

ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

УДК 551.32

ЛЕДНИК ГОФМАНА НА ПРИПОЛЯРНОМ УРАЛЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И РЕАКЦИЯ НА ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

© 2025 г. Г. А. Носенко^{1,*}, А. Ф. Глазовский¹, И. А. Корнева¹,
А. А. Григорьев², Е. И. Шубницина³

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН,
Екатеринбург, Россия

³Национальный парк “Югыд ва”, Вуктыл, Россия

*e-mail: nosenko@igras.ru

Поступила в редакцию 19.06.2025 г.

После доработки 13.07.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

В работе представлены результаты количественной оценки изменений самого большого на Приполярном Урале ледника Гофмана за период 1951–2024 гг. Для решения этой задачи использовались аэрофотоснимки 1951 г., актуальные космические снимки Sentinel-2, данные съёмки лазерного дальномера со спутника ICESat-2, а также исторические и современные наземные фотоснимки. Результаты показали, что площадь ледника в 1951 г. составляла $0.36 \pm 3\%$ км². Эта величина практически не отличалась от результатов наземной фототеодолитной съёмки площади ледника, выполненной в 1929 г. К 2024 г. площадь ледника сократилась на 33% и составила $0.24 \pm 8\%$ км². Сокращение площади ледника сопровождалось понижением высоты его поверхности. За 73 года (1951–2024 гг.) поверхность ледника на профиле ICESat-2 понизилась на 45 ± 11 м и находилась на высоте 647 ± 11 м. Средняя скорость понижения поверхности составила 0.6 м/год. Сравнительный анализ динамики изменений размеров ледника Гофмана и климатических показателей в данном регионе позволяет предположить, что на рубеже столетий условия существования ледников в этом регионе существенно ухудшились. При относительном постоянстве осадков зимнего периода резко увеличилось число лет с положительными температурными аномалиями летнего периода (фактически непрерывный ряд с 2003 г.). Кроме того, за последние 20 лет наблюдается существенный рост коротковолновой радиации и снижение балла облачности в летний период. Рост летних температур воздуха и увеличение коротковолновой радиации приводят к тому, что баланс массы ледника становится еще более отрицательным и скорость сокращения его размеров возрастает. Ответ на вопрос о том, сколько времени удастся сохраниться леднику Гофмана в его каровой части, будет зависеть от дальнейшего развития климатического сценария.

Ключевые слова: сокращение ледников, исторические фотографии, дистанционное зондирование, Приполярный Урал

DOI: 10.7868/S2412376525040037

ВВЕДЕНИЕ

По данным Международной службы мониторинга ледников (далее — WGMS), баланс массы сорока референтных ледников, расположенных в разных районах земного шара, остаётся устойчиво отрицательным на протяжении последних трёх десятилетий (WGMS..., 2025). Наблюдения из космоса также свидетельствуют о том, что ледники сокращаются по всему миру (Zemp

et al., 2023; IPCC, 2023; Dussaillant I. et al., 2025). Глобальное потепление ускоряет этот процесс, и если большие ледники сокращаются, то малые оказываются под угрозой исчезновения. Количество исчезнувших ледников уже так велико, что WGMS выступила с инициативой создания “Глобального списка жертв ледников” (glaciercasualtylist.rice.edu..., 2025) для того, чтобы сохранить их имена, порой имеющие важное научное, экономическое или историческое

значение. В число таких потенциальных “жертв” попадают малые ледники Урала, которые находятся на границе субполярного оледенения. На данный момент уже зафиксировано исчезновение ледника МГУ на Полярном Урале (Носенко и др., 2020) и ледника Манарага на Приполярном (Глазовский и др., 2003) на фоне продолжающегося сокращения других ледников Урала (Шейн и др., 2024).

Ещё два десятилетия назад можно было с уверенностью сказать, что южная граница распространения ледников на Урале находится в районе хребта Тельпос-Из (63° с.ш. 59° в.д.), где в середине прошлого века были обнаружены два небольших каровых ледника (Долгушин, Кеммерих, 1957; Долгушин, Осипова, 1979). В 2024 г. на космических снимках Sentinel-2 на месте этих ледников можно было увидеть только озёра и остатки льда на стенках каров.

Севернее хребта Тельпос-Из (до $65^\circ 40'$ с.ш.) располагается часть территории Уральской горной системы со сложной орографией, состоящая из нескольких кулисообразно расположенных хребтов с ярко выраженным рельефом альпийского типа, получившая в трудах геолога А.Н. Алешкова название “Приполярный Урал” (рис. 1). Это наиболее высокая, труднодоступная горная провинция Урала, характеризующаяся большим количеством осадков.

Первые инструментальные исследования ледников Урала проведены в 1929 г. А.Н. Алешковым на леднике Гофмана (Алешков, 1935). Однако с тех пор информация о состоянии ледников в этом районе ограничивалась описанием вновь обнаруженных или упоминаниями о посещении уже известных (Долгушин, Кеммерих, 1957; Долгушин, 1960).



Рис. 1. (а) Район исследований: Приполярный Урал, положение ледника Гофмана ($64^\circ 46.893'$ с.ш., $58^\circ 53.600'$ в.д.); (б) Ледник Гофмана в каре у подножия горы Сабля (фото Ю. Трубникова, 2024 г.); (в) Область питания ледника (фото А. Григорьева, 2023 г.)

Fig. 1. The area of study:

- (а) Location of the Hoffman Glacier ($64^\circ 46.893'$ N, $58^\circ 53.600'$ E) in the Subpolar Urals;
 (б) Hoffman Glacier in the cirque at the foot of Mount Sabre (photo by Yu. Trubnikov, 2024);
 (в) The glacier accumulation area (photo by A. Grigoriev, 2023)

К моменту создания Каталога ледников СССР (Каталог..., 1966) в нём содержалась информация о 30 ледниках, расположенных на этой территории, полученная в основном с использованием данных аэрофотосъёмки (АФС) 1951–1958 гг. Всё это были небольшие каровые или присклоновые ледники, площадь которых не превышала 0.5 км². Предполагается, что происходившие с тех пор изменения климата должны были влиять на режим ледников и их размеры. В то же время труднодоступность, сложные метеоусловия и небольшие размеры ледников ограничивали возможности регулярного получения информации об их состоянии наземными и дистанционными методами. Если сравнить изображения ледников на АФС 1957 г. с современными космическими снимками высокого разрешения WorldView-2 (2020 г.), то можно увидеть (несмотря на более позднюю дату и значительные остатки зимнего снега на космических снимках), что размеры ледников уменьшились: относительная высота боковых морен увеличилась в результате понижения поверхности льда и, соответственно, сократилась площадь ледников (рис. 2, *а–б*); сокращению площади также способствует образование приледниковых озёр (рис. 2, *в–г*); количество обломочного материала на поверхности ледников увеличилось, что говорит об интенсивной абляции и их отрицательном балансе массы за прошедший период в целом (рис. 2, *д–е*).

Все эти признаки позволяют судить об изменении состояния ледников Приполярного Урала на качественном уровне. Вместе с тем для оценки скорости происходящих изменений и каких-либо прогнозов дальнейшего развития ситуации безусловный интерес представляет получение количественных показателей. В настоящей работе сделана попытка использовать данные исторических и современных наземных и дистанционных наблюдений за динамикой состояния одного из ледников Приполярного Урала – ледника Гофмана – для количественной оценки произошедших с ним изменений с середины прошлого века до наших дней. Выбор объекта исследований обусловлен как самим фактом его существования в настоящее время, так и наличием ряда данных исторических наземных наблюдений и фотосъёмок, необходимых для сравнения.

ДАННЫЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ РАЗМЕРОВ ЛЕДНИКА

Оледенение Саблинского хребта в начале прошлого века представлено небольшими каровыми, висячими и присклоновыми ледниками, которые обнаружены А.Н. Алешковым во время экспедиций 1929 и 1932 годов. Наиболее крупным из них оказался ледник, достигавший в длину почти 1 км, названный в честь руководителя Первой экспедиции Русского географического общества на Северный Урал – Эрнста Карловича Гофмана (Гофман, 1856). Во время посещения А.Н. Алешкову удалось выполнить фототео-долитную съёмку ледника, оценить его размеры и скорость таяния поверхности. По результатам съёмки им была составлена подробная топокарта с сечением между горизонталями 10 м, дающая представление о строении ледника, его границах и моренном покрове (Алешков, 1935). К сожалению, на карте не обозначены положения базисов съёмки, что не позволяет осуществить координатную привязку, приемлемую для сравнения с данными последующих АФС и космических съёмок.

Поскольку наземные инструментальные гляциологические наблюдения в этом районе не проводились с момента посещения их А.Н. Алешковым, то для оценки изменений положения границ ледника использованы исторические данные дистанционного зондирования: материалы аэрофотосъёмки (15.08.1951) из архивов Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН и Института географии РАН, а также современные космические снимки Sentinel-2 (август–сентябрь 2024 г.)

Для оценки изменений высоты поверхности ледника Гофмана использовались данные съёмки лазерного высотомера со спутника ICESat-2 от 16.03.2019 (NASA..., 2025), а данные реанализа ERA5 привлечены для исследования возможного влияния климатических факторов (летней температуры воздуха, зимних осадков) на баланс массы ледника (climatereanalyzer.org..., 2025).

Реанализ представляет собой синтез различных данных наблюдений и моделирования гидродинамической климатической моделью. Для оценки трендов изменений характеристик атмосферной радиации и облачности на протяжении последних десятилетий использовался реанализ ERA5-land, который является последней версией реанализа Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) для территории суши с высоким разрешением (0.1°× 0.1°). Были

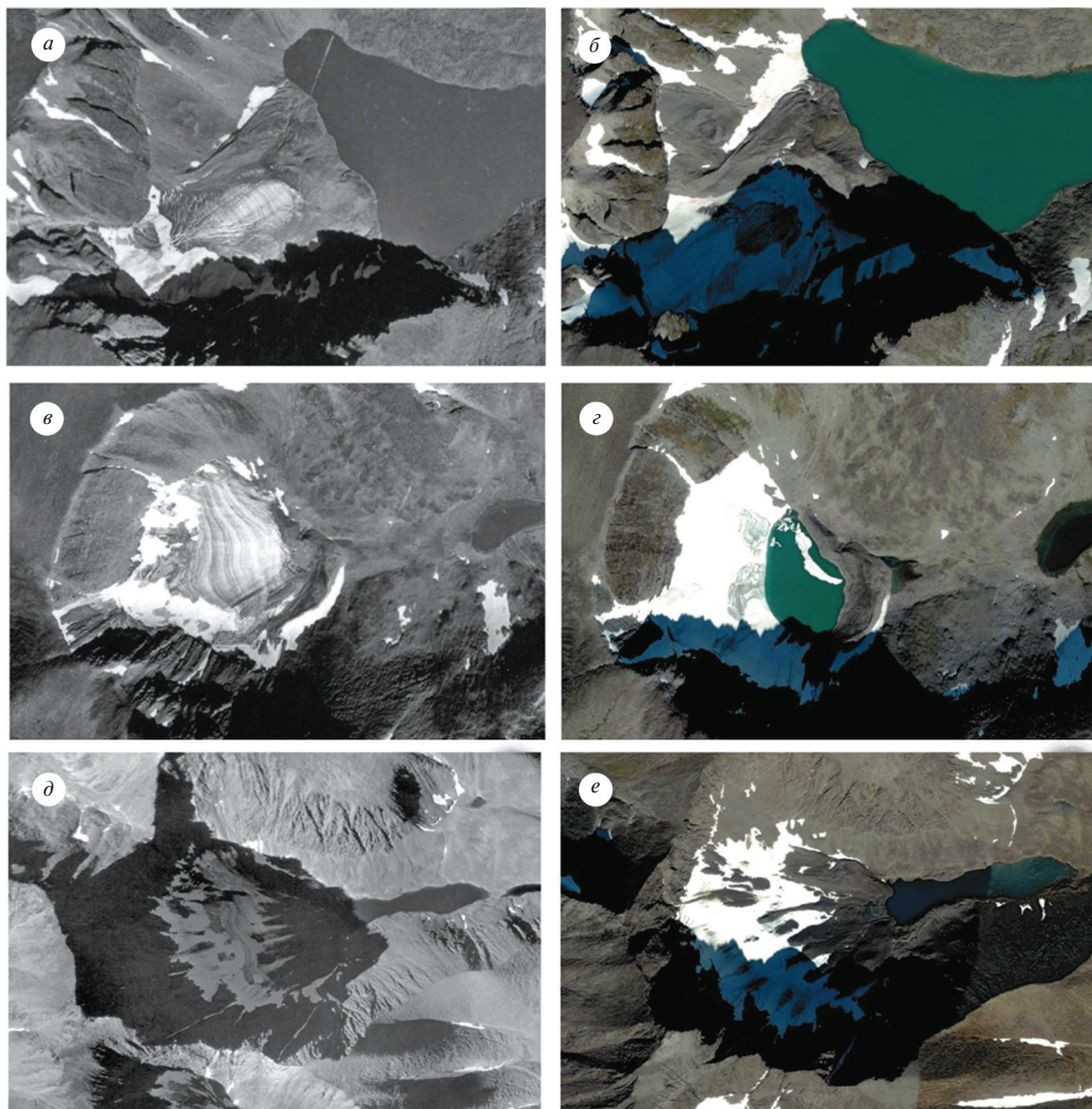


Рис. 2. Изображения ледников Приполярного Урала на АФС (31.07.1957) и космических снимках WorldView-2 (23.08.2020):

(а–б) Ледник Воейкова;

(в–г) Ледник Рихтера;

(д–е) Ледник Манси

Fig. 2. Images of glaciers of the Subpolar Urals on aerial photo (31.07.1957) and space images WorldView-2 (23.08.2020):

(а–б) Voeikov Glacier;

(в–г) Richter Glacier;

(д–е) Mansi Glacier

использованы данные со среднемесячным разрешением.

Для оценки изменений условий атмосферной циркуляции в регионе использовались среднемесячные значения индекса Североатлантического колебания (САК) за летние месяцы (июнь–август) из (NAO index, 2003), рассчитанные на основе эмпирических ортогональных функций аномалий атмосферного давления на уровне моря в североатлантическом секторе (20–80 с.ш., 90 з.д., – 40 в.д.). Во многих исследованиях показано, что индекс САК оказывает существенное влияние на климат Евразии и Северной Америки не только в зимний период, но и в летнее время через изменения атмосферной циркуляции (Folland et al., 2009; Blade et al., 2011). Тем не менее прямые линейные корреляции летнего индекса САК с основными метеопараметрами (температура воздуха, количество осадков) оказываются значимыми в основном только в Великобритании, Северной Европе и Средиземноморье (Folland et al., 2009; Blade et al., 2011; Liu et al., 2025). Однако очевидно, что цепочка циркуляционных механизмов, характерная для разных фаз индекса САК в летний сезон, в том числе смена положения североатлантического шторм-трека, существенно влияет на климатические условия на всей территории России и даже Восточной Азии (Liu et al., 2023). В дополнение к летнему индексу САК (июнь–август), как косвенной оценке циркуляционных условий на ЕТР, применены данные геопотенциальной высоты на уровне 500 гПа по данным реанализа ERA5-land.

В качестве дополнительной информации привлекались исторические и современные материалы наземной фотосъёмки, полученные во время экспедиционных исследований сотрудниками Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН и Национального парка “Югыд ва”.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ РАЗМЕРОВ ЛЕДНИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Изменения площади ледника. Во время посещения района горы Сабля в июле–августе 1932 г. А.Н. Алешковым составлена карта, на которой он показал положение ледников и снежников на восточном склоне Саблинского хребта. Из семи обнаруженных им ледников наиболее крупным был ледник Гофмана, расположенный в каре на восточном склоне горы Сабля (1497 м). В момент его посещения в 1932 г. площадь ледника составляла 0.37 км², длина – 1 км (Алешков, 1935).

На аэрофотоснимках этого района, полученных 15.08.1951, видны остатки сезонного снежного покрова на склонах Саблинского хребта и днища каров в тех местах, где на карте 1932 г. показаны ледники. Видно, что на момент съёмки сезонного снега оставалось ещё много, поскольку свободная от снега поверхность льда видна только на леднике Гофмана, который выходит за пределы кара и располагается на более низком уровне, чем другие ледники. Поэтому корректно определить наличие других ледников и положение их границ по этому снимку не удалось. Аэрофотосъёмки 1963 г. оказались ещё менее подходящими для исследования – днища каров закрыты снегом, а на озёрах частично сохранился ледяной покров.

Более удачная съёмка этого района выполнена уже из космоса 26.08.2024 со спутника Sentinel-2. Дата и условия съёмки исключительно благоприятные благодаря отсутствию облачности и завершению периода абляции ледников, когда сезонный снежный покров на их поверхности практически весь растаял, но осенние снегопады ещё не начались и поверхности ледников максимально открыты для наблюдений их границ и структуры поверхности. Наземные снимки, полученные почти синхронно в конце августа этого года на леднике Гофмана, подтверждают отсутствие сезонного снега на днище и стенках кара. В тыловой части области питания ледника сохраняется только шлейф из лавинных конусов с запасами многолетнего фирна на стенках кара (см. рис. 1, б).

Остальные ледники Саблинского хребта к 2024 г. сократились настолько, что разрешающая способность снимка Sentinel-2 (10 м) не позволяет корректно определить их границы и, соответственно, размеры. Судя по конфигурации снежно-фирновых пятен на склонах хребта и в тыловых частях каров, это уже остатки и прежде небольших ледников, которые в настоящий момент могут представлять собой перелетовывающие снежники, продолжающие существовать благодаря повышенной концентрации лавинного и метелевого снега на склонах и днищах каров. Возможно, что наиболее крупные из них ещё содержат ледяное ядро.

В отношении этих ледников можно сделать вывод о сокращении их размеров лишь на качественном уровне. Поэтому для количественной оценки происходящих изменений использовали ледник Гофмана, границы которого были определены по АФС (15.08.1951) и снимку Sentinel-2

(26.08.2024). Предварительно фрагмент АФС с изображением ледника был корегистрирован со снимком Sentinel-2 в системе координат WGS 1984 UTM зона 40N с использованием программы ArcMap 10.8. После этого была выполнена оцифровка границ ледника в соответствующие снимкам годы. При дешифрировании положений границ ледника использовались данные наземных фотосъёмок и GPS измерений, полученные практически синхронно с космической съёмкой во время обследования ледника 28–30 августа 2024 г. (рис. 3).

В результате по этим оценкам площадь ледника в 1951 г. составляла $0.36 \pm 3\%$ км², а в 2024 – $0.24 \pm 8\%$ км². За 73 года площадь ледника сократилась на 33 %. Погрешность определения площади оценивалась по соотношению площади буферной зоны вдоль периметра

ледника шириной в элемент разрешения снимка (для АФС – 3 м, для Sentinel-2 – 10 м) к его площади внутри границы.

Один из важных показателей состояния ледника – изменение положения границы моренного чехла на его языке, который находится в наиболее неблагоприятных температурных условиях. Интенсивное таяние способствует увеличению концентрации обломочного материала на поверхности ледника. Постепенно он превращается в сплошной моренный чехол, граница которого перемещается вверх по леднику. Судя по всему, перемещение именно этой границы мог наблюдать А. Н. Алешков во время посещения ледника в 1929 и 1932 гг., поскольку уже в то время нижняя граница ледника находилась в глубине мощной конечной морены. Измерения с помощью снимков АФС и Sentinel-2

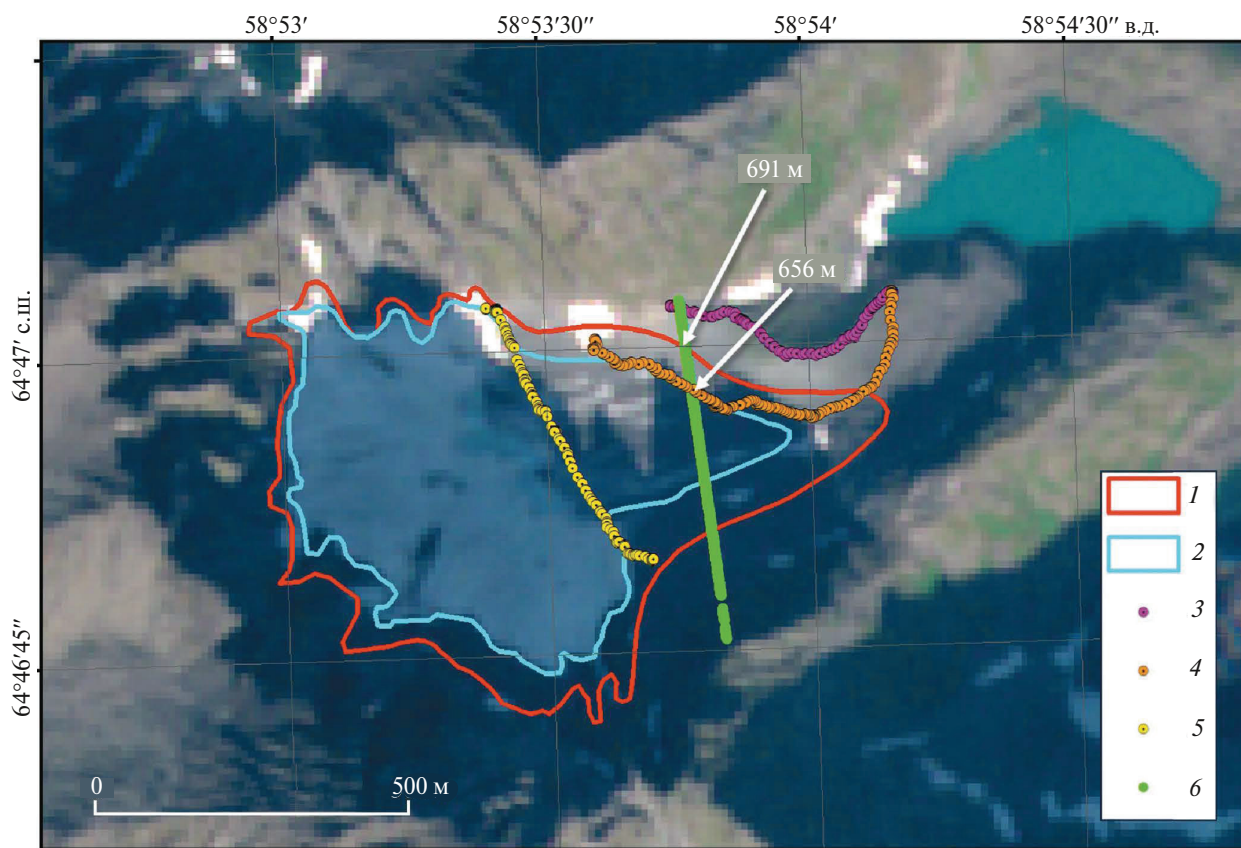


Рис. 3. Границы ледника Гофмана: 1 – в 1951 г.; 2 – в 2024 г. Треки наземной GPS-съёмки в 2024 г.: 3 – гребень левой боковой морены; 4 – линия контакта морены с ледником; 5 – поперечный профиль; 6 – линия трека лазерного дальномера со спутника ICESat-2 (16.03.2019). В качестве основы изображения использован снимок Sentinel-2 (26.08.2024)

Fig. 3. Outlines of the Hoffmann Glacier in 1951 (1) and 2024 (2). Tracks of the 2024 ground GPS survey: crest of the left lateral moraine (3); line of contact of the moraine with the glacier (4); transverse profile (5); track line of the laser altimetry (16.03.2019) from the ICESat-2 satellite (6). Background is the Sentinel-2 image, 26 August 2024

показывают, что за 73 года (1951–2024) эта граница переместилась на 170 м вверх по леднику со средней скоростью 2.3 м/год. Близкая величина скорости перемещения этой границы – 6 м за три года (1929–1932) – получена в своё время А.Н. Алешковым. К моменту посещения ледника гляциологами Института географии РАН в 2002 г. перемещение этой границы по сравнению с 1932 г. составило 150 м (Глазовский и др., 2005). Соответственно, средняя скорость на этом промежутке времени имела похожую величину – 2.1 м/год. То обстоятельство, что скорость несколько возросла за два последних десятилетия, не противоречит общей тенденции изменения климатических условий в этом регионе.

Изменение высоты поверхности ледника.

Сокращение размеров ледника проявляется не только в изменении его площади, но и в снижении высоты поверхности. Сравнение наземных снимков 1950 и 2024 гг. наглядно демонстрирует увеличение свободной ото льда площади внутренней стороны левой боковой морены, произошедшее в результате понижения поверхности ледника Гофмана за этот период времени (рис. 4).

Детальность цифровых моделей SRTM и ASTER GDEM 3.0 на этот район недостаточна для решения нашей задачи. Кроме того, они имеют множественные “артефакты” на таком ярко выраженном рельефе в виде аномалий высоты поверхности в моделях рельефа. Эти “артефакты” возникают из-за особенностей технологии съёмки в оптическом и радиодиапазонах, атмосферных условий, а также высокой крутизны склонов.

ArcticDEM на этот район существует, но на месте глубоких и крутостенных каров Саблинского хребта в ней также находятся “неопределённости” в виде участков с отсутствием данных. Поэтому для количественной оценки изменения высоты положения линии контакта ледника с боковой мореной были использованы данные лазерного дальномера со спутника ICESat-2 (ATL06 Track ID: 1187). Трасса одного из шести его лучей пересекла границы языка ледника Гофмана 16.03.2019. Эта трасса (beam: gt3l strong) применена для решения поставленной задачи, поскольку данные ICESat-2 содержат координатную привязку для каждого фотона. Трасса прохождения луча совмещена с границами ледника в 1951 и 2023 гг. в программной среде ArcMap 10.8. Точки пересечения трассы с границами ледника на левой боковой морене

применены для определения высоты положения его поверхности в эти годы (см. рис. 3).

В результате для границ 1951 и 2024 гг. отсчёт высот точек пересечения составил 691 и 656 м соответственно. В эти величины необходимо внести поправки с учётом того, что съёмка ICESat-2 проведена в марте 2019 г.

Для точки пересечения профиля ICESat-2 с положением границы в 1951 г. – это поправка на толщину снежного покрова, который лежал в марте 2019 г. в этом месте на склоне левой боковой морены и включён в измеренную величину. Как показывает фотонный профиль, крутизна склона в этом месте порядка 40°. Толщина снежного покрова на склонах такой крутизны не превышает 0.5–1.0 м (можно вычесть или пренебречь). В результате высота поверхности ледника в 1951 г. в этой точке должна была составлять 691 ± 1 м.

Для точки пересечения с границей 2024 г. учитывалось два обстоятельства. Во-первых, в марте 2019 г. на этом месте ещё была довольно пологая поверхность ледника, покрытая снегом, толщина которого к весне здесь могла достигать 2–3 м (снегомерная съёмка 01.04.2006 на водораздельном плато между р. Левый Вож и р. Седью, расположенным на высоте порядка 600 м в 5 км от ледника, показала толщину снежного покрова 2 м (Носенко Г.А., Носенко О.А., 2006), а с учётом того, что этот участок находится у подножия крутого склона боковой морены высотой порядка 40 м, можно увеличить эту цифру до 5–6 м за счёт сползания снега (снежных осовов). Во-вторых, поверхность ледника по линии трека в 2019 г. выше, чем в 2024 г., поэтому внесена поправка на слой стаявшего за пять лет льда. Если ориентироваться на отрицательный баланс массы ледников Полярного Урала, которые в последние годы тают особенно быстро, то в области языка ледника эта величина может составлять порядка 1.0 м в.э. в год (Носенко и др., 2020). С учётом этого допущено, что на леднике Гофмана количество стаявшего льда в точке пересечения его границы с профилем ICESat-2 должно составить не менее 5 м в.э. В пересчёте на слой льда с плотностью 0.85 г/см^3 это составляет порядка 6 м.

С учётом перечисленных выше поправок высота границы ледника в 2024 г. должна была находиться на уровне 645 ± 11 м. В результате за 73 года (1951–2024) высота поверхности ледника на профиле ICESat-2 понизилась

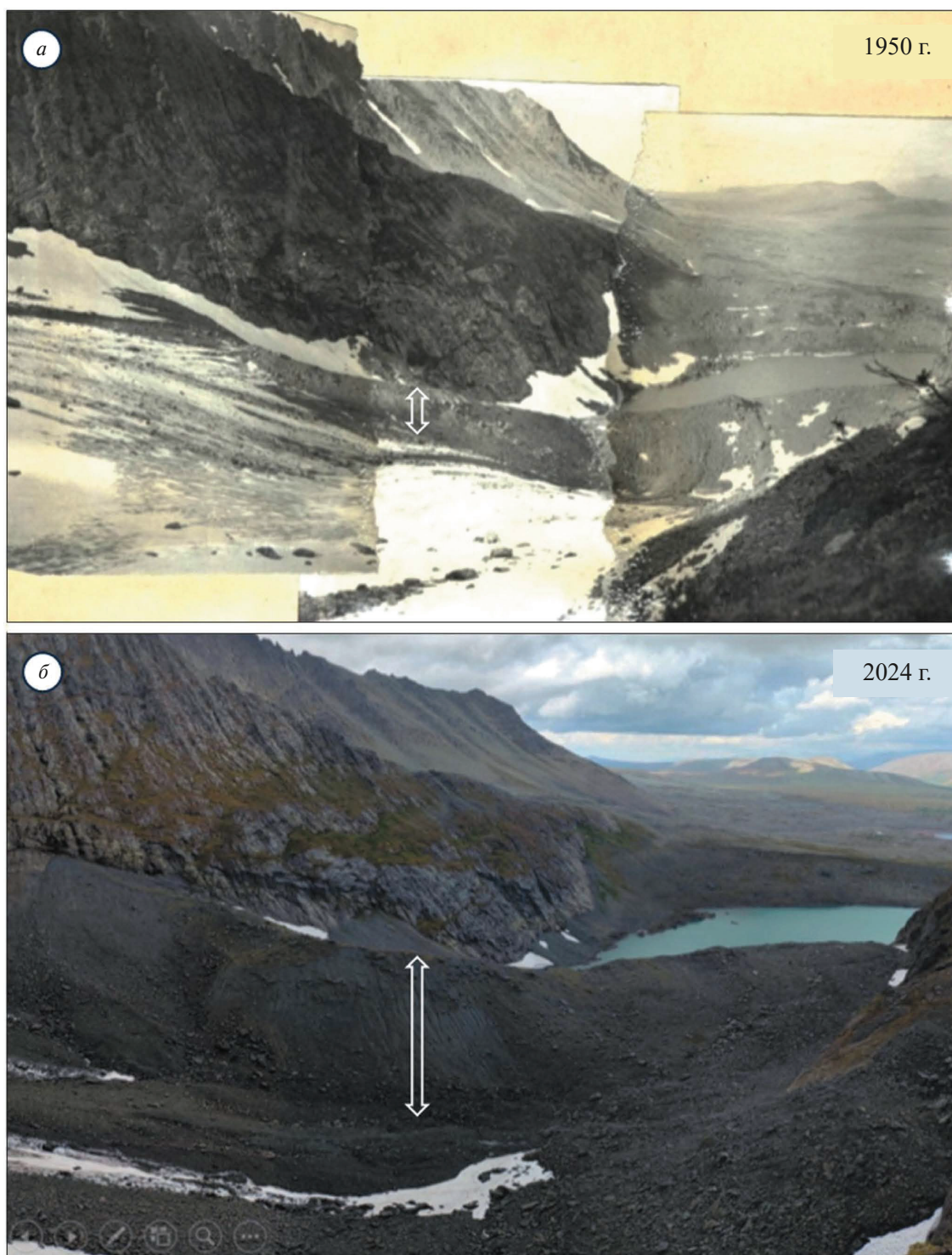


Рис. 4. Состояние поверхности левой боковой морены ледника Гофмана в 1950 и 2024 гг. на снимках с правого борта кара:

(а) Мозаика снимков М.В. Фишмана, 1950 г.;

(б) Снимок Ю.С. Трубникова 30.08.2024

Fig. 4. The state of the surface of the left lateral moraine of the Hoffman Glacier in 1950 and 2024 in photographs taken from the right side of the cirque:

(a) A mosaic of photographs taken by M.V. Fishman, 1950;

(b) Photograph by Yu.S. Trubnikov, 30 August 2024

на 46 ± 11 м. Средняя скорость понижения поверхности составила 0.6 м/год.

ОБСУЖДЕНИЕ

Отмечено, что по оценке А. Н. Алешкова в 1932 г. площадь ледника составляла 0.37 км^2 . По сравнению с полученной величиной площади в 1951 г. (0.36 км^2) разница невелика и находится в пределах погрешности дешифрирования положений границ ледника по АФС. В то же время разница в величинах оценки площадей может обусловлена погрешностями трансформирования АФС в картографическую проекцию, связанными с глубоко расчленённым рельефом, и различиями в наземном и дистанционном методах измерений. Сравнивая эти площади, стоит учесть, что межгодовая изменчивость метеорологических факторов (температура воздуха и зимние осадки), определяющих величину снегонакопления и продолжительность залегания снежного покрова, в этом районе высокая. Несмотря на совпадение сроков измерений А. Н. Алешкова в 1932 г. (первая половина августа) и проведения АФС 1951 г. (15 августа), количество остатков сезонного снега на стенках кара и боковых моренах, затрудняющее определение положений границ ледника, могло быть разным.

Тем не менее, несмотря на довольно большой перечень возможных причин неопределённости, полученная площадь ледника в 1951 г. практически не отличается от её величины в 1932 г. Предположено, что это обусловлено относительно небольшим временным интервалом наблюдений с благоприятными (стабильными) для баланса массы ледников климатическими условиями. Кроме того, баланс массы каровых ледников в значительной мере зависит от их морфологии, поскольку их питание в основном обеспечивается лавинным и метелевым переносом снега со стенок кара на его дно (Ходаков, 1978). Поэтому накопление снега в тыловой части кара к весне может превышать 10 м. Предположение, высказанное А. Н. Алешковым, впоследствии подтверждено во время гляциологических наблюдений на каровых ледниках Обручева и ИГАН на Полярном Урале в 70-х годах прошлого столетия (Троицкий, 1966). Более того, такая же величина накопления снега получена на леднике ИГАН во время проведения снегомерной съёмки в апреле 2021 г. (Лаврентьев и др., 2023), что свидетельствует об устойчивости режима питания каровых ледников

в определённом диапазоне изменений климатических факторов (направления влагопереноса, количества зимних осадков и летних температур воздуха).

Однако ледник продолжает сокращаться. Площадь ледника Гофмана в 2024 г. существенно (в 1.5 раза) меньше, чем в 1951 г. Предположено, что значительное сокращение площади, обусловленное изменением климата, началось на рубеже XX и XXI столетий. На графиках изменений осадков и температур для этого района (climatereanalyzer.org..., 2025) показано, что при относительном постоянстве осадков зимнего периода (рис. 5, а) резко увеличилось число лет с положительными температурными аномалиями летнего периода (фактически непрерывный ряд с 2003 г.) (см. рис. 5, б). Такая комбинация климатических факторов неблагоприятна для существования ледников — абляция начинает превышать аккумуляцию и баланс массы становится отрицательным.

Кроме летних температур и зимних осадков важным климатическим фактором, влияющим на таяние ледников, — коротковолновая радиация (Торопов et al., 2019; Korneva et al., 2024). Для оценки трендов характеристик атмосферной радиации и облачности применены данные реанализа ERA5-land за 1966–2022 гг. На рис. 6, а представлены скользящие линейные тренды за последовательные 25-летние периоды, приходящей к земной поверхности коротковолновой радиации и общей и нижней облачности в среднем за летние периоды.

Из графиков (см. рис. 6) следует, что на рубеже XX и XXI столетий знак коэффициента тренда коротковолновой радиации меняется с отрицательного на положительный, что свидетельствует о её существенном росте за последние 20 лет, причём наиболее высокие коэффициенты тренда наблюдаются как раз в первые два десятилетия XXI века. В эти же годы произошло резкое снижение количества облачности (знак тренда сменился с положительного на отрицательный), причём в большей степени облачности нижних ярусов (голубая кривая на рис. 6, а).

Такое увеличение приходящей коротковолновой радиации и снижение балла облачности связано, по-видимому, с увеличением частоты возникновения ясной погоды, вызванной антициклональными условиями. Отмечено, что в среднем для летнего периода в этом регионе характерна облачная циклональная погода с периодическим выпадением жидких осадков

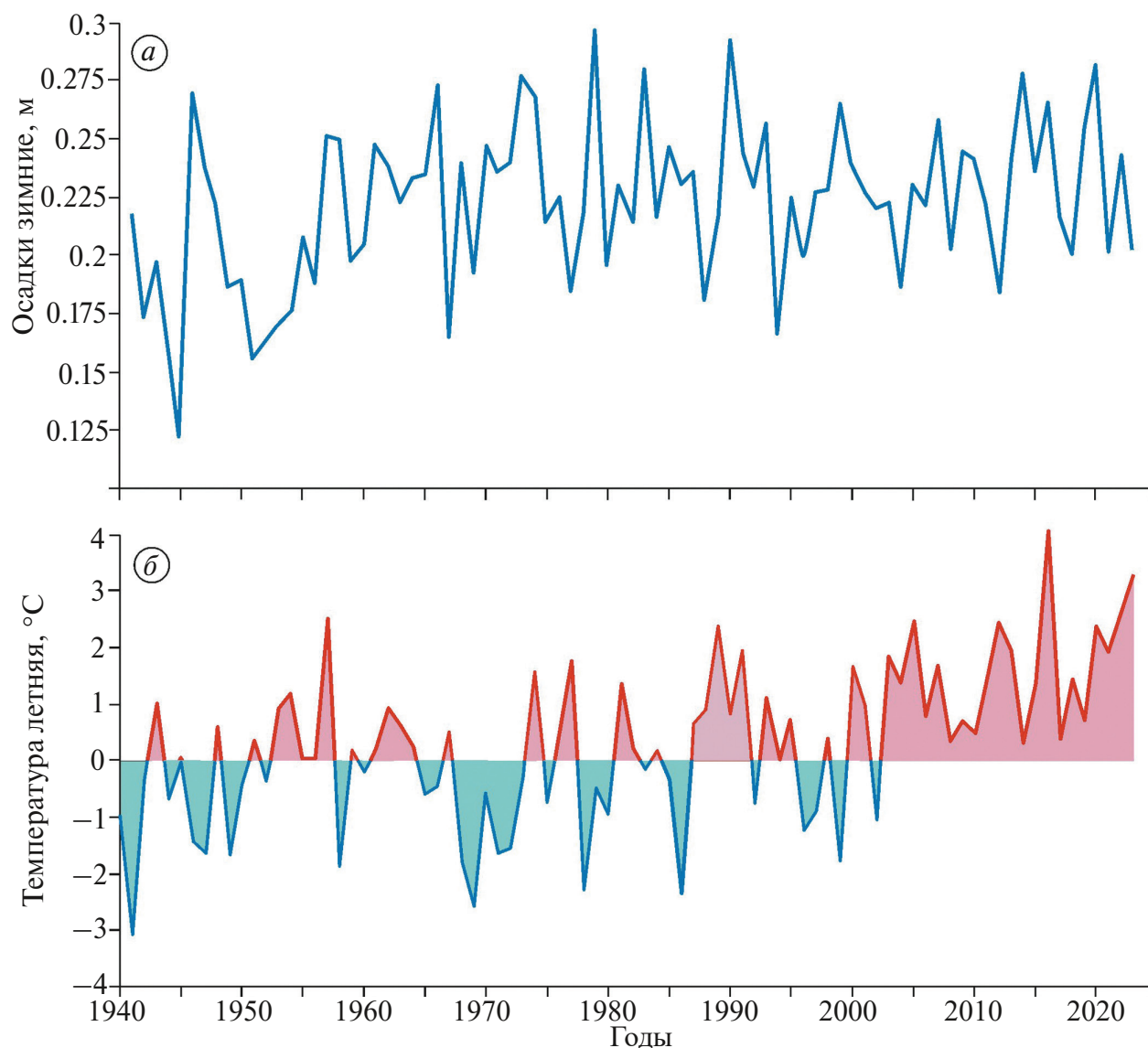


Рис. 5. Изменения зимних (ONDJFMA) осадков (а) и аномалий летних (MJJAS) температур воздуха (б) в период 1940–2023 гг. по данным реанализа ESMWF ERA 5 (climateranalyser.org..., 2025)

Fig. 5. Changes in winter (ONDJFMA) precipitation (a) and anomalies of summer (MJJAS) air temperatures (b) in the period 1940–2023, according to ESMWF ERA 5 reanalysis data (climateranalyser.org..., 2025)

(максимум осадков в регионе приходится именно на лето). Североатлантические циклоны, приносящие осадки с Атлантики, приходят в этот регион достаточно часто вместе с западным переносом. Увеличение количества антициклонов может говорить о более частом блокировании западного переноса и усилении меридионального переноса.

Удобным инструментом для анализа особенностей атмосферной циркуляции служат

количественные индексы атмосферной циркуляции, среди которых наиболее часто для территории ЕТР используют индекс арктической осцилляции (АО) и индекс Северо-Атлантического колебания (САК) в зимний период. В некоторых работах показано, что аномалии атмосферного давления, связанные с летним индексом САК, также оказывают влияние далеко за пределами Европы (Folland et al., 2009; Liu et al., 2023). Так, в (Liu et al., 2023) подтверждена связь количества дней с низким

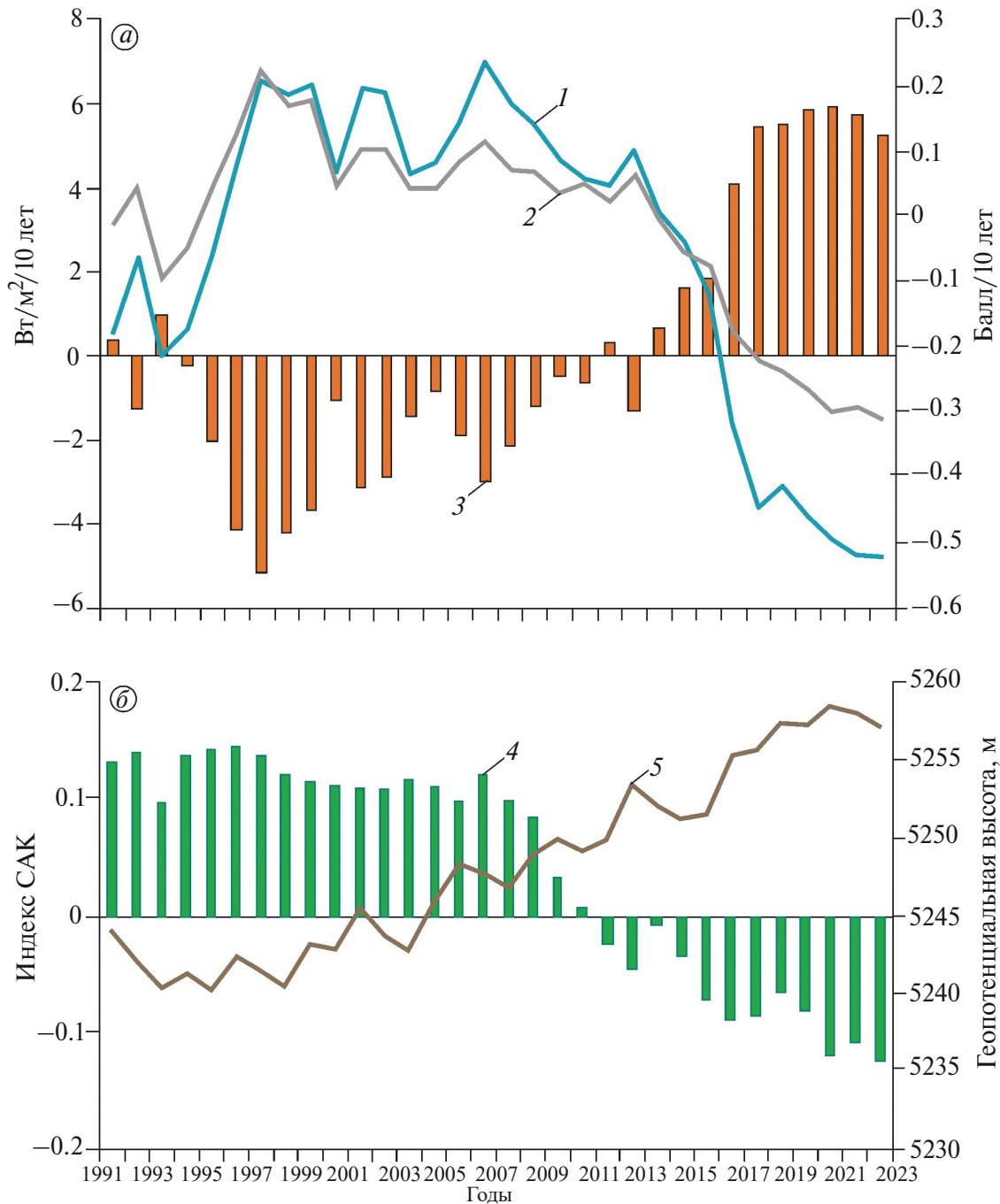


Рис. 6. Тренды изменений характеристик атмосферной радиации и облачности за последовательные 25-летние периоды начиная с 1966–1991 гг. (по шкале абсцисс указан последний год периода), в среднем за летний период (июнь–август): (а) скользящие линейные тренды приходящей к земной поверхности коротковолновой радиации ($Вт/м^2/10$ лет) (1); балла общей облачности (2) и нижней облачности (3); (б) средние за последовательные 25-летние периоды в среднем за летний сезон значения индекса Северо-Атлантического колебания (4) и средние значения геопотенциальной высоты (м) на уровне 500 ГПа (5)

Fig. 6. Trends in atmospheric radiation and cloudiness characteristics for successive 25-year periods, starting from 1966–1991 (the last year of the period is indicated on the abscissa scale), on average for the summer period (June–August): (a) Sliding linear trends in shortwave radiation ($W/m^2/10$ years) arriving at the earth's surface (1); total cloudiness (2) and low cloudiness (3); (b) Average values of the North Atlantic Oscillation (NAO) index for successive 25-year periods, on average for the summer season (4) and average values of geopotential height at the level of 500 GPa (5)

баллом облачности и высокими значениями приходящей коротковолновой радиации в летние периоды 2000–2018 гг. на севере ЕТР с усилением уральского антициклона в разные фазы летнего индекса САК и изменением положения Северо-Атлантического и Азиатского шторм-треков. На рис. 6, б представлен временной ход за те же последовательные 25-летние периоды осреднённого индекса САК в среднем за летние месяцы. При положительных значениях этого индекса хорошо развиты Исландская депрессия и Азорский антициклон и при этом прослеживается зональная циркуляция (Нестеров, 2013). А при отрицательной фазе происходит ослабление обоих этих центров действия атмосферы и усиление меридиональных процессов и блокирующих ситуаций. Видно, что как раз на рубеже веков индекс САК перешёл из положительной фазы в отрицательную, что может свидетельствовать о более частом возникновении блокирующих антициклонов в регионе. О росте атмосферного давления в регионе также свидетельствует положительный тренд геопотенциальной высоты на уровне 500 ГПа (см. рис. 6, б).

Изменения перечисленных климатических показателей показывают, что на рубеже XX–XXI столетий условия существования ледников в этом регионе существенно ухудшились, и это является причиной их интенсивного сокращения в настоящее время.

По сравнению с другими ледниками Приполярного Урала ледник Гофмана находится в самых благоприятных условиях. Высокий меридионально ориентированный Саблинский хребет первым встречает влагонесущие воздушные массы, приносящие осадки с запада и северо-запада. Высокие стенки кара восточной экспозиции обеспечивают повышенную концентрацию зимних осадков в области его питания и защищают от воздействия прямой солнечной радиации летом (максимальный угол Солнца на этой широте не превышает 50°, а соотношение между размерами области питания на дне кара (~500 × 500 м) и высотой горного обрамления с южной стороны (~700 м) обеспечивают значительную часть суток пребывание в тени).

Тем не менее рост летних температур воздуха и изменения радиационного баланса в последние два десятилетия способствовали увеличению площади абляции ледника и её распространению на днище кара. К концу периода абляции сезонного снега на леднике практически не остаётся и начинают таять запасы многолетнего фирна, который в настоящий момент

ещё сохраняются в узкой полосе лавинных наносов у стенок кара (см. рис. 1, б). Интенсивное таяние сопровождается образованием натёчного льда, который покрывает значительную часть области аккумуляции, что в свою очередь свидетельствует об изменении режима питания ледника.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты показывают, что с 1929 по 1951 г. площадь ледника Гофмана практически не изменилась, а с 1951 по 2024 г. сократилась на 33 %. При этом высота поверхности в области его языка понизилась на 46 ± 11 м.

Анализ изменения климатических факторов в этом регионе (летней температуры воздуха, зимних осадков, компонентов радиационного баланса) предполагает, что скорость изменения его размеров на исследуемом временном интервале была непостоянной. Рост летних температур воздуха и увеличение коротковолновой радиации (при постоянстве зимних осадков) привели к тому, что на протяжении двух последних десятилетий баланс массы ледника стал ещё более отрицательным и скорость сокращения его размеров возросла. Особенно наглядно это проявляется в области языка, поверхность которого понижается и закрывается моренным чехлом. При сохранении современных тенденций язык исчезнет первым, но оставшаяся часть ледника в каре может существовать неопределённо долгое время, достигнув равновесного состояния баланса массы. Сколько времени удастся сохраняться леднику в его каровой части, будет зависеть от дальнейшего развития климатического сценария. Для ответа на этот вопрос необходимы регулярные инструментальные наблюдения.

Благодарности. Полевые исследования проводились в рамках экспедиционных работ Национального парка “Югыд ва”, а также государственного задания № 122021000083-7 Института экологии растений и животных УрО РАН. Обработка данных дистанционного зондирования Земли и анализ полученных результатов выполнены в рамках государственного задания Института географии РАН № FMWS-2024-0004. Авторы выражают благодарность Юрию Сергеевичу Трубникову за фотосъёмку и GPS-съёмку ледника Гофмана в 2024 г.

Acknowledgements. Field research was carried out within the framework of expeditionary works of the Yugyd va National Park, as well as the State Assignment Project No. 122021000083-7 of the Institute

of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the RAS. Processing of the Earth remote sensing data and analysis of the obtained results were carried out within the framework of the State Assignment Project No. FMWS-2024-0004 of the Institute of Geography of the RAS. The authors would like to thank Yuri Sergeevich Trubnikov for photographs and GPS-survey of the Hoffman Glacier in 2024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алешков А.Н. Гора Сабля и её ледники // Труды ледниковых экспедиций. 1935. Вып. 4. Л.: ЦУЕГМС. С. 56–74.
- Глазовский А.Ф., Носенко Г.А., Цветков Д.Г. Ледники Урала: современное состояние и перспективы эволюции // Материалы гляциологических исследований. 2005. № 98. С. 207–213.
- Гофман Э.К. Северный Урал и береговой хребет Пай-Хой. Т. 2. СПб.: Типография Императорской Академии наук, 1856. 376 с.
- Долгушин Л.Д., Кеммерих А.О. Новые ледники на Урале. // Изв. АН СССР. Сер. География. 1957. № 6. С. 67–78.
- Долгушин Л.Д. Ледники Урала и некоторые особенности их эволюции. // Вопросы физической географии Урала. М.: МОИП, 1960. С. 33–60.
- Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Новые ледники на хребте Тельпос-Из // Материалы гляциологических исследований. 1979. № 36. С. 214–218.
- Каталог ледников СССР. Т. 3. Северный Край. Ч. 3 Урал. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 52 с.
- Лаврентьев И.И., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Шейн А.Н., Иванов М.Н., Леопольд Я.К. Толщина льда и снежного покрова ледника ИГАН (Полярный Урал) по данным наземного радиозондирования в 2019 и 2021 гг. // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. № 1. С. 5–16.
<https://doi.org/10.31857/S2076673423010106>
- Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада, ЛТД, 2013. 144 с.
- Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Иванов М.Н., Сеницкий А.И., Кобелев В.О., Никитин С.А. Реакция ледников Полярного Урала на современные изменения климата // Лёд и Снег. 2020 Т. 60. № 1. С. 42–57.
<https://doi.org/10.31857/S2076673420010022>
- Носенко Г.А., Носенко О.А. Снежный покров Полярного Урала по данным современных микроволновых съемок AMSRE // Материалы гляциологических исследований. 2006. Вып. 101. С. 176–183.
- Троицкий Л.С., Ходаков В.Г., Михалев В.И., Гуськов А.С., Лебедева И.М., Адаменко В.Н., Живкович Л.А. Оледенение Урала. М.: Наука, 1966. 355 с.
- Шейн А.Н., Иванов М.Н., Носенко Г.А., Лаврентьев И.И. Исследования ледников ИГАН, Анучина и Фото-геодезистов в 2023 г. // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2024. № 1 (124). С. 50–68.
<https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2024.122.1.004>
- Ходаков В.Г. Водно-ледовый баланс районов современного и древнего оледенения СССР. М.: Наука, 1978. 192 с.
- Bladé I., Liebmann B., Fortuny D., Oldenborgh G.J. Observed and simulated impacts of the summer NAO in Europe: implications for projected drying in the Mediterranean region // Climate dynamics. 2012. V. 39. P. 709–727.
- climaterereanalyzer.org // Электронный ресурс. https://climaterereanalyzer.org/research_tools/monthly_tseries/ Дата обращения: 18.04.2025.
- Dussailant I., Hugonnet R., Huss M., Berthier E., Bannwart J., Paul F., Zemp M. Annual mass change of the world's glaciers from 1976 to 2024 by temporal downscaling of satellite data with in situ observations // Earth System Science Data. 1977–2006, 2025. V. 17. № 5.
<https://doi.org/10.5194/essd-17-1977-2025>, 2025
- ECMWF ERA5 (0.5 × 0.5 deg) // Электронный ресурс. https://climaterereanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/ Дата обращения: 20.05.2025.
- Folland C.K., Knight J., Linderholm H.W., Fereday D., Ineson S., Hurrell J.W. The summer North Atlantic Oscillation: past, present, and future // Journ. of Climate. 2009. V. 22. № 5. P. 1082–1103.
- glaciercasualtylist.rice.edu // Электронный ресурс. <https://glaciercasualtylist.rice.edu/> Дата обращения: 18.04.2025.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, IPCC. 2023. P. 1–34.
<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- ICESat-2 // Электронный ресурс. <https://openaltimetry.earthdatacloud.nasa.gov/data/icesat2/> Дата обращения: 18.04.2025.
- Korneva I.A., Toropov P.A., Muraviev A.Y., Aleshina M.A. Climatic factors affecting Kamchatka glacier recession // International Journal of Climatology. 2024. V. 44. № 2. P. 345–369.
- Liu Q., Bader J., Jungclaus J.H., Matei D. More extreme summertime North Atlantic Oscillation under climate change // Communications Earth and Environment. 2025. V. 6. P. 474.
<https://doi.org/10.1038/s43247-025-02422-x>
- Liu L., Wu B., Ding S. Combined impact of summer NAO and northern Russian shortwave cloud radiative effect on Eurasian atmospheric circulation. // Environmental research letters. 2023. V. 18. P. 014015.

- NAO Index // Электронный ресурс. NAO Index Data provided by the Climate Analysis Section, NCAR, Boulder, USA, Hurrell (2003). Дата обращения: 22.02.2025.
- NASA // Электронный ресурс. <https://openaltimetry.earthdatacloud.nasa.gov/data/icesat2/> Дата обращения: 18.04.2025.
- Sentinel-2 // Электронный ресурс: <https://browser.data-space.copernicus.eu/> Дата обращения: 21.05.2025.
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M. Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century // International Journ. of Climatology. 2019. V. 39. P. 4703–4720.
- Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Welty E.Z., Dussaillant I., Bannwart J. WGMS 2023. Global Glacier Change Bulletin. (2020–2021). ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. (2020–2021). № 5. 134 p. <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2023-09>

Citation: Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Korneva I.A., Grigoriev A.A., Shubnitsina E.I. The Hoffman Glacier in the Subpolar Urals: current state and response to climate change. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (4): 557–572. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525040037.

The Hoffman Glacier in the Subpolar Urals: current state and response to climate change

© 2025 G. A. Nosenko^{a, #}, A. F. Glazovsky^a, I. A. Korneva^a, A. A. Grigoriev^b, E. I. Shubnitsina^c

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

^b*Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia*

^c*Yugyd va National Park, Vuktyl, Russia*

[#]*e-mail: nosenko@igras.ru*

Received June 19, 2025; revised July 13, 2025; accepted September 25, 2025

This paper presents the results of a quantitative assessment of changes of the Hoffman Glacier, the largest glacier in the Subpolar Urals, occurring over the period 1951–2024. Aerial photographs from 1951, current Sentinel-2 satellite images, laser rangefinder data from the ICESat-2 satellite, as well as historical and modern ground-based photographs were used. The results show that in 1951 glacier area was $0.36 \pm 3\%$ km². This value was almost identical to the results of a ground-based phototheodolite survey of the glacier area carried out in 1929. By 2024, the glacier area had decreased by 33 % and amounted to $0.24 \pm 8\%$ km². The reduction in the glacier area was accompanied by a decrease in its surface height. Over 73 years (1951–2024), the glacier surface elevation on the ICESat-2 profile decreased by 45 ± 11 m and reached the altitude of 647 ± 11 m. The average rate of the surface lowering amounted to 0.6 m/year. A comparative analysis of the dynamics of changes in the Hoffman Glacier size and climate data in this region suggests that the conditions for the existence of glaciers in this region have significantly worsened at the turn of the centuries. With a relative stability of winter precipitation, the number of years with positive temperature anomalies in summertime has sharply increased (with a continuous series of such anomalies since 2003). In addition, a certain increase in the short-wave radiation caused by reduction in the cloudiness has been observed over the past 20 years. The rise in summer air temperatures and the increase in the shortwave radiation cause the glacier mass balance to become even more negative and the rate of its shrinkage to increase. How long the Hoffman Glacier will remain in its cirque part will depend on the further development of the climate scenario.

Keywords: glacier shrinkage, historical photographs, remote sensing, Subpolar Urals

REFERENCES

- Aleshkov A.N. Mount Sabre and its glaciers. Trudy lednikovykh ekspeditsiy. Proceedings of glacial expeditions. Leningrad: TSUEGMS. 1935, 4: 56–74. [In Russian].
- Glazovsky A.F., Nosenko G.A., Tsvetkov D.G. Ural glaciers: Current state and evolutionary prospects. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2005, 98: 207–213. [In Russian].
- Hoffman E.K. Severnyy Ural i beregovoy hrebet Paj-Hoj. Northern Urals and the Pai-Khoi Coastal Ridge. Vol. 2. Saint Petersburg: Printing House of the Imperial Academy of Sciences, 1856: 376 p. [In Russian]
- Dolgushin L.D., Kemmerich A.O. New glaciers in the Urals. *Izvestiya Ros. Akad. Nauk. Seriya geograficheskaya. Proc. of RAS. Geographical series*. 1957, 6: 67–78 [In Russian]
- Dolgushin L.D. Ural glaciers and some features of their evolution. *Voprosy fizicheskoy geografii Urala*. Questions of physical geography of the Urals. Moscow: MOIP, 1960: 33–60. [In Russian]
- Dolgushin L.D., Osipova G.B. New glaciers on the Telpoz-Iz ridge. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1979, 36: 214–218. [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 3. Northern Edge. Is. 3 Ural. Leningrad: Hydrometizdat, 1966: 52 p. [In Russian].
- Lavrentiev I.I., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Shein A.N., Ivanov M.N., Leopold Y.K. Ice and snow thickness of the IGAN Glacier in the Polar Urals from ground-based radio-echo sounding 2019 and 2021. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2023, 63 (1): 5–16. <https://doi.org/10.31857/S2076673423010106> [In Russian].
- Nesterov E.S. Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean. North Atlantic Oscillation: Atmosphere and Ocean. Moscow: Triada, LTD, 2013: 144 p. [In Russian].
- Nosenko G.A., Muraviev A.Y., Ivanov M.N., Sinitsky A.I., Kobelev V.O., Nikitin S.A. Response of the Polar Urals glaciers to the modern climate changes. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 42–57. <https://doi.org/10.31857/S2076673420010022> [In Russian].
- Nosenko G.A., Nosenko O.A. Snow cover of the Polar Urals according to modern microwave surveys AMSRE. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2006, 101: 176–183. [In Russian].
- Troitsky L.S., Khodakov V.G., Mikhalev V.I., Guskov A.S., Lebedeva I.M., Adamenko V.N., Zhivkovich L.A. *Oledenenie Urala*. The glaciation of the Urals. Moscow: Nauka, 1966: 355 p. [In Russian].
- Shein A.N., Ivanov M.N., Nosenko G.A., Lavrentyev I.I. Studies of the IGAN, Anuchin and Fotogeodestov glaciers in 2023. *Nauchnyy vestnik Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga*. Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. 2024, 1 (124): 50–68. <https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2024.122.1.004> [In Russian].
- Khodakov V.G. *Vodno-ledovyy balans rajonov sovremenno-go i drevnego oledeneniya SSSR*. Water-ice balance of areas of modern and ancient glaciation of the USSR. Moscow: Nauka, 1978: 192 p. [In Russian].
- Bladé I., Liebmann B., Fortuny D., Oldenborgh G.J. Observed and simulated impacts of the summer NAO in Europe: implications for projected drying in the Mediterranean region. *Climate dynamics*. 2012, 39: 709–727.
- climatereanalyzer.org: official site. Retrieved from: URL: https://climatereanalyzer.org/research_tools/monthly_tseries. Last access: April 18, 2025.
- Dussaillant I., Hugonnet R., Huss M., Berthier E., Bannwart J., Paul F., Zemp M. Annual mass change of the world's glaciers from 1976 to 2024 by temporal downscaling of satellite data with in situ observations. *Earth Syst. Sci. Data*. 1977–2006, 2025: 17 (5) <https://doi.org/10.5194/essd-17-1977-2025>, 2025
- ECMWF ERA5 (0.5 × 0.5 deg). Retrieved from: https://climatereanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries. Last access: May 20, 2025.
- Folland C.K., Knight J., Linderholm H.W., Fereday D., Ineson S., Hurrell J.W. The summer North Atlantic Oscillation: Past, present, and future. *Journ. of Climate*. 2009, 22 (5): 1082–1103.
- glaciercasualtylist.rice.edu: official site. Retrieved from: <https://glaciercasualtylist.rice.edu>. Last access: April 18, 2025.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, IPCC. 2023: 1–34. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- ICESat-2. Retrieved from: <https://openaltimetry.earthdatacloud.nasa.gov/data/icesat2>. Last access: April 18, 2025.
- Korneva I.A., Toropov P.A., Muraviev A.Y., Aleshina M.A. Climatic factors affecting Kamchatka glacier recession. *International Journal of Climatology*. 2024, 44 (2): 345–369.
- Liu Q., Bader J., Jungclaus J.H., Matei D. More extreme summertime North Atlantic Oscillation under climate change. *Communications Earth and Environment*. 2025, 6: 474. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02422-x>
- Liu L., Wu B., Ding S. Combined impact of summer NAO and northern Russian shortwave cloud radiative effect

- on Eurasian atmospheric circulation. *Environmental research letters*. 2023, 18: 014015.
- NAO Index*. Retrieved from: NAO Index Data provided by the Climate Analysis Section, NCAR, Boulder, USA, Hurrell (2003). Last access: February 25, 2025.
- NASA: official site. Retrieved from: <https://openaltime-try.earthdatacloud.nasa.gov/data/icesat2>. Last access: April 18, 2025.
- Sentinel-2. Retrieved from: <https://browser.dataspace.copernicus.eu>. Last access: May 21, 2025.
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century. *International Journal of Climatology*. 2019, 39: 4703–4720.
- Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Welty E.Z., Dussaillant I., Bannwart J.* WGMS 2023. Global Glacier Change Bulletin. (2020–2021). ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. 2020–2021, 5: 134 p.
<https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2023-09>