

ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

УДК 551.324

МАЛЫЕ ФОРМЫ ОЛЕДЕНЕНИЯ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТАЙМЫРА: НОВЫЕ ОЦЕНКИ

© 2024 г. М. Д. Ананичева^{1*}, И. А. Корнева^{1,2}

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

*e-mail: maranan@gmail.com

Поступила 24.03.2024 г.

После доработки 27.04.2024 г.

Принята к печати 08.07.2024 г.

Представлены новые данные о современном состоянии оледенения Таймыра и дано сравнение основных гляциологических параметров ледников на 2022 г. (снимки Sentinel-2) с Каталогом ледников СССР (1967) и архивными снимками CORONA (1966). Оценены климатические изменения, произошедшие в этом регионе, на фоне которых идёт сокращение ледников гор Бырранга.

Ключевые слова: ледник, площадь ледника, спутниковый снимок, изменения климата, температура, осадки, радиационный баланс, горы Бырранга, Таймыр

DOI: 10.31857/S2076673424030038, EDN: IOPBXC

ВВЕДЕНИЕ

Малые формы оледенения (далее — МФО) на полуострове Таймыр расположены в самой высокой его части — горах Бырранга. Горы протягиваются на 1100 км от Енисейского залива Карского моря на юго-западе до моря Лаптевых на северо-востоке, шириной до 200 км. Горы Бырранга подразделяются на три части: западную, центральную и восточную. Западная часть расположена между Енисейским заливом и долиной реки Пясины и имеет высоты 250–320 м. Центральная часть лежит в междуречье Пясины и Таймыры, имеет высоты от 400 до 600 м. Восточная часть лежит к востоку от Таймыры и является наиболее высокой с высотами от 600 до 1125 м. Формы горных вершин разнообразны: встречаются и остроугольные вершины, и горы с плоскими вершинами и пологими склонами. Склоны и вершины часто покрыты осыпями и скоплениями глыб, которые образуют «каменные реки» и «моря». Иногда среди обломков встречаются валуны, принесённые древним ледником со стороны морского побережья (Троицкий, 1966).

Открыты горы Бырранга в 1736 г. Василием Васильевичем Прончищевым во время Великой Северной экспедиции. Осенью 1739 г. Харитон Лаптев остановился на зимовку на восточном побережье Таймыра и решил исследовать внутренние районы полуострова несколькими санными группами.

В апреле–мае 1741 г. Харитон Лаптев по руслу нижней Таймыры пересёк горы Бырранга. Он первый дал письменную характеристику центральной части гор в своём путевом дневнике.

В 1843 г. горы Бырранга исследовал Александр Миддендорф. Опираясь на записи Харитона Лаптева, он составил первую карту Таймыра с точным изображением гор Бырранга. Именно Миддендорф назвал эти труднодоступные горы Бырранга, используя при этом название, принятое у нганасан (Магидович И., Магидович В., 2004).

Ледники Бырранга сосредоточены в северной, самой высокой части гор в истоках рек Преградной, Ключевки и др. (море Лаптевых), Ледниковой, Холодной и Жданова (Карское море) и бассейна оз. Таймыр. В 1950 и 1967 гг. были проведены аэрофотосъёмки района, а в 1967 г. Таймырской экспедицией ААНИИ, база которой находилась на ледо-раздельном плато трёх крупных перемётно-долинных ледников, выполнен комплекс стационарных и маршрутных исследований. По этим материалам Л.С. Говорухой с соавторами был составлен Каталог ледников, который содержит сведения о 96 ледниках общей площадью 30.5 км². Авторы отнесли наиболее крупные ледники к тому времени к долинным, перемётным, карово-долинным и каровым морфологическим типам. Небольшие ледники — к карово-висячим, ледникам кулуаров и присклоновым типам. Некоторые ледники в центре оледенения образовывали «комплексное

ледниковое плато», формируя «общую перемётную систему» (Каталог..., 1980).

Горы Бырранга образовались примерно в одно время с Уральскими горами — в палеозое (герцинская складчатость). Долгое время самой высокой точкой Бырранги считалась гора Ледниковая высотой 1146 м. Но в девяностые годы высота Ледниковой была уточнена, и оказалось, что она составляет всего 1119 м над ур. моря, а самая высокая гора высотой 1125 м над ур. моря находится в другом горном узле, в ста километрах восточнее Ледниковой (Троицкий, 1966).

Выявленная разрывно-складчатая структура демонстрирует тектонические деформации возрастом в первые сотни — тысячи лет и представляет собой потенциальный очаг сильных землетрясений (Овсюченко и др., 2023).

В южных предгорьях много озёр, самое большое — оз. Таймыр, принимающее талую воду ледников. Ко времени составления Каталога (1980) насчитывалось около сотни ледников, некоторые из них спускались до высот 600–900 м над ур. моря. Для долинных ледников характерны крутые языки, испещрённые каналами стока. Поверхность ледников не засорена моренным материалом, за исключением тех мест, где проходят каналы стока. Вдоль них образуются муравьиные кучи или щебнистые поля; конечные морены отсутствуют, что свидетельствует о малых скоростях движения льда и незначительной транспортирующей способности ледников.

Климат в горной системе арктический (Алисов, 1956, 1974) с длинной, очень холодной зимой и коротким летом. По данным метеостанции имени Е.К. Федорова (до 1983 г. называлась «Мыс Челюскин») средняя температура января составляет -27.7°C , июля $+1.4^{\circ}\text{C}$. В течение всего года дуют сильные ветры, осадков выпадает немного — годовая сумма составляет 267 мм, максимум — летом (36 мм в августе). Летом на Таймыре заканчивают свою траекторию циклоны, приходящие с Северной Атлантики, они приносят основную массу осадков. Стоит отметить, что непродолжительный летний период (июль–август) затрудняет поиск спутниковых снимков, где ледники не покрыты сезонным снегом.

Цель работы — определить гляциологические характеристики ледников гор Бырранга по самым новым снимкам Sentinel-2 за 2022 г. и сравнить их с предыдущими результатами. В перспективе — обновление Каталога «Ледники России», в котором для исследуемого района по снимкам Sentinel-2, датированных 2019 г., было обнаружено 213 ледников общей площадью 29.94 км². Также ставилась задача оценить изменения различных климатических параметров этого региона и их возможное влияние на динамику оледенения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки площадей ледников использовались спутниковые снимки Sentinel-2, полученные в августе 2022 г. (<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/L2A>). Снимки за этот год были получены со спутника оптических изображений Sentinel-2A для наблюдения Земли, запущенного в рамках программы Европейского космического агентства «Коперник» в 2015 г. (<https://scihub.copernicus.eu>), имеющего 12 диапазонов. На спутнике установлен мультиспектральный прибор (MSI), имеющий 13 спектральных диапазонов в видимом, ближнем инфракрасном (NIR) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) спектрах.

Изображения, полученные со спутника Sentinel-2, имеют пространственное разрешение 10 м, что обеспечивает достаточно подробную информацию о таких объектах как ледники. Выделение контуров проводилось вручную в программе ArcGIS-ArcMap, с использованием возможностей мультиспектральной съёмки.

Погрешность дешифрирования в основном зависит от проведения границы ледника, так как не всегда удаётся использовать снимки с полностью свободной от сезонного снега и обломочного материала поверхностью. То есть точность примерно равна разрешению снимка с учётом объективной неопределённости, что считать границей ледника. С учётом размера пикселя в использованных снимках от 10 до 30 м и характерного размера ледников общая погрешность определения площади может достигать 5%. Мы работали с ледниками, на которых хорошо виден открытый лёд.

Для построения ЦМР использовалась ArcticDEM (Porter et al., 2018), это «база точек с высотами», по ним определялись высоты нижней и верхней позиций каждого ледника. Это можно вручную определять на карте, а можно и автоматически интерполировать полигон XY в полигон XYZ. Точность можно определить умножением периметра контура ледника на 5 м (половина точности (разрешения) снимка Sentinel-2 (10 м), отнесённого к площади ледника. Погрешность получилась от 3 до 10% в зависимости от площади ледника. Чем меньше погрешность, тем точность, определённая таким методом, больше. Площадь растёт пропорционально квадрату размера, а периметр — пропорционально размеру.

Чтобы понять общую (фоновую) картину изменения климата по метеостанциям, были построены поля изменений средней летней температуры (T_{sum}), а также изменений сумм осадков за холодный период (P_{cold}) за период с 1966 по 2021 г. Холодный период определяли за 1966–2021 гг. по средним месячным температурам; для большинства станций региона — это суммы осадков за все месяцы кроме периода с июня по сентябрь. Температура

лета — один из основных факторов таяния ледников (абляции), а твёрдые осадки — основа их питания (аккумуляции).

Линейные тренды климатических параметров определяли по уравнениям регрессии рядов этих параметров с принятыми интервалами ошибок $\pm 0.1^\circ\text{C}$ — для температуры и ± 5 мм — для осадков. В данном случае под трендом понимается изменение климатических параметров за указанный период.

Также были использованы данные температуры воздуха, количества атмосферных осадков, радиационных (приходящая к поверхности коротковолновая и длинноволновая радиация) и тепловых потоков (скрытого и явного тепла) по реанализу ERA5-Land в узлах сетки $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ с 1966 по 2021 г. с месячным разрешением.

Для обоснования использования данных реанализа ERA5-Land в работе (Титкова, Ананичева, 2023) проведена верификация приземной T_{year} и месячных сумм осадков реанализа ERA5-Land со стационарными данными. Линейные тренды определяли по уравнениям регрессии с оценкой статистической значимости 95% по критерию Стьюдента. Корреляция между значениями температуры реанализа ERA5-Land для региона гор Бырранга и данными наблюдений высокая (0.85–0.9). Связь между колебанием суммарных осадков по двум базам данных значима и колеблется в среднем от 0.64 до 0.67. Таким образом, в горных районах России колебания температуры и осадков хорошо синхронизированы в реанализе ERA5-Land с данными наблюдений (Титкова, Ананичева, 2023).

Для сравнения наших данных и данных Каталога ледников СССР использовались снимки CORONA. Данные дистанционного зондирования CORONA — источник исторической спутниковой информации среднего и высокого разрешения, в своё время рассекреченной Министерством Обороны США и находящейся в открытом доступе. Оригиналы плёнок хранятся в Службе архивов и записей США (National Archives and Records Administration (NARA)), копии плёнок хранятся в USGS EROS Data Center, который и занимается сканированием и продажей данных. Параметры миссии, снимавшей CORONA7: система — LANYARD, название миссии — KH-7, камера — High Resolution Surveillance Camera, период съёмки — с июля 1963 г. по 6 июня 1967 г., разрешение — 0.6–1.2 м.

Нам удалось получить снимки за 1965/66 г. (номера снимков: DS1022-1005DF028 (1965 г.) и DS1036-2137DF008 (1966 г.)). Обработывался снимок 1966 г., он был привязан по характерным точкам рельефа с использованием более 80 опорных точек. Дешифрировался снимок по той же методике, вручную. В качестве базового рельефа для ортотрансформирования CORONA была использована

ЦМР ArcticDEM с пространственным разрешением 10 м. Ортотрансформированный снимок имеет разрешение 2 м. Цель этой части работы — проверить данные Каталога ледников СССР на этот регион, поскольку даты снимков совпадают с датами составления Каталога, и сравнить с данными, полученными по Sentinel-2, 2022 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственно-временные особенности распределения температуры воздуха и осадков. Арктика — регион с наибольшими темпами роста температуры воздуха в современный период (Алексеев и др., 2017; IPCC, 2021). Причины максимальных трендов в высоких широтах Северного полушария (так называемого «арктического усиления») до сих пор остаются дискуссионными (Bekgulyev et al., 2010; Латонин и др., 2020). На Таймыре за последние десятилетия наблюдаются самые высокие скорости повышения среднегодовой температуры воздуха (Доклад об особенностях климата, 2023). Предположено, что именно сильное повышение температуры воздуха (в тёплый сезон) и служит основным фактором, определяющим ускоренное таяние ледников Бырранга. На рис. 1 приведены тренды (изменения) средней летней температуры воздуха и сумм атмосферных осадков за холодный период. Кружками на рисунке показаны метеостанции, список которых дан в (Титкова, Ананичева, 2023).

Максимум изменения T_{sum} приходится на область южнее п-ва Таймыр и в Корякском нагорье (см. рис. 1, а). Как было показано в работе (Титкова, Ананичева, 2023), наибольшие изменения T_{year} (до $4\text{--}5^\circ\text{C}$ за период 1966–2021 гг.) характерны для самых северных (арктических) горных районов Таймыра и Чукотки, наименьшие значения — для гор Бырранга и юга Орулгана. Детальные карты трендов, построенные по данным реанализа ERA5-Land не противоречат общим тенденциям, отмеченным по данным наблюдений (Титкова, Ананичева, 2023). Годовые изменения T_{year} максимальны в горах Бырранга — до $4\text{--}5^\circ\text{C}$ по данным реанализа. Летние тренды температуры здесь ниже на $1\text{--}2^\circ\text{C}$. Летние температуры не демонстрируют столь высокой скорости потепления по сравнению со среднегодовой температурой, основное потепление происходит в холодный период. Для осадков холодного периода (см. рис. 1, б) и среднегодовых (Титкова, Ананичева, 2023) характерны отрицательные тренды для прибрежной полосы арктической зоны.

Пространственно-временные особенности радиационных и тепловых потоков. Помимо основных климатических параметров (температура воздуха и осадки), которые обычно учитывают при оценке

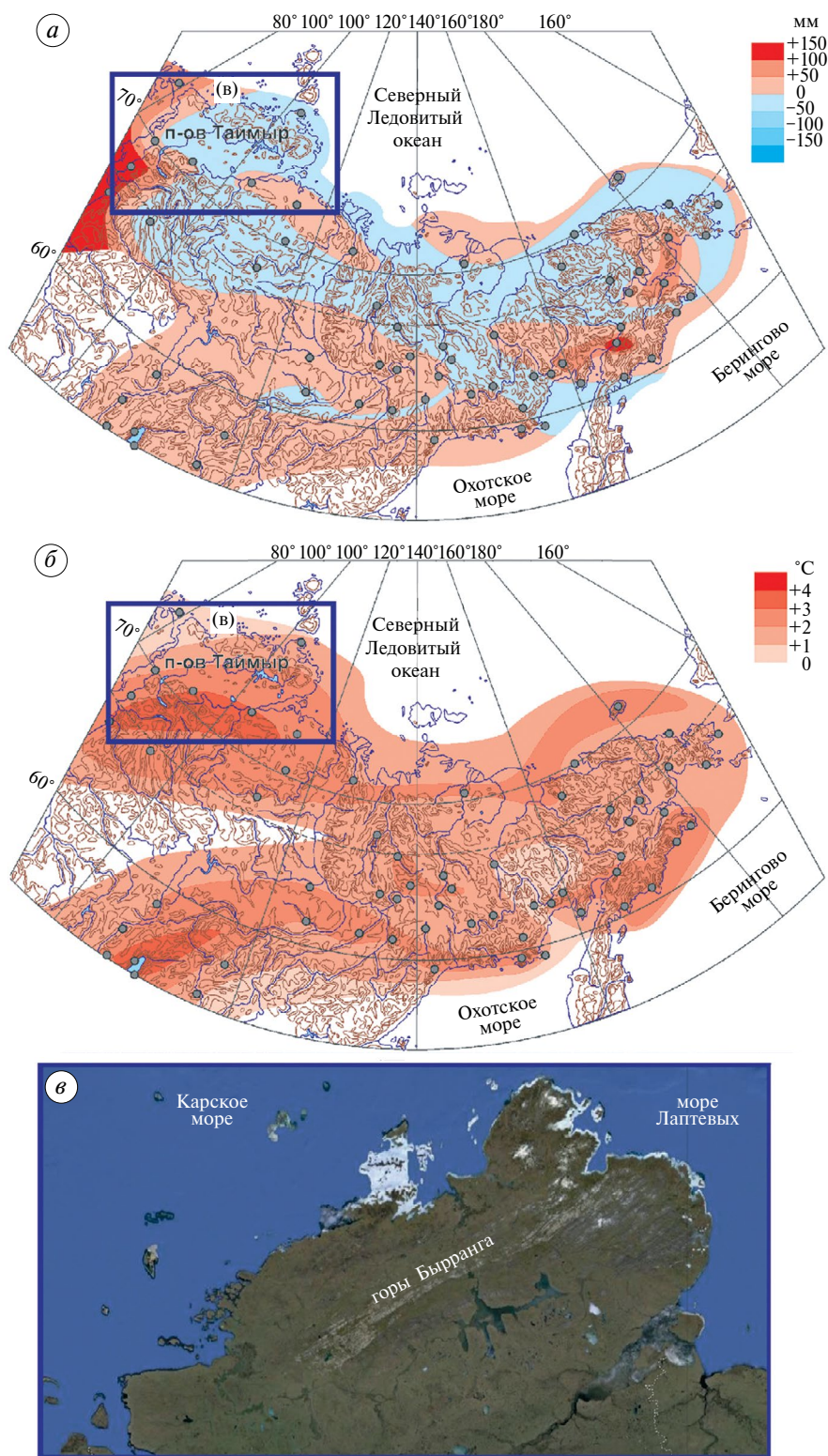


Рис. 1. Карты изменений T_{sum} (°C) (a) и P_{cold} (мм) (б) на Арктическую зону России по данным наблюдений за 1966–2021 гг. Квадратом показан район исследований. Величины изменений значимы на уровне 95%. Карта района исследований (в). Кругами показаны метеостанции

Fig. 1. Maps of the T_{sum} (°C) (a) and P_{cold} (mm) (б) for the Arctic zone of Russia according to observation data for 1966–2021. The square shows the study area. Magnitudes of changes are significant at the level 95%. The map of the study region (в). Circles show weather stations

влияния изменения климата на динамику ледников, были рассмотрены также тенденции радиационных и тепловых потоков в летний сезон (июнь–август), вклад которых также может быть значительным.

На рис. 2 представлены основные тенденции среднемесячных радиационных и турбулентных потоков в летние сезоны за 1966–2021 гг. Видно, что на большей части полуострова наблюдается статистически значимое снижение приходящей коротковолновой радиации (см. рис. 2, *а*) за последние десятилетия (до $4 \text{ Вт/м}^2/10 \text{ лет}$), по-видимому, из-за увеличения облачности. Это согласуется с результатами работы (Радионых и др., 2017), в которой также отмечается эта тенденция к сокращению суммарной радиации после 2000 г. на метеостанциях Арктического региона.

Увеличение количества облаков отмечается в Арктике как по спутниковым данным (Wang et al., 2021), так и по данным наблюдений (Sviashchennikov, Drugorub, 2022). При этом видно значимое увеличение баланса коротковолновой радиации (до 5 Вт/м^2 за 10 лет при среднем региональном значении 98 Вт/м^2) в центральной и юго-западных частях полуострова (см. рис. 2, *в*), произошедшее из-за сильного снижения отражённой коротковолновой радиации (до -5 Вт/м^2 за 10 лет

на территории всего полуострова, см. рис. 2, *б*) и альбедо поверхности. Помимо этого, во всём регионе произошло значимое увеличение приходящего к поверхности длинноволнового потока (см. рис. 2, *з*) – до 2 Вт/м^2 за 10 лет при среднем региональном значении 245 Вт/м^2 . Аналогичные величины трендов получены по данным наблюдений для разных районов Арктики, причиной служит рост влагосодержания атмосферы и увеличение количества облачности (Бекряев, 2015). Заметим, что увеличение длинноволнового потока к поверхности рассматривается как один из важных факторов таяния морского льда в Арктике (Kapsch et al., 2016; Kim et al., 2019), а также как важная составляющая обратной связи «сокращение площади морского льда – рост содержания водяного пара – увеличение нисходящей длинноволновой радиации – сокращение площади морского льда» (Алексеев и др., 2017). (Zhang et al. (2021) показали, что 82% повышения зимней температуры в Арктике вызвано увеличением приходящей к поверхности длинноволновой радиации при безоблачном небе. Тем не менее, по оценкам ERA5 за рассматриваемый период тренды суммарного длинноволнового баланса на большей части полуострова Таймыр близки к нулю или отрицательны (см. рис. 2, *д*), т.е. рост встречного

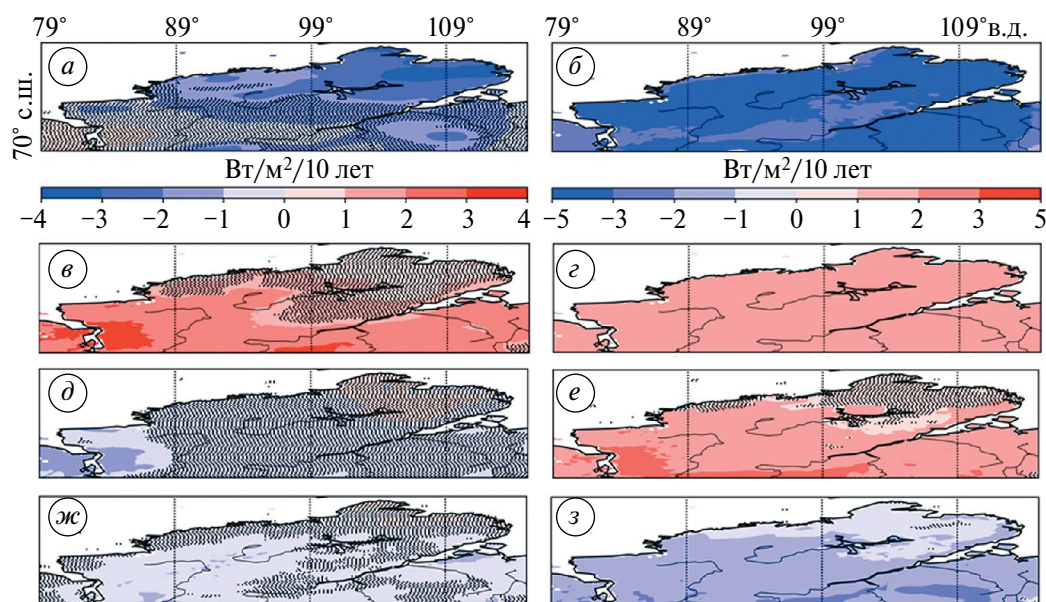


Рис. 2. Коэффициенты тренда ($\text{Вт/м}^2/10 \text{ лет}$) летних (июнь–август) суммарных значений приходящей коротковолновой радиации (*а*); отражённой коротковолновой радиации (*б*); коротковолнового радиационного баланса (*в*); приходящей длинноволновой радиации (*з*); длинноволнового радиационного баланса (*д*); суммарного радиационного баланса (*е*); явного потока тепла (*ж*); скрытого потока тепла за период 1966–2021 гг. Чёрной штриховкой показаны области, где тренд статистически незначим на уровне 5% (*з*)

Fig. 2. Trend coefficients ($\text{W/m}^2/10 \text{ years}$) of summer (June–August) total values of incoming shortwave radiation (*a*); reflected shortwave radiation (*b*); shortwave radiation balance (*v*); incoming longwave radiation (*z*); longwave radiation balance (*d*); the total radiation balance (*e*); turbulent flux of sensible heat (*ж*); turbulent flux of latent heat for the period 1966–2021. Black shading shows areas where the trend is statistically insignificant at the 5% level (*з*)

излучения атмосферы полностью компенсируется ростом собственного излучения поверхности.

Таким образом, суммарный рост радиационного баланса летом, статистически значимый на большей части полуострова (до $3 \text{ Вт/м}^2/10 \text{ лет}$ при среднем значении по региону 64 Вт/м^2 , см. рис. 2, *д*), был вызван, по-видимому, уменьшением отражённой коротковолновой радиации и альбедо.

Для рассматриваемого региона характерны отрицательные тенденции изменения турбулентных потоков тепла (явного и скрытого, см. рис. 2, *ж–з*), причём для потока скрытого тепла величины значительны: до $-3 \text{ Вт/м}^2/10 \text{ лет}$ при среднем региональном значении — 30 Вт/м^2 за весь рассматриваемый период. Тем не менее, эти тенденции не способствуют таянию ледников, так как отрицательные потоки тепла направлены от поверхности ледника в атмосферу. В работах (Суркова, Романенко, 2021; Иванов и др., 2022) показано, что величины турбулентных потоков над Карским морем малы и суммарный годовой тренд за период 1979–2018 гг. практически равен нулю.

Обработка данных снимков Sentinel-2, 2022 г. Обработка снимков началась с выделением бассейнов, принимающих талый сток с ледников Бырранга (рис. 3), это было сделано с помощью ЦМР

ArcticDEM. В каталоге ледников СССР, где даны сведения только о 96 ледниках, указаны первые три бассейна (см. рис. 3, *I–III*).

Анализ изменения ледников мы проводили далее, группируя их по этим бассейнам. Съёмка спутником Sentinel-2 региона гор Бырранга в августе 2022 г. выявила 210 ледников общей площадью 24.7 км^2 . Эти сведения близки по количеству и площади к данным в электронном каталоге «Ледники России», но снимки, используемые в данной работе, более новые. Даже при такой небольшой разнице (три года), изменения ледников заметны, поскольку ледники здесь невелики и находятся в зоне интенсивного повышения температур и отрицательных трендов осадков уже в течение десятилетий.

Экспозиция и морфологический тип, средняя площадь ледника. Экспозиция ледников была определена также с помощью ArcticDEM. Экспозиция ледника в какой-то степени отражает влияние на него климатических условий, на морфологический тип оказывают влияние вмещающие ледник формы рельефа. На рис. 4, *а* дано распределение ледников по экспозиции, на рис. 4, *б* — по морфологическому типу.

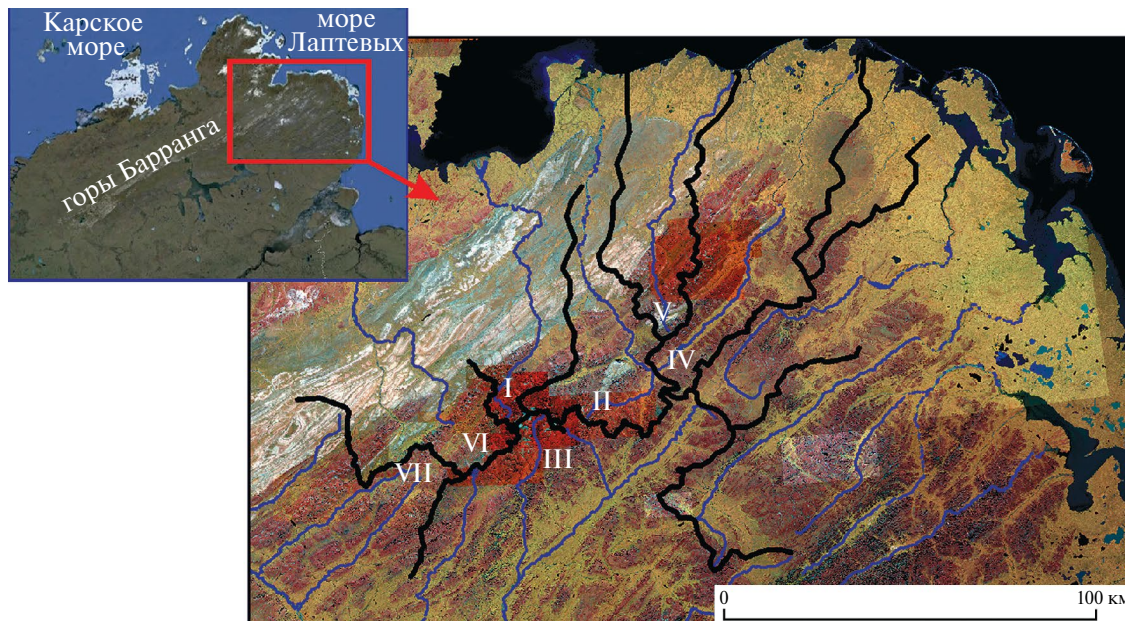


Рис. 3. Снимок на район гор Бырранга с выделением ледниковых бассейнов. Римскими цифрами обозначены бассейны: *I* — р. Преградная — Залив Фаддея — мыс Лаптевых; *II* — р. Толля — Ключевка — мыс Лаптевых; *III* — р. Ледниковая — р. Малахайтари — оз. Таймыр; *IV* — р. Рыбная — море Лаптевых; *V* — р. Географы — море Лаптевых; *VI* — р. Ленинградская — Карское море; *VII* — р. Сочавы — р. НюнькаракуТари — оз. Таймыр

Fig. 3. Sentinel-2 image of the Byrranga Mountains highlighting the glacial basins. Roman numbers indicate the basins: *I* — Pregradnaya River — Thaddeus Bay — Laptev Sea; *II* — Tollya River — Klyuevka River — Laptev Sea; *III* — Lednikovaya — Malakhitari rivers — Taimyr Lake; *IV* — Rybnaya River — Laptev Sea; *V* — Geographa River — Laptev Sea; *VI* — Leningradskaya River — Kara Sea; *VII* — Sochavy River — NyunkarakuTari river — Taimyr Lake

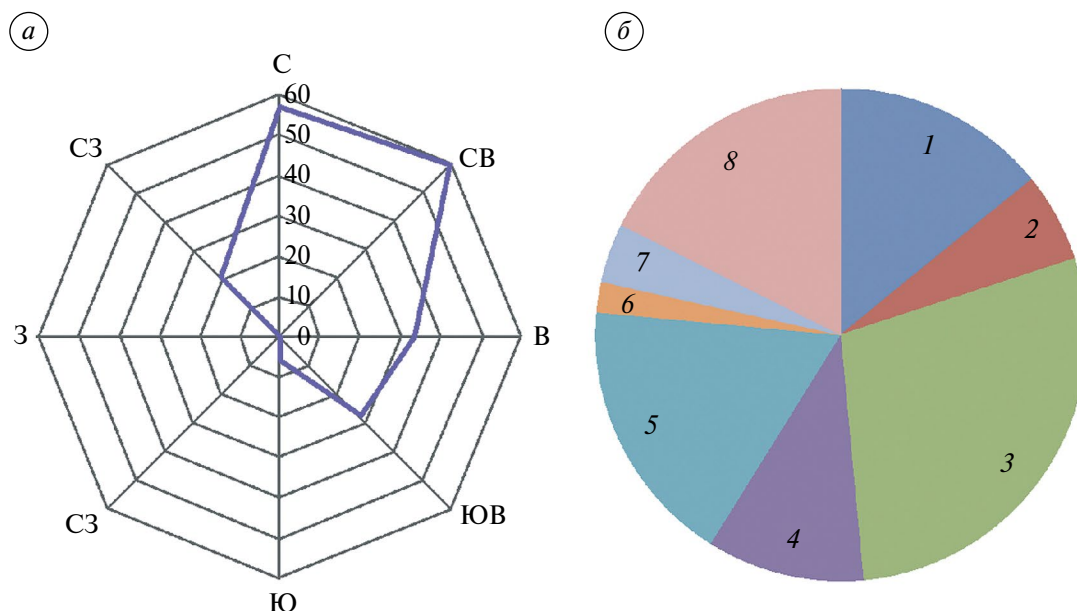


Рис. 4. Распределение ледников Бырранга в 2022 г. по экспозиции (а); и по морфологическому типу (б). Цифрами обозначены типы: 1 – висячий; 2 – долинный; 3 – карово-висячий; 4 – карово-долинный; 5 – каровый; 6 – кулуаров; 7 – перемётный; 8 – присклоновый

Fig. 4. Distribution of Byrranga glaciers in 2022 by aspect (а); and by morphological type (б). The numbers indicate the types: 1 – hanging; 2 – valley; 3 – corrie-hanging; 4 – corrie-valley; 5 – corrie; 6 – couloirs; 7 – transfluent; 8 – slope

Наибольшее количество ледников здесь ориентированы теперь на холодный север, северо-восток, северо-запад (67.65%) и восток (16.8%), а также на юго-восток и юг (16.8%). Большинство ледников Бырранга принадлежит к малым формам оледенения (по М.В. Тронову, 1954) и сейчас находятся в стадии деградации (Kononov et al., 2005; Ананичева, Кононов, 2020; Ananicheva et al., 2020). В таких условиях сложно определить по снимкам точно их морфологический тип. По нашим оценкам, преобладают сейчас карово-висячие (28.4%) и присклоновые (17.6%) ледники. Это неустойчивые морфологические типы; следовательно, при дальнейшем потеплении они будут достаточно быстро таять.

Ледники, действительно небольшие по площади, располагаются по бассейнам так, как показано на рис. 5, а. Наибольшие ледники (количество до 60, компактная группа) отдают талую воду в бассейн рек Ледниковой – Малахайтари, последняя впадает в оз. Таймыр. Это озеро имеет сток в море Лаптевых через реку Нижняя Таймыра. Несколько меньше ледников и уже меньшей площади принадлежат бассейнам рек Толля, и Преградной. Остальные ледники средней площадью менее 0.15 км² (от 10 до 30 в бассейне) расположены группами на довольно большой площади.

Высотное положение ледников Бырранга. Наибольший перепад высот характерен для бассейнов, находящихся в центральной, северной и

северо-восточной частях горного массива, в бассейне рек Преградной и Ледниковой. Последние занимают более западную и юго-восточную части гор, по-видимому, там больше осадков для питания ледников. Абсолютные минимумы концов ледников достигают отметок 300–250 м. Считается, что высотная зона распространения ледников Бырранга самая низкая после Кроноцкого массива среди горных районов Евразии.

Распределение высших точек (H_{high}) и низших (H_{low}) по высотным интервалам показано на рис. 5, б. Высшие точки большинства ледников лежат в пределах 800–900 м, низшие большинства интервале 600–700 м. Толщина небольших карово-долинных ледников по оценкам экспедиционных работ в 2015 г. в районе левых притоков р. Рыбной достигает 3.5 м (Антонов, 2016).

Сравнение с оценками, сделанными в Каталоге ледников СССР (1967 г.). Мы сравнили площади ледников, указанные в Каталоге, с полученными при анализе снимков Sentinel-2 за 2022 г. Это было возможно для трёх бассейнов, ледники которых попали в Каталог ледников СССР (1980): I, II, III (см. подпись к рис. 3). По результатам анализа площадь, покрытая льдом, в бассейне р. Преградная сократилась на 50.1%, в бассейне р. Толля – на 48.8%, в бассейне р. Малахайтари – на 56%. В целом площадь всех ледников со времени составления Каталога, то есть за 55 лет, сократилась на

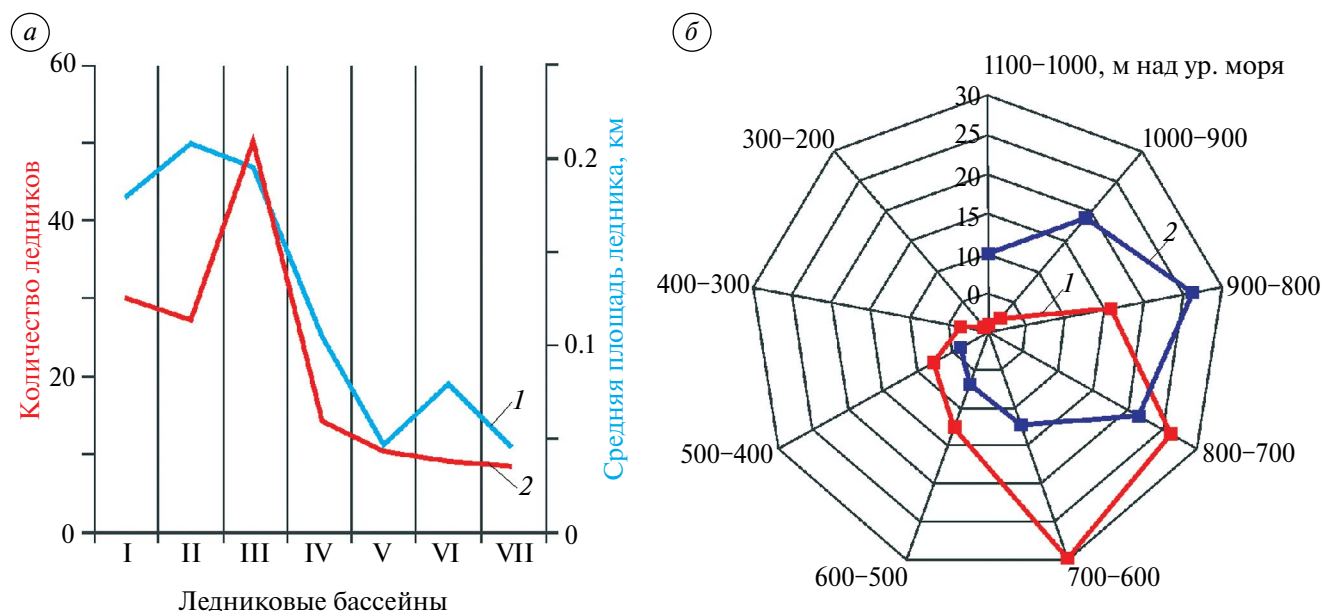


Рис. 5. Площадь ледников Бырранга и их количество по бассейнам; (а): 1 – количество ледников; 2 – средняя площадь ледника. (Римскими цифрами указаны ледниковые бассейны, которые даны на рис. 3). Распределение верхней и нижней отметок высоты ледников по высотным интервалам; (б): 1 – H_{low} ; 2 – H_{high}

Fig. 5. Area of Byrranga glaciers and their number by basin; (а): 1 – number of glaciers; 2 – mean glacier area. Roman numerals indicate glacial basins, which are shown in Fig. 3. Distribution of the highest and lowest elevation points by altitude intervals; (б): 1 – H_{low} ; 2 – H_{high}

52.2%. Эти результаты, как будет сказано ниже, проверены с помощью анализа снимков CORONA за 1966 г.

Сравнение сокращения площади ледников Корякского нагорья за чуть меньший период (снимки Sentinel-2, 2019 г.) составило от 52 до 68%, то есть значительно больше, чем в горах Бырранга (Ананичева и др., 2023).

Сравнение с оценками, сделанными по снимкам Landsat 2003 г. В работе (Ананичева, Капустин, 2010) были представлены данные об изменении площади ледников гор Бырранга, полученные по снимку Landsat Thematic Mapper (номер снимка LE71500062003222ASN01). Они сравнивались с площадями ледников в Каталоге ледников СССР, определёнными по аэрофотосъёмкам 1967 г. Тогда сокращение ледников (было идентифицировано 66 ледников) составило 17% по сравнению с Каталогом. Сокращались долинные и карово-долинные ледники южных и юго-восточных экспозиций. Сейчас, в соответствии с наблюдающимся интенсивным потеплением в Арктической зоне, меняются площади ледников северных экспозиций.

Наблюдения экспедиции ААНИИ обнаружили полное отсутствие фирновой толщи, а также слоёв инфильтрационно-конжеляционного льда у самых крупных перемётных ледников, объединённых

общей площадью истечения. Отсутствие на ледниках фирна и наложенного льда говорит о неразвитости областей питания, ледники гор Бырранга принадлежат к «пассивному оледенению», по мнению автора монографии (Большаинов, 2006). Наш анализ уклонов поверхности ледников по ЦМР (ЕТОРО-30) выявил преобладание слабонаклонных и псевдогоризонтальных участков в области питания с переходом к склонам средней крутизны (до 10°) в области разгрузки (Ананичева, Капустин, 2010).

Сравнение со снимками CORONA – середина 1960-х гг. Как было сказано раньше, привязанный и ортотрансформированный снимок CORONA имеет высокое разрешение – 2 м; таково разрешение современных коммерческих спутников, снимающих земную поверхность, их нет в открытом доступе. Было дешифровано 57 ледников в семи бассейнах в горах Бырранга – на снимке CORONA 1966 г. (рис. 6).

Проведено сравнение этих ледников по площади со снимком Sentinel-2, 2022 г. Мы преследовали две цели: во-первых, сравнить наши новые результаты со снимками высокого разрешения (CORONA, 1966) – самыми ранними из открытого доступа; во-вторых, проверить данные Каталога ледников СССР, составленного в 1967 г.

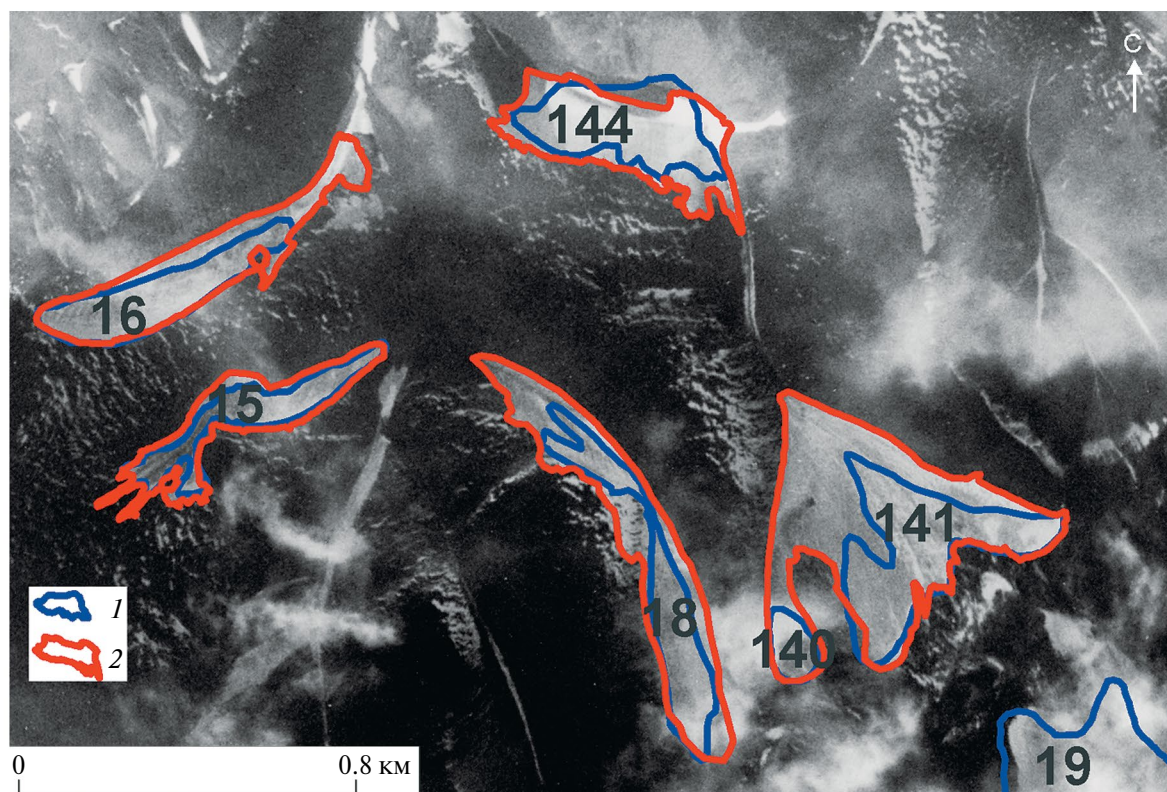


Рис. 6. Фрагмент снимка CORONA с контурами ледников: 1 – по Sentinel-2, 2022 г.; 2 – по CORONA, 1966 г.

Fig. 6. Fragment of a CORONA image with the contours of glaciers: 1 – Sentinel-2, 2022; 2 – CORONA images, 1966

К 2022 г. (Sentinel-2) площадь в разных бассейнах сократилась от 35 до 46% (исходя из анализа снимков CORONA, 1966). Максимально сократились ледники бассейнов р. Толля – центр района оледенения, и р. Географов – северная часть района. Если сравнивать результаты 2022 г. с КATALOGом ледников СССР, 1967 г., разница больше – от 48.8 до 56%. Соответственно, проверка по снимкам CORONA 1966 г. показала расхождение с КATALOGом от 3 до 20% для разных бассейнов.

Средняя площадь ледников в группе (бассейне) прямо не коррелирует со степенью сокращения общей площади, но видно, что чем больше сокращение в группе, тем ледники в среднем меньше. Таким образом, в районе гор Бырранга в среднем больше уменьшаются в размерах малые ледники – площадью от 0.1 до 0.2 км².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Ледники Бырранга – самые северные континентальные горные ледники, они до конца XX века находились более или менее в стабильном состоянии, но уже к 2003 г их площадь уменьшилась на 17% (снимки Landsat) по сравнению с КATALOGом ледников СССР (1967), а к

2022 г. (Sentinel-2) площадь ледников сократилась от 35 до 46% (снимки CORONA, 1966) для разных бассейнов.

2. По реанализу ERA5-Land изменения среднегодовой температуры на Таймыре максимальны для севера России – до 4–5 °С. Изменения летней температуры оказались ниже на 1–2 °С. Отрицательные тренды среднегодовой суммы осадков, а также суммы осадков холодного периода характерны для самых северных прибрежных областей. Основные климатические параметры – температура воздуха и осадки – не способствуют сохранению оледенения в горах Бырранга.

3. Если сравнивать результаты изменения размеров ледников в 2022 г. с КATALOGом ледников 1967 года, разница больше – от 48.8 до 56%. Соответственно, проверка по снимкам CORONA 1966 г. показала расхождение с КATALOGом от 3 до 20% для разных бассейнов.

4. Сокращение площади к 2003 г. шло у долинных и каровых ледников южной и юго-восточной экспозиций, а к 2022 г. интенсивно таяли каровые и висячие ледники, лежащие на северных и северо-восточных склонах, продолжали таять ледники и южных, и юго-восточных экспозиций.

5. Максимально сократились ледники в бассейнах р. Толля (центр района и оледенения) и р. Географа в северной части региона.

6. Ледники Бырранга имеют слабые уклоны (до 10% на склонах) и относятся к так называемому «пассивному оледенению», однако в последние десятилетия они активно изменяются.

7. Тенденции изменения радиационных потоков по данным реанализа ERA5-Land показали значимое увеличение радиационного баланса в 1966–2021 гг. (до 3 Вт/м²/10 лет), из-за уменьшения отражённой от поверхности коротковолновой радиации. Этот фактор помимо роста температуры воздуха способствует ускоренному таянию ледников.

Необходим мониторинг изменений горных ледников Российской арктической зоны, поскольку они являются чувствительным показателем изменения климата в этом регионе, для которого характерно «арктическое усиление». Так как эти ледники крайне затратны для экспедиционных исследований, использование средств ДЗЗ — это один из эффективных методов. Сейчас сравнивать изменения ледников стоит не с Каталогом ледников СССР, хотя это большое подспорье в оценках, а самими ранними спутниковыми снимками, такими как, например, CORONA, находящимися в открытом доступе и имеющими высокое разрешение.

Благодарности. Работа сделана в рамках гранта РНФ № 24-27-00310. Спасибо Ю.М. Кононову за техническую помощь при подготовке статьи.

Acknowledgments. The study was carried out within the framework of the Russian Science Foundation (Grant No. 24-27-00310). Thanks to Yu.M. Kononov for technical assistance.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Бобылев Л.П., Уразильдева А.В., Гнатюк Н.В. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на летнее потепление в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3. С. 67–77.
- Алисов Б.П. Климат СССР. Учебное пособие для высших учебных заведений. М.: Изд-во МГУ, 1956. 125 с.
- Алисов Б.П., Полтараус Б.В. Климатология. Учебник для студентов географических факультетов университетов, специализирующихся по метеорологии и климатологии. Издание 2-е, переработанное и дополненное. М.: Изд-во МГУ, 1974. 299 с.
- Ананичева М.Д., Капустин Г.А. Оценка изменений ледников гор Бырранга по космическим снимкам и Каталогу ледников СССР // Лёд и Снег. 2010. № 3 (111). С. 19–24.
- Ананичева М.Д., Кононов Ю.М. Горные ледники Севера России: изменения за последние десятилетия под воздействием вариаций климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. Т. 3. С. 42–72. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-3-42-72>
- Ananicheva M., Kononov Yu., Belozarov E. Contemporary state of glaciers in Chukotka and Kolyma highlands // Bulletin of Geography (Physical Geography Series). 2020. V. 19. P. 5–18. <https://doi.org/10.2478/bgeo-2020-0006>
- Антонов О.М. Изменение границ малых ледников северо-восточного Таймыра за последние десятилетия // Тезисы докладов XVI Гляциол. симпозиума. Санкт-Петербург, 24–27 мая 2016 г. / Ред. В.М. Котляков и С.С. Кутузов. СПб.: ААНИИ, 2016. 46 с.
- Бекряев Р.В. Изменения потоков нисходящей длинноволновой радиации и эффективного излучения подстилающей поверхности в высоких широтах // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 27–48.
- Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming // Journal of Climate. 2010. V. 23. P. 3888–3906.
- Большаинов Д.Ю. Пассивное оледенение Арктики и Антарктиды. СПб.: ААНИИ, 2006. 295 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М., 2023. 104 с.
- Иванов В.В., Архипкин В.С., Лемешко Е.М., Мысленков С.А., Смирнов А.В., Суркова Г.В., Тузов Ф.К., Чечин Д.Г., Шестакова А.А. Изменение гидрологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в евразийской Арктике в XXI веке // Вест. МГУ. Сер. 5. География. 2022. Т. 1. С. 13–25.
- Каталог ледников СССР. Ангара-Енисейский район. Т. 16. Вып. 1. Ч. 2. Горы Бырранга. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. С. 52–78.
- Латонин М.М., Башмачников И.Л., Бобылёв Л.П. Явление арктического усиления и его движущие механизмы // Фундаментальная и прикладная геофизика. 2020. Т. 13. №. 3. С. 3–24.
- Магидович В., Магидович И. Географические открытия и исследования XVII–XVIII веков. М.: Центрполиграф, 2004. 495 с.
- Овсяченко А.Н., Жостков Р.А., Едемский Д.Е., Собищев А.Л., Сысолин А.И., Преснов Д.А. Активная тектоника северо-восточного Таймыра (горы Бырранга) и вопросы сеймотектонической регионализации российской Арктики // Физика земли. 2023. № 6. С. 207–223.
- Радионон В.Ф., Русина Е.Н., Сибир Е.Е. Многолетняя изменчивость годовых сумм суммарной и поглощенной солнечной радиации в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3. С. 39–50.

- Суркова Г.В., Романенко В.А. Сезонные и многолетние изменения турбулентных потоков тепла между морем и атмосферой в западном секторе российской Арктики // Вест. МГУ. Сер. 5. География. Динамика природных процессов. 2021. № 4. С. 74–82.
- Титкова Т.Б., Ананичева М.Д. Использование реанализа ERA5-Land и данных метеостанций в горных районах России для оценки изменения ледниковых систем // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 2. С. 199–213.
- Троицкий С.Л. Четвертичные отложения и рельеф равнинных побережий Енисейского залива и прилегающей части гор Бырранга. М.: Наука. 1966. 213 с.
- Francis J.A., Hunter E. Changes in fabric of the Arctic's greenhouse blanket // Environ. Research Letters. 2007. V. 2. P. 45011.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; 2023. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kapsch M., Graversen R.G., Tjernström M., Bintanja R. The Effect of Downwelling Longwave and Shortwave Radiation on Arctic Summer Sea Ice // Journ. of Climate. 2016. V. 29. P. 1143–1159.
- Kim K.Y., Kim J.Y., Kim J., Yeo S., Na H., Hamlington B.D., Leben R.R. Vertical Feedback Mechanism of Winter Arctic Amplification and Sea Ice Loss // Sci. Rep. 2019. V. 9. P. 1184.
- 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. 163–171. <https://doi.org/10.3189/172756405781812709>
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kellener C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Plantson M., Wethington M., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesem M. ArcticDEM. 2018 Harvard. Dataverse V3. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>
- Sviashennikov P., Drugorub A. Long-term trends in total cloud cover in the Arctic based on surface observations in 1985–2020 // Bull. of Geography. Physical Geography Series. 2022. No. 22. P. 33–43.
- Wang X., Liu J., Yang B. Seasonal Trends in Clouds and Radiation over the Arctic Seas from Satellite Observations during 1982 to 2019 // Remote Sensing. 2021. V. 13. № 16. P. 3201.
- Yamanouchi T. Arctic warming by cloud radiation enhanced by moist air intrusion observed at Ny-Ålesund, Svalbard. // Polar Science. 2019. V. 21. P. 110–116.
- Zhang R., Wang H., Fu Q., Rasch P.J., Wu M., Maslowski W. Understanding the cold season Arctic surface warming trend in recent decades // Geophys. Research Letters. 2021. V. 48. e2021GL094878

Citation: Ananicheva M.D., Korneva I.A. Small glacier forms and climate changes in the Taymyr Peninsula: new assessments. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (3): 345–357. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673424030038

Small glacier forms and climate changes in the Taymyr Peninsula: new assessments

M.D. Ananicheva^{a*}, I.A. Korneva^{a,b}

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia*

*e-mail: maranan@gmail.com

Received March 24, 2024 / Revised April 27, 2024 / Accepted July 8, 2024

New estimates of the glaciation in the Taymyr Peninsula were obtained on the basis of the satellite data. The glaciation of the Byrranga Mountains was analyzed. These are the northernmost continental mountain glaciers, represented mainly by small forms of glaciation. They were in a relatively stable state until the end of the 20th century, but by 2003 the total area of them had decreased by 17% (Landsat images) compared to the USSR Catalog of Glaciers (1967). And even more (by 35–46%), of their area had decreased by 2022 (Sentinel-2) (CORONA images, 1966) in different basins that have been determined for all groups of glaciers. The use of the ArcticDEM database made it possible to correct the boundaries of the ice divides between

the glaciers in the center of the glaciation. If we compare the results of 2022 with the 1967 Catalog, the contraction becomes more intensive – from 48.8 to 56%. Accordingly, the comparison with the Corona images of 1966 demonstrated a certain discrepancy with data of the 1967 Catalog – from 3 to 20% for different basins. Estimates of climatic changes in this region have been made, against the background of which the Byrranga glaciers are shrinking. The most intensive warming in Russia occurred here, on the Taimyr, during the period 1966–2021. The average annual air temperature had risen by 4–5 °C, but in summer the rate of warming was 2 times lower than the annual means. This means that in addition to the air temperature rise, other factors contribute to the accelerated melting of the glaciers. Thus, according to the ERA5-Land reanalysis, a significant increase in the radiation balance was identified (up to 3 W/m²/10 years, which for the period 1966–2021 amounted to 5% of the regional mean), which probably occurred due to a decrease in the surface albedo.

Keywords: glacier, glacier area, satellite image, climate change, temperature, precipitation, radiation balance, Byrranga Mountains, Taimyr

REFERENCES

- Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Urazgildeeva A.V., Gnatyuk N.V. The influence of atmospheric transfers of heat and moisture on summer warming in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2017, 3: 67–77. [In Russian].
- Alisov B.P. Climate of the USSR. Textbook for higher educational institutions. *Uchebnoe posobie dlya vysshih uchebnykh zavedenij*. Study guide for higher education institutions. M.: Moscow University Publishing House, 1956:125 p. [In Russian].
- Alisov B.P., Poltarauz B.V. *Klimatologiya. Uchebnik dlya studentov geograficheskikh fakul'tetov universitetov, specializiruyushchihya po meteorologii i klimatologii*. Climatology. A textbook for students of geographical faculties of universities specializing in meteorology and climatology. M.: Moscow University Publishing House, 1974: 299 p. [In Russian].
- Ananicheva M.D., Kapustin G.A. Assessment of changes in the Byrranga Mountains glaciers based on satellite images and the USSR Glacier Inventory. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2010, 3 (111): 19–24. [In Russian].
- Ananicheva M.D., Kononov Yu.M. Mountain glaciers of the North of Russia: changes in recent decades under the influence of climate variations. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2020, 3: 42–72. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-3-42-72> [In Russian].
- Ananicheva M., Kononov Yu., Belozarov E. Contemporary state of glaciers in Chukotka and Kolyma highlands. *Bulletin of Geography (Physical Geography Series)*. 2020, 19: 5–18. <https://doi.org/10.2478/bgeo-2020-0006>
- Antonov O.M. Changes in the small glacier boundaries in Northeastern Taimyr over the past decades. *Tezisy dokladov XVI Glyaciologicheskogo simpoziuma, Sankt-Peterburg 24–27 maya 2016 goda*. Abstracts of the XVI Glaciological Symposium in St. Petersburg on May 24–27, 2016. Saint Petersburg: AARI, 2016: 46 p. [In Russian].
- Bekryaev R.V. Changes in the fluxes of downward long-wave radiation and effective radiation of the underlying surface at high latitudes. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2015, 1: 27–48. [In Russian].
- Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming. *Journ. Climate*. 2010. V. 23. P. 3888–3906. [In Russian].
- Bolshiyanov D.Yu. *Passivnoye oledeneniye Arktiki i Antarktidi*. Passive glaciation of the Arctic and Antarctica. Saint Petersburg: AARI, 2006. 295 p. [In Russian].
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossijskoj Federatsii za 2022 god. Report on climate features in the Russian Federation for 2022. Moscow, 2023: 104 p. [In Russian].
- Ivanov V.V., Arkhipkin V.S., Lemesheko E.M., Myslenkov S.A., Smirnov A.V., Surkova G.V., Tuzov F.K., Chechin D.G., Shestakova A.A. Changes in hydrological conditions in the Barents Sea as an indicator of climate trends in the Eurasian Arctic in the 21st century. *Vestnik Moskovskogo universiteta*. Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography. 2022, 1: 13–25. [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR. Angaro-Yeniseyskiy rayon. The USSR Glacier Inventory. Angara-Yenisei region. V. 16. Is. 1, Part 2. Byrranga Mountains. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980: 52–78. [In Russian].
- Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev L.P. The phenomenon of Arctic amplification and its driving mechanisms. *Fundamental'naya i prikladnaya geofizika*. Fundamental and Applied Geophysics. 2020, 13 (3): 3–24. [In Russian].
- Magidovich V., Magidovich I. *Geograficheskiye otkrytiya i issledovaniya XVII-XVIII vekov*. Geographical discoveries and research of the 17th–18th centuries. M.: Centerpoligraph, 2004: 495 p. [In Russian].
- Ovsyuchenko A.N., Zhostkov R.A., Edemsky D.E., Sobisevich A.L., Sysolin A.I., Presnov D.A. Active tectonics of northeastern Taimyr (Byrranga Mountains) and

- issues of seismotectonic regionalization of the Russian Arctic. *Fizika Zemli*. Physics of the Solid Earth. 2023, 6: 207–223. [In Russian].
- Radionov V.F., Rusina E.N., Sibir E.E. Long-term variability of annual amounts of total and absorbed solar radiation in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2017, 3: 39–50.
- Surkova G.V., Romanenko V.A. Seasonal and long-term changes in turbulent heat flows between the sea and the atmosphere in the western sector of the Russian Arctic. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5. Geografiya. Dinamika prirodnih processov*. Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography. Dynamics of natural processes. 2021, 4: 74–82. [In Russian].
- Titkova T.B., Ananicheva M.D. Using ERA5–Land Reanalysis and data from weather stations in the mountainous regions of Russia to assess changes in the glacial systems of Eastern Siberia and the Far East. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (2): 199–213.
- Troitsky S.L. *Chetvertichnyye otlozheniya i rel'yef ravninnykh poberezhnyy Yeniseyskogo zaliva i prilgayushchey chasti gor Byrranga*. Quaternary sediments and topography of the coastal plains at the Yenisei Bay and in adjacent parts of the Byrranga Mountains. M.: Science. 1966: 213 p. [In Russian].
- Francis J.A., Hunter E. Changes in fabric of the Arctic's greenhouse blanket. *Environ. Research Letters*. 2007, 2: 45011.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press 2023. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kapsch M., Graversen R.G., Tjernström M., Bintanja R. The Effect of Downwelling Longwave and Shortwave Radiation on Arctic Summer Sea Ice. *Journ. of Climate*. 2016, 29: 1143–1159.
- Kim K.Y., Kim J.Y., Kim J., Yeo S., Na H., Hamlington B.D., Leben R.R. Vertical Feedback Mechanism of Winter Arctic Amplification and Sea Ice Loss. *Science Reports*. 2019, 9: 1184.
- 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: 163–171. <https://doi.org/10.3189/172756405781812709>
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kellener C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Plantson M., Wethington M., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesem M. ArcticDEM. 2018 Harvard. Dataverse V3. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>
- Sviashennikov P., Drugorub A. Long-term trends in total cloud cover in the Arctic based on surface observations in 1985–2020. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*. 2022, 22: 33–43.
- Wang X., Liu J., Yang B. Seasonal Trends in Clouds and Radiation over the Arctic Seas from Satellite Observations during 1982 to 2019. *Remote Sensing*. 2021, 13 (16): 3201.
- Yamanouchi T. Arctic warming by cloud radiation enhanced by moist air intrusion observed at Ny-Ålesund, Svalbard. *Polar Science*. 2019, 21: 110–116.
- Zhang R., Wang H., Fu Q., Rasch P.J., Wu M., Maslowski W. Understanding the cold season Arctic surface warming trend in recent decades. *Geophys. Research Letters*. 2021, 48: e2021GL094878