

ГЛЯЦИОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.324
doi: 10.17223/25421379/35/6



ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДНИКОВ КОРЯКСКОГО НАГОРЬЯ В ПЕРИОД С 1972 ПО 2019 г.

Мария Дмитриевна Ананичева¹, Юрий Михайлович Кононов²

^{1,2} *Институт географии РАН, Москва, Россия*

¹ *maranan@gmail.com*

² *jukon02@mail.ru*

Аннотация. Изменения площади ледников Корякского нагорья были количественно оценены за период 1972–2019 гг. по данным дистанционного зондирования (спутниковые снимки Corona и Sentinel-2). За этот период площадь ледников сократилась почти вдвое, с 85,1 до 38,9 км². Средняя скорость изменения площади составила 0,98 км²/год. Убыль площади каждого ледника колебалась от 14,3 до 81,4 %. Ледники с восточной, северо-восточной и юго-западной экспозицией потеряли ~62 % своей площади, тогда как ледники северной, северо-западной и западной экспозиции потеряли ~57 %. Наименьшую потерю своей площади (в среднем 47,4 %) понесли небольшие ледники с южной экспозицией.

Ключевые слова: *Северо-Восточная Азия, Корякское нагорье, горные ледники, дистанционное зондирование, изменение ледников, изменение климата*

Благодарности: авторы благодарны А.А. Алейникову (Группа компаний «СКАНЭКС») за помощь в обработке спутниковых снимков, использованных в данной работе.

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0004 (№ 41021051703465-1).

Для цитирования: Ананичева М.Д., Кононов Ю.М. Изменения ледников Корякского нагорья в период с 1972 по 2019 г. // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 72–88. doi: 10.17223/25421379/35/6

Original article
doi: 10.17223/25421379/35/6

GLACIER CHANGE ON THE KORYAK HIGHLANDS, NORTH-EAST ASIA, BETWEEN 1972 AND 2019

Maria D. Ananicheva¹, Yury M. Kononov²

^{1,2} *Institute of Geography, RAS, Moscow, Russia*

¹ *maranan@gmail.com*

² *jukon02@mail.ru*

Abstract. The availability of satellite imagery offers the opportunity to view glacier changes for remote and inaccessible regions such as the Koryak Highlands (Northeastern Russia). In this study, multi-annual fluctuations of glacier area for this region were assessed for the period 1972–2019 based on different satellite images. Since study of the glaciers in the 20th century in this region was scarce and contradictory, the character of glacier changes and its relation to climate are poorly understood. There are not enough reliable data in the USSR Glacier Inventory compiled in the end of 1960s for this region, therefore a reassessment is necessary. For this purpose, Corona images offer a valuable opportunity to map margins of the glaciers around the 1970s. The state of glaciers in 2019 was obtained based on Sentinel-2 images. As a result, over the period from 1972 to 2019, the total surface area of glaciers in the Koryak Highlands decreased by almost half: from 85.1 ± 0.9 km² in 1972 to 38.9 ± 0.8 km² in 2019. The mean rate of area change was 0.98 km² yr⁻¹ over the study period. The surface area loss of each glacier for 1972–2019 ranged from 14.3 to 81.4 %. Glaciers with an area of less than 0.2 km² lost on average 63.7% of their area. Glaciers with an area of 0.2 to 0.5 km² and from 0.5 to 0.1 km² lost 58.1 % and 53.9 % of their area, respectively, over the same period. The largest glaciers (more than 1 km²) lost the least area (on average, 46.2 %). Glaciers with eastern, northeastern and southwestern aspects lost respectively 61.8 %, 60.4 % and 63.5 % of their area, while glaciers with northern, northwestern and western aspects lost respectively, 58.5 %, 56.6 % and 57.2 % of their area for 1972 to 2019. The small glaciers, which are few in number of the southern aspect showed the

least area loss (on average, 47.4 %). The degree of the glaciers preservation even with significant reduction in area points at more important role of the orographic factor (relief features) compared to climatic one. Glaciers of the Koryak and Chukotka highlands demonstrate approximately the same rate of reduction in percentage for the entire period from 1972/75 to 2019. However, compared to the glaciers of the Sredinny Range on Kamchatka, glaciation in the Koryak and Chukotka Highlands decreased faster.

Keywords: *Northeastern Asia, Koryak Highlands, mountain glaciers, remote sensing, glacier change, climate change*

Acknowledgments: The authors are grateful to A.A. Aleinikov (SCANEX Group of Companies) for his assistance in processing satellite images used in this work.

Source of financing: The study was carried out within the framework of the State Assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0004 (No. 1021051703465-1).

For citation: Ananicheva M.D., Kononov Yu.M. (2025) Glacier change on the Koryak Highlands, north-east Asia, between 1972 and 2019. *Geosferye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. 71–88. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/6

Введение

Ледники являются важным компонентом высокогорных ландшафтов [Oerlemans, 1994; Vaughan et al., 2014; Huss et al., 2017; Marzeion et al., 2018; Pepin et al., 2022]. Аккумулируя в себе значительные водные запасы, поступающие в виде атмосферных осадков, горные ледники оказывают определяющее воздействие на гидрологический режим близлежащих территорий [Barnett et al., 2005; Viviroli et al., 2011; Musselman et al., 2017; Huss, Hock, 2018; Zemp et al., 2019]. Кроме того, горные ледники часто могут способствовать возникновению опасных природных явлений, в первую очередь селевых потоков. В обоих случаях они выступают в роли весьма нестабильных природных объектов, которые откликаются на всевозможные изменения климатических условий. Таким образом, чувствительность оледенения к изменению климата и потенциально значительные для человечества последствия его деградации требуют надежных оценок изменения состояния ледников в условиях современного и ожидаемого в ближайшем будущем климата. Для получения таких оценок и анализа остающихся неопределенностей необходимы данные мониторинга оледенения в разных физико-географических условиях [Andreassen et al., 2005; Chinn et al., 2005; Kononov et al., 2005; Braithwaite, 2009; Takahashi et al., 2011; Bliss et al., 2014; Zemp et al., 2015; Das et al., 2023].

В континентальной части России находятся 18 горно-ледниковых систем. Первой системной оценкой оледенения на территории России является Каталог ледников СССР [1965–1982], по данным которого в середине XX в. на территории России насчитывалось свыше 8,5 тысяч ледников общей площадью около 6 тыс. км². Однако из-за труднодоступности некоторых регионов и недостаточной развитости методов дистанционного анализа эти материалы были не полными. К таким районам относится и Корякское нагорье, оледенению которого посвящено данное исследование.

Корякское нагорье расположено на северо-востоке Азиатской части России вдоль Берингова моря, между Анадырским заливом и п-ом Камчатка. Удалённость и труднодоступность объекта исследований создают серьёзное препятствие для организации наземных наблюдений. Поэтому основным инструментом изучения ледников здесь остается дистанционное зондирование. Вместе с тем наличие здесь переходных состояний и форм между классическими ледниками и каменными глетчерами затрудняет их идентификацию.

Первые сведения о ледниках Корякского нагорья были получены в 1937 г. во время геологической экспедиции [Николаев, Колосов, 1939]. В 1955 г. были получены первые подсчёты числа и площади ледников по данным аэрофотосъёмки [Васьковский, 1955]. Последующие исследования постепенно дополняли и уточняли информацию о числе и параметрах ледников Корякского нагорья [Сватков, 1965], и в наиболее полном виде она была представлена в отдельном томе Каталога ледников СССР [Виноградов и др., 1982]. Раздел, посвященный Корякскому нагорью, был составлен по картам издания 1952 г., созданным на основе аэрофотосъёмки 1949–1950 гг. Однако сложности в проведении полноценных полевых исследований не позволили обеспечить эти данные достаточной степенью надежности. Использовались снимки разного разрешения, полученные в разное время года. Разными были методы и подходы к процессу дешифрирования, а также анализу полученных результатов, что существенно затрудняет сравнительную оценку современного состояния ледниковых районов. В результате такой ценный ресурс, как Каталог ледников СССР, в части Корякского нагорья оказался малопригодным для оценки изменения горного оледенения указанного района за последние десятилетия [Седов, 2001; Ананичева, 2012; Ананичева и др., 2012; Носенко и др., 2022].

Первый сравнительный анализ параметров оледенения Корякского нагорья представленных в ката-

логе ледников СССР и данных дистанционного зондирования был предпринят нами в работе [Ананичева и др., 2023]. Основная цель представляемого здесь исследования – провести более детальную ревизию данных о числе и параметрах ледников Корякского нагорья [Виноградов и др., 1982], используя надежные материалы дистанционного зондирования, выполненные во время максимально близкое к составлению каталога. Мы привлекли набор архивных снимков Corona, датированных 1967–1973 гг., доступ к которым появился в последнее время. Следующей основной задачей исследования было оценить изменения основных параметров оледенения

Корякского нагорья за последние десятилетия на фоне меняющегося климата.

Район исследований

Корякское нагорье занимает обширную территорию на крайнем северо-востоке Азиатской территории России (рис. 1). С юго-востока оно омывается Беринговым морем, на юго-западе – водами мелководного Пенжинского залива Охотского моря, на северо-востоке – также мелководным Анадырским заливом. Протяжённость его с юга на север порядка 800 км, ширина от 80 до 270 км.

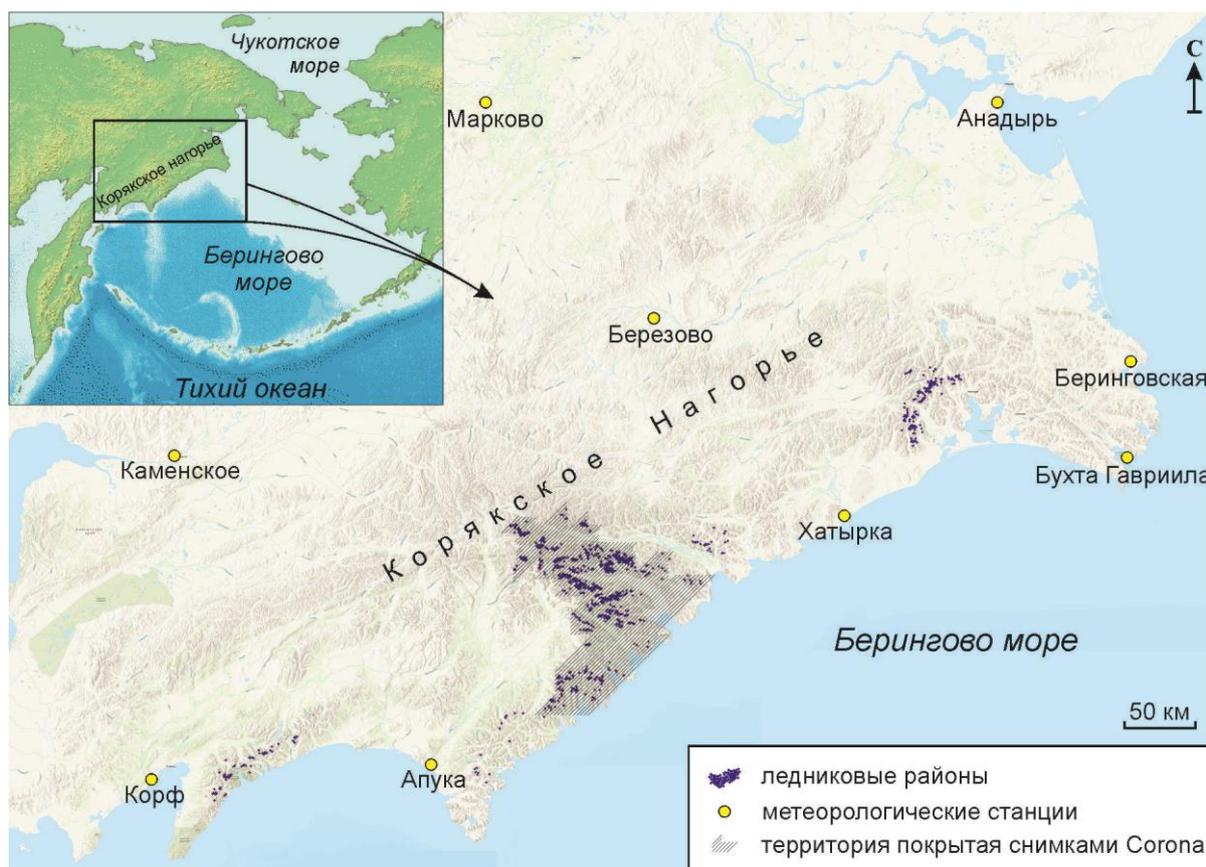


Рис. 1. Карта расположения Корякского нагорья с указанием района исследований и местоположением ледников

Fig. 1. Location map of the Koryak Highlands showing the region of study with glaciers areas

Корякское нагорье состоит из параллельных антиклинальных хребтов, ориентированных преимущественно с северо-востока на юго-запад. Хребты имеют хорошо выраженный альпийский характер с многочисленными карами и подвижными каменистыми осыпями. Диапазон преобладающих высот 600–1 800 м (высшая точка в центральной части – гора Ледяная, 2453 м над ур. м.).

Климат в районе нагорья морской, с муссонным характером. Лето короткое и прохладное, с затяжными дождями и туманами, возможны снегопады из-за преобладающего переноса воздуха с океана на сушу. Средняя температура июля составляет 9 °С. Зимой отмечаются сильные ветры при относительно небольших морозах. Средняя температура января от –14 °С на побережье до –24 °С в горах.

Осадки формируются при вторжении тихоокеанских циклонов. Годовое количество осадков – на юго-восточном склоне свыше 700 мм, на северо-западном – 400 мм. Основное количество твёрдых осадков выпадает в первую половину зимы, но их распределение по территории неравномерно. Частота и мощность их выпадения резко уменьшаются по мере удаления от побережья. Снег не тает в течение года на высотах свыше 1400 м на северных склонах и 1980 м – на южных. Ущелья северной и северо-западной части заполнены плотным снегом вплоть до августа.

Материалы и методы исследований

В данном исследовании использовались различные наборы данных для оценки изменений ледников в период с 1972 по 2019 г. В качестве основного источника данных дистанционного зондирования выступают спутниковые снимки Corona (1972 г.) и Sentinel-2 (2019 г.)

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 плёнок хранятся в Службе архивов и записей США (National Archives and Records Administration, NARA), копии – в USGS EROS DataCenter, который и занимается сканированием и продажей данных.

Для Корякского нагорья в глобальном архиве имеются снимки за 1972 г. 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 30-метровым разрешением.

Привязка снимков Corona осуществлялась путём точного совмещения с космическим снимком Sentinel-2 по общим элементам рельефа, которые не были подвержены изменениям, таким как скальные выступы, горные гребни вершины гор, крупные груды камней, скальные обрывы берегов. Особенности ландшафта заключается в отсутствии надежных опорных точек, обычно используемых при привязке (пересечение дорог, мостов). Поэтому для обеспече-

ния 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.

По снимкам Corona 1972 г. анализировались ледники большой группы северной части Корякского нагорья и меньшей по количеству ледников южной части нагорья. Нам удалось получить снимки, покрывающие 619 объектов из 715 упомянутых в Каталоге ледников СССР как ледники [Виноградов и др., 1982]. Оценивались площади, длины, характерные высотные точки для определения высоты границы питания (equilibrium line altitude – ELA). Использовался пакет программ ArcGis, ArcMap, определение контуров ледников выполнялось в ручном режиме. Самое оптимальное время дешифрирования ледников для данного района – 10–20 августа по снимкам 1972 г. В более ранние сроки большое количество сезонного снега делает невозможным корректно определять контуры ледника. После 20 августа слишком большие тени от горных хребтов могут мешать дешифрированию, а позже 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 твёрдых осадков, облачности и других факторов.

Для дешифрирования ледников 2019 г. использовались снимки Sentinel-2A/2B. Данные Sentinel-2 представляются Европейским космическим агентством (European Space Agency, ESA) пользователям на бесплатной основе (<https://scihub.copernicus.eu>). В работе использовалась мозаика цифровой модели рельефа (ЦМР) ArcticDEM 3.0 с пространственным разрешением 2 м (<https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem>).

Что касается точности определения площадей ледников на 2019 г., то нами проведено сравнение ортофотопланов ледников, сделанных по аэрофото-снимкам с дрона (БПЛА) во время экспедиции 2020 г. и Sentinel-2 2019 г. для четырех ледников: № 678, 679, 680 и 685 (номера даны по Каталогу ледников СССР). Разница составила от 2 до 12 %, что может являться оценкой погрешности определения контуров ледников [Ananicheva, Aleinikov, 2022].

Для оценки общей тенденции динамики важных для ледников климатических параметров исследовались изменения годовой и средней летней температуры воздуха, а также общих осадков (в течение года), осадков холодного периода (когда темпера-

туры весь месяц были устойчиво ниже нуля) и осадков теплого периода по имеющимся данным метеостанций (табл. 1). Для их расчета использовался временной отрезок с 1966 (когда были исправлены показатели осадкомеров на северных станциях РФ) по 2021 г. Метеопараметры были получены по метеостанциям (табл. 1) из базы данных [Булыгина и др., 2020, а, б].

Однако близко расположенных к району исследований метеостанций нет, но представление о характере изменений основных климатических факторов (летних температур воздуха и зимних осадков), влияющих на режим и баланс массы ледников, можно получить по данным реанализа ECMWF ERA5-land (<https://climate.copernicus.eu/>). Применение данных ERA5 обусловлено рядом достоинств: непрерывными рядами данных, высоким пространственным разрешением ($0,1^\circ \times 0,1^\circ$) с исходным разрешением 9 км. [Copernicus ...], а также высокой точностью описания температурного режима. Набор данных ERA5-Land, как и любое другое моделирование, дает

оценки, которые имеют некоторую степень неопределенности [Muñoz-Sabater et al., 2021]. Для выявления пространственной неоднородности и оценки погрешностей был проведен корреляционный анализ метеорологических показателей между метеостанциями и данными реанализа ERA5.

В качестве основного параметра, отражающего связь оледенения с климатом, используется высота границы питания (Equilibrium line altitude, ELA) – граница, разделяющая область аккумуляции от зоны абляции на леднике. Значения ELA рассчитаны по упрощенному методу Куровского для всех ледников [Калесник, 1963; Braithwaite, 2015]. Оценки этого параметра определяются с ошибкой от 5 до 15 % [Ananicheva et al., 2010]. Применяя методы Куровского – Гефера, мы получаем среднюю многолетнюю границу питания ледника для периода его сокращения. При наступании ледника ошибки из-за допущения стационарности и линейности абляции имеют одинаковый знак, т.е. складываются, а в периоды сокращения ледника они имеют противоположный знак, т.е. компенсируют друг друга.

Таблица 1

Метеостанции и их основные характеристики

Table 1

Weather stations and their main parameters

№	Индекс ВМО	Название	Широта, С.	Долгота, В.	Высота, м над ур. м	Период наблюдений, годы
1	25954	Корф	60°21'	166°00'	2	1936–2021
2	25956	Апука	60°26'	169°40'	3	1936–2021
3	25767	Хатырка	62°03'	175°12'	17	1955–2013
4	25777	Бухта Гавриила	62°25'	179°08'	4	1935–1995
5	25744	Каменское	62°29'	166°13'	35	1950–2021
6	25677	Беринговская	63°03'	179°19'	86	1944–1992
7	25656	Березово	63°27'	172°42'	200	1944–1994
8	25551	Марково	64°41'	170°25'	25	1895–2020
9	25563	Анадырь	64°47'	177°34'	64	1899–2021

Примечание. Начало наблюдений указано для измерения температуры воздуха. Измерение осадков для всех станций представлено с 1966 г.

Note. The start of observations is indicated for the air temperature. Precipitation measurements for all stations have been presented since 1966.

Результаты исследования и их обсуждение

Основные характеристики современного оледенения Корякского нагорья были подробно представлены в [Ananicheva, Aleinikov, 2022]. Эти данные использовались в настоящем исследовании для оценки динамики оледенения во времени. В этом подразделе представлены новые данные о состоянии оледенения Корякского нагорья в 1972 г., полученные по спутниковым снимкам Copona.

Нужно учитывать, что снимки Copona не покрывают 100 % территории распространения ледников, указанных в Каталоге ледников СССР. В общей

сложности на изображениях Copona от 1972 г. было выделено 175 ледников размером от 0,05 до 4,33 км². Причем большинство ледников имели площади до 2 км², и только один ледник занимал площадь более 4 км². Общая площадь оледенения в 1972 г. составила 85,14 км². Различные топографические параметры ледников разных размерных групп приведены в табл. 2. Подавляющее большинство ледников (156) Корякского нагорья имеют площадь от 0,1 до 1 км². На их долю приходится 68 % от общей площади оледенения. Почти половина ледников (83 или 47,4 %) входят в размерный класс 0,2–0,5 км², при этом на их долю приходится 32,5 % общей площади оледенения.

Количество ледников размерного класса $> 1 \text{ км}^2$ составляет всего 15 (8,6 %), однако они занимают 31,5 % общей площади оледенения. Ледники размерного класса $< 0,1 \text{ км}^2$ являются самыми малочисленными (4, или 2,3 %), и на их долю приходится лишь 0,4 % общей площади оледенения. Средняя высота отдельных ледников колеблется от 470 до 2050 м над ур. м, со средней высотой 1146 м над ур. м. Средняя минимальная и максимальная высота всех ледников составляет 999 м и 1293 м. Более крупные ледники ($> 1 \text{ км}^2$) имеют более широкий диапазон высот (532 м), а их зона абляции находится на более низких высотах по сравнению с более мелкими ледниками. В целом наблюдается закономерность – диапазон высот растет по мере увеличения

размерного класса ледниковых групп (табл. 2, рис. 2). Большинство ледников располагалось на склонах северной и северо-западной экспозиции. Примерно также была распределена и площадь оледенения. В 1972 г. на территории Корякского нагорья не было ни одного ледника юго-восточной экспозиции (рис. 2).

Как уже отмечалось выше, для анализа изменения оледенения Корякского нагорья во времени, наряду со снимками Corona от 1972 г. использовались материалы спутниковой съемки Sentinel-2 от 2019 г. (рис. 3). Общая площадь ледников сократилась с $85,1 \text{ км}^2$ в 1972 г. до $38,9 \text{ км}^2$ в 2019 г. Средняя скорость изменения площади составила $0,98 \text{ км}^2/\text{год}$ за исследуемый период.

Таблица 2

Параметры ледников в 1972 г. в зависимости от размерной группы

Table 2

Glaciers parameters according to different size classes for all glaciers in 1972

Показатель	Размерная группа, км ²					Все
	< 0,1	0,1–0,2	0,2–0,5	0,5–1	> 1	
Количество	4 (2,3 %)	39 (22,3 %)	83 (47,4 %)	34 (19,4 %)	15 (8,6 %)	175
Площадь, км ²	0,3 (0,4 %)	6,1 (7,1 %)	27,6 (32,5 %)	24,3 (28,5 %)	26,8 (31,5 %)	85,1
Средняя высота, м	1 234	1 079	1 090	1 257	1 358	1 146
Средняя минимальная высота, м	1 163	983	955	1 065	1 092	999
Средняя максимальная высота, м	1 306	1 174	1 225	1 448	1 624	1 293
Средний высотный интервал, м	143	191	271	383	532	294

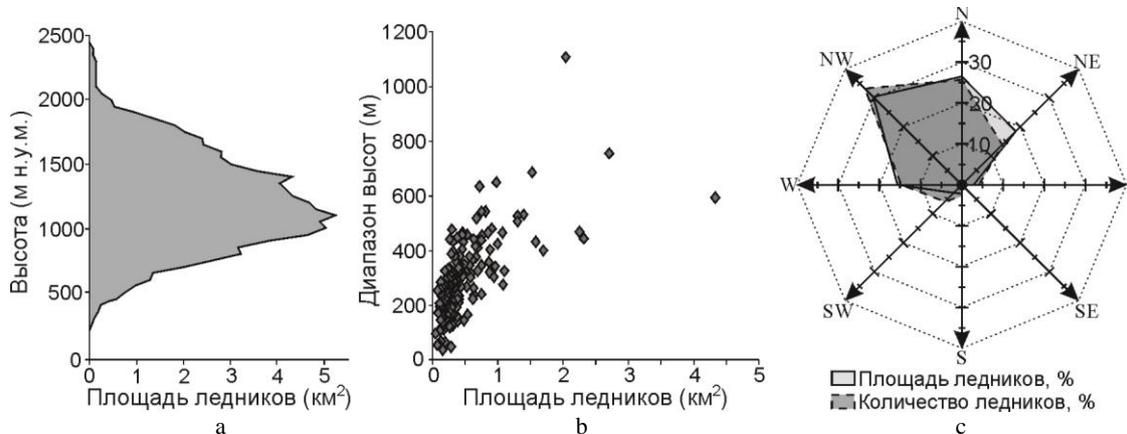


Рис. 2. Основные характеристики ледников Корякского нагорья в 1972 г.

a – распределение суммарной площади ледников по высоте; b – диаграмма разброса поверхностной площади ледников в зависимости от диапазона высот; c – распределение ледников по экспозиции

Fig. 2. Glacier parameters for the Koryak Highlands in 1972

a – elevation-dependent glacier spreading; b – scatter plot of surface area with respect to the elevation range; c – distribution of glaciers by aspects

Значительное сокращение общей площади оледенения способствовало существенному изменению в распределении ледников по размерным классам. Особенно сильно это выразилось в размерных группах $< 0,1$ и $0,1–0,2 \text{ км}^2$, в которые переместилось большинство ледников, имевших размеры площади от $0,2$

до 1 км^2 в 1972 г. В размерном классе $< 0,1 \text{ км}^2$ в 2019 г. оказалось 69 ледников, а в 1972 г. их было только 4. Тем не менее они занимают только 9,6 % от общей площади оледенения 2019 г. Эта группа занимает первое место по количеству ледников, но последнее по площади оледенения. Убыль площади

каждого ледника за 1972–2019 гг. колебалась от 14,3 до 81,4 %. Ледники площадью менее 0,2 км² потеряли в среднем 63,7 % от своей площади. Ледники площадью от 0,2 до 0,5 км² и от 0,5 до 0,1 км² потеряли 58,1 и 53,9 % площади соответственно за тот же период. Самые крупные ледники (более 1 км²) потеряли, в процентном отношении меньше всего площади (в среднем 46,2 %), главным образом потому, что эти ледники имеют сравнительно большую площадь аккумуляции по сравнению с более мелкими ледниками. Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о том, что более мелкие ледники потеряли большую долю площади по сравнению с более крупными ледниками (табл. 3, рис. 4, а). Ледники с восточной, северо-восточной и юго-западной экспозицией потеряли 61,8, 60,4 и 63,5 % своей площади соответственно в период с 1972 по 2019 г., тогда как ледники северной, северо-западной и западной экспозиции потеряли, соответственно, 58,5, 56,6 и 57,2 % своей площади. Наименьшую потерю своей площади (в среднем 47,4 %) понесли малочисленные и небольшие ледники южной экспозиции. Скорее всего, это связано с тем, что эти ледники сохраняются в силу благоприятных особенностей рельефа, которые защищают их от воздействия климата. Таким образом, экспозиция, как и высотное положение ледников, по-видимому, не играет значительной роли в изменении площади (рис. 4, б, с).

Ближайшие к Корьякскому нагорью районы с развитым современным оледенением расположены к северу – Чукотское нагорье, и к югу – горные хребты Камчатки. Так же, как и в Корьякском нагорье, комплексные исследования ледников этих районов началось со второй половины XX в. и были приурочены к составлению Каталога ледников СССР [Каталог..., 1965–1982].

Чукотское нагорье представляет собой систему средневысотных хребтов и низкогорных массивов. Для наиболее приподнятых участков нагорья характерно интенсивное расчленение и альпийские формы рельефа – цирки, кары, а также глубокие сквозные ледниковые долины. Ледники Чукотского нагорья представлены несколькими изолированными группами [Седов, 1997]. Три группы ледников располагаются в непосредственной близости от морского побережья. Четвёртая группа из четырёх каровых ледников находится в хр. Пекульней. Пять ледников пятой группы располагаются в Чантальском хребте в бассейне р. Амгуэма.

Согласно последним исследованиям, оледенение Чукотского нагорья в течение последних десятилетий

сокращается [Ананичева, Карпачевский, 2016; Ананичева и др., 2017; Ananicheva et al. 2020]. Со второй половины 1970-х гг. и до 2017 г. общая площадь ледников здесь сократилась с 17,4 до 12 км², или на 30 %. Средняя скорость сокращения была 0,14 км²/год. Скорость была неравномерной. До 2005 г. площади сокращались в среднем на 0,04 км² в год, а затем вплоть до 2017 г. уже со скоростью 0,26 км²/год.

Полуостров Камчатка расположен к югу от Корьякского нагорья и имеет вытянутую в меридиональном направлении форму. Западное побережье полуострова омывает Охотское море, восточное – Тихий океан. Большая часть Камчатки имеет горный рельеф. Крупнейшее горное сооружение – Срединный хребет, который представляет собой цепь вулканов высотой 1700–2600 м над ур. м, тянущуюся практически через весь полуостров с северо-востока на юго-запад. Большинство ледников приурочено к водоразделу северной части Срединного хребта. Кроме того, в центральной части Срединного хребта существуют относительно компактные узлы оледенения. Основной особенностью существования оледенения на Камчатке является высокая вулканическая активность.

Анализ изменений ледников [Муравьев, Носенко, 2013; Докукин и др., 2017; Муравьев, 2020а; Fukumoto et al., 2022] показал, что тенденция к сокращению их размеров, установившаяся во второй половине XX в., сохраняется и в настоящее время. Так, общее сокращение площади ледников Камчатки с 1950 по 2002–2015 гг. составило 10,6 %, или 82,81 км², однако в разных районах это происходит неодинаково. Больше всего сократились (27,6 %, или 24,6 км² за 1957–2013 гг.) ледники Кроноцкого полуострова, расположенного в средней части Тихоокеанского побережья. Существенно меньше сократились ледники северной части Срединного хребта (16,6 %, или 57,65 км² за 1950–2002 гг.) и вулканического массива Алней-Чашаконджа (19,5 %, или 11,8 км² за 1950–2010 гг.). Площадь оледенения Ичинского вулкана с 1950 по 2010–2014 гг. практически не изменилась благодаря мощному моренному покрову, бронирующему языки ледников. В пределах Ключевской группы вулканов, наоборот, наблюдается небольшой рост площади оледенения – 4,3 % (8,7 км²) с 1950 по 2010–2015 гг. Такая неоднородность в поведении ледников в разных районах Камчатки обусловлена разнообразием сочетаний форм макрорельефа, климатических характеристик и, в особенности, наличием (или отсутствием) современной вулканической активности [Докукин и др., 2017; Муравьев, 2020b; Fukumoto et al., 2022].

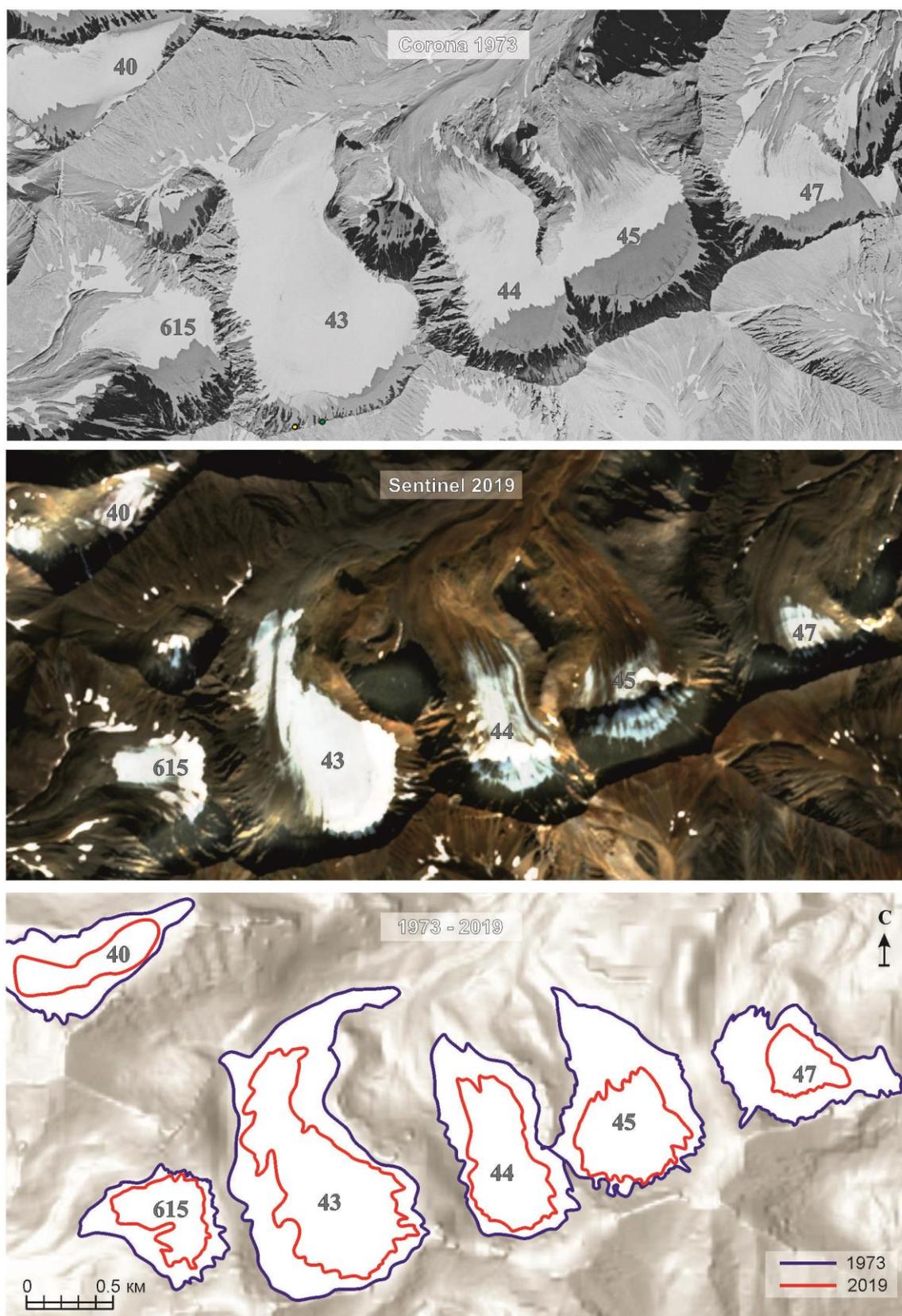


Рис. 3. Оцифровка контуров ледников по изображениям Corona (1972 г.) и Sentinel 2 (2019 г.)
Номера в пределах контуров ледников соответствуют номерам по Каталогу ледников СССР

Fig. 3. Digitization of glacier margins from Corona (1972) and Sentinel 2 (2019) images
Numbers of glaciers from the USSR Glacier Inventory are given on the glacier contours

Изменение параметров ледников в период с 1972 по 2019 г. в зависимости от размеров ледников

Glaciers parameters changes between 1972 and 2019 according to different size classes of the glaciers

Размерная группа, км ²	Общая площадь, км ²		Изменение площади, км ²
	1972	2019	
< 0,1	0,3	3,76	3,46
0,1–0,2	6,1	7,24	1,14
0,2–0,5	27,6	12,3	–15,3
0,5–1	24,3	6,5	–17,8
> 1	26,8	9,1	–17,7
Всего	85,1	38,9	–46,2

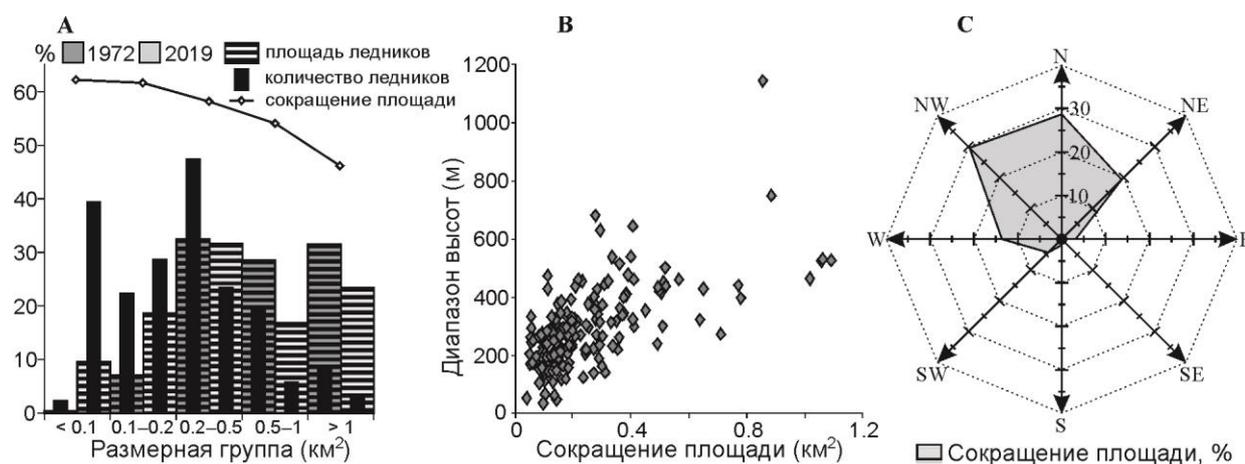


Рис. 4. Изменения ледников Корякского нагорья за период с 1972 по 2019 г. в зависимости от (а) размера, (б) диапазона высот и (с) экспозиции

Fig. 4. Glacier changes based on (a) size class, (b) elevation range, and (c) aspects in the Koryak Highlands between 1972 and 2019

Сравнительный анализ наших результатов показывает, что скорость сокращения относительной площади ледников за исследуемый период была почти одинакова для Корякского нагорья и Чукотского нагорья – 0,9 и 0,8 % в год соответственно. На Камчатке сокращение площади шло гораздо медленнее. Даже для района с самыми значительными потерями площади оледенения (Кроноцкий полуостров) их скорость убыли была 0,4 % в год, что почти в 2 раза ниже чем в Корякском нагорье и на Чукотке.

Вместе с тем скорость сокращения площадей ледников во всех упоминаемых районах не была равномерной за весь исследуемый период. В работе [Муравьев, 2020a] исследовались ледники Срединного хребта – района, где влияние вулканизма выражено в меньшей степени. В итоге автор отмечает, что потери за первые 15 лет XXI в. оказываются примерно равными общей сумме потерь за вторую половину XX в. Это означает, что в начале двадцать первого века скорость сокращения ледников в 4,3 раза больше, т.е. около 1,45 % площади в год.

В работе [Ананичева, 2012] было проанализировано, в том числе, состояние отдельных ледников Корякского нагорья в 2003 г., используя спутниковые снимки Landsat MSS, TM и ETM+ и Terralook ASTER. Здесь эти материалы использовались для определения скорости изменения площадей ледников за периоды до начала XXI в. и после. Согласно этим исследованиям, сокращение ледников Корякского нагорья в последние десятилетия XX в. происходило со скоростью 0,25 км²/год. А уже в начале XXI в. деградация ледников замедлилась до 0,07 км²/год. В табл. 4 представлены результаты сравнения относительных величин сокращения оледенения соседних регионов за разные периоды. Как видно, оледенение Чукотки и Камчатки имеют схожую динамику деградации ледников. Оледенение Корякского нагорья, согласно анализируемым здесь данным, наоборот, в конце XX в. сокращалось гораздо стремительнее, чем в начале XXI в. Однако необходимо учитывать, что для сравнения с работой [Ананичева, 2012] мы имеем данные только для 24 ледников из 175.

Вполне возможно, что ситуация изменится, когда появится возможность использовать данные обо всех ледниках.

Для оценки пространственно-временной стабильности основных климатических параметров был проведен комплексный статистический анализ динамики температуры воздуха и атмосферных осадков по данным метеостанций и реанализа ERA5-land (табл. 5). Несмотря на значительные расстояния между метеостанциями и различия в абсолютной высоте, была выявлена значимая ($p < 0,01$) статистическая связь по температуре воздуха между всеми станциями за более чем 50-летний период. Атмосферные осадки изменялись во времени с большими различиями между метеостанциями, чем температура (табл. 5).

Для всего района исследований характерна общая закономерность в годовом распределении осадков. Максимальное количество осадков выпадает в конце лета, затем количество среднемесячных осадков постепенно сокращается, достигая минимума к концу весны. А уже с июня по август выпадение осадков резко усиливается. На всех метеостанциях среднемесячные значения температуры воздуха сохраняются

положительными с июня (иногда с мая) до сентября, не достигая 15 °C (рис. 5). Среднегодовая температура воздуха для всех метеостанций остается отрицательной. Учитывая, что все метеостанции находятся в предгорной части, мы можем предположить, что в высокогорье температура еще ниже, а осадков выпадает больше, как и их доля в твердом виде.

Как видно из рис. 6, на протяжении второй половины XX и начала XXI в. основные метеорологические показатели (температура и осадки) не испытывали значительных долгопериодных изменений. Тем не менее, согласно данным наблюдений, на метеостанции Апука летняя температура воздуха за период с 1936 по 2021 г. повышалась со средней скоростью в 0,02 °C/год, а с 1947 г. потепление уже составляло 0,03 °C/год.

Атмосферные осадки, в частности за холодный период года, не имеют значимых трендов за весь период наблюдений (рис. 6). Таким образом, мы можем считать, что наибольший вклад в сокращение оледенения Корякского нагорья вносит повышение температуры воздуха летнего сезона.

Площади ледников и скорости их изменений в районах исследования

Таблица 4

Table 4

Glacier areas and rates of areal changes in the study regions

Район (источник)	Годы			Скорость изменения, %/год		
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₁ – t ₂	t ₂ – t ₃	t ₁ – t ₃
Корякское нагорье (наше исследование и [Ананичева, 2012])	1972	2003	2019	-1,42	-0,39	-0,97
Чукотское нагорье [Ананичева и др., 2017]	1975	2005	2017	-0,20	-1,14	-0,59
Срединный хребет на Камчатке [Муравьев, 2020b]	1950	2002	2017	-0,34	-1,56	-0,54

Таблица 5

Корреляция основных метеорологических параметров между метеостанциями и данными реанализа ERA5-land

Table 5

Correlation of the main meteorological parameters between weather stations and ERA5-land reanalysis data

Метеостанция	Марково	Анадырь	Березово	Беринговская	Каменское	Хатырка	Бухта Гавриила	Корф	Апука	ERA5-land
Марково		0,14	0,48	0,30	0,58	0,67	0,31	0,53	0,38	0,41
Анадырь	0,70		0,35	0,23	0,11	0,23	-0,06	0,30	0,24	0,01
Березово	0,92	0,80		0,48	0,50	0,08	-0,06	0,20	0,25	0,17
Беринговская	0,81	0,81	0,87		0,12	0,07	-0,04	0,07	0,19	-0,11
Каменское	0,85	0,79	0,83	0,70		0,09	0,35	0,44	0,22	0,22
Хатырка	0,32	0,39	0,52	0,68	0,34		0,37	0,57	0,62	0,23
Бухта Гавриила	0,48	0,59	0,67	0,78	0,54	0,56		0,56	0,53	0,08
Корф	0,51	0,53	0,63	0,61	0,81	0,59	0,55		0,72	0,09
Апука	0,64	0,70	0,70	0,76	0,83	0,68	0,67	0,86		0,13
ERA5-land	0,79	0,62	0,73	0,79	0,76	0,50	0,76	0,75	0,78	

Примечание. Коэффициенты корреляции температуры воздуха теплого сезона (среднемесячные значения выше нуля) представлены в нижней левой части таблицы. Коэффициенты корреляции атмосферных осадков холодного сезона (среднемесячные значения ниже нуля) представлены в верхней правой части таблицы. Жирным шрифтом выделены статистически значимые ($p < 0,01$) значения.

Note. Correlation coefficients for warm season air temperature (mean monthly values above zero) are presented in the lower-left part of the table. The correlation coefficients of atmospheric precipitation during the cold season (mean monthly values below zero) are in the upper-right part of the table. Statistically significant ($p < 0.01$) values are highlighted in bold.

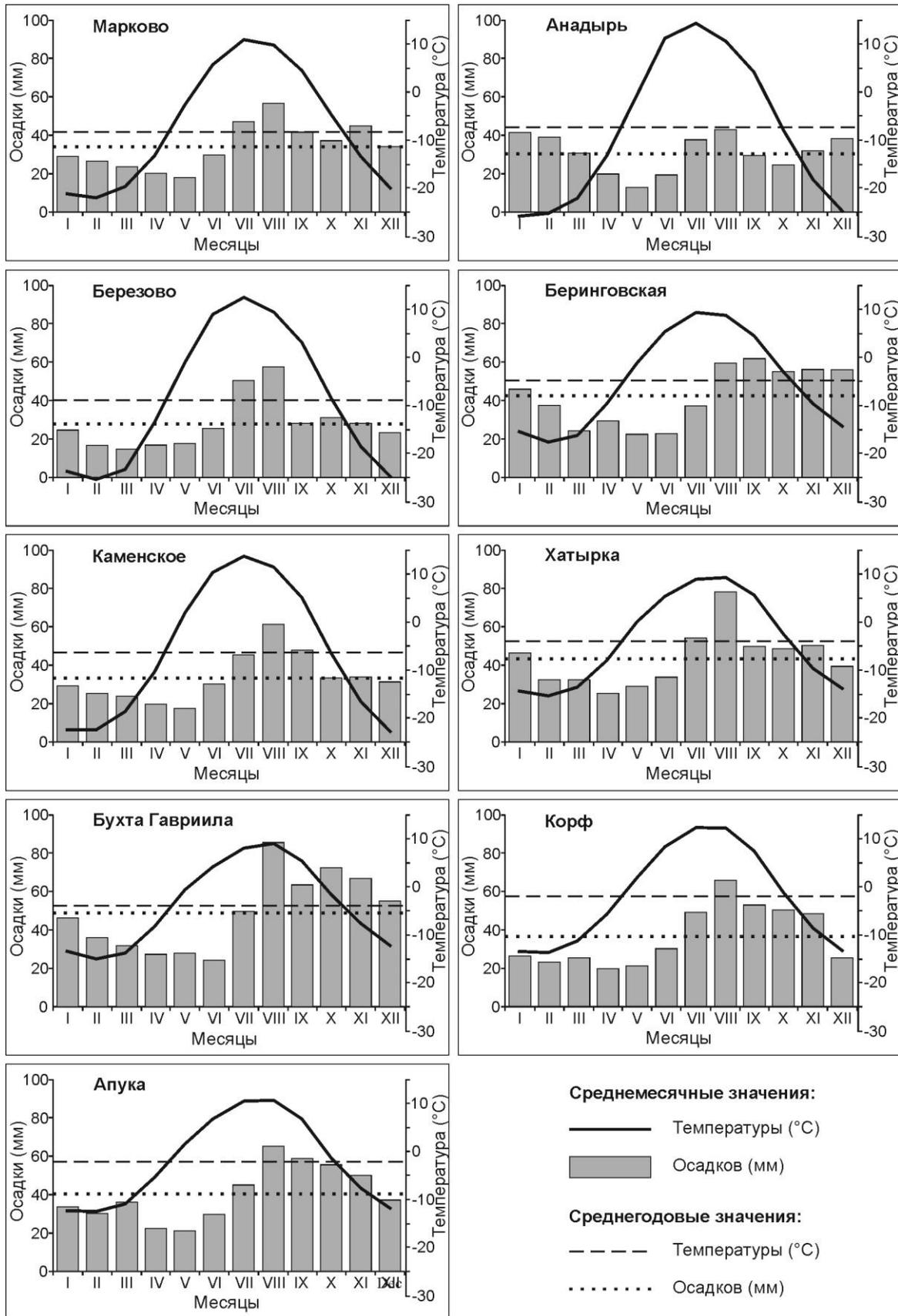


Рис. 5. Среднемесячная температура и осадки для района исследований, полученные по данным метеостанций

Fig. 5. Mean monthly temperature and precipitation for the study area derived from weather station data

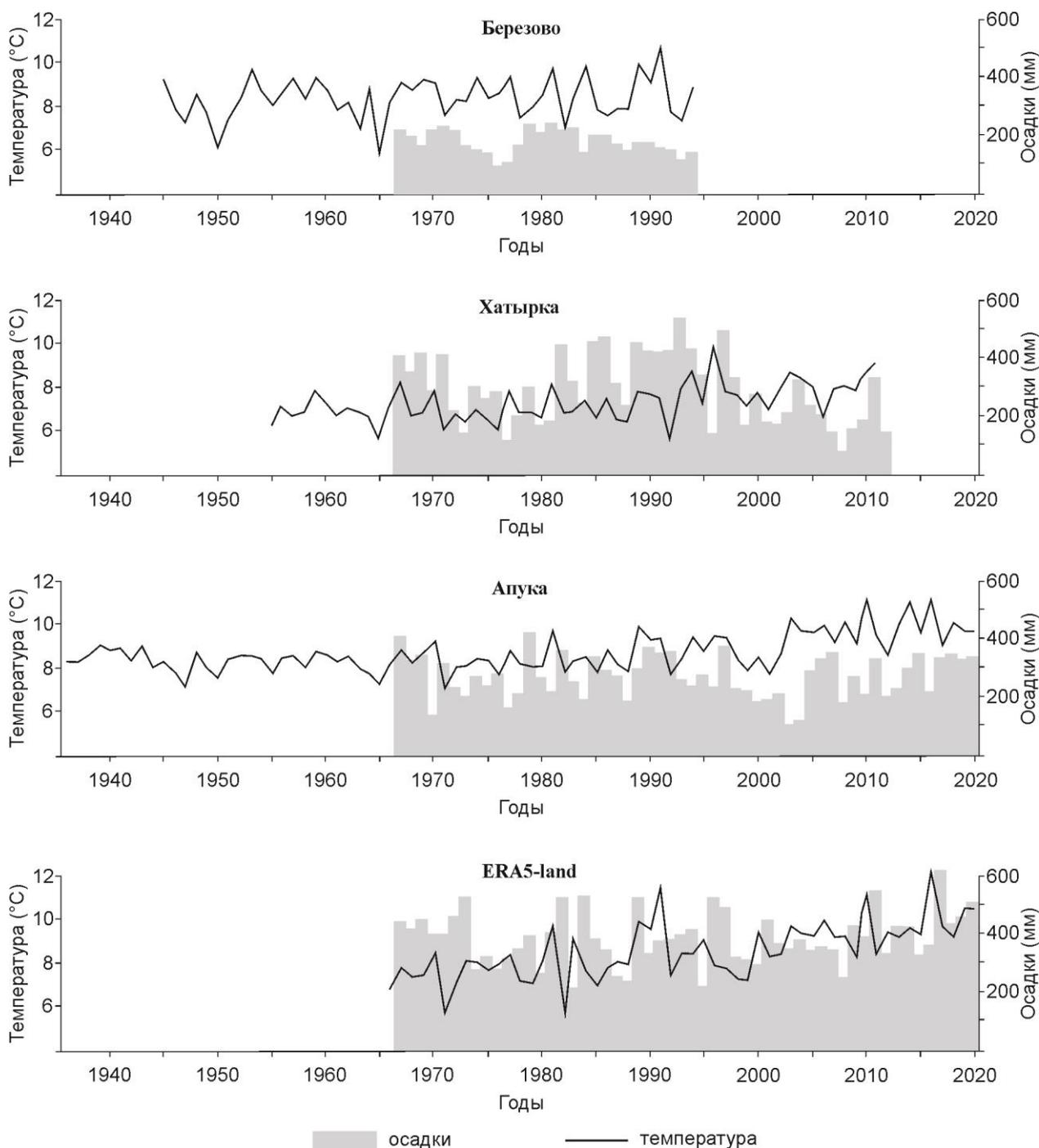


Рис. 6. Изменение средних летних температур воздуха (июнь–август) и суммы зимних осадков (октябрь–апрель) для района исследований по данным метеостанций (Березово, Хатырка, Апука) и данным реанализа (ERA5-land)

Fig. 6. Changes in mean summer air temperatures (June–August) and total winter precipitation (October–April) in the region of study according to weather stations (Berezovo, Khatyrka, Apuka) records and reanalysis data (ERA5-land)

Как уже неоднократно отмечалось, ELA является важной гляциоклиматической характеристикой, отражающей состояние оледенения. Преобладающее из

года в год смещение ELA в ту или иную сторону указывает на предстоящее в ближайшее время наступление ледников или, наоборот, их деградацию.

Наиболее высоко ELA располагалась на ледниках с самой малой площадью ($< 0,1 \text{ км}^2$) и наибольшей ($0,5-1$ и $> 1 \text{ км}^2$) площадью. Также наибольшая ELA характерна ледникам южной экспозиции. За период с 1972 по 2019 г. ELA Корякского нагорья

поднялась в среднем на 30 м со скоростью 0,65 м/год. При этом изменения ELA были неравномерными. Рост ELA с 1972 по 2019 г. был заметно значительнее на ледниках большей площади (табл. 6).

Таблица 6

Изменение ELA с 1972 по 2019 г. в зависимости от размера ледников и их экспозиции

Table 6

Change in ELA from 1972 to 2019 depending on the size of glaciers and their aspect

Показатель		Положение ELA, м над ур. м		Изменение ELA, м	Скорость изменения ELA, м/год
Размерная группа, км ²		1972	2019		
	< 0,1	1234	1254	20	0,43
	0,1–0,2	1079	1102	23	0,49
	0,2–0,5	1090	1118	28	0,60
	0,5–1	1257	1296	39	0,83
	> 1	1358	1400	42	0,89
Экспозиция ледников	W	1092	1135	43	0,91
	NW	964	992	28	0,60
	N	1099	1130	31	0,66
	NE	1155	1194	39	0,83
	E	1285	1301	16	0,34
	SE	1300	1314	14	0,30
	S	1392	1422	30	0,64
	SW	1321	1361	40	0,85

Также наибольший подъем ELA был у ледников западной и северной экспозиций. При этом, учитывая низкую ELA этих ледников, очевидно, что они находятся в наиболее благоприятных климатических условиях. Ледники южных экспозиций, напротив, испытали наименьший подъем ELA за почти 50 лет. Соответственно, можно уверенно предположить, что ледники южных экспозиций в течение длительного времени находятся в менее благоприятных климатических условиях и своим существованием в большей степени обязаны орографическому фактору. Именно поэтому эти ледники в меньшей степени реагируют на изменения климата.

Заключение

За период с 1972 по 2019 г. оледенение Корякского нагорья подверглось значительным изменениям. Общая площадь ледников сократилась почти вдвое, с $85,1 \text{ км}^2$ в 1972 г. до $38,9 \text{ км}^2$ в 2019. Хотя общее количество ледников осталось неизменным, произошло существенное перераспределение ледников по раз-

мерным классам. Большие ледники хоть и сократились больше, чем малые в абсолютных значениях, в относительном выражении потеряли меньшую долю своих площадей.

Сохранность ледников даже при значительном сокращении площади демонстрирует усиление орографического фактора (особенностей рельефа) по сравнению с климатическими условиями. При этом высотное положение и экспозиция ледников существенного значения не имеют. Сокращение оледенения Корякского и Чукотского нагорий в процентном выражении происходило примерно с одинаковой скоростью за весь период с 1972/75 до 2019 г. Однако по сравнению с ледниками Срединного хребта на Камчатке, оледенение Корякского и Чукотского нагорий сокращалось быстрее.

Исходя из различий в реакции на климатические изменения разных групп ледников, с большой долей уверенности мы можем предположить, что ледники южных экспозиций, особенно небольших размеров, своим существованием в большей степени обязаны удобным орографическим условиям и в меньшей степени подвержены влиянию изменений климата.

Список источников

Ананичева М.Д. Современное состояние ледников Корякского нагорья и оценка их эволюции к середине текущего столетия // Лёд и Снег. 2012. № 1 (117). С. 15–23.

Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Михайлов А.Ю. Ледники Мейныпильгынского хребта: современное состояние и сценарий эволюции ледниковых систем // Лёд и Снег. 2012. № 2 (118). С. 40–50.

- Ананичева М.Д., Карпачевский А.М.** Современное состояние ледников Чукотского и Колымского нагорий и прогноз эволюции ледниковых систем Чукотского нагорья // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. Т. 1. С. 64–83.
- Ананичева М.Д., Маслаков А.А., Антонов Е.В.** Деградация объектов криосферы в районе залива Лаврентия, Восточная Чукотка // *Арктика и Антарктика*. 2017. № 3. С. 17–29.
- 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. 27, № 5. С. 29–38. DOI: 10.15372/KZ20230503.
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В.** Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394 // *Электронный ресурс*. 2020а. URL: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения: 25.11.2022).
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В.** Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 201462 // *Электронный ресурс*. 2020б. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения: 25.11.2022).
- Васьковский А.П.** Современное оледенение Северо-Востока СССР // *Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР*. 1955. № 9. С. 71–91.
- Виноградов О.Н., Коновалова Г.И., Сватков Н.М.** Каталог ледников СССР: Корякское нагорье. Т. 20, ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 75 с.
- Докукин М.Д., Сейнова И.Б., Савернюк Е.А., Черноморец С.С.** О наступании ледников в условиях вулканической деятельности вулкана Ключевской (Камчатка) // *Лёд и Снег*. 2017. № 57 (1). С. 10–24.
- Калесник С.В.** Очерки гляциологии. М.: Географгиз, 1963. 551 с.
- Каталог ледников СССР**. М.; Л.: Гидрометеиздат, 1965–1982.
- Муравьев А.Я., Носенко Г.А.** Изменения оледенения северной части Срединного хребта на Камчатке во второй половине XX в. // *Лёд и Снег*. 2013. № 53 (2). С. 5–11.
- Муравьев А.Я.** Сокращение ледников северной части Срединного хребта на Камчатке в период с 1950 по 2016–2017 гг. // *Лёд и Снег*. 2020а. № 60 (4). С. 498–512.
- Муравьев А.Я.** Распределение и морфология современных ледников Камчатки // *Лёд и Снег*. 2020б. № 60 (3). С. 325–342.
- Николаев И.Г., Колосов Д.М.** Современные ледники в Корякском хребте // *Известия Государственного географического общества*. 1939. Т. 71, № 8. С. 1154–1162.
- Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Никитин С.А.** Баланс массы ледников Корякского нагорья Нежданый и Соседний за 1961–2016 гг. // *Лёд и Снег*. 2022. № 62(1). С. 5–16.
- Сватков Н.М.** Современное оледенение хребта Малиновского // *Материалы гляциологических исследований*. 1965. № 15. С. 111–119.
- Седов Р.В.** Ледники Чукотки // *Материалы гляциологических исследований*. 1997. № 82. С. 213–217.
- Седов Р.В.** Каталог ледников северо-восточной части Корякского нагорья // *Материалы гляциологических исследований*. 2001. № 91. С. 195–224.
- Ananicheva M.D., Krenke A.N., Barry R.G.** The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios // *The Cryosphere*. 2010. V. 4. P. 435–445. doi: 10.5194/tc-4-435-2010
- Ananicheva M., Kononov Yu., Belozero E.** Contemporary state of glaciers in Chukotka and Kolyma highlands // *Bulletin of Geography Physical Geography Series*. 2020. V.19. P. 5–18. doi: 10.2478/bgeo-2020-0006
- Ananicheva M., Aleinikov A.** Glaciers of the Koryak Highlands: assessment of the state using satellite images and field studies // *Bulletin of geography (Physical Geography Series)*. 2022. V. 22. P. 45–58. doi: 10.12775/bgeo-2022-0004
- Andreassen L.M., Elvehoy H., Kjollmoen B., Engeset R.V., Haakensen N.** Glacier mass balance and length variations in Norway // *Annals of Glaciology*. 2005. V. 42. P. 317–325. doi: 10.3189/172756405781812826
- Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P.** Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions // *Nature*. 2005. V. 438 (7066). P. 303–309. doi: 10.1038/nature04141
- Braithwaite R.J.** After six decades of monitoring glacier mass balance we still need data but it should be richer data // *Annals of Glaciology*. 2009. V. 50 (50). P. 191–197. doi: 10.3189/172756409787769573
- Braithwaite R.J.** From Doktor Kurowski's Schneegrenze to our modern glacier equilibrium line altitude (ELA) // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 2135–2148. doi: 10.5194/tc-9-2135-2015
- Bliss A., Hock R., Radić V.** Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2014. V. 119 (4). P. 717–730. doi: 10.1002/2013JF002931
- Chinn T., Winkler S., Salinger M.J., Haakensen N.** Recent glacier advances in Norway and New Zealand: a comparison of their glaciological and meteorological causes // *Geografiska Annaler (Series A, Physical Geography)*. 2005. V. 87 (1). P. 141–157 doi: 10.1111/j.0435-3676.2005.00249.x
- Copernicus** Climate Change Service. ERA5 hourly data on single levels from 1966 to present. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview> (Date of accessed: 17.02.2022).
- Das S., Sharma M.C., Murari M.K., Nüsser M., Schmidt S.** Half-a-century (1971–2020) of glacier shrinkage and climatic variability in the Bhaga basin, western Himalaya // *Journal of Mountain Science*. 2023. V. 20 (2). P. 299–324. doi: 10.1007/s11629-022-7598-9
- Fukumoto S., Sugiyama S., Hata S., Saito J., Shiraiwa T., Mitsudera H.** Glacier mass change on the Kamchatka Peninsula, Russia, from 2000 to 2016 // *Journal of Glaciology*. 2022. V. 69 (274). P. 237–250. doi: 10.1017/jog.2022.50
- Huss M., Bookhagen B., Huggel C., Jacobsen D., Bradley R.S., Clague J.J., Vuille M., Buytaert W., Cayan D.R., Greenwood G., Mark B.G., Milner A.M., Weingartner R., Winder M.** Toward mountains without permanent snow and ice // *Earth's Future*. 2017. V. 5 (5). P. 418–435. doi: 10.1002/2016EF000514
- Huss M., Hock R.** Global-scale hydrological response to future glacier mass loss // *Nature Climate Change*. 2018. V. 8 (2). P. 135–140. doi: 10.1038/s41558-017-0049-x

- Kononov Y.M., Ananicheva M.D., Willis I.C.** High-resolution reconstruction of Polar Ural glacier mass balance for the last millennium // *Annals of Glaciology*. 2005. V. 42. P. 163–170. doi: 10.3189/172756405781812709
- Marzeion B., Kaser G., Maussion F., Champollion N.** Limited influence of climate change mitigation on short-term glacier mass loss // *Nature Climate Change*. 2018. V. 8(4). P. 305–308. doi: 10.1038/s41558-018-0093-1
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N.** ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // *Earth System Science Data*. 2021. V. 13. P. 4349–4383. doi: 10.5194/essd-13-4349-2021
- Musselman K.N., Clark M.P., Liu C., Ikeda K., Rasmussen R.** Slower snowmelt in a warmer world // *Nature Climate Change*. 2017. V. 7 (3). P. 214–219. doi: 10.1038/nclimate3225
- Oerlemans J.** Quantifying global warming from the retreat of glaciers // *Science*. 1994. V. 264 (5156). P. 243–245. doi: 10.1126/science.264.5156.243
- Pepin N.C., Arnone E., Gobiet A., Haslinger K., Kotlarski S., Notarnicola C., Palazzi E., Seibert P., Serafin S., Schöner W., Terzago S., Thornton J.M., Vuille M., Adler C.** Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world // *Reviews of Geophysics*. 2022. V. 60. e2020RG000730. doi: 10.1029/2020RG000730
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummens P., Laurier F., Bojesen M.** ArcticDEM, Version 3 // *Harvard Dataverse*. 2018. V. 1. doi: 10.7910/DVN/OHHUKH (Accessed: 17-24.07.2018).
- Takahashi S., Sugiura K., Kameda T., Enomoto H., Kononov Y., Ananicheva M. D., Kapustin G.** Response of glaciers in the Suntar-Khayata range, eastern Siberia, to climate change // *Annals of Glaciology*. 2011. V. 52 (58). P. 185–192. doi: 10.3189/172756411797252086
- Vaughan D.G., Comiso J.C., Allison I., Carrasco J., Kaser G., Kwok R., Mote P., Murray T., Paul F., Ren J., Rignot E., Solomina O., Steffen K., Zhang T.** Observations: Cryosphere. // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2014. P. 317–382. doi: 10.1017/CBO9781107415324.012
- Viviroli D., Archer D.R., Buytaert W., Fowler H.J., Greenwood G.B., Hamlet A.F., Huang Y., Koboltschnig G., Litaor M.I., López-Moreno J.I., Lorentz S., Schädler B., Schreier H., Schwaiger K., Vuille M., Woods R.** Climate change and mountain water resources: Overview and recommendations for research, management and policy // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. V. 15(2). P. 471–504. doi: 10.5194/hess-15-471-2011
- Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hoelzle M., Paul F., Haerberli W., Denzinger F., Ahlström A.P., Anderson B.** Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century // *Journal of Glaciology*. 2015. V. 61 (228). P. 745–762. doi: 10.3189/2015JG15J017
- Zemp M., Huss M., Thibert E., Eckert N., McNabb R., Huber J., Barandun M., Machguth H., Nussbaumer S.U., Gärtner-Roer I., Thomson L., Paul F., Maussion F., Kutuzov S., Cogley J.G.** Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // *Nature*. 2019. V. 568 (7752). P. 382–386. doi: 10.1038/s41586-019-1071-0

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. 52(1). pp. 15–23. In Russian. doi: 10.15356/2076-6734-2012-1-15-23
- Ananicheva M.D., Kapustin G.A., Mikhailov A.Y. Glaciers in the Meynypilgynsky range: current state and development forecast of glacier systems // *Led i Sneg [Ice and Snow]*. 2012. 52(2). pp. 40–50. In Russian.
- Ananicheva M.D., Karpachevskiy A.M. Current state of the Kolyma and Chukchi glaciers and projection of the evolution of Chukchi Highlands' glacial systems // *Fundamental and Applied Climatology*. 2016. 1. pp. 64–83. In Russian. doi: 10.21513/2410-8758-2016-1-64-83
- Ananicheva M.D., Maslakov A.A., Antonov E.V. Degradation of cryosphere objects in the region of Lawrence Bay, Eastern Chukotka // *Arctic and Antarctic*. 2017. 3. pp. 17–29. In Russian. doi: 10.7256/2453-8922.0.0.24204
- Ananicheva M.D., Aleinikov A.A., Kononov Yu.M. Revising the Catalog of the Koryak Highland glaciers using archival Corona images and comparison with Sentinel-2 images against the backdrop of changing climate // *Kriosfera Zemli – Earth's Cryosphere*. 2023. 27(5). pp. 29–38. In Russian. doi: 10.15372/KZ20230503
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. Description of the data array of the mean monthly air temperature at the stations of Russia. 2020a. Certificate of state registration of the database No. 2014621485. <http://meteo.ru/data/156-temperature#description-mass-data> (Date of accessed on 23.11.2022).
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. Description of the data array of monthly precipitation totals at Russian stations. Certificate of state registration of the database . 2020b No. 2015620394. <http://meteo.ru/data/158-totalprecipitation#description-mass-data> (Date of accessed on 23.1.2022).
- Vas'kovsky A.P. *Sovremennoe oledenenie Severo-Vostoka SSSR* [Modern glaciation of the North-East of the USSR] // *Materialy po geologii i poleznim iskopaemim Severo-Vostoka SSSR* [Materials of geology and mineral resources of the North-East of the USSR]. 1955. 9. pp. 71–91. In Russian
- Vinogradov O.N., Konovalova G.I., Svatkov N.M. *Katalog lednikov SSSR: Koryakskoe nagor'e* [USSR Glacier Inventory: Koryak Highlands]. V. 20(1). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982. 75 p. In Russian
- Dokukin M.D., Seynova I.B., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S. On advancing of glaciers due to activity of the Klyuchevskaya Sopka volcano (Kamchatka) // *Led i Sneg [Ice and Snow]*. 2017. 57(1). pp. 10–24. In Russian. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-10-24
- Kalesnik S.V. *Ocherki glyatciologii* [Essays on glaciology]. Moscow: Publishing house “Geografiz”. 1963. 551 p. In Russian
- Katalog lednikov SSSR* [USSR Glacier Inventory]. Moscow–Leningrad: Hydrometeoizdat, 1965–1982. In Russian

- Muraviev A. Ya., Nosenko G. A. Glaciation change in the northern part of the Middle Range on the Kamchatka Peninsula in the second half of the XX century // *Led i Sneg* [Ice and Snow]. 2013. 122 (2). pp. 5–11. In Russian. doi: 10.15356/2076-6734-2013-2-5-11
- Muraviev A. Ya. Degradation of glaciers in the northern part of the Middle Range on Kamchatka Peninsula along the period from 1950 over 2016–2017 // *Led i Sneg* [Ice and Snow]. 2020a. 60 (4). pp. 498–512. In Russian. doi: 10.31857/S2076673420040055
- Muraviev A. Ya. Distribution and morphology of present-day glaciers on Kamchatka // *Led i Sneg* [Ice and Snow]. 2020b. 60 (3). pp. 325–342. In Russian. doi: 10.31857/S2076673420030043.
- Nikolaev I. G., Kolosov D. M. *Sovremennyye ledniki v Koryackom khrebtie* [Modern glaciers in the Koryatsky ridge] // *Izvestiya Gosudarstvennogo geograficheskogo obshchestva* [News of the State Geographical Society]. 1939. 71(8). pp. 1154–1162. In Russian
- Nosenko G. A., Muraviev A. Y., 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. 62(1). pp. 5–16. In Russian. doi: 10.31857/S2076673422010112
- Svatkov N. M. *Sovremennoe oledenenie hrebta Malinovskogo* [Modern glaciation of the Malinovsky ridge] // *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy* – [Data of Glaciological Studies]. 1965. 15. pp. 111–119. In Russian
- Sedov R. V. *Ledniki Chukotki* [Glaciers of Chukotka] // *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy* [Data of glaciological studies]. 1997. 82. pp. 213–217. In Russian
- Sedov R. V. *Katalog lednikov severo-vostochnoj chasti Koryakskogo nagor'ya* [Glacier Inventory of the North-Eastern part of the Koryak Upland] // *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy* [Data of Glaciological Studies]. 2001. 91. pp. 195–224. In Russian
- Ananicheva M. D., Krenke A. N., Barry R. G. The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios // *The Cryosphere*. 2010. 4. pp. 435–445. doi: 10.5194/tc-4-435-2010
- Ananicheva M., Kononov Yu., Belozherov E. Contemporary state of glaciers in Chukotka and Kolyma highlands // *Bulletin of Geography (Physical Geography Series)*. 2020.19. pp. 5–18. dx: 10.2478/bgeo-2020-0006
- Ananicheva M., Aleinikov A. Glaciers of the Koryak Highlands: assessment of the state using satellite images and field studies // *Bulletin of geography (Physical Geography Series)*. 2022. 22. pp. 45–58. doi: 10.12775/bgeo-2022-0004
- Andreassen L. M., Elvehoy H., Kjollmoen B., Engeset R. V., Haakensen N. Glacier mass balance and length variations in Norway // *Annals of Glaciology*. 2005. 42. pp. 317–325. doi: 10.3189/172756405781812826
- Barnett T. P., Adam J. C., Lettenmaier D. P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions // *Nature*. 2005. 438(7066). pp. 303–309. doi: 10.1038/nature04141
- Braithwaite R. J. After six decades of monitoring glacier mass balance we still need data but it should be richer data // *Annals of Glaciology*. 2009. 50(50). pp. 191–197. doi: 10.3189/172756409787769573
- Braithwaite R. J. From Doktor Kurowski's Schneegrenze to our modern glacier equilibrium line altitude (ELA) // *The Cryosphere*. 2015. pp. 2135–2148. doi: 10.5194/tc-9-2135-2015
- Bliss A., Hock R., Radić V. Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2014. 119(4). pp. 717–730. doi: 10.1002/2013JF002931
- Chinn T., Winkler S., Salinger M. J., Haakensen N. Recent glacier advances in Norway and New Zealand: a comparison of their glaciological land meteorological causes // *Geografiska Annaler (Series A, Physical Geography)*. 2005. 87 (1). pp. 141–157 doi: 10.1111/j.0435-3676.2005.00249.x
- Copernicus Climate Change Service. ERA5 hourly data on single levels from 1966 to present. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview> (Accessed on 17 February 2022)
- Das S., Sharma M. C., Murari M. K., Nüsser M., Schmidt S. Half-a-century (1971–2020) of glacier shrinkage and climatic variability in the Bhaga basin, western Himalaya. *Journal of Mountain Science*. 2023. 20(2). pp. 299–324. doi: 10.1007/s11629-022-7598-9
- Fukumoto S., Sugiyama S., Hata S., Saito J., Shiraiwa T., Mitsudera H. Glacier mass change on the Kamchatka Peninsula, Russia, from 2000 to 2016 // *Journal of Glaciology*. 2022. 69 (274). pp. 237–250. doi: 10.1017/jog.2022.50
- Huss M., Bookhagen B., Huggel C., Jacobsen D., Bradley R. S., Clague J. J., Vuille M., Buytaert W., Cayan D. R., Greenwood G., Mark B. G., Milner A. M., Weingartner R., Winder M. Toward mountains without permanent snow and ice // *Earth's Future*. 2017. 5 (5). pp. 418–435. doi: 10.1002/2016EF000514
- Huss M., Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss // *Nature Climate Change*. 2018. 8(2). pp. 135–140. doi: 10.1038/s41558-017-0049-x
- Kononov Y. M., Ananicheva M. D., Willis I. C. High-resolution reconstruction of Polar Ural glacier mass balance for the last millennium // *Annals of Glaciology*. 2005. 42. pp. 163–170. doi: 10.3189/172756405781812709
- Marzeion B., Kaser G., Maussion F., Champollion N. Limited influence of climate change mitigation on short-term glacier mass loss // *Nature Climate Change*. 2018. 8(4). pp. 305–308. doi: 10.1038/s41558-018-0093-1
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D. G., Piles M., Rodríguez-Fernández N. J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // *Earth System Science Data*. 2021. 13. pp. 4349–4383. doi: 10.5194/essd-13-4349-2021
- Musselman K. N., Clark M. P., Liu C., Ikeda K., Rasmussen R. Slower snowmelt in a warmer world // *Nature Climate Change*. 2017. 7(3). pp. 214–219. doi: 10.1038/nclimate3225
- Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers // *Science*. 1994. 264(5156). pp. 243–245. doi: 10.1126/science.264.5156.243
- Pepin N. C., Arnone E., Gobiet A., Haslinger K., Kotlarski S., Notarnicola C., Palazzi E., Seibert P., Serafin S., Schöner W., Terzago S., Thornton J. M., Vuille M., Adler C. Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world // *Reviews of Geophysics*. 2022. 60. e2020RG000730. <https://doi.org/10.1029/2020RG000730>
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M. Jr., Williamson C.; Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. (2018) ArcticDEM, Version 3, Harvard Dataverse, V1. doi: 10.7910/DVN/OHHUKH (Accessed on 17-24.07.2018).
- Takahashi S., Sugiura K., Kameda T., Enomoto H., Kononov Y., Ananicheva M. D., Kapustin G. Response of glaciers in the Suntar-Khayata range, eastern Siberia, to climate change // *Annals of Glaciology*. 2011. 52(58). pp. 185–192. doi: 10.3189/172756411797252086

Vaughan D.G., Comiso J.C., Allison I., Carrasco J., Kaser G., Kwok R., Mote P., Murray T., Paul F., Ren J., Rignot E., Solomina O., Steffen K., Zhang T. Observations: Cryosphere. // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2014. pp. 317–382. doi: 10.1017/CBO9781107415324.012

Viviroli D., Archer D.R., Buytaert W., Fowler H.J., Greenwood G.B., Hamlet A.F., Huang Y., Koboltschnig G., Litaor M.I., López-Moreno J.I., Lorentz S., Schädler B., Schreier H., Schwaiger K., Vuille M., Woods R. Climate change and mountain water resources: Overview and recommendations for research, management and policy // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. 15 (2). pp. 471–504. doi: 10.5194/hess-15-471-2011

Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hoelzle M., Paul F., Haeberli W., Denzinger F., Ahlstrøm A.P., Anderson B. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century // *Journal of Glaciology*. 2015. 61 (228). pp. 745–762. doi: 10.3189/2015JG15J017

Zemp M., Huss M., Thibert E., Eckert N., McNabb R., Huber J., Barandun M., Machguth H., Nussbaumer S.U., Gärtner-Roer I., Thomson L., Paul F., Maussion F., Kutuzov S., Cogley J.G. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // *Nature*. 2019. 568 (7752). pp. 382–386. doi: 10.1038/s41586-019-1071-0

Информация об авторах:

Ананичева М.Д., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, отдел гляциологии, Институт географии РАН, Москва, Россия.

E-mail: maranan@gmail.com

Кононов Ю.М., старший научный сотрудник, отдел палеогеографии четвертичного периода, Институт географии РАН, Москва, Россия.

E-mail: jukon02@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Ananicheva M.D., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Department of glaciology, Institute of Geography, RAS, Moscow, Russia.

E-mail: maranan@gmail.com

Kononov Yu.M., Senior Researcher, Department of Quaternary Paleogeography, Institute of Geography, RAS, Moscow, Russia.

E-mail: jukon02@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.12.2024; одобрена после рецензирования 02.05.2024; принята к публикации 03.06.2025

The article was submitted 24.12.2024; approved after reviewing 02.05.2024; accepted for publication 03.06.2025