

СОКРАЩЕНИЕ ОЛЕДЕНЕНИЯ ХРЕБТА ОРУЛГАН (ВЕРХОЯНСКИЙ ХРЕБЕТ) В 1951–2023 гг.

© 2024 г. А. Я. Муравьев*, Т. Е. Хромова

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: anton-yar@rambler.ru*

Поступила 06.04.2024 г.

После доработки 07.07.2024 г.

Принята к печати 07.10.2024 г.

Представлены новые данные о площади и высотных характеристиках оледенения хребта Орулган в 2013–2023 гг. Оценены изменения оледенения за следующие временные периоды: с 1951–1967 по 2013 г., 2013–2018 и 2018–2023 гг. Выявлено существенное ускорение сокращения площади ледников в 2018–2023 гг. (4.06%/год), по сравнению с 2013–2018 гг. (2.17%/год) и периодом с 1951–1967 по 2013 г. (0.61%/год).

Ключевые слова: горные ледники, хребет Орулган, Верхоянский хребет, сокращение площади ледников, морфологические типы, высотное распределение, спутниковые съёмки, цифровая модель рельефа

DOI: 10.31857/S2076673424040036, EDN: HTXBJW

ВВЕДЕНИЕ

Оледенение хребта Орулган — это один из 18 современных горно-ледниковых районов на территории России. Он входит в группу из 9 ледниковых систем, расположенных в субарктической зоне и, наряду с Колымским нагорьем, характеризуется небольшой (менее 10 км²) площадью оледенения (Хромова и др., 2021). Небольшие по площади ледниковые системы представляют особый интерес для исследования, так как продолжают существовать в неблагоприятных климатических условиях, находясь почти на грани исчезновения.

Хребет Орулган образует центральную, самую высокую (максимальная высота 2283 м) часть северной ветви Верхоянского хребта (рис. 1). Он вытянут примерно на 400 км в меридиональном направлении. Наибольшая высота горных вершин (2000–2300 м) характерна для узкой полосы вдоль главного водораздела, отделяющего бассейны реки Лена с запада от бассейнов рек Яна и Омолой с востока. Здесь и располагаются современные ледники. К северу и югу высоты хребта понижаются, уменьшая возможности для существования ледников. Ширина западного и восточного макросклонов хребта Орулган практически равны, однако их рельеф существенно различается (Каталог..., 1972). В осевой зоне хребта и на его западном макросклоне широко распространены альпийские формы

рельефа, которые на восточном макросклоне характерны только для наиболее приподнятых участков. Западный макросклон характеризуется интенсивным расчленением рельефа с относительными превышениями 800–1300 м. Долины крупнейших рек на нём глубокие, вытянуты в широтном направлении. Восточный макросклон характеризуется гораздо меньшим расчленением рельефа и относительными превышениями до 800 м.

Климат хребта Орулган как части Верхояно-Колымской области характеризуется высокой степенью континентальности (Корейша, 1991). Хребет Орулган, находясь на сравнительно небольшом удалении от моря Лаптевых, подвержен влиянию арктических воздушных масс. В то же время, расположение на пути господствующего западного переноса приводит к значительному уменьшению количества осадков, выпадающих на восточном макросклоне хребта, по сравнению с западным. В 1960-х годах метеостанции на западном склоне хребта Орулган фиксировали сумму годовых осадков около 350 мм, а на восточном — 200 мм (Башлавин, 1970). Все метеостанции расположены на высотах, не превышающих 500 м над ур. моря. Очевидно, что абсолютные значения количества выпадающих осадков растут с высотой и на высотах, где расположены ледники, эти значения будут существенно больше. Западные и северо-западные ветра могут перераспределять снег на

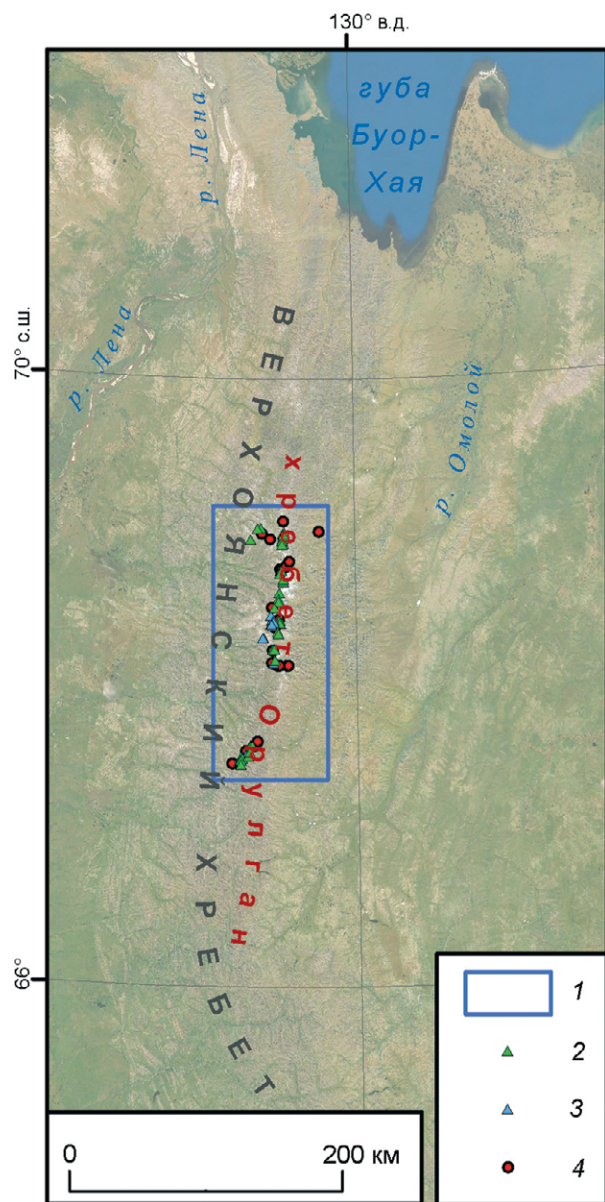


Рис. 1. Район исследований: 1 – район современной оледенения на хребте Орулган; метки ледников по состоянию на 2018 г., информация о которых в Каталоге (Каталог..., 1972) была получена в результате обработки АФС 1951 (2) и 1967 (3) гг.; 4 – ледники Каталога (Каталог..., 1972), исчезнувшие к 2023 г.

Fig. 1. Study area: 1 – The area of modern glaciation in Orulgan Range; tags of glaciers as of 2018, information about which in the Catalog (Katalog..., 1972) was obtained as a result of aerial photo 1951 (2) and 1967 (3) processing; 4 – Catalog (Katalog..., 1972) glaciers that disappeared by 2023

подветренный восточный макросклон, улучшая на нём условия существования ледников. Холодный период продолжается в районе исследований с сентября по май, когда выпадает основное количество осадков.

Особенности рельефа и климата накладывают свой отпечаток на расположение и экспозицию ледников. По данным Каталога ледников СССР (Каталог..., 1972) основное количество ледников хребта Орулган ориентировано на север и северо-восток, отражая наиболее благоприятные условия для существования ледников: интенсивный перенос и концентрация снега на подветренных склонах, накопление снега за счёт горно-долинной циркуляции, поступление снега со стен каров в виде лавин, расположение в глубоких карах, защищающее ледники от действия прямой солнечной радиации. В короткий тёплый период (июнь–август) на высотах, где расположены ледники, температуры воздуха часто уходят в минус, что приводит к выпадению осадков в твёрдом виде и сокращению тёплого периода. В 1970-е годы средняя температура тёплого периода на уровне нижних границ ледников составляла не более 2.5 °С. Температура в июле (самый тёплый месяц) не превышала 5 °С. Склоны освобождались от снега, как правило, только к середине июля. Все это сокращало период абляции до 2–2.5 месяцев.

Высота границы питания ледников хребта Орулган повышается в направлении с севера на юг (Корейша, 1991). Согласно карте № 213 Атласа (Атлас..., 1997) её высота в конце XX в. составляла около 1800 м у северной оконечности хребта и превышала 2000 м в его центральной, наиболее высокой части. Расчётная величина аккумуляции–абляции на высоте границы питания ледников находилась в диапазоне 750–1250 мм в.э. в год. Области питания ледников района образованы ледяной и фирново-ледяной зонами льдообразования (Каталог..., 1972; Корейша, 1991), характерными для резко континентального климата.

Хребет Орулган долгое время оставался одним из наименее изученных районов северо-востока Сибири. Первое описание ледника в этом районе было сделано в 1952 г. Л.П. Персиковым. Ледник был назван в честь известного исследователя северо-востока Д.М. Колосова. В разные годы отдельные ледники были описаны Ю.С. Бушканцом и Г.Д. Беляковым (1955 г.), Ю.Г. Сухоруковым и И.М. Осташкиным (1957 г.). Данные о ледниках в этом районе были впервые опубликованы А.П. Васильковским в его сводке о ледниках Северо-востока СССР (Васильковский, 1955). На основе аэрофотосъёмки 1951 г. он обнаружил 54 ледника и снежника общей площадью 20 км². Но, как отмечает Башлавин (Башлавин, 1970), съёмка 1951 г. выполнена в период, когда район был покрыт свежесвалившимся снегом, что могло привести к неточностям в дешифрировании границ ледников.

Первое обстоятельное исследование ледников хребта Орулган было проведено Д.К. Башлавиным (Башлавин, 1970). В результате нескольких полевых сезонов (1952–1968 гг.) и анализа

аэрофотоснимков (1951 и 1967 гг.) было выделено два участка оледенения. Один из них расположен в южной части района в верховьях р. Собопол, другой в северной части между верховьями рек Сынча и Джарджан. Всего было обнаружено 47 ледников общей площадью 18,38 км² и много перелетовывающих снежников. При этом отмечалось, что площадь ледников, вероятно, может быть больше, так как отнесение к ледникам обнаруженных 20 крупных снежно-ледовых образований затруднительно без полевых наблюдений. Преобладали ледники площадью 0,1–0,3 км². Основным морфологическим типом были каровые ледники, но обнаружено и несколько висячих ледников, один присклонно-долинный и один перемётно-долинный.

Д.К. Башлавин отметил, что высотное положение ледников снижается от 1890 м на юге до 1630 м на севере (Башлавин, 1970). Положение концов ледников на восточной половине хребта выше, чем на западной. Большая часть ледников имеет северную и северо-восточную ориентацию, они равномерно распределены между западным и восточным макросклонами. По оценке Башлавина, основанной на анализе аэрофотосъёмки 1951 и 1967 гг., ледники мало изменились за этот период. Результаты этих исследований стали основой для подготовки каталога ледников хребта Орулган (Каталог..., 1972).

Ледники, не вошедшие в Каталог ледников СССР, обнаружил в 1991 г. Р.В. Седов во время полевых работ в Хараулахских горах и северной части хребта Орулган. Было обнаружено много снежников и восемь ледников общей площадью 0,5 км² (Седов, 1997). Все ледники расположены в бассейне реки Лена, относятся к малым ледникам площадью менее 0,1 км². Существование ледников на севере хребта было предсказано Д.К. Башлавиным (Башлавин, 1970). По его расчётам, высота нижнего края каровых ледников понижается с юга на север в среднем на 1,25 м/км. К югу от южного участка оледенения на протяжении 100 км горы повсюду значительно ниже нижнего предела возможного существования ледников. К северу от северного участка горы поднимаются до расчётных высот, и ледники могут встречаться до 69° с.ш.

Ледники хребта Орулган вновь попали в круг интересов гляциологов, когда стали широко доступны материалы космической съёмки и развернулись масштабные работы по исследованию ледников с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Состояние ледников хребта было исследовано по снимку ASTER 2008 г. (Ananicheva, Karpachevsky, 2015). Авторы этой работы обнаружили 70% процентов ледников, описанных в Каталоге ледников СССР (Каталог..., 1972), и оценили сокращение площади ледников района в 60% за период, прошедший со времени составления Каталога ледников СССР по 2008 г. Был сделан

прогноз о полном исчезновении ледников района к середине XXI века, но, по их собственным оценкам, точность проведённых исследований вносит некоторую неопределённость в полученные результаты.

В международном каталоге Randolph Glacier Inventory (RGI) версии 6.0 (RGI..., 2017) и базе данных GLIMS (<https://www.glims.org/>) представлены данные о ледниках хребта Орулган, полученные в результате обработки спутникового снимка Landsat-8 от 05.08.2013. Эти базы данных содержат сведения о 30 ледниках общей площадью 8,05 км². При этом дешифрирование границ ледников на спутниковом снимке проводилось с применением автоматических алгоритмов, которые, как правило, без последующей редакции приводят к большому проценту неопределённости: не учитывают лёд, расположенный под мореной, и завышают размеры ледников за счёт снега на склонах в области питания и снежников.

В рамках формирования Каталога ледников России (Хромова и др., 2021; <https://www.glacru.ru/>) на спутниковых снимках Sentinel-2 от 27.08.2018 было идентифицировано 66 ледников хребта Орулган общей площадью 9,4 км². 60 из них идентифицированы в Каталоге ледников СССР (Каталог..., 1972). По данным каталога, в этом районе преобладают каровые ледники северо-восточной экспозиции. Ледники находятся в высотном диапазоне 1500–2300 м.

В последние десятилетия в горных районах Северной Евразии наблюдается ускорение сокращения размеров ледников (Khromova et al., 2019; Муравьев, Носенко, 2022). Исследование этого процесса требует сокращения временных интервалов между наблюдениями за состоянием ледников. Решить подобную задачу можно путем обработки и анализа современных данных ДЗЗ – находящихся в открытом доступе спутниковых снимков Sentinel-2, Landsat-8 и 9, а также цифровых моделей рельефа (далее –ЦМР).

Цель работы – исследовать изменения оледенения хребта Орулган с середины XX века по 2023 г. Дополнительными задачами стали: оценка динамики изменения ледников района в промежуточные периоды XXI века; сравнение динамики изменений оледенения хребта Орулган с другими горно-ледниковыми районами северо-востока России.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено путем анализа и интерпретации современных данных ДЗЗ, а также исторических данных о ледниках хребта Орулган. В работе использовались: 1) три спутниковых снимка Sentinel-2 уровня обработки L2A от 19.08.2023 и 10.08.2023 (табл. 1); 2) спутниковые снимки

Таблица 1. Спутниковые снимки, использованные в работе

Спутник	Дата съемки	Идентификатор снимка (ID)
Sentinel-2	19.08.2023	S2B_MSIL2A_20230819T033539_N0509_R061_T52WDA_20230819T070235
	19.08.2023	S2B_MSIL2A_20230819T033539_N0509_R061_T52WDB_20230819T070235
	10.08.2023	S2B_MSIL2A_20230810T030529_N0509_R075_T52WDV_20230810T055515
Landsat-8	10.08.2023	LC08_L1TP_125012_20230810_20230812_02_T1
	05.08.2013	LC08_L1TP_126012_20130805_20200912_02_T1

Landsat-8 уровня обработки L1TP от 10.08.2023 и 05.08.2013; 3) Каталог ледников России на район исследований с данными на 27.08.2018 (Хромова и др., 2021; <https://www.glasru.ru/>); 4) мозаика ЦМР ArcticDEM v4.1 с пространственным разрешением 2 м (Porter et al., 2023); 5) Каталог ледников СССР (Каталог..., 1972); 6) данные реанализа метеопараметров ECMWF ERA5 с разрешением 0.5° × 0.5° (<https://climatoreanalyzer.org>; <https://www.ecmwf.int>); 7) данные CRU TS v4 с разрешением 0.5° × 0.5° (CRU TS v4; Harris et al., 2020).

Информация о пространственном положении границ ледников в 2023 и 2013 гг. получена путём их дешифрирования вручную, на спутниковых снимках Sentinel-2 и Landsat-8, в соответствии с методикой международного проекта GLIMS (Raup, Khalsa, 2010). Снимки с минимальной облачностью подбирались на конец периода абляции — август (до первых снегопадов) — для минимизации влияния на результаты дешифрирования остатков сезонного снежного покрова и снежников. Снимок Landsat-8 от 10.08.2023 использовался для дешифрирования границ трех ледников, закрытых облачностью на снимках Sentinel-2 2023 г. Снимки Landsat-8 проходили предварительную подготовку: синтезированные из каналов B2, B3 и B4 изображения с пространственным разрешением 30 м подвергались повышению детализации (паншарпенинг) данными каналов B8 с пространственным разрешением 15 м. Точность определения границ ледников по результатам обработки современных спутниковых снимков составляла 0.01 км², как и минимальный размер учитываемых ледников. Погрешность определения площади ледников в результате дешифрирования их границ на современных спутниковых снимках оценена как произведение протяжённости границ ледников на разрешающую способность данных снимков — 10 м для Sentinel-2 и 15 м для Landsat-8 (разрешение панхроматического канала).

Сведения о пространственном положении границ ледников в 2018 г. получены из Каталога ледников России (Хромова и др., 2021; <https://www.glasru.ru/>). Этот набор данных сформирован в результате дешифрирования границ ледников на спутниковых снимках Sentinel-2 от 27.08.2018 и содержит информацию о 66 ледниках общей

площадью 9.4 км², два из которых не были зарегистрированы в Каталоге ледников СССР.

Ледораздел ледников № 21 и 53 (по Каталогу (Каталог..., 1972) на 2013 и 2023 гг. в пределах границ ледника 2018 г. идентичен с данными Каталога (Хромова и др., 2021), но, вероятно, существенно отличается от его местоположения в Каталоге (Каталог..., 1972). Также он не совпадает с данными RGI 6.0 (RGI..., 2017). Подобрать спутниковые снимки подходящего качества для получения временного среза в 2000-х годах не удалось.

Сведения о морфометрических характеристиках ледников, приведённые в Каталоге ледников СССР (Каталог..., 1972), получены на основе обработки данных дешифрирования аэрофотосъёмок 1951 и 1967 гг., местами уточнённых по результатам полевых работ 1967 и 1969 гг. По данным аэрофотосъёмки 1967 г. определены характеристики ледников с номерами 20–22 и 48–57, включая крупнейшие ледники района — перемётно-долинные ледники № 21 и 53 (Колосова). В Каталоге ледников СССР на территорию хребта Орулган регистрировались ледники площадью не менее 0.03 км², при точности измерения площади 0.01 км². Исходные материалы аэрофотосъёмок на район исследований недоступны, поэтому оценить точность данных Каталога (Каталог..., 1972) не представляется возможным.

ЦМР ArcticDEM v4.1 (Porter et al., 2023) использовалась для проведения ледораздела ледников № 21 и 53, а также для расчета долей площади оледенения, ориентированных по восьми румбам. Для этого из мозаики этой ЦМР с пространственным разрешением 2 м было построено растровое изображение экспозиции её ячеек, которое, в свою очередь, статистически анализировалось в границах ледников 2013, 2018 и 2023 гг.

Для анализа изменений ледников в зависимости от их размеров все ледники были разбиты на группы, исходя из их площади по Каталогу ледников России (Хромова и др., 2021; <https://www.glasru.ru/>) в 2018 г. В случае распада ледников, зарегистрированных в Каталоге ледников СССР (Каталог..., 1972), учитывались изменения суммарной площади всех фрагментов. Используемые в исследовании спутниковые снимки и ЦМР были зарегистрированы в проекции UTM

(зона 52N) на эллипсоиде WGS 1984. Обработка данных ДЗЗ производилась в программных пакетах ESRI ArcGIS и QGIS. Статистическая обработка велась в LibreOffice Calc.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно данным Каталога ледников России (Хромова и др., 2021; <https://www.glacru.ru/>), в 2018 г. на хребте Орулган находилось 66 ледников общей площадью 9.4 ± 1.0 км². В количественном отношении в районе исследований преобладают каровые и карово-долинные ледники, формирующие более 83% от общего числа ледников (табл. 2). По площади преобладают характеризующиеся наибольшими средними размерами перемётно-долинные и карово-долинные ледники. Средняя площадь ледников района невелика — всего 0.14 км². Это существенно меньше среднего размера ледников в 2018 г. в таких районах оледенения северо-восточной части России, как хребет Улахан-Чистай (0.60 км²) (Муравьев, Носенко, 2022) и гор Сунтар-Хаята (0.53 км²) (Муравьев и др., 2021).

В результате обработки и анализа спутниковых снимков Sentinel-2 2023 г. (см. табл. 1) на хребте Орулган было обнаружено 58 ледников общей площадью 7.47 ± 0.85 км² (табл. 3). Шесть ледников, зарегистрированных в Каталоге (Хромова и др., 2021) на 2018 г., исчезли в 2018–2023 гг. Не были обнаружены 20 зарегистрированных в Каталоге (Каталог..., 1972) ледников суммарной площадью 1.97 км² (их размеры от 0.03 до 0.18 км²) в 1951–1967 гг. Семь ледников, зарегистрированных в Каталоге (Каталог..., 1972), распались на 17 фрагментов.

Дешифрирование границ ледников на спутниковом снимке Landsat-8 от 05.08.2013 выявило 65 ледников общей площадью 10.57 ± 1.68 км². Из них два ледника площадью около 0.01 км², не регистрировавшиеся в Каталоге (Каталог..., 1972), исчезли в период 2013–2018 гг.

Следует отметить, что площадные категории ">2" и "1–2" км² (см. табл. 3), включают в себя только по одному перемётно-долинному леднику (№ 21 и 53 соответственно), которые образуют единый перемётный комплекс (рис. 2). Сведений о том, где проводился ледораздел между ними при составлении Каталога (Каталог..., 1972), нет. Можно предположить, что пространственное положение линии ледораздела между этими ледниками в Каталоге (Каталог..., 1972) может существенно отличаться от её положения в Каталоге (Хромова и др., 2021) и, следовательно, в данных на 2013 и 2023 гг. Поэтому, вероятно, более корректно при анализе изменения их площади в период 1967–2013 гг. рассматривать их как единый ледник.

В целом оледенение хребта Орулган сократилось с середины XX в. по 2023 г. почти вдвое — с 16.4 до 8.9 км² (см. табл. 3). При этом сокращение площади ледников было неравномерным как во времени, так и по площадным группам ледников и их экспозиции. В период с 1951–1967 по 2023 г. сокращение ледников было обратно пропорционально их размеру (см. табл. 3). Наибольшее сокращение размеров наблюдается у самых мелких ледников площадью менее 0.1 и 0.1–0.5 км². Эта закономерность прослеживается и в промежуточные периоды (с 1951–1967 по 2013 и 2018 гг., 2013–2018, 2013–2023, 2018–2023 гг.). Исключение составляет площадная группа ледников 0.5–1.0 км², размеры которой в Каталоге (Каталог..., 1972) и 2013 г. оказались близки друг к другу, а после 2013 г. она сокращалась существенно быстрее ледников группы 0.1–0.5 км². Причины этой аномалии не ясны.

Оледенение хребта Орулган крайне неравномерно распределено по его макросклонам. В 2018 г. на западном макросклоне хребта находилось 13 ледников общей площадью 1.74 ± 0.18 км², на восточном — 53 ледника общей площадью 7.66 ± 0.83 км². При этом разница в изменениях площади ледников на разных макросклонах в 2013–2023 гг. невелика и находится в пределах погрешности измерений. Так, площадь ледников западного макросклона за

Таблица 2. Морфологические типы ледников хребта Орулган в 2018 г.

Морфологический тип ледников	Число ледников	Площадь ледников, км ²	Средний размер ледника, км ²	Доля ледников данного морфологического типа в общем числе ледников/в общей площади, %
Перемётно-долинный	2	3.46 ± 0.15	1.73	3.0/36.8
Карово-долинный	18	3.39 ± 0.40	0.19	27.3/36.1
Каровый	37	2.16 ± 0.38	0.06	56.1/23.0
Карово-висячий	4	0.18 ± 0.03	0.05	6.1/1.9
Висячий	4	0.11 ± 0.03	0.03	6.1/1.2
Присклоновый	1	0.10 ± 0.02	0.10	1.5/1.1
Всего	66	9.40 ± 1.01	0.14	100/100

Таблица 3. Изменение площади ледников хребта Орулган, зарегистрированных в Каталоге (Каталог..., 1972) и идентифицированных в Каталоге (Хромова и др., 2021)

Размер ледников в 2018 г., км ²	Кол-во ледников в 2018 г.	Площадь ледников, км ²				Изменение площади ледников, км ² /%					
		1951/1967	2013	2018	2023	с 1951/1967 по			2013– 2018	2013– 2023	2018– 2023
						2013	2018	2023			
>2	1	2.80	2.72±0.15	2.59±0.10	2.44±0.10	–0.08/ –2.9	–0.21/ –7.5	–0.36/ –12.9	–0.13/ –4.8	–0.28/ –10.3	–0.15/ –5.8
1–2	1*	1.42	1.18±0.12	1.11±0.08	1.00±0.07	–0.24/ –16.9	–0.31/ –21.8	–0.42/ –29.6	–0.07/ –5.9	–0.18/ –15.3	–0.11/ 9.9
0.5–1	2	1.47	1.43±0.19	1.29±0.12	0.76±0.06	–0.04/ –2.7	–0.18/ –12.2	–0.71/ –48.3	–0.14/ –9.8	–0.67/ –46.9	–0.53/ –41.1
0.1–0.5	20	5.24	3.44±0.62	3.04±0.39	2.43±0.36	–1.80/ –34.4	–2.20/ –42.0	–2.81/ –53.6	–0.40/ –11.6	–1.01/ –29.4	–0.61/ –20.1
<0.1	39	5.48	1.74±0.56	1.34±0.32	0.84±0.26	–3.74/ –68.2	–4.14/ –75.5	–4.64/ –84.7	–0.40/ –23.0	–0.90/ –51.7	–0.50/ –37.3
Всего	63	16.41	10.51±1.64	9.37±1.01	7.47±0.85	–5.90/ –36.0	–7.04/ –42.9	–8.94/ –54.5	–1.14/ –10.8	–3.04/ –28.9	–1.90/ –20.3

*Ледник №53 по Каталогу (Каталог..., 1972) распался на два фрагмента в период 2013–2018 гг.

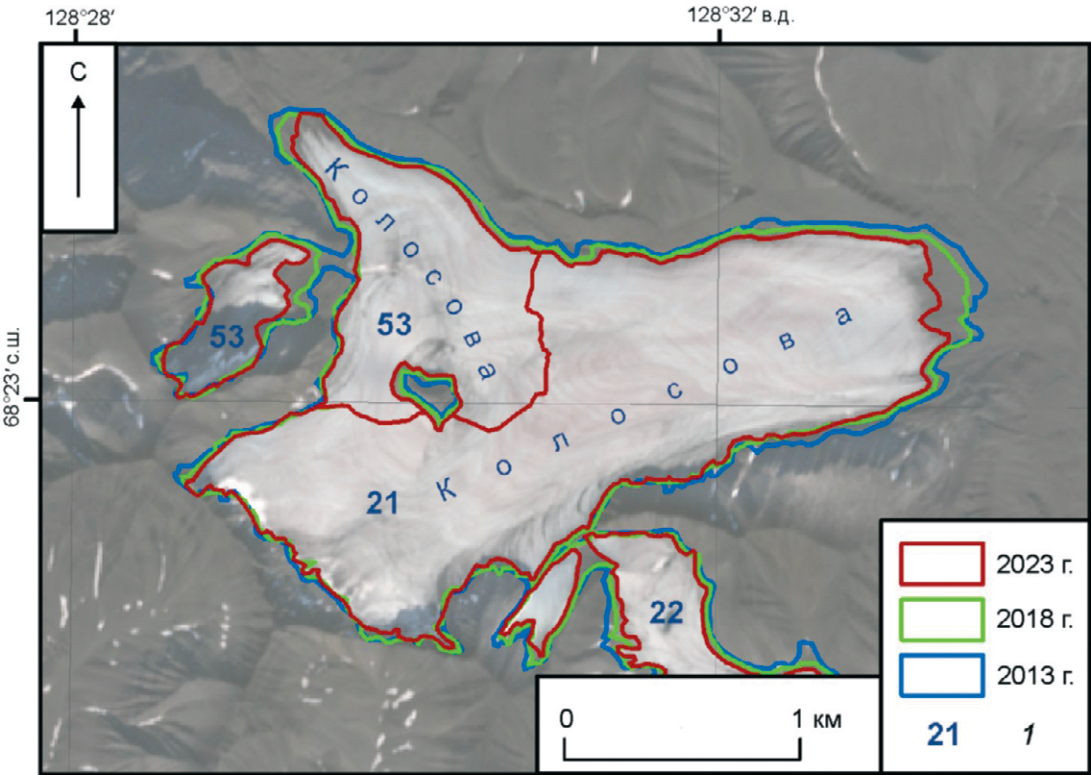


Рис. 2. Отступление границ крупнейших ледников хребта Орулган в 2013–2023 гг.

l – номера ледников по Каталогу (Каталог..., 1972)

Fig. 2. Retreat of the largest glaciers boundaries in Orulgan Range in 2013–2023.

l – numbers of glaciers according to the Catalog (Katalog..., 1972)

2013–2023 гг. сократилась на 26.8%, восточного — на 29.7%. В 2013–2018 гг. сокращение площади составило 8.4 и 11.4%, а в 2018–2023 гг. — 20.1 и 20.6%, соответственно.

Площадь представленных в табл. 3 (см. табл. 3) ледников по КATALOGу (КАТАЛОГ..., 1972) составляла 6.43 км² для дешифрованных по АФС 1967 г. и 10.07 км² для дешифрованных по АФС 1951 г. Исходя из этого соотношения, средняя скорость сокращения площади ледников хребта Орулган с 1951–1967 по 2023 г. составила 0.13 км² или 0.81%/год, а с 1951–1967 по 2013 г. — на 0.10 км² или 0.61%/год. Полученные результаты указывают на существенное ускорение сокращения площади ледников в этом районе в последнее десятилетие. Так в 2013–2018 гг. средняя скорость сокращения площади ледников составляла 0.23 км² или 2.17%/год, а в 2018–2023 гг. она возросла до 0.38 км² или 4.06%/год. В период 2013–2023 гг. она составляла в среднем 2.89%/год.

Изменения площади ледников хребта Орулган, в зависимости от их экспозиции по КATALOGу (КАТАЛОГ..., 1972), отображено на рис. 3, а. Ледников южной и юго-западной экспозиции в районе исследований нет. Во все исследованные периоды основная площадь оледенения района была сосредоточена в пределах ледников, ориентированных на северо-восток и восток. Наибольшее относительное сокращение площади с середины XX в. по 2023 г. претерпели малые ледники западной (91.7%) и

юго-восточной (70.6%) экспозиций, а также ледники, ориентированные на север (70.6%). Следует отметить, что средние размеры ледников этих экспозиций в КATALOGе (КАТАЛОГ..., 1972) находились в диапазоне 0.1–0.2 км², то есть это малые ледники, для которых свойственны наибольшие скорости сокращения площади (см. табл. 3). Подобная закономерность прослеживается и в промежуточные периоды — с 1951–1967 по 2013 г., 2013–2023 и в 2018–2023 гг. Наименьшее относительное сокращение площади с середины XX в. по 2023 г. претерпели ледники восточной (34.7%) и северо-западной (38.0%) экспозиций. В 1951–1967 гг. их средние размеры по КATALOGу (КАТАЛОГ..., 1972) составляли чуть более 1.0 и 0.4 км², соответственно.

Анализ суммарного распределения экспозиций отдельных ячеек ЦМР в границах ледников дает другую картину ориентации ледниковых поверхностей хребта Орулган (см. рис. 3, б). В периоды 2013–2023 и 2018–2023 гг. основная площадь оледенения района формировалась поверхностями, ориентированными на север (от 32.4% в 2018 г. до 30.7% в 2023 г.) и северо-восток (от 36.7% в 2013 г. до 37.9% в 2023 г.). На восток в 2013–2023 гг. была ориентирована существенно меньшая площадь оледенения — от 17.3% в 2013 г. до 18.8% в 2023 г. Доли площади оледенения, ориентированные на юг и юго-запад, в 2013–2023 гг. были пренебрежимо малы (0.6–0.7%). Наибольшее относительное сокращение площади за 2013–2023 гг. претерпели ледниковые поверхности, ориентированные на

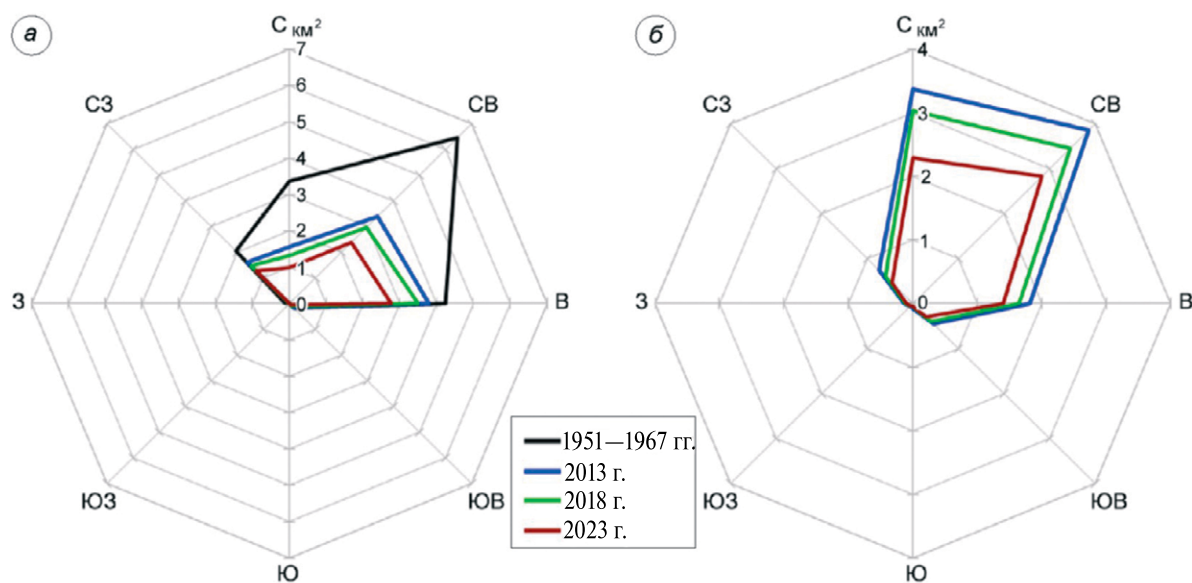


Рис. 3. Распределение по экспозициям, изменение площади: ледников хребта Орулган, зарегистрированных в КATALOGах (КАТАЛОГ..., 1972; Хромова и др., 2021), в зависимости от их экспозиции по КATALOGу (КАТАЛОГ..., 1972) (а); оледенения хребта Орулган в целом, в зависимости от экспозиций элементов поверхности ледников (б)

Fig. 3. Exposure allocation, change in area: glaciers of the Orulgan Range registered in the Catalogs (Catalog..., 1972) and (Khromova et al., 2021) depending on their exposure in the Catalog (Catalog..., 1972) (a); glaciation of the Orulgan Range as a whole depending on the exposure of glacier surface elements (b)

северо-запад (38.3%) и юг (37.2%), наименьшее — на восток (22.8%).

Разница отображённых на разных частях рис. 3 данных по экспозициям имеет, прежде всего, методическую природу. Экспозицию ледника в Каталоге (Каталог..., 1972) определяли согласно методике (Руководство..., 1966) как «сторону света, к которой обращена его поверхность». Очевидно, что даже с учётом всех методических уточнений, процесс определения экспозиции ледников в Каталоге (Каталог..., 1972) отличался субъективностью. Поверхность ледников сложна, отдельные её элементы могут быть обращены в разные стороны. Поэтому методика (Руководство..., 1966) определяла, скорее, не интегральную характеристику экспозиции его поверхности, а направление движения основного потока льда. Определение экспозиции отдельных ледников в современном Каталоге (Хромова и др., 2021; <https://www.glasgu.ru/>) или анализ распределения по экспозициям ледниковой поверхности района исследований (см. рис. 3, б) опирается на автоматизированный статистический анализ ЦМР, лишённый субъективности.

В 2013 г. ледники хребта Орулган спускались до высоты примерно 1350 м, в 2023 г. — до 1370 м. Высота нижней точки ледника № 21 (Колосова) — крупнейшего ледника района (см. рис. 2) — за 2013–2023 гг. поднялась на 40 м — с 1550 м в 2013 г. до 1590 м в 2023 г. — при отступании фронта ледника на 140–200 м (см. рис. 2). Средняя взвешенная по площади высота оледенения хребта Орулган в 2013–2023 гг. составляла 1840–1845 м без значимых

изменений (вероятно, ограничения имеющихся ЦМР).

Основная часть оледенения района (от 69.6% в 2013 г. до 71.8% в 2023 г.) сосредоточена в высотном диапазоне 1700–2000 м (рис. 4). Доля площади оледенения, расположенного ниже 1500 м, пренебрежимо мала. Она сократилась с 0.4% в 2013 г. до 0.2% в 2023 г. Больше всего сократилось оледенение на относительно низких гипсометрических уровнях. Наибольшее сокращение зафиксировано на высотах 1500–1600 м, где за 2013–2023 гг. площадь ледников уменьшилась втрое (с 0.24 до 0.08 км²), а его доля понизилась с 2.3 до 1.0%.

Средняя вертикальная протяжённость ледников хребта Орулган (разница высоты высшей и низшей точек) в 2013–2023 гг. сокращалась — в 2013 г. она составляла около 215 м, в 2018 г. — 195 м, в 2023 г. — 170 м. Наибольшей вертикальной протяжённостью характеризуется крупнейший ледник района — № 21 (Колосова). С 2013 по 2023 г. его вертикальная протяжённость сократилась примерно на 50 м — с 615 до 565 м.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для объяснения, выявленного сокращения ледников хребта Орулган были проанализированы климатические изменения, произошедшие в период исследования в этом районе. Использованы данные наблюдений ближайших метеостанций и реанализа ERA5 с разрешением 0.5° × 0.5° (<https://climatareanalyzer.org/>; <https://www.ecmwf.int/>), представляющего собой синтез фактических данных наблюдений и результатов моделирования. Возможности использования реанализа ERA5 для оценки трендов температур воздуха и осадков в районах оледенения на северо-востоке России исследовались в работе (Титкова, Ананичева, 2023). Для Верхоянского хребта наибольшие относительные ошибки реанализа ERA5, в сравнении с данными метеостанций, относятся к весеннему периоду (–10% для температур и 82% для осадков). Наименьшие ошибки в определении температур наблюдаются в летний период (–2%), осадков — в зимний (20%). В целом данные реанализа ERA5 занижают температуры и завышают количество осадков. Тем не менее, эти данные хорошо воспроизводят тренды изменений основных климатических параметров. Также в исследовании были использованы данные CRU TS v4 (временные ряды с координатной сеткой Отдела климатических исследований Университета восточной Англии) с сеткой 0.5° × 0.5° (CRU TS v4; Harris et al., 2020).

Тенденция к потеплению с середины 1970-х годов прослеживается в ходе температуры как для Земного шара в целом, так и в среднем по территории России. Наблюдавшееся в первой половине XX века потепление, как и последовавшее затем до

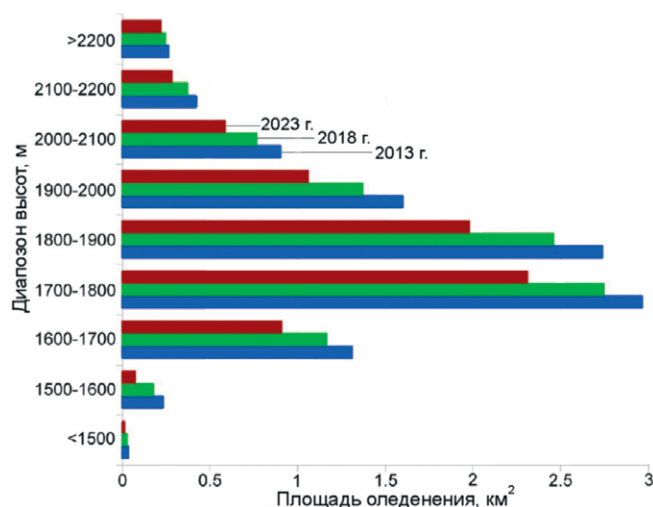


Рис. 4. Высотное распределение площади ледников хребта Орулган, зарегистрированных в Каталогах (Каталог..., 1972) и (Хромова и др., 2021), в 2013, 2018 и 2023 гг.

Fig. 4. Altitude distribution of glaciers area in the Orulgan Range, by Inventory data (Katalog..., 1972) and (Khromova et al., 2021), in 2013, 2018 and 2023

1970-х годов похолодание, климатологи связывают в основном с естественными причинами. Период с середины 1970-х годов обозначен в климатической литературе как период современного потепления, а 1976 г. условно принимается за его начало (Третий оценочный доклад..., 2022). В целом локальные тренды температуры воздуха за 1976–2020 гг. по всей территории России положительны. К 2020 г. область потепления $+0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет вдоль северного побережья России (от Ямала до Чукотки) распространилась на юг до 60-й параллели. Если на карте трендов 1976–2012 гг. хребет Орулган находился в зоне потепления $+0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет, то в 1976–2020 — $+0.7\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Ход температуры воздуха (среднегодовой и за тёплый период) на станциях, расположенных в радиусе 200–300 км от ледниковой системы хребта Орулган, в целом повторяет общие для территории северо-востока России закономерности. В расчётах CRU TS v4 для района исследований использовались материалы наблюдений следующих метеостанций: Кюсюр ($70^{\circ}35'59''$ с.ш. $127^{\circ}24'00''$ в.д., высота 30 м), Джарджан ($68^{\circ}42'00''$ с.ш. $124^{\circ}00'00''$ в.д., высота 38 м), Верхоянск ($67^{\circ}35'59''$ с.ш. $133^{\circ}24'00''$ в.д., высота 136 м), Жиганск ($66^{\circ}47'59''$ с.ш. $123^{\circ}24'00''$ в.д., высота 86 м). Осреднённые по станциям ежегодные данные (CRU TS v4) для местоположения современных ледников Орулгана (ячейки 67.75/128.25 — 68.75/128.75) демонстрируют (рис. 5, а), что похолодание с 1940-х годов и относительно холодный период примерно с 1950-х до 1970-х годов улучшили условия существования ледников. В этот период (1951–1967) по данным работы (Башлавин, 1970) ледники почти не изменились. С середины 1970-х годов начинается потепление, постепенно усилившееся в 2000-х годах и резко ускорившееся после 2015 г. Среднегодовая температура возросла с 1975 по 2000 г. на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$), а за 2000–2015 гг. еще на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$), то есть средняя скорость повышения температуры увеличилась вдвое. За период 2015–2020 гг. скорость потепления составила $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (см. рис. 5, а). Ход температур тёплого периода (июнь–август) по данным ERA5 демонстрирует усиление потепления, начиная с 2000 г. с локальным понижением температуры в 2003 и 2016 гг. (см. рис. 5, б). Летние сезоны 2018–2023 гг. были аномально тёплыми. Такой температурный режим сформировал условия для устойчивого сокращения площади ледников, с усилением этого процесса в последние пять лет.

Если температуры тёплого периода ответственные за условия таяния ледников, то осадки холодного периода контролируют условия аккумуляции на ледниках. Как отмечается в (Башлавин, 1970), тёплый период для ледников Орулгана начинается в начале–середине июня

и продолжается 2–2.5 месяца. Летние снегопады при вторжении западных воздушных масс иногда приводят к его сокращению. Холодный период начинается в конце августа — начале сентября и продолжается до начала июня.

В течении 1976–2020 гг. тренд годового количества выпадающих осадков положителен во всех районах России. Причем, если в ряде областей тренд статистически не значим, то на Азиатской части России оценки уверенно подтверждают тенденцию к увеличению осадков. Хребет Орулган попадает в зону увеличения годовых сумм осадков со средними значениями 2% от нормы за 10 лет (Третий оценочный доклад..., 2022). При этом если в декабре–феврале район распространения ледников хребта Орулган находится в зоне нулевого изменения сумм осадков, то в марте–мае и сентябре–ноябре эти изменения уже носят более существенных характер и достигают 4–5 % от нормы. Значения трендов изменения сумм осадков в тёплый период (июнь–август), так же, как и декабре–мае, близки к нулю. Таким образом, незначительное фоновое увеличение сумм осадков в этом районе происходит за счёт весны и осени.

Данные CRU TS v4 (CRU TS v4) для ледниковой системы хребта Орулган демонстрируют увеличение годовых сумм осадков с начала 1980-х годов до конца первой декады XXI века примерно на 50 мм (см. рис. 5, в). Затем намечается тенденция к уменьшению осадков, значимый минимум которых фиксируется в 2018 г. Результаты реанализа ERA5 для сумм осадков за октябрь–апрель показывают похожие тенденции: уменьшение осадков в 1990-е годы, затем увеличение с начала 2000-х годов с локальным минимумом в 2013 г. и максимумом в 2014 г., и тенденцию к снижению количества осадков, наметившуюся в 2020 г. (см. рис. 5, в). Сокращение повторяемости (в процентах от общего числа наблюдений за год) сплошной облачности, начавшееся в 2004 г. с локальными максимумами в 2015 и 2022 гг. (см. рис. 5, д), также могло повлиять на ускорение процесса таяния ледников путём увеличения количества приходящей прямой радиации.

Таким образом, в ситуации отсутствия метеонаблюдений в непосредственной близости к ледникам, оценить изменение основных климатических параметров возможно по фоновым значениям, рассчитанным с учётом данных наблюдений на ближайших к району исследований метеостанциях и полученных в результате моделирования. Эти данные свидетельствуют об ухудшении условий существования ледников, показывая устойчивый тренд повышения среднегодовой температуры воздуха с ускорением этого процесса в последнее десятилетие. При этом осадки холодного периода, ответственные за условия питания ледников, испытывают колебания, в целом не играющие

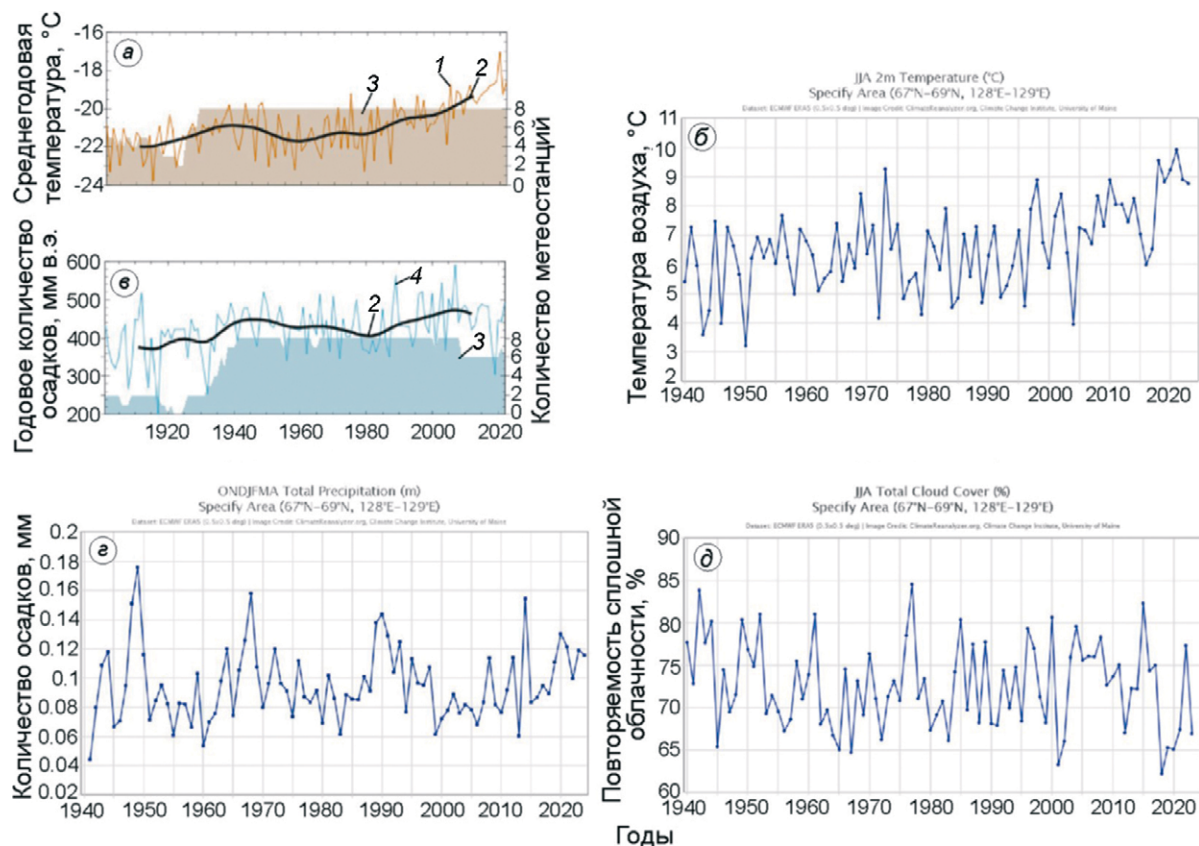


Рис. 5. Изменения в районе расположения ледников хребта Орулган: среднегодовых температур воздуха (а), по данным (CRU TS v4); средних летних (июнь–август) температур воздуха (б), по данным реанализа ECMWF ERA5 (<https://climateranalyzer.org>); годового количества осадков (в), по данным (CRU TS v4); количества зимних осадков (октябрь–апрель) (г), по данным реанализа ECMWF ERA5 (<https://climateranalyzer.org>); повторяемости сплошного облачного покрова в летний период (июнь–август) (д), по данным реанализа ECMWF ERA5 (<https://climateranalyzer.org>).

1 – среднегодовая температура воздуха; 2 – сглаженные значения; 3 – количество метеостанций, используемых для расчетов CRU TS v4; 4 – годовое количество осадков

Fig. 5. Changes in the glaciers location area of the Orulgan Range: of annual air temperatures (a), according to (CRU TS v4); of average summer air temperatures (June–August) (б), according to ECMWF ERA5 reanalysis (<https://climateranalyzer.org>); of annual precipitation (в), according to (CRU TS v4); of total winter precipitation (October–April) (г), according to ECMWF ERA5 reanalysis (<https://climateranalyzer.org>); frequency of total cloud cover in summer (June–August) (д), according to ECMWF ERA5 reanalysis (<https://climateranalyzer.org>).

1 – annual air temperatures; 2 – smoothed values; 3 – number of weather stations used for CRU TS v4 calculations; 4 – annual precipitation

существенно роли для компенсации повышения температуры воздуха. На этом фоне существуют локальные эпизоды похолодания и увеличения количества осадков, что может служить причиной некоторого непродолжительного замедления сокращения площади ледников.

Проведение прямого сравнения скорости сокращения оледенения хребта Орулган с другими районами горного оледенения российской Арктики и Субарктики затруднено из-за дефицита в научной литературе данных за сопоставимые временные интервалы. Подобные данные есть для хребта Улахан-Чистай (горы Черского), расположенного

примерно в 800 км к востоку-юго-востоку от района исследований. В 2012–2018 гг. оледенение хребта Улахан-Чистай сокращалось со средней скоростью 2.04% площади в год (Муравьев, Носенко, 2022), что близко к наблюдаемым на хребте Орулган 2.17%/год в сопоставимый период 2013–2018 гг.

Для более корректного сравнения имеет смысл сопоставить изменение размеров ледников отдельных площадных групп (см. табл. 3). Так, ледники хребта Орулган площадью 0.1–0.5 км² и 0.5–1.0 км² на 2018 г. за 2013–2018 гг. сократились на 11.6% и 9.8%, соответственно, что составляет в среднем 2.32 и 1.96% в год. Площадь расположенных на

хребте Улахан-Чистай ледников подобных размеров за 2012–2018 гг. сократились на 17.8 и 14.2% (Муравьев, Носенко, 2022), что составляет в среднем 2.97 и 2.37%/год, соответственно. То есть, скорость сокращения ледников хребта Орулган в 2013–2018 гг. была ниже, чем на расположенном южнее хребте Улахан-Чистай.

В период с 1951–1967 по 2018 г. средняя скорость сокращения площади оледенения хребта Орулган составляла 0.14 км² или 0.84%/год. В сопоставимый период с 1944–1947 по 2018 г. площадь оледенения гор Сунтар-Хаята сокращалась со средней скоростью 0.46%/год (Муравьев и др., 2021). То есть, средние темпы сокращения площади оледенения этих районов в период с середины XX в. по 2018 г. были близки. Изложенное выше позволяет говорить о том, что реакция оледенения хребта Орулган на современные климатические изменения не противоречит динамике оледенения основных горно-ледниковых районов Северо-востока России. Рост скорости сокращения площади ледников района в последнее десятилетие согласуется с тенденцией интенсификации этого процесса в других районах горного оледенения Северной Евразии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оледенение хребта Орулган в 2023 г. насчитывало 58 ледников общей площадью 7.47±0.85 км². В количественном отношении в этом районе преобладают каровые и карово-долинные ледники, по площади – перемётно-долинные и карово-долинные. Основная часть площади (71.8%) ледников района сосредоточена в высотном диапазоне 1700–2000 м. В целом, распределение площади оледенения района по высотным интервалам в 2013, 2018 и 2023 гг. существенно не менялось.

С середины XX в. по 2023 г. площадь оледенения хребта Орулган сократилась на 54.5%. Сокращение площади ледников в этот период оказалось обратно пропорционально их размерам – наибольшее (84.7%) сокращение претерпели ледники площадью менее 0.1 км², наименьшее (12.9%) – крупнейший ледник района (Колосова) площадью более 2 км². Наибольшее относительное сокращение площади с середины XX в. по 2023 г. претерпели малые ледники западной экспозиции (91.7%), наименьшее – ледники восточной экспозиции (34.7%).

В последнее десятилетие сокращение оледенения хребта Орулган существенно ускорилось. Так, средняя скорость сокращения площади ледников, составлявшая в период с 1951–1967 по 2013 г. 0.61%/год, возросла до 2.17%/год в 2013–2018 гг. и до 4.06%/год в период 2018–2023 гг., т.е. в последнюю пятилетку она практически удвоилась по сравнению с предыдущей.

Эти тенденции хорошо иллюстрируют изменения температуры воздуха в регионе, что подтверждает индикационную роль ледников. Относительно холодный период 1950–1970 гг. сменяется потеплением, которое постепенно возрастает с начала 2000-х годов, усиливаясь к концу второй декады XXI века. При этом незначительные колебания сумм осадков холодного периода не формируют благоприятных условий накопления в периоды повышения температур воздуха. Определенный вклад в процесс ухудшения условий существования ледников вносит и усиление прихода коротковолновой радиации на фоне сокращения повторяемости сплошной облачности.

Скорость происходящих с ледниками изменений требуют продолжения наблюдений, особенно за небольшими ледниковыми системами, для которых некоторые исследователи прогнозируют полное исчезновение к середине XXI века. Регулярный анализ позволит проверить такие прогнозы и определить фатальные значения климатических параметров для ледников, находящихся в разных географических и орографических условиях.

Благодарности. Исследование изменений площади ледников хребта Орулган выполнено в рамках темы Государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0004. Анализ изменений высотного распределения оледенения и климатических изменений выполнен при поддержке гранта РНФ № 23-17-00247.

Acknowledgements. The study of the glacier area changes in the Orulgan Range was carried out within the framework of the research project FMWS-2024-0004 of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences. Analysis of changes in the altitudinal distribution of glaciation and climate change was implemented with the support from Russian Science Foundation grant 23-17-00247.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. Т. 1. М.: РАН, 1997. 392 с.
- Башлашин Д.К. Современные ледники хребта Орулган // МГИ. 1970. Вып. 16. С. 174–178.
- Васьковский А.П. Размеры современного оледенения на Северо-Востоке СССР // Колыма. 1955. № 10. С. 42–45.
- Каталог ледников СССР. Т. 17. Вып. 5. Ч. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 44 с.
- Корейша М.М. Оледенение Верхояно-Колымской области. М.: Изд-во РАН, 1991. 143 с.
- Муравьев А.Я., Носенко Г.А. Сокращение оледенения хребта Улахан-Чистай (горы Черского) в 1970–2018 гг. // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 2. С. 179–192. <https://doi.org/10.31857/S2076673422020124>

- Муравьев А.Я., Носенко Г.А., Никитин С.А. Сокращение оледенения гор Сунтар-Хаята с середины XX века по 2018 год // *Лёд и Снег*. 2021. Т. 61. № 4. С. 485–499.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421040103>
- Руководство по составлению Каталога ледников СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 154 с.
- Седов Р.В. Снежно-ледяные образования Южного Хараулаха и Северного Орулгана // МГИ. 1997. Вып. 83. С. 172–176.
- Титкова Т.Б., Ананичева М.Д. Использование реанализа ERA5—Land и данных метеостанций в горных районах России для оценки изменения ледниковых систем Восточной Сибири и Дальнего Востока // *Лёд и Снег*. 2023. Т. 63. № 2. С. 199–213.
<https://doi.org/10.31857/S2076673423020163>
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Ред. В.М. Катцов. Росгидромет. СПб.: Научно-технические технологии, 2022. 676 с.
- Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаврентьев И.И. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // *Лёд и Снег*. 2021. Т. 61. № 3. С. 341–358.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421030093>
- Ananicheva M.D., Karpachevsky A. Glaciers of the Orulgan Range: assessment of the current state and possible development for the middle of the 21st century // *Environmental Earth Sciences*. 2015. V. 74. Is. 3. P. 1985–1995.
<https://doi.org/10.1007/s12665-015-4605-2>
- CRU TS v4. <https://www.uea.ac.uk/web/groups-and-centres/climatic-research-unit/data>
Дата обращения: 03.06.2024.
- Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // *Scientific Data*. 2020. V. 7. № 109.
<https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Climate Reanalyzer // Электронный ресурс.
https://climatreanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/
Дата обращения: 03.06.2024.
- ECMWF // Электронный ресурс.
<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
Дата обращения: 03.06.2024.
- Catalog of glaciers in Russia // Электронный ресурс.
<https://www.glacru.ru/ледниковые-районы/хребет-орулган/>
Архив данных от 03.06.2024. Дата обращения: 03.06.2024.
- Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyayeva V. Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries // *Regional Environmental Change*. 2019. V. 19. № 5. P. 1229–1247.
<https://doi.org/10.1007/s10113-018-1446-z>
- Porter C., Howat I., Noh M.-J., Husby E., Khuvis S., Danish E., Tomko K., Gardiner J., Negrete A., Yadvav B., Klassen J., Kelleher C., Cloutier M., Bakker J., Enos J., Arnold G., Bauer G., Morin P. 2023. “ArcticDEM, Version 4.1”. Harvard Dataverse, V1.
<https://doi.org/10.7910/DVN/3VDC4W>
Архив данных от 28.06.2023.
- Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial. 2010. 15 p.
http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf
- RGI Consortium (2017). Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media.
<https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>

Citation: Muraviev A. Ya., Khromova T. E. Reduction of glaciers in the Orulgan Range (Verkhoyansk Range) from 1951 to 2023. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (4): 513–526. [In Russian].
doi: 10.31857/S2076673424040036

Reduction of glaciers in the Orulgan Range (Verkhoyansk Range) from 1951 to 2023

A. Ya. Muraviev[#], T. E. Khromova

Институт географии РАН, Москва, Россия

[#]e-mail: anton-yar@rambler.ru

Received April 6, 2024 / Revised July 7, 2024 / Accepted October 7, 2024

New data on glaciation of the Orulgan Range in 2013, 2018 and 2023 are presented. By analyzing multi-temporal satellite imagery and historical data, changes in glacier area were estimated from the mid-20th century through 2013, 2018, and 2023, and for the periods 2013–2018, 2018–2023, and 2013–2023. In 2023, the glaciation of the Orulgan Ridge consisted of 58 glaciers with a total area of 7.47 ± 0.85 km². Among the morphological types, corrie glaciers and corrie-valley glaciers predominate. The largest areas are occupied by transfluent-valley and corrie-valley glaciers. The main part (71.8%) of the total area of glaciation in the region is concentrated in the altitudinal range of 1700–2000 m. From the middle of the 20th century to 2023, the area of glaciers registered in the USSR Glacier Inventory and identified in the Russian Glacier Catalog decreased from 16.41 to 7.47 ± 0.85 km², i.e. by 8.94 km² (54.5%). Of these, 5.90 km² were lost from 1951–1967 to 2013, 1.14 km² between 2013–2018, and 1.90 km² between 2018–2023. By 2023, small glaciers with area less than 0.1 km² (84.7%) were the most reduced and largest glacier with area more than 2 km² (12.9%) was the least reduced. The small glaciers of the western aspect decreased most significantly (91.7%). We found a significant increase in the average rate of glacier area reduction in the last 10 years compared to the period from the mid-20th century to 2013: 0.61%/year from 1951–1967 to 2013 to 2.17%/year in 2013–2018, and 4.06%/year in 2018–2023. These changes occurred at the background of a stable positive trend of mean annual air temperature, the magnitude of which is especially large, with acceleration of this process in the last decade.

Keywords: mountain glaciers, Orulgan Range, Verkhoyansk Range, glaciers area reduction, morphological types, altitude distribution, satellite imagery, digital elevation model

REFERENCES

- World atlas of snow and ice resources. V. 1. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 392 p.
- Bashlavin D. K. Present glaciers of the Orulgan Range. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1970, 16: 174–178. [In Russian].
- Vas'kovsky A. P. *Razmeri sovremennogo oledeneniya na Severo-Vostoke SSSR*. The extent of modern glaciation in the North-East of the USSR. Kolyma. 1955, 10: 42–45. [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 17. Is. 5. Pt. 2. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1972: 44 p. [In Russian].
- Koreysha M. M. *Oledenenie Verkhoyansko-Kolimskoi oblasti*. Glaciation of the Verkhoyansk-Kolymaregion. Moscow: Academy of Sciences of the USSR Soviet Geophysical Committee, 1991: 143 p. [In Russian].
- Muraviev A. Y., Nosenko G. A. Reduction of glaciers in the Ulakhan-Chistay Range (Chersky Mountains) from 1970 to 2018. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2022, 62 (2): 179–192.
<https://doi.org/10.31857/S2076673422020124> [In Russian].
- Muraviev A. Y., Nosenko G. A., Nikitin S. A. Reduction of glaciation in the Suntar-Khayata Mountains from the mid 20th century to 2018. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (4): 485–499.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421040103> [In Russian].
- Rukovodstvo po sostavleniyu Kataloga lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory guide. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1966: 154 p. [In Russian].
- Sedov P. V. Snow-ice formations of the South Kharaulach and Northern Orulgan, Siberia // *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1997, 83: 172–176. [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. 2023, 63 (2): 199–213.
<https://doi.org/10.31857/S2076673423020163> [In Russian].
- Tretiy otsenochnyy doklad po izmeneniyu klimata i yego posledstviyam na territorii Rossiyskoy Federatsii. Third assessment report on climate change and its consequences on the Russian Federation territory /

- Edited by V.M. Katsov. Rosgidromet. Saint Petersburg: Naukoyemkiye tekhnologii, 2022: 676 p. [In Russian].
- Khromova T.Y., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraviev A.Y., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I.* New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021, 61 (3): 341–358. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030093> [In Russian].
- Ananicheva M.D., Karpachevsky A.* Glaciers of the Orulgan Range: assessment of the current state and possible development for the middle of the 21st century. *Environmental Earth Sciences*. 2015, 74 (3): 1985–1995. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4605-2>
- CRU TS v4. <https://www.uea.ac.uk/web/groups-and-centres/climatic-research-unit/data>. Last access: June 30, 2024.
- Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*. 2020, 7: 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Climate Reanalyzer. Retrieved from: https://climatereanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/ Last access: June 30, 2024.
- ECMWF. Retrieved from: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> Last access: June 30, 2024.
- Catalog of glaciers in Russia. Retrieved from: <https://www.glacru.ru/>. Archive data from 03.06.2024. Last access: June 30, 2024.
- Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyaeva V.* Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries. *Regional Environmental Change*. 2019, 19 (5): 1229–1247. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1446-z>
- Porter C., Howat I., Noh M-J., Husby E., Khuvis S., Danish E., Tomko K., Gardiner J., Negrete A., Yadav B., Klassen J., Kelleher C., Cloutier M., Bakker J., Enos J., Arnold G., Bauer G., Morin P.* 2023. “ArcticDEM, Version 4.1”. Harvard Dataverse, V1. <https://doi.org/10.7910/DVN/3VDC4W> Archive data from 28.06.2023.
- Raup B., Khalsa S.J.S.* GLIMS data analysis tutorial. 2010: 15 p. http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf
- RGI Consortium (2017). Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media. <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>