температуры (T_{sum} , °C), а также годовой суммы общих осадков (P_{year} , мм), осадков холодного периода (P_{cs} , мм), когда температуры весь месяц были устойчиво ниже нуля, и осадков теплого периода (P_{ws} , мм) для остальных месяцев (рис. 3). Для расчета климатических тенденций использовался временной интервал с 1966 г. (когда были исправлены показатели осадкомеров на северных станциях РФ) по 2021 г. Тренды (линейные) определялись по уравнениям регрессии рядов этих параметров с принятыми интервалами ошибок ± 0.1 °C для температуры и ± 5 мм для осадков. На рис. 3 даны фрагменты карт на территорию севера Дальнего Востока для указанных выше параметров, составленных на весь Северо-Восток России.

Изменения средней годовой температуры в Корякском нагорье T_{year} лежат в диапазоне от +1 до +2 °C за рассматриваемый период, а средней летней T_{sum} – в диапазоне от +1 до +3 °C, на Чукотском полуострове T_{year} выше, а T_{sum} несколько ниже. “Арктическое усиление” в северных континентальных частях осуществляется за счет повы-

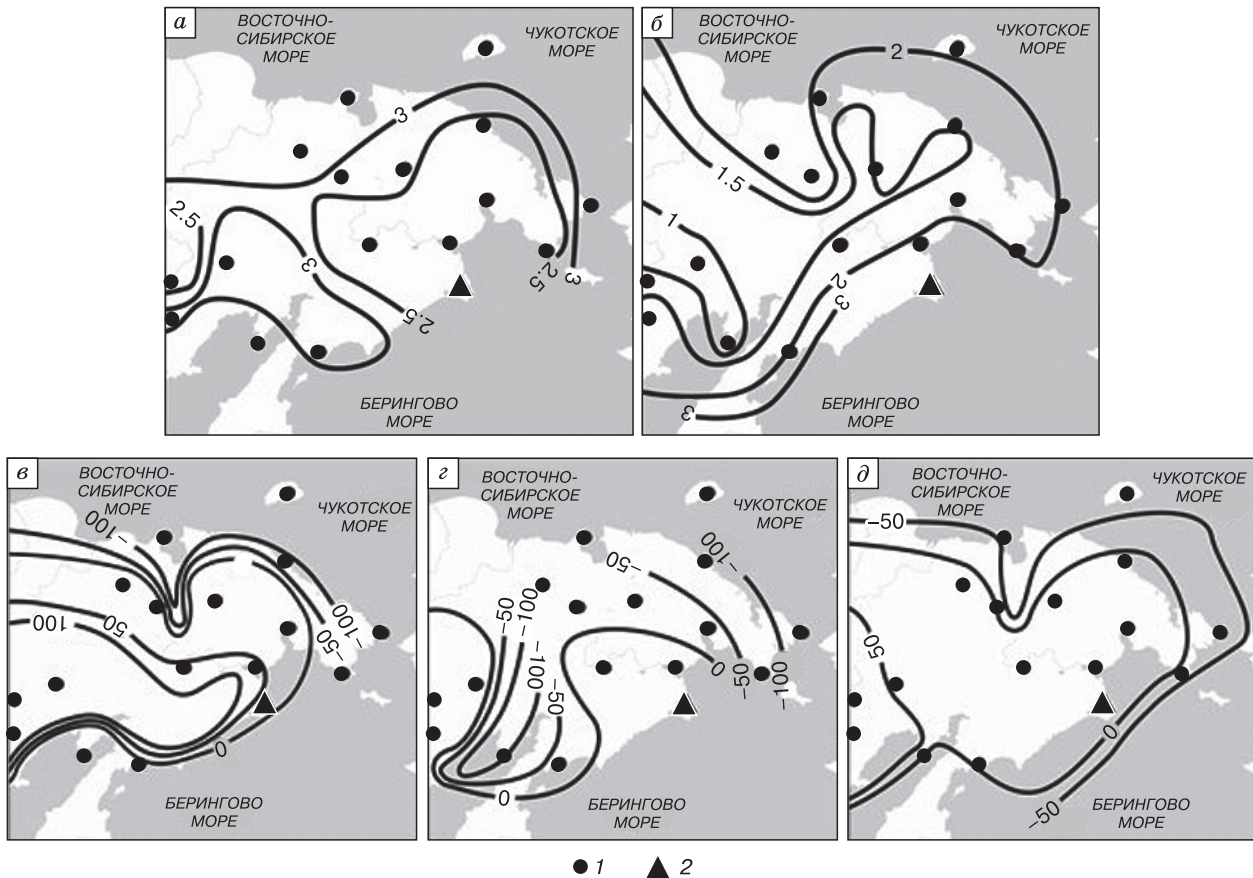


Рис. 3. Изменения температуры и осадков в изолиниях за 1966–2021 гг.

a – средней годовой температуры T_{year} , °C; *б* – средней летней температуры T_{sum} , °C; *в* – годовой суммы осадков P_{year} , мм; *г* – осадков холодного периода P_{cs} , мм; *д* – осадков теплого периода P_{ws} , мм; 1 – метеостанции; 2 – метеостанция Апука.

нения температуры холодного и переходных периодов. В более южных районах Корякского нагорья тренды теплого периода становятся выше. Тренды осадков за год в Корякском нагорье растут от береговой зоны к горам от 0 до 150 мм (за счет увеличения осадков теплого периода), тренды осадков холодного периода (твердые) находятся в диапазоне от 0 до 50 мм. Таким образом, тенденции изменения температуры и осадков в изучаемом регионе не способствуют сохранению и развитию оледенения.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Данные дистанционного зондирования CORONA – источник исторической спутниковой информации среднего и высокого разрешения, в свое время рассекреченной Министерством обороны США и находящиеся в открытом доступе. Оригиналы пленок хранятся в Службе архивов и записей США (National Archives and Records Administration, NARA), копии пленок хранятся в центре USGS EROS Data Center, который занимается сканированием и продажей данных.

На район Корякского нагорья в глобальном архиве имеются снимки за 1966–1973 гг. на время окончания периода абляции (конец июля–август). Снимки панхроматические, имеют довольно высокое пространственное разрешение (1.8–2.7 м). На данный район они не сканировались и не продавались.

Снимки CORONA представляют собой отсканированные пленочные изображения, которые нуждаются в тщательной пространственной привязке и ортокоррекции. В качестве базового рельефа для ортотрансформирования космических снимков CORONA теперь была использована цифровая модель рельефа ArcticDEM с пространственным разрешением 10 м [Porter *et al.*, 2018], а также на некоторые участки – SRTM с разрешением 30 м.

Привязка снимков CORONA осуществлялась путем точного совмещения со спутниковым снимком Sentinel-2 по общим элементам рельефа, которые не были подвержены изменениям, таким как скальные выступы, гребни вершин гор, крупные груды камней, скальные обрывы берегов. Особен-

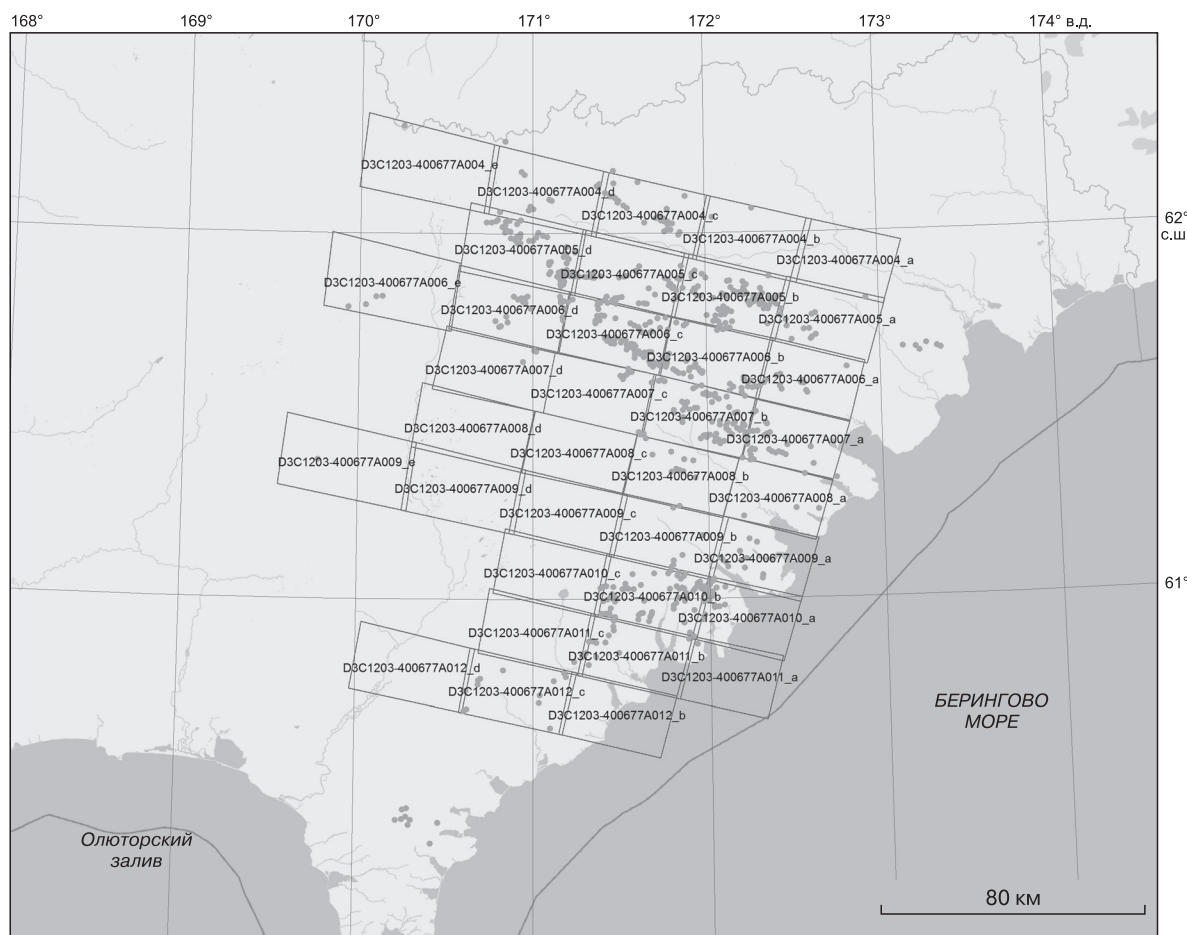


Рис. 4. Покрытие снимками CORONA районов оледенения Корякского нагорья.

Цифры соответствуют ID снимка.

ности ландшафта заключаются в отсутствии надежных опорных точек, обычно используемых при привязке (пересечение дорог, мостов). Поэтому для обеспечения точности привязки снимка приходилось выбирать свыше 50 опорных точек. А для корректного ортотрансформирования снимка CORONA важно, чтобы опорные точки находились как на самых высоких частях (гребни хребтов), так и в долинах рек, у подножия склонов. Привязанный и ортотрансформированный снимок CORONA соответствует пространственному разрешению 2 м.

Благодаря использованию снимков CORONA можно проверить данные морфометрии, которые вошли в Каталог ледников СССР, определить параметры изменений площади оледенения Корякского нагорья с 1966–1972 гг. по настоящее время (рис. 4).

По снимкам CORONA 1967–1973 гг. анализировались ледники большой группы северной части Корякского нагорья и меньшей (по количеству ледников) южной части нагорья. Авторам

удалось получить снимки, покрывающие 619 объектов из 715 упомянутых в Каталоге ледников СССР [1982] как ледники.

Оценивались площади, длины, характерные высотные точки для определения высоты границы питания (ВГП, *англ.* equilibrium line altitude, ELA). Использовался пакет программ ArcGIS ArcMap, определение контуров делалось в ручном режиме.

Оптимальное время дешифрирования ледников для данного района – 10–20 августа по снимкам 1967–1973 гг. В более раннее время большое количество сезонного снега делает невозможным корректное определение контуров ледника. После 20 августа слишком большие тени от горных хребтов могут мешать дешифрированию, а позднее 5 сентября выпадает свежий снег. Это “окно” может меняться год от года на несколько дней в зависимости от летних температур воздуха, количества накопившихся за предшествующий холодный сезон твердых осадков, облачности и других факторов.

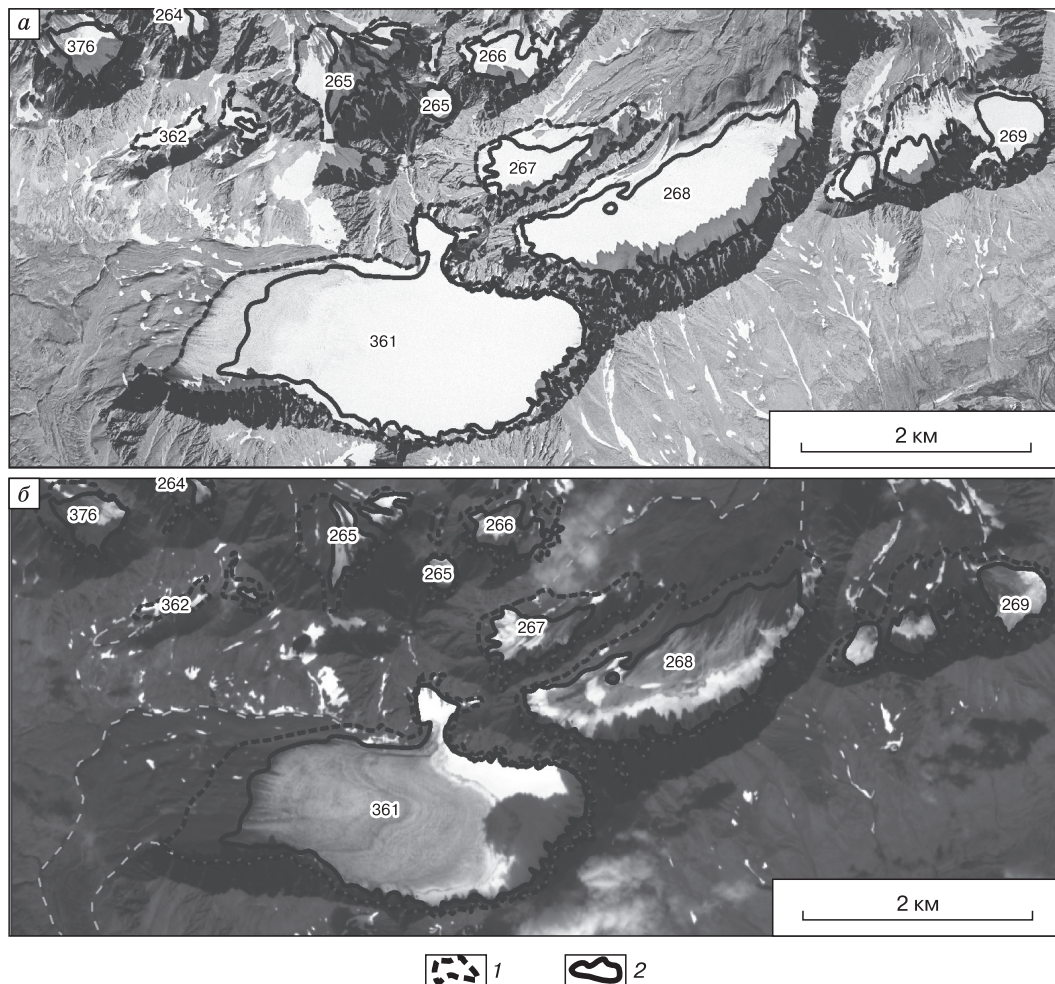


Рис. 5. Снимок CORONA с ледниками Корякского нагорья за август 1972 г.

Номера соответствуют КATALOGу ледников СССР [1982]. Контуры на разные даты: 1 – по снимкам CORONA, 1972 г.; 2 – по снимкам Sentinel-2 (а – август 2019 г., б – 2019 г.).

Авторами измерены площади ледников по снимкам CORONA (доверительный интервал определения площади ледников $0.10 \pm 0.05 \text{ км}^2$) и проведено сравнение с соответствующими площадями в КATALOGе ледников СССР и с оценками, сделанными по снимкам Sentinel-2 за 2019 г. (рис. 5).

Что касается точности определения площадей ледников на 2019 г., было проведено сравнение ортофотопланов ледников, сделанных по аэрофотоснимкам с дрона (БПЛА) во время экспедиции 2020 г., и Sentinel-2 за 2019 г. для четырех ледников: 678, 679, 680 и 685 (номера даны по КATALOGу ледников СССР [1982]). Разница составила от 2 до 12 %, что может являться оценкой погрешности определения контуров ледников [Ananicheva, Aleinikov, 2022].

В работе [Носенко и др., 2022] с использованием данных исторических наземных фототеодолит-

ных съемок 1961 г. и космических съемок 2016 г. было установлено, что за 55 лет площадь ледников Нежданного и Соседнего сократилась на 15.2 %.

Согласно нашим данным, в период 1973–2019 гг. суммарная площадь этих двух ледников сократилась на 23 %. Такое расхождение в оценках сокращения, возможно, связано со сложностью дешифрирования по космическим снимкам нижней границы ледников, которая покрыта мощным моренным чехлом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Каталог ледников на Корякское нагорье был составлен по данным топокарт и аэрофотосъемки, количество ледников в нем указано почти в 2.5 раза больше, чем было обнаружено на снимках. По-видимому, многие каменные глетчеры были приняты за живые ледники. Авторы попытались осуществить возможную переоценку площадей

Таблица 1. Оценка площадей ледников Корякского нагорья по снимкам CORONA (1972 г.) и Sentinel-2 (2019 г.) в сравнении с КATALOGом ледников СССР [1982] (данные 1967 г.)

Бассейн	$\Delta S_{1967-1972}$	$\Delta S_{1967-2019}$	$\Delta S_{1972-2019}$	Сравнение с данными КATALOGа, %		Количество ледников (по снимкам CORONA)
	км ²			расхождение	удовлетворительные	
Хр. Пикась – хр. Укаэлят	0.15	0.30	0.15	43.1	56.9	174
Хр. Укаэлят – хр. Снеговой	0.04	0.23	0.18	44.7	55.3	114
Р. Ильпи – р. Имолканаваям	-0.01	0.11	0.12	33.3	66.7	39
Р. Ватына	0.06	0.20	0.14	31.25	68.75	80
Р. Аниваям – р. Мачевна	0.01	0.14	0.13	17.5	82.5	97
Бухта Мачевна – р. Апука	-0.01	0.12	0.13	32.35	67.65	34
Р. Апукаваям	0.14	0.29	0.14	54.0	46.0	87
Все ледники с открытым льдом	0.11	0.36	0.25	43.3	56.7	178

Примечание. Разности площадей ледников: $\Delta S_{1967-1972}$ – данные КATALOGа и снимков CORONA; $\Delta S_{1967-2019}$ – данные КATALOGа и снимков Sentinel-2; $\Delta S_{1972-2019}$ – данные снимков CORONA и Sentinel-2.

ледников в каталоге на этот регион, исходя из того, что данные снимков CORONA отражают состояние ледников нагорья на время составления каталога.

В табл. 1 для групп (бассейнов) ледников показаны разности площадей ледников ($\Delta S_{1967-1972}$) и расхождения (завышение или занижение) площадей по сравнению со снимками. Завышением (занижением) считалось, если площадь в каталоге была выше (ниже) площади ледника по снимку CORONA на величину от 0.015 до 0.25 км² в зависимости от диапазона значений площадей. Диапазоны площадей ледников Корякского нагорья: 0.01–0.05; 0.05–0.10; 0.10–0.50; 0.50–1.0; 1.0–1.5 км².

Большие расхождения оказались для объектов в бассейне р. Апукаваям (более 50 %), в бассейнах между основными хребтами Пикась и Укаэлят, Укаэлят и Снеговой (в пределах 40–45 %), а также для группы ледников с открытым льдом, т. е. для тех объектов, которые были точно определены как ледники по снимкам Sentinel-2 за 2019 г. Причина состоит в недостаточной точности определения объектов по аэрофотоснимкам из-за наличия снега или значительного моренного чехла (обломочного материала), покрывающего тело ледника. Поэтому сравнение современного состояния ледников Корякского нагорья с КATALOGом ледников СССР [1982] на этот район носит относительный характер. Сравнение же с данными состояния ледников, полученными по архивным снимкам CORONA, с современным положением представляется более корректным.

Распределение анализируемых объектов (ледников, как указано в [КАТАЛОГ..., 1982]) по экспозиции склона и морфологическому типу дано в табл. 2.

Наибольшие площади характерны для ледников северо-восточной экспозиции (наиболее кли-

матически холодной), относящихся к долинному морфологическому типу. Наименьшими в среднем являются ледники восточной, юго-западной экспозиции, висячие и каровые типы.

Распределение высот границы питания ледников, определенных с помощью ArcticDem на эти годы, в среднем по бассейнам показано на рис. 6. На рис. 6 также приведены максимальные высоты хребтов (H_{high}), где находятся ледники. На оси абсцисс дано географическое местоположение бассейнов на территории Корякского нагорья (см. рис. 1).

Таблица 2. Характеристика ледников по экспозиции и морфологическому типу

Ледник	Количество	Средняя площадь, км ²
Экспозиция		
Северная	195	0.08
Северо-восточная	84	0.16
Северо-западная	175	0.10
Южная	15	0.09
Юго-восточная	4	0.04
Юго-западная	33	0.07
Восточная	18	0.05
Западная	95	0.10
Всего	619	
Тип		
Каровый	486	0.16
Карово-долинный	67	0.47
Карово-висячий	9	0.22
Висячий	10	0.08
Долинный	36	1.25
Присклоновый	11	0.10
Всего	619	

Примечание. Жирным шрифтом выделены наибольшие значения площади ледника для каждого раздела.

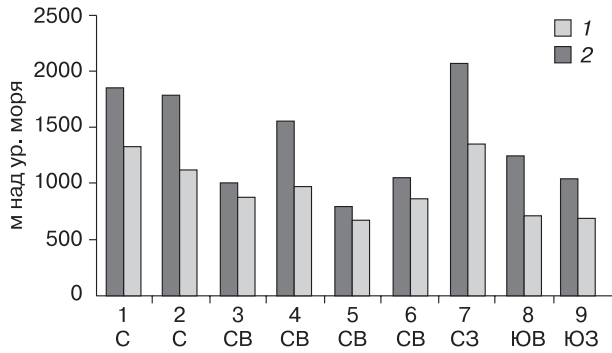


Рис. 6. Высота границы питания (1) по бассейнам и высшая точка диапазона ледников H_{high} в бассейне (2).

Ось абсцисс: 1–9 – номера соответствуют районам (см. рис. 1); внизу указано их местоположение в Корякском нагорье.

В целом ВГП ледников Корякского нагорья, которая зависит от климата и высоты вмещающих форм рельефа, в период относительно стабильного климата (конец 1960-х – начало 1970-х гг.) связана как с высотой хребтов H_{high} , так и с расположением относительно преобладающих воздушных масс, приносящих осадки с Тихого океана с северо-востока и северо-запада.

Были выполнены оценка площади всех найденных на снимках CORONA ледников и сопоставление этих значений с предыдущими оценками 2019 г. (Sentinel-2). Сравнение площадей ледников в 1967–1972 гг. и 2019 г. показано на рис. 7.

Наибольшее сокращение площади в абсолютных величинах (см. рис. 6) фиксируется для всех ледников с открытым льдом, т. е. для тех объектов, которые уверенно дешифрируются на снимках Sentinel-2 как ледники, поскольку они имеют относительно большие площади (от 0.5 до >4 км²),

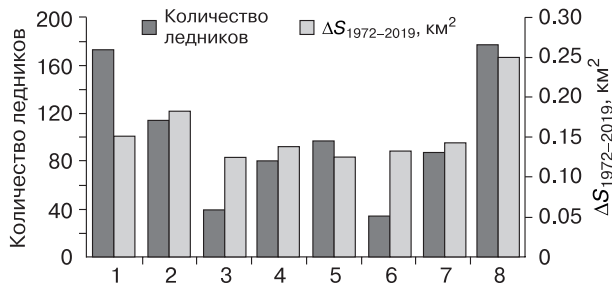


Рис. 7. Количество ледников в 2019 г. и сокращение площади ледников ($\Delta S_{1972-2019}$) с 1973 г. (CORONA) по 2019 г. (Sentinel-2).

Бассейны: 1 – хр. Пикась–хр. Укаэлят; 2 – хр. Укаэлят–хр. Снеговой; 3 – р. Ильпи–р. Имолканавая; 4 – р. Ватына; 5 – р. Аниваям–р. Мачевна; 6 – р. Мачевна–р. Апука; 7 – р. Апукавая, 8 – все ледники с открытым льдом.

а также для ледников бассейнов между хребтами Пикась и Укаэлят, Укаэлят и Снеговой, где в основном и расположены эти ледники. Наименьшее сокращение площади отмечается в бассейне рек Ильпи–Имолканавая, где ледники меньше по площади. Если судить по относительным величинам сокращения площади и среднего по площади ледника для указанных групп, то закономерность обратная: чем больше средняя площадь ледника, тем меньше сокращение.

Уменьшение площади со времени съемок и получения снимков CORONA по 2019 г. по группам с единым морфологическим типом приведено на рис. 8.

В Корякском нагорье большинство ледников принадлежит к каровому морфологическому типу (средняя площадь ледника этой группы в 1973 г. составляла 0.16 км², в 2019 г. – 0.05 км²), далее идут карово-долинные (средняя площадь ледников группы 0.44–0.17 км²), долинные ледники (1.13–0.64 км²), карово-висячие (0.21–0.05 км²), висячие (0.09–0.01 км²) и присклоновые (0.10–0.02 км²) ледники. Наибольшее сокращение в абсолютных значениях характерно для долинных и карово-долинных типов. Морфологический тип ледника связан с фактором рельефа подстилающей поверхности ледников, их экспозиция определяет в некоторой степени климатические условия существования: это в основном направленность к влагонесущим воздушным потокам и температурные условия. Большинство ледников нагорья имеют северную, северо-западную и северо-восточную экспозицию. Велика также доля ледников западных румбов. Относительное сокращение площади $\Delta S_{1973-2019}$ максимально для лед-

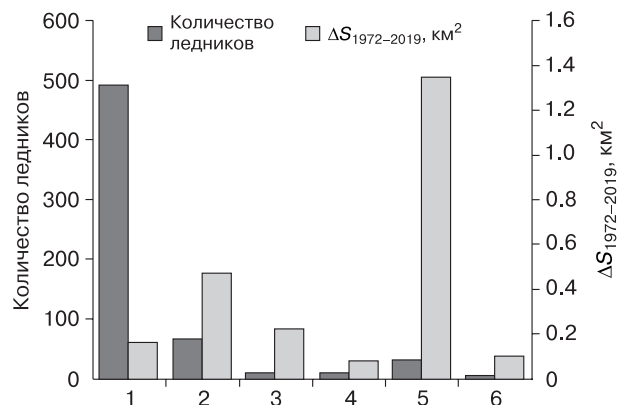


Рис. 8. Сокращение площади для ледников различных морфологических типов (определенных по Каталогу ледников СССР).

Типы ледников: 1 – каровый (486); 2 – долинный (36); 3 – карово-долинный (67); 4 – карово-висячий (9); 5 – висячий (10); 6 – присклоновый (11). В скобках – количество ледников.

ников восточной и юго-восточной экспозиции – 72.0 и 76.4 %, минимально для северо-восточной (наиболее холодное направление) и западной (максимум приходящих осадков) экспозиции – 55.9 и 57.1 % соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В настоящей работе уточняются сведения о ледниках Корякского нагорья, ранее полученные в [Ананичева, 2012; Ananicheva, Aleinikov, 2022], с помощью архивных космических снимков CORONA. По снимкам Ladsat и ASTER за 2003 г. авторами было найдено 237 ледников, по Sentinel-2 за 2019 г. – 212 ледников с открытым льдом, по снимкам CORONA (начало 1970-х гг.) только 178 ледников с открытым льдом, хорошо идентифицируемых как ледники (а не покрытые обломочным материалом возможные каменные глетчеры). Но нужно учитывать, что снимки CORONA не покрывают всю территорию распространения ледников, приведенных в [Каталог..., 1982]. Эти сведения указывают на значительные погрешности Каталога ледников СССР [1982] на территорию Корякского нагорья (в котором указано 715 ледников).

Большие расхождения характерны для объектов в бассейне р. Апукаваям, в бассейнах между хребтами Пикась и Укаэлят, Укаэлят и Снеговой, где в основном и находятся ледники нагорья. Следовательно, значительные расхождения свойственны группам тех объектов, которые были точно определены как ледники по снимкам Sentinel-2 за 2019 г.

По аэрофотоснимкам при наличии снега и значительной степени покрытия объектов обломочным материалом, как это имеет место в Корякском нагорье, сложно четко идентифицировать их как “живые” ледники и определить площади с высокой точностью. В новом электронном каталоге [Хромова и др., 2021] содержатся сведения о почти 900 ледниках. Оценка авторов этой работы базировалась на снимках 2019 г., но исследование велось по ледникам, на которых был виден лед, и их можно уверенно отнести к “живым” ледникам. Их количество оказалось несколько меньше, чем в работе [Ананичева, 2012], что логично при изменениях климата в последние десятилетия. Гляциальные объекты, которые по снимкам Sentinel-2 за 2019 г. были покрыты обломочным материалом и лед в них не просматривался, мы отнесли к возможному каменным глетчерам.

Представляется, что результаты дешифрирования снимков 2019 г. наиболее близки к реальной ситуации на данный период времени. Результаты авторов по определению площадей по снимкам меньшего разрешения за 2003 г. дали такие оценки: уменьшение площади ледников Корякского нагорья оценивалось в 69 % со времени составления

Каталога ледников СССР [1982]. Учитывая то, что сейчас проведено сравнение с ситуацией 2019 г., результаты выглядят вполне достоверными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа является продолжением исследования изменения состояния ледников Корякского нагорья, сделанного авторами в 2003 г. по снимкам Ladsat и ASTER, а также по Sentinel-2 в 2019 г. Здесь по снимкам CORONA на начало 1970-х гг. была предпринята попытка проверить данные Каталога ледников СССР [1982] на исследуемый регион, поскольку анализ 2003 и 2019 гг. показал, что этот каталог завышает количество ледников и требует верификации.

При покрытии снимками CORONA примерно 85 % объектов, указанных в каталоге, было установлено, что абсолютное сокращение площади ледников (ледниковых объектов) колеблется от 0.12 до 0.25 км² для разных бассейнов. Относительное сокращение – от 52 до 68 %. Наибольшее сокращение отмечено для ледников каровых и висячих, восточной и юго-восточной экспозиции.

Карты трендов температуры и осадков, построенные по данным только метеостанций за период 1966–2021 гг., демонстрируют неблагоприятные для развития оледенения тенденции: положительные тренды температур средней годовой и средней летней, слабый рост твердых осадков и больший (по сравнению с твердыми) рост жидких осадков.

Благодарности. Работа выполнена по проекту государственного задания (рег. № НИОКТР АААА-А19-119022190172-5; № 0148-2019-0004).

Литература

- Ананичева М.Д. Современное состояние ледников Корякского нагорья и оценка их эволюции к середине текущего столетия // Лед и снег, 2012, т. 52, № 1, с. 15–23.
- Ананичева М.Д., Кононов Ю.М. Горные ледники Севера России: изменения за последние десятилетия под воздействием вариаций климата // Фундам. и прикл. климатология, 2020, т. 3, с. 42–72.
- Ананичева М.Д., Пакин Г.Ю., Кононов Ю.М. Байкальская ледниковая система, новые находки // Лед и снег, 2019, т. 59, № 1, с. 135–144.
- Васьковский А.П. Современное оледенение Северо-Востока СССР // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР, вып. 9, с. 71–91.
- Галанин А.А. Каменные глетчеры – особый тип современного горного оледенения северо-востока Азии // Вестн. ДВО РАН, 2005, № 5, с. 59–70.
- Каталог ледников СССР. Т. 20. Ч. 1. Корякское нагорье / Ред. О.Н. Виноградов, Г. И. Коновалова, Н.М. Сватков. Л., Гидрометеиздат, 1982, 78 с.
- Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Никитин С.А. Баланс массы ледников Корякского нагорья Нежданный и Соседний за 1961–2016 гг. // Лед и снег, 2022, т. 62, № 1, с. 5–16.

Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф. и др. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // *Лед и снег*, 2021, т. 61, № 3, с. 341–358.

Ananicheva M., Aleinikov A. Glaciers of the Koryak Highlands: assessment of the state using satellite images and field studies // *Bull. Geogr. (Phys. Geogr. Ser.)*, 2022, No. 22, p. 45–58.

Porter C., Morin P., Howat I. et al. ArcticDEM, 2018. – <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKHHarvard.Dataverse.V3>. (дата обращения: 01.03.2021).

Takahashi S., Sugiura K., Kameda T. et al. Response of glaciers in the Suntar-Khayata range, eastern Siberia, to climate change // *Ann. Glaciol.*, 2011, vol. 52 (58), p. 185–192.

References

Ananicheva M.D. The current state of glaciers within the Koryak Highland and assessment of their development by the middle of this century. *Led i sneg [Ice and Snow]*, 2012, vol. 52 (1), p. 15–23.

Ananicheva M.D., Kononov Yu.M. Mountain glaciers of the Russian north: changes over the past decades under climate variations. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and Applied Climatology]*, 2020, vol. 3, p. 42–72. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-3-42-72.

Ananicheva M.D., Pakin G.Yu., Kononov Yu.M. Baikal glacier system, new findings. *Led i sneg [Ice and Snow]*, 2019, vol. 59 (1), p. 135–144.

Vaskovsky A.P. Modern glaciation of the North-East of the USSR. *Materialy po geologii i poleznym iskopayemym Severo-*

Vostoka SSSR [Materials on geology and mineral resources of the North-East of the USSR], 1955, iss. 9, p. 71–91.

Galanin A.A. Rock glaciers are a special type of modern mountain glaciers in Northeast Asia. *Vestnik DVO RAN [Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences]*, 2005, vol. 5, p. 59–70.

Katalog lednikov SSSR [The USSR Glacier Inventory]. Vol. 20. Pt 1. Koryak Highland. O.N. Vinogradov, G.I. Kononova, N.V. Svatkov (eds.). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1982, 75 p. (in Russian).

Nosenko G.A., Muraviev A.Ya., Nikitin S.A. Mass balance of the Nezhdannyy and Sosedny glaciers of the Koryak Highlands in 1961–2016. *Led i sneg [Ice and Snow]*, 2022, vol. 62 (1), p. 5–16. DOI: 10.31857/S2076673422010112.

Khromova T.E., Nosenko G.A., Glazovsky A.F. et al. New Catalog of Russian Glaciers Based on Satellite Data (2016–2019). *Led i sneg [Ice and Snow]*, 2021, vol. 61 (3), p. 341–358.

Ananicheva M., Aleinikov A. Glaciers of the Koryak Highlands: assessment of the state using satellite images and field studies. *Bull. Geogr. (Phys. Geogr. Ser.)*, 2022, No. 22, p. 45–58.

Porter C., Morin P., Howat I., Noh M. et al. ArcticDEM, 2018. DOI: <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKHHarvard.Dataverse.V3> (last visited: 01.03.2021).

Takahashi S., Sugiura K., Kameda T. et al. Response of glaciers in the Suntar-Khayata range, eastern Siberia, to climate change. *Ann. Glaciol.*, 2011, vol. 52 (58), p. 185–192. DOI: 10.3189/172756411797252086.

*Поступила в редакцию 25 апреля 2023 г.,
после доработки – 15 июля 2023 г.,
принята к публикации 14 сентября 2023 г.*