УДК 551.32

БАЛАНС МАССЫ ЛЕДНИКА ИГАН (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ) В 2018–2023 гг.

© 2024 г. Г. А. Носенко^{1,*}, А. Я. Муравьев¹, А. Н. Шеин², М. Н. Иванов³, И. И. Лаврентьев¹, Я. К. Леопольд², А. И. Синицкий², В. В. Токмаков⁴

¹Институт географии РАН, Москва, Россия ²Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия ³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия ⁴ООО Техстройпроект, Чебоксары, Россия *e-mail: nosenko@igras.ru

> Поступила 18.09.2024 г. После доработки 25.09.2024 г. Принята к печати 07.10.2024 г.

В период 2018—2023 гг. на леднике ИГАН проводились наблюдения за состоянием баланса массы геодезическим методом. Сравнение полученных результатов с данными наблюдений предыдущих лет позволяет сделать вывод о сокращении массы ледника за исследуемый период, хотя это и не исключает возможность формирования на этом фоне положительного баланса массы в отдельные годы.

Ключевые слова: сокращение ледников, геодезический баланс массы, космические снимки, Полярный Урал

DOI: 10.31857/S2076673424040074, EDN: HTIDLX

введение

В условиях изменений климата, происходящих в последние десятилетия, особую актуальность приобретают наблюдения за состоянием баланса массы ледников на нашей планете, которые, с одной стороны, служат естественными индикаторами современных климатических трендов, а с другой – важным компонентом криосферы, имеющим, к сожалению, ограниченный ресурс (ІРСС, 2023). Поэтому Международная служба мониторинга ледников (WGMS – World Glacier Monitoring Service, https://wgms.ch/) проявляет в последние годы повышенную активность, привлекая внимание общественности к результатам таких наблюдений, выполняемых по единой методике в разных ледниковых районах Земли. Эти результаты свидетельствуют об отрицательном балансе массы и увеличении скорости сокращения ледников. Особую ценность в этом отношении представляют ледники с длинными рядами наблюдений. Ледник ИГАН, расположенный на Полярном Урале, относится к числу таких ледников, поскольку имеет один из самых длинных рядов инструментальных наблюдений за балансом массы на Полярном Урале, который был начат в 1958 г. в рамках программы Международного геофизического года (Троицкий и др., 1966). Несмотря на то, что этот ряд прерывался, он достаточно информативен, чтобы судить о реакции ледников на изменения климата в данном районе (Shahgedanova et al., 2012; Носенко и др., 2020). Важным обстоятельством является то, что гляциологические наблюдения на леднике были возобновлены в 2000-х годах и продолжаются до сих пор (Шеин и др., 2024). Поэтому мы имеем возможность количественной оценки изменений состояния ледника в настоящее время и сравнений с результатами прошлых лет.

В работе представлены результаты наблюдений за балансом массы ледника ИГАН геодезическим методом с использованием DGPS-съёмок и построенных разновременных цифровых моделей поверхности ледника (ЦМР) за период 2018–2023 гг. На основе сравнения полученных результатов и данных исследований предыдущих лет (1963, 2008 и 2018 гг.) показана общая тенденция изменения массы ледника и ее особенности на коротком временном интервале.

РАЙОН И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ледник ИГАН (66.01°в.д., 67.58°с.ш.) расположен на Полярном Урале на водоразделе между Европой и Азией (рис. 1). В Каталоге ледников СССР (Каталог..., 1966) он отнесён к ледникам карово-долинного типа, хотя фактически состоит из двух различных по морфологии и режиму питания частей. Южная часть располагается на восточном подветренном склоне горы Харнаурды-Кеу (1246 м) на высоте порядка 1000 м и является типичным склоновым лелником. По ней прохолит главный водораздел Уральских гор и часть стока поступает в бассейн Баренцева моря. Северная часть начинается в просторном крутостенном каре восточной экспозиции и поэтому относится к карово-долинному типу ледников. Сток с нее поступает в бассейн Карского моря. Южная часть существует благодаря повышенной концентрации осадков, создаваемой метелевым переносом, а у северной, кроме метелей, дополнительное питание создают лавины в тыловой части кара и вдоль высокого и крутого северного борта.

В середине прошлого века обе эти части соединяла широкая перемычка, благодаря которой они и были объединены в Каталоге под одним названием. Через эту перемычку часть льда склонового ледника поступала в карово-долинную и участвовала в формировании ее баланса массы. К началу XXI века плошаль южной части сократилась почти вдвое и в последние годы остается практически неизменной – 0.17±0.03 км² (Носенко и др., 2020). Связь с северной частью в настоящее время практически утрачена (Шеин и др., 2024). Поэтому в данной работе основное внимание уделено исследованию изменений северной карово-долинной части ледника ИГАН (рис. 1), которая все еще остается самым большим ледником на Полярном Урале и представляет интерес для изучения взаимосвязей баланса массы и климата. Его площадь в 2018 г. составляла 0.51 км² (Носенко и др., 2020). Толщина льда по результатам радиолокационного зондирования достигает 114 м (Лаврентьев и др., 2023). Бурение в области границы питания ледника, выполненное в апреле 2023 г., подтвердило значительную толшину льда – был получен керн с глубины 90.8 м.

Из-за особенностей своего расположения и режима питания ледник ИГАН находится в более благоприятных условиях, по сравнению со многими ледниками Полярного Урала. Высотный диапазон расположения ледника (от 830 м на языке до 1100 м



Рис. 1. Ледник ИГАН 28.08.2022. Фото А.Н. Шеина *1*– место расположения ледника ИГАН **Fig. 1.** IGAN Glacier 28.08.2022. Photo by A.N. Shein *1* – location of the IGAN Glacier v тыловой стенки кара) обеспечивает температурный режим, способствующий сохранению масс зимних осадков и лавинного снега. В 1958-1962 гг. в период работы метеостанции "Плато ИГАН" (67.58° с.ш., 66.03° в.д., 755 м над ур. моря), расположенной в непосредственной близости к леднику, среднегодовая температура воздуха была отрицательной: -6 °С (Троицкий и др., 1966). Метелевый перенос и крутые высокие борта кара создают повышенную концентрацию снега на поверхности ледника, в 1.5-2.0 раза превышающую количество выпадающих осадков (Троицкий и др., 1966). По данным радарных снегомерных съёмок 2019 и 2021 гг. толщина снежного покрова возрастает от 4.0 м на языке до 9.5 м в тыловой части кара (Лаврентьев и др., 2023). Аналогичные величины аккумуляции снега на леднике фиксировались неоднократно и в период наблюдений 1958-1981 гг. (Троицкий и др., 1966).

Основными климатическими факторами, влияющими на баланс массы ледника, являются температура воздуха тёплого периода (июнь—август) и осадки холодного периода (октябрь—апрель). Основным источником осадков на Полярном Урале являются северо-западные циклоны, приходящие с Баренцева моря и Северной Атлантики. Несмотря на высокую межгодовую изменчивость, среднее количество твёрдых осадков за холодные месяцы балансового года (октябрь–апрель (ONDJFMA) на протяжении всего периода наблюдений остается практически на прежнем уровне – порядка 0.27 мв.э. (рис. 2, *a*, поданным реанализа ERA5 ECMWF (https://climatereanalyzer.org/research_tools/monthly_tseries/).

При этом средняя годовая температура воздуха тёплых месяцев (июль—август (JJA) постепенно увеличивается (см. рис. 2, δ) и в настоящее время разница с 1950-ми годами прошлого столетия, составляет около 2.0 °С. Поскольку при постоянстве осадков температура воздуха растет, то абляция становится ведущим компонентом в балансе массы ледников Полярного Урала.

Исследования последних лет показывают также, что рост температуры не всегда служит единственной причиной сокращения оледенения. Не исключено, что аналогичную роль в усилении абляции могут играть изменения, происходящие с радиационным балансом. Наблюдения последних лет в



Рис. 2. Изменения средних годовых температур воздуха тёплого периода (июнь—август) (JJA) (*1*) и сумм осадков холодного периода (октябрь—апрель) (ONDJFMA) масс-балансового года (*2*) в районе исследований по данным реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) за период 1951–2023 гг. (*3*) и тренды изменений температуры и осадков соответственно (*4*)

Fig. 2. Changes in mean annual warm period air temperatures (JJA) (1) and cold period precipitation amounts (ONDJFMA) of the mass-balance year (2) in the study area according to the ERA5 reanalysis of the European Centre for Medium-Term Weather Forecasts (ECMWF) for the period 1951–2023. (3) and trends of temperature and precipitation changes, respectively (4)

горных районах Кавказа и Алтая показали возможную связь роста доли коротковолновой составляющей в радиационном балансе этих территорий с увеличением интенсивности сокращения размеров оледенения (Торопов, 2019; Торопов, 2020; Когпеva et al., 2024). Возможны и другие причины и механизмы сокращения ледников, обусловленные особенностями взаимодействия климата и рельефа, присущими как горно-ледниковому району в целом, так и отдельному леднику.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Спутниковые изображения. Для определения положений границ ледника и изменений его площади были использованы космические снимки Sentinel-2 (табл. 1) за период 2018–2023 гг. Дешифрирование границ проводилось вручную по синтезированным из трех каналов изображениям (уровень обработки L1C (SENTINEL 2..., 2019) и L2A.

Снимки подбирались как можно ближе к концу периода абляции (до первых снегопадов) для минимизации влияния на результат дешифрирования остатков сезонного снежного покрова и снежников. Погрешность определения площади ледника определялась "буферным" методом как площадь буферной зоны (произведение длины его дешифрированной границы на разрешающую способность снимков Sentinel-2 (10 м). Положение границы между северной (исследуемой) и южной частями ледника соответствует ее положению в 2018 г. (Носенко и др., 2020). Аналогичное допущение сделано для границы ледника в его северо-западной части, проходящей по крутым стенкам кара с многочисленными лавинными конусами.

Спутниковые снимки использовались также для определения положений снеговой и фирновой границ ледника при сравнительном анализе метеоусловий в разные годы.

Данные наземных геодезических измерений. Ежегодные масс-балансовые наблюдения на леднике ИГАН были начаты в 1958 г. в рамках программы Международного геофизического года (Троицкий, 1966) и продолжались 18 лет до закрытия гляциологического стационара на озере Большая Хадата в конце 1981 г. Наблюдения в этот период выполнялись традиционным гляциологическим методом с использованием сети снегомерных реек и шурфов и сопровождались фотогеодезическим мониторингом (Цветков, 1970). Результаты этого мониторинга, сохранившиеся в виде топоплана 1963 г., послужили в дальнейшем основой для создания цифровой модели рельефа поверхности ледника (Носенко и др., 2020) и продолжения балансовых наблюдений геодезическим методом (Cogley, 2009; Fischer, 2011).

Благодаря развитию и совершенствованию оборудования и технологий обработки данных геодезический метод в последние годы становится распространенным и эффективным способом оценки баланса массы ледников, рекомендованным к использованию WGMS (Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016-2017)). Первая DGPS-съёмка на леднике ИГАН была проведена в конце периода абляции 2008 г. во время работы экспедиции Института географии РАН (Shahgedanova et al., 2012). Через 10 лет в конце августа 2018 г. была выполнена повторная съёмка с участием ГАУ ЯНАО "Научный центр изvчения Арктики" и МГУ имени М.В. Ломоносова (Носенко и др., 2020). В 2019 г. съёмка не проводилась, но с 2020 по 2023 г. ГАУ ЯНАО "Научный центр изучения Арктики" и МГУ имени М.В. Ломоносова ежегодно проводили DGPS-съёмку ледника в конце периода абляции (последние числа августа).

DGPS-съёмка проводилась по методике, отработанной в предыдущие годы, в режиме RTK (Real Time Kinematic) с использованием комплекта двухчастотных GPS-приемников Trimble. Результаты работ представляли собой массивы данных трёх координат точек, отражающих рельеф поверхности ледника. Уравнивание выполнялось в системе координат WGS 84, UTM зона 41N, модель геоида – EGM96. Точность измерений координат x и y составляет ± 0.05 м, высоты $z - \pm 0.1$ м. Расстояние

Таблица 1. Космические снимки Sentinel-2, использовавшиеся для определения положений границ ледника и сезонного снега на его поверхности в конце периода абляции в 2018–2023 гг.

Дата съёмки	Идентификатор снимка (ID)				
26.08.2018	L1C_T41WPR_A016591_20180826T071901				
22.08.2019	S2B_MSIL1C_20190822T073619_N0500_R092_T41WPR_20230721T005512				
05.09.2020	S2B_MSIL2A_20200905T073619_N0500_R092_T41WPR_20230312T114542				
23.08.2021	S2A_MSIL2A_20210823T072621_N0500_R049_T41WPR_20230120T150641				
08.08.2022	S2A_MSIL2A_20220808T072631_N0400_R049_T41WPQ_20220808T092700				
15.08.2023	S2B_MSIL2A_20230815T071629_N0509_R006_T41WPR_20230815T092704				
07.09.2023	S2B_MSIL1C_20230907T072619_N0509_R049_T41WPR_20230907T100744				



Рис. 3. Покрытие DGPS-съёмкой поверхности северной части ледника ИГАН в 2023 г.

1 – граница ледника, 2 – точки геодезической съёмки поверхности ледника 28.08.2023, 3 – граница северной и южной частей ледника). В подложке спутниковый снимок Sentinel-2 от 15.08.2023

Fig. 3. DGPS imagery coverage of the northern part surface of the IGAN glacier in 2023.

I – glacier boundary, 2 – points of geodetic survey of the glacier surface on 28.08.2023, 3 – boundary of the northern and southern parts of the glacier). Sentinel-2 satellite image from 15.08.2023 as a background

между точками съёмки по профилю, в зависимости от режима съемки, изменялось от 4–5 до 15–20 м, между профилями было порядка 20–30 м. Наклон поверхности ледника меняется плавно и в основном составляет 11°. В качестве геодезических пунктов использовались базисы опорной сети 1963 г., которые были найдены во время съемок 2008 и 2018 гг., а также новые, дополнительно созданные на освободившейся ото льда поверхности ложа ледника (Шеин и др., 2024). Пример покрытия площади ледника точками съемки в 2023 г. показан на рис. 3.

Метод. Для оценки изменения высоты поверхности, объёма и баланса массы ледника в 2018–2023 гг. были построены ЦМР его поверхности по состоянию на конец сезонов абляции 2020, 2021, 2022 и 2023 гг. Изменение объёма льда рассчитывалось как объём, заключенный между поверхностями разновременных ЦМР. Так как все использованные в работе ЦМР отражают состояние поверхности ледника в конце периода абляции, сезонные различия в состоянии поверхности ледника

ЛЁДИСНЕГ №4 2024

практически не вносили дополнительных погрешностей в измерения.

При построении ШМР поля точек съёмок 2020-2023 гг. были корегистрированы с полем точек DGPS съёмки 2018 г. по базисам с известными координатами (путем систематического сдвига в плане и по высоте, нивелирующего разницу в координатах базиса в полях точек разновременных съемок). Для качественной интерполяции при построении ЦМР на конкретный год массивы точек съёмки этого года дополнялись вспомогательными данными вне зоны их покрытия: 1) точками геодезических съёмок других лет, расположенными на стабильных поверхностях вне границ ледника на год съёмки; 2) точками с присвоенными значениями высот со скорректированной ЦМР ArcticDEM v3.0 от 21.08.2016, расположенными за пределами ледника вдоль его северных и западных границ; 3) точками с высотами ЦМР 2018 г., расположенными на северо-западной границе ледника. На основе полученных массивов точек с известными высотами методом линейной интерполяции (инструмент "Топо в растр" в ESRI ArcGIS) строились ЦМР, использованные для оценки изменений высоты поверхности.

Вертикальная погрешность ячеек ЦМР, построенных на основе полей точек геодезической съёмки, зависит не столько от точности значений высот в точках съёмки, сколько от расстояния между точками съемки, степени удаленности от них, кривизны поверхности ледника и ее микрорельефа. Значение вертикальной погрешности построенных ЦМР в зоне охвата геодезической съемкой не превышало ±1.0 м, аналогично предыдущей работе (Носенко и др., 2020).

Вертикальная погрешность вне зон охвата геодезическими съёмками, с покрытием данными скорректированной ЦМР ArcticDEM v3.0 от 21.08.2016 была определена статистически. Из прошедших корегистрацию массивов точек геодезических съёмок 2018 и 2020–2023 гг. были выделены 243 точки, расположенные на стабильных поверхностях (вне ледников, снежников, эрозионных врезов). Далее была рассчитана статистика отклонений высот точек съёмок от высот соответствующих им ячеек ЦМР. Среднеквадратичное отклонение высот составило 1.63 м. Эта величина была принята за вертикальную погрешность высоты ЦМР 2018, 2020, 2021, 2022 и 2023 гг. вне зоны покрытия геодезической съёмкой.

Погрешность определения изменения высоты поверхности ледника зависит от комбинации конкретных ЦМР и соотношения долей площади в них, образованных: 1) зоной перекрытия разновременными геодезическими съёмками; 2) зоной перекрытия геодезической съёмки и производных от ЦМР ArcticDEM v3.0 от 21.08.2016; 3) зоной взаимного перекрытия только производными от ArcticDEM v3.0. Она определялась как среднеквадратичное значение вертикальных погрешностей сравниваемых ЦМР. В зоне взаимного перекрытия разновременными геодезическими съёмками она составляет ± 1.0 м; в зоне покрытия одной из геодезических съёмок и производной от ЦМР ArcticDEM v3.0 $-\pm 1.91$ м; в зоне взаимного перекрытия только производными от ЦМР ArcticDEM v3.0 — ±2.31 м.

Для пересчета изменения высоты поверхности ледника в баланс массы было использовано среднее значение плотности льда 840 кг/м³, полученное в результате полевых измерений на ледниках ИГАН и Обручева в 1959–1963 гг. (Троицкий и др., 1966). Погрешность определения плотности льда принята равной ± 60 кг/м³, аналогично работе (Zemp et al., 2010). Все использованные в исследовании ЦМР и спутниковые снимки были зарегистрированы в проекции UTM (зона 41N) на эллипсоиде WGS 1984. Работа со снимками и данными геодезических съёмок велась в программных продуктах ESRI ArcGIS и QGIS.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты обработки космических снимков и данных DGPS-съёмки свидетельствуют о том, что ледник продолжает сокращаться. За пять лет (с 2018 по 2023 г.) площадь его северной части уменьшилась на 0.08 км² и к 2023 г. составила 0.43 \pm 0.04 км². Сокращение площади происходит в основном за счёт отступания его границы в области языка и вдоль правой боковой морены. Интенсивное таяние за эти годы привело к понижению поверхности ледника, которое на этих участках достигает 6.0 \pm 1.9 м (рис. 4), при этом средняя величина понижения по всей площади северной части ледника составила 3.7 \pm 1.9 м.

Несмотря на неравномерный характер распределения изменений высоты поверхности, в целом оно отражает особенности режима питания ледника, обусловленные лавинным питанием и метелевым переносом снега с западных румбов. Как мы упоминали выше, толщина снежного покрова увеличивается от языка к тыловой части кара (Лаврентьев, 2023). Поэтому язык и центральная часть ледника раньше освобождаются от сезонного снежного покрова, который имеет там меньшую толщину. После освобождения от снега открытая поверхность льда начинает таять еще быстрее изза более низкого альбедо. На космических снимках хорошо видна динамика снеговой границы, которая в течение сезона абляции отступает к бортам и тыловой части кара. Метелевый перенос в период аккумуляции может нарушать эту закономерность. Результаты снегомерных съёмок в 2019, 2021 и 2023 гг. показали, что несмотря на сходный диапазон величин, поля аккумуляции могут отличаться в зависимости от метеоусловий конкретного года. Так, например, по результатам снегомерных съёмок в апреле 2021 г. был обнаружен след мощной струи воздушных масс из понижения в горном обрамлении на северо-западе, создавший зимой 2020/21 г. повышенную концентрацию осадков вдоль осевой линии ледника. Во время балансовых наблюдений в августе 2021 г. там еще сохранялись остатки зимнего снега (Лаврентьев, 2023). Снегомерные съёмки 2019 и 2023 гг. такого явления не зафиксировали. Но, возникая неоднократно и сохраняясь в виде остатков сезонного снега или фирна, неоднородности снегонакопления могут влиять на условия абляции отдельных участков поверхности ледника, задерживая момент начала таяния льда, и, в конечном итоге, проявиться на ЦМР (см. рис. 4) в виде различий в изменении ее высоты. В зависимости от соотношения частоты возникновения таких событий и интенсивности процессов абляции такой след может сохраняться несколько лет, что, возможно, и удалось зафиксировать на коротком интервале наблюдений.

Все эти годы площадь северной части ледника продолжала сокращаться. К 2023 г. ее величина



Рис. 4. Изменение высоты поверхности ледника ИГАН с 2018 по 2023 г.:

(*a*) карта изменения высоты поверхности, *1* – продольный профиль, по которому измерялось изменение высоты поверхности ледника с 1963 по 2023 г.; (*б*) изменение высоты поверхности по профилю

Fig. 4. Change in the surface elevation of the IGAN glacier from 2018 to 2023:

(a) a map of the surface elevation change, 1 - longitudinal profile, along which the glacier surface elevation change was measured from 1963 to 2023; (δ) surface elevation change along the profile

составляла 0.43 ± 0.04 км², сократившись по сравнению с 1963 г. на 38% (табл. 2).

Построенные ЦМР позволили оценить изменения высоты поверхности, объёма и баланса массы (удельного и кумулятивного) северной части ледника ИГАН за пять прошедших лет (2018–2023 гг.) (табл. 3). За период наблюдений с 2018 по 2023 г. поверхность ледника понизилась в среднем на 3.73 м. Ледник за это время потерял 1.593 млн м³ льда. Средний годовой удельный баланс массы был отрицательным -627±45 мм в.э. Эта величина почти в два раза больше, чем в период 2008–2018 гг., когда она составляла -372±63 мм в.э. (Носенко и др., 2020).

НОСЕНКО и др.

Год	1963	2008	2018	2020	2021	2022	2023
Площадь, км ²	0.69±0.01	$0.61 {\pm} 0.02$	$0.53 {\pm} 0.05$	$0.52 {\pm} 0.05$	$0.49 {\pm} 0.05$	$0.44 {\pm} 0.05$	0.43 ± 0.04

Таблица 3. Изменения высоты поверхности, объёма и баланса массы северной части ледника ИГАН за 2018–2023 гг.

Период	Изменение высоты	Изменение	Баланс массы		
	поверхности (среднее), м	объема, млн. м ³	Удельный, мм в.э.	Кумулятивный, мм в.э.	
2018-2023	-3.73	-1.593	-627 ± 45	-3134 ± 224	
2020-2023	-4.82	-2.056	-1349±96	-4046 ± 289	
2018-2020	1.09	1.09	456±33	912±65	
2020-2021	-0.81	-0.81	-683±49	_	
2021-2022	-2.32	-2.32	-1952±139	_	
2022-2023	-1.68	-1.68	-1410 ± 101	_	

Кумулятивный баланс массы за пять лет достиг величины -3134 ± 224 мм в.э.

На этом можно было бы и остановиться, сделав вывод об устойчивости тенденции к сокращению размеров ледника в условиях современного климата. Но при сравнении изменений его объема оказалось, что за весь период наблюдений (2018-2023 гг.) ледник потерял меньше, чем за три последних балансовых года (2020-2023 гг.). Причем разница существенно больше погрешности измерений и составляет 912±65 мм в.э. (см. табл. 3). Это означает, что в промежутке между 2018 и 2020 гг. (в 2019 г. измерения не проводились) баланс массы был положительным. Для последнего десятилетия это уже не совсем привычная ситуация, поскольку у большинства референтных ледников WGMS, расположенных в разных районах нашей планеты, наблюдается устойчивый отрицательный тренд в изменении баланса массы (WGMS, 2023). Так, на Центральном Кавказе на леднике Джанкуат баланс массы ежегодно остается отрицательным на протяжении 18 лет (с 2006 г.) (Popovnin et al., 2024). Аналогичная ситуация наблюдается у ледника Гарабаши на Эльбрусе (Носенко и др., 2024).

Объяснением причины таких колебаний баланса массы ледника ИГАН может быть благоприятная для его режима комбинация метеоусловий в эти два года, которая проявилась на коротком временном интервале положительным балансом массы. В защиту этой версии говорит характер изменений летних температур и зимних осадков (см. рис. 2). На этом рисунке летние температуры воздуха на протяжении трех лет (с 2017 по 2021 г.) слабо меняются в диапазоне значений от 12.3 до 12.7 °С, демонстрируя отставание почти на 1 °С от наметившейся в последние годы линии тренда. И только в 2022/23 г. они снова возрастают и достигают ожидаемого уровня — 14 °С. Это означает, что в 2017—2019 гг. абляция не должна была превышать среднегодовую величину.

В то же время на графике зимних осадков (см. рис. 2) 2019 году соответствует резкое и аномально большое увеличение их количества до 0.398 м. Эта величина почти в 1.5 раза превышает их среднее значение за период с 1951 по 2023 г. и является максимальной в этом районе с начала XXI столетия. Хотя данные реанализа ERA5 для Северного полушария и переоценивают величину водного эквивалента снега, они адекватно отражают его межгодовую изменчивость (Kouki et al., 2023). С учётом этого можно допустить, что 2019 год в отношении зимних осадков был действительно аномальным.

В поисках дополнительных аргументов были проанализированы результаты маршрутных снегомерных съёмок на метеостанции Салехард (далее ГМС) за последние 15 лет (2008–2023 гг.). Распределение максимального и среднего водозапаса в снежном покрове по годам показывает, что 2019 и 2020 гг. отличались от других лет этого промежутка времени аномально большим количеством снега (рис. 5). В эти годы его величина вдвое превышала среднее значение за 15 лет.

Однако этот аргумент тоже мог оказаться недостаточно убедительным, поскольку несмотря на хорошую корреляцию температур воздуха (r = 0.89), установленную в свое время между ГМС Салехард и метеостанцией Большая Хадата, расположенной рядом с ледником ИГАН, связь между осадками была не столь надежной (Иванов, 2013). Но 25 апреля 2019 г. (в конце периода аккумуляции)





Рис. 5. Изменения средней (1) и максимальной (2) величины водозапаса в снежном покрове с 2008 по 2023 г. по данным ГМС Салехард

Fig. 5. Changes in the average (1) and maximum (2) water content in snow cover from 2008 to 2023 according to the Salekhard hydrometeorological station

в рамках международного проекта БРИКС на леднике ИГАН была проведена снегомерная съёмка, которая также показала большую величину аккумуляции, аналогичную наблюдавшимся в особо снежные годы прошлого века. Толщина снежного покрова на леднике в области питания в 2019 г. превышала 9 м (Лаврентьев и др., 2023). Таким образом, в этот год не исключена и возможная связь повышенной аккумуляции на леднике с пиком снегозапасов по данным ГМС Салехард.

350

В годы прямых наблюдений на леднике ИГАН была отмечена хорошая связь годового баланса с высотой положения границы питания (r = 0.86) (Волошина, 1988). Поэтому дополнительно мы решили посмотреть на межгодовую динамику положения снеговой границы в конце периода абляции, которая представляет собой интегральный гляциоклиматический показатель балансового состояния ледника. Для этого мы сравнили изображения поверхности ледника на космических снимках Sentinel-2 в конце периода абляции за пять лет – с 2018 по 2023 г.

При отсутствии облачности высокая частота проведения съёмок с этого спутника обеспечивает регистрацию момента начала осенних снегопадов (конца периода абляции) с точностью в несколько дней. Как показали наблюдения, в последние годы таяние завершается в конце августа – первых числах сентября. Наиболее низкое положение в эти годы снеговая линия занимала 22 августа 2019 г. и находилась на высоте ниже 900 м. К этой дате площадь ледника, освободившаяся от сезонного снега, не превышала 30% и больше уже не увеличилась (рис. 6, a), а после 6 сентября на леднике выпал снег. В предыдущий 2018 год к 27 августа было свободно порядка 50% площади, а через неделю началась зима. В последующие годы (2020-2023 гг.) к приходу зимы сезонного снега на леднике оставалось все меньше и коэффициент AAR (соотношение площади аккумуляции к площади всего ледника) стремился к нулю. Состояние поверхность ледника в 2022 г. можно увидеть на рис. 1, который был сделан 28 августа при проведении DGPS-съёмки. Снега на ней практически не осталось. Подобная ситуация наблюдалась и в 2023 г. На космическом снимке Sentinel-2, сделанном 7 сентября, видна только узкая полоска остатков зимнего лавинного снега, сохранившегося на поверхности ледника у подножия задней стенки кара в его северной части. Южная часть ледника освободилась от снега практически полностью (см. рис. 6, б).

Если заглянуть в прошлое, то аналогичная с 2019 г. ситуация наблюдалась в 1968 г., когда из-за обильных зимних осадков и холодного лета снег не успел растаять на всей поверхности ледника ИГАН и годовой баланс был положительным (Волошина, 1988). Поэтому 30% освободившейся к концу лета от снега площади ледника свидетельствуют о том, что метеоусловия 2019 г. были благоприятными для увеличения его массы и полученные нами результаты отражают реальную картину ее изменения за период 2018-2023 гг.



Рис. 6. Состояние поверхности ледника ИГАН на снимках Sentinel-2 в конце периода абляции: (*a*) 22.08.2019; (*б*) 07.09.2023

Fig. 6. The state of the IGAN glacier surface in Sentinel-2 images at the end of the ablation period: (a) 22.08.2019; (b) 07.09.2023

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты оценки изменений баланса массы ледника ИГАН геодезическим методом за 2018-2023 гг. показали, что сокращение размеров ледника продолжается и скорость потери массы за последние пять лет увеличилась почти вдвое по сравнению с предыдущим периодом 2008-2018 гг. (c -372±63 до -627±45 мм в.э.). Основной причиной, определяющей эту тенденцию, служит повышение летних температур воздуха, происходящее на фоне практически постоянного количества выпадающих зимних осадков на протяжении периода наблюдений. Дополнительными факторами, участвующими в этом процессе, являются особенности рельефа, экспозиция ледника и возможные изменения радиационного баланса, которые требуют дополнительных исследований.

Для территории Полярного Урала характерна интенсивная шиклоническая деятельность. обусловленная особенностями географического положения. Она сопровождается обильным выпадением осадков и резкими колебаниями температур воздуха как в зимний, так и в летний сезоны. Высокая контрастность метеорологических условий в периоды аккумуляции и абляции может быть причиной значительных колебаний составляющих баланса массы, которые неоднократно отмечались в прошлом. Регулярные наблюдения последних пяти лет позволили установить, что на фоне общей тенденции к сокращению и сейчас возможны ситуации, когда из-за благоприятной комбинации метеоусловий годовой баланс массы ледника может быть положительным.

Благодарности. Экспедиционная часть работ выполнена в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального НОЦ "Прогноз деградации мерзлоты и технология автоматизированного контроля несущей способности мерзлых грунтов под объектами капитального строительства". Обработка и анализ результатов произведены при поддержке темы Госзадания ИГ РАН № FMWS-2024-0004.

Acknowledgements. The expedition part of the work was carried out within the framework of the West Siberian Interregional Scientific and Educational Center project "Forecast of Permafrost Degradation and Technology of Automated Monitoring of the Bearing Capacity of Frozen Soils under Capital Construction Projects". Analytical studies were carried out within the framework of the research project FMWS-2024-0004 of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Волошина А.П. Некоторые итоги исследований баланса массы ледников Полярного Урала // МГИ. 1988. Вып. 61. С. 44–51.
- Иванов М.Н. Эволюция оледенения Полярного Урала в позднем голоцене. М.: Типография МГУ, 2013. 200 с.
- Каталог ледников СССР. Т. 3. Северный Край. Ч. 3. Урал. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 52 с.
- Лаврентьев И.И., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Шеин 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

Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Иванов М.Н., Синицкий 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., Смирнов А.М., Лаврентьев И.И., Кутузов С.С., Абрамов А.А. Динамика показателей баланса массы ледника Гарабаши (Эльбрус) в условиях современного климата // Сб. тезисов Всеросс. открытой конф. "Состояние горных ледников в условиях современного изменения климата" г. Нальчик, 30–31 мая 2024 г. ISBN 978-5-907725-74-4. С. 23–24.

https://vgistikhiya.ru/images/kart/Тезисы___31.05.pdf

- Торопов П.А., Алешина М.А., Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Никитин С.А. Современная деградация горного оледенения Алтая, ее последствия и возможные причины // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 118–130.
- 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.
- Шеин А.Н., Иванов М.Н., Носенко Г.А., Лаврентьев И.И. Исследования ледников ИГАН, Анучина и Фотогеодезистов в 2023 г. // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2024. № 1 (122). С. 50–68.

https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2024.122.1.004

- Цветков Д.Г. 10 лет фотогеодезических работ на ледниках Полярного Урала (Опыт наземной съёмки и составления планов малых ледников с приложением топокарт ледников ИГАН и Обручева в масштабе 1:5000) // МГИ. 1970. Вып. 16. С. 245–257.
- ArcticDEM // Электронный ресурс: https://www.pgc.umn.edu/guides/arcticdem/ datadescription/ Дата обращения: 16.07.2024.
- *Cogley J.G.* Geodetic and direct mass-balance measurements: comparison and joint analysis. Annals of Glaciology. 2009. V. 50. P. 96–100. https://doi.org/10.3189/172756409787769744
- ECMWF ERA5 (0.5×0.5 deg) // Электронный реcypc. https://climatereanalyzer.org/reanalysis/ monthly_tseries/ Дата обращения: 20.08.2024.
- *Fischer A*. Comparison of direct and geodetic mass balances on a multi-annual time scale. The Cryosphere. 2011. V. 5. Is. 1. P. 107–124.

https://doi.org/10.5194/tc-5-107-2011

ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/ WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. 274 pp. Publication based on database version. https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2019-12

IPCC, 2023: 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 [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 2023. 184 p.

https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Kouki K., Luojus K., Riihelä A. Evaluation of snow cover properties in ERA5 and ERA5-Land with several satellite-based datasets in the Northern Hemisphere in spring 1982–2018 // The Cryosphere. 2023. V. 17. Is. 12. P. 5007–5026.

https://doi.org/10.5194/tc-17-5007-2023

- Korneva I.A., Toropov P.A., Muraviev A.Y., Aleshina M.A. Climatic factors affecting Kamchatka glacier recession // International Journ. of Climatology. 2024. V. 44. No. 2. P. 345–369. https://doi.org/10.1002/joc.8328
- Popovnin V., Gubanov A., Lisak V., Toropov P. Recent Mass Balance Anomalies on the Djankuat Glacier, Northern Caucasus // Atmosphere. 2024. V. 15. Iss. 1 107. https://doi.org/10.3390/atmos15010107
- SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR.Is.41.03/07/2019: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/ Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report
- Shahgedanova M., Nosenko G., Bushueva I., Ivanov M. Changes in area and geodetic mass balance of small glaciers, Polar Urals, Russia 1950–2008 // Journ. of Glaciology. 2012. V. 58. No. 211. P. 953–964. https://doi.org/10.3189/2012JoG11J233
- *Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st // International Journ. of Climatology. 2019. V. 39. P. 4703–4720.
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Nosenko G.A., Khromova T.E., Nikitin S.A. Modern deglaciation of the Altai mountains: Effects and possible causes. Russian Meteorology and Hydrology. 2020. V. 45. P. 368–376.
- Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Bannwart J., Rastner P., Paul F., Hoelzle M. Global Glacier Change Bulletin. 2016–2017. No. 3.
- Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Welty E.Z., Dussaillant I., Bannwart J. WGMS 2023. Global Glacier Change Bulletin. 2020–2021. No. 5.
- ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/ WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. 134 p. Publication based on database version. https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2023-09
- Zemp M., Jansson P., Holmlund P., Gartner-Roer I., Koblet T., Thee P., Haeberli W. Reanalysis of multitemporal aerial images of StorglaciaËren, Sweden (1959–99).
 Part 2: Comparison of glaciological and volumetric mass balances // The Cryosphere. 2010. V. 4. No. 3.
 P. 345–357. https://doi.org/10.5194/tc-4-345-2010

Citation: Nosenko G.A., Muraviev A.Ya., Shein A.N., Ivanov M.N., Lavrentiev I.I., Leopold J.K., Sinitsky A.I., Tokmakov V.V. Mass balance of IGAN Glacier (the Polar Urals) in 2018–2023. Led i Sneg. Ice and Snow. 2024, 64 (4): 567–579. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673424040074

Mass balance of IGAN Glacier (the Polar Urals) in 2018–2023

G. A. Nosenko^{1,#}, A. Ya. Muraviev¹, A. N. Shein², M. N. Ivanov³, I. I. Lavrentiev¹, J. K. Leopold², A. I. Sinitsky², V. V. Tokmakov⁴

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; ²Scientific Center for Arctic Studies, Salekhard, Russia; ³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ⁴Techstroyproekt LLC, Cheboksary, Russia [#]e-mail: nosenko@igras.ru

Received September 18, 2024 / Revised September 25, 2024 / Accepted October 7, 2024

The results of observations of the mass balance of the IGAN glacier by the geodetic method using DGPS surveys and constructed multi-temporal digital models of the glacier surface (DEM) for the period 2018– 2023 are presented. Comparison with data from previous years (1963, 2008, 2018) obtained using a similar methodology allowed to assess changes in glacier mass over the entire observation period and its features over the short span of the last five years. It was found that the glacier continues to shrink. In 2023, the area of its northern part was 0.43 ± 0.04 km², having decreased by 38% compared to 1963. From 2018 to 2023, the glacier surface dropped by an average of 3.73 m. During this period, the glacier lost 1.593×10^6 m³ of ice. The average annual specific mass balance was negative -627 ± 45 mm w.e. This value is almost twice as high as in the period 2008-2018, when it was -372 ± 63 mm w.e. The cumulative mass balance over five years reached -3134 ± 224 mm w.e. The main cause that determines the glacier shrinkage throughout the entire observation period from 1963 to 2023 is the increase in summer air temperatures occurring on the background of practically unchanged winter precipitation. Along with this, it was found that the glacier lost less over the entire observation period (2018–2023) than in the last three balance years (2020-2023). A possible explanation for this could be the positive mass balance in 2019, in which the DGPS survey could not be conducted. To confirm this assumption, data from meteorological observations of air temperature, precipitation, snow measurement and monitoring of the snow line from satellite images at the end of the ablation period were used. Based on the analysis of these data, a conclusion was made that such a situation was possible due to the anomalous winter precipitation and cold summer in that specific year.

Keywords: glacier shrinkage, geodetic mass balance, satellite imagery, Polar Urals

REFERENCES

- Voloshina A.P. Some results of the mass balance studies of the Polar Urals glaciers. *Materialy Glyaciologichkih Issledovanij*. Data of Glaciological Studies. 1988, 61: 44–51. [In Russian].
- *Ivanov M.N.* Evolution of the Polar Urals glaciation in the late Holocene. Moscow: MSU Publishing House, 2013: 200 p. [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory.V. 3. Northern Edge. Is. 3 Ural. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1966: 52 p. [In Russian].

Lavrentiev I.I., Nosenko G.A., Glazovsky, A.F., Shein A.N., Ivanov M.N., Leopold Ya.K. Ice and snow thickness of the IGAN Glacier in the Polar Urals from groundbased 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].

- 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., Smirnov A.M., Lavrentiev I.I., Kutuzov S.S., Abramov A.A. Dinamika pokazateley balansa massy lednika Garabashi (El'brus) v usloviyakh sovremennogo klimata. The mass balance indicators dynamics of the Garabashi (Elbrus) glacier under modern climate conditions. Abstracts of All-Russian open conference "State of mountain glaciers in the context of modern climate change". Nalchik, may 30–31. ISBN 978-5-907725-74-4. P. 23–24. https://vgistikhiya.ru/images/kart/Тезисы–31.05.pdf
- Troitsky L.S., Khodakov V.G., Mikhalev V.I., Guskov A.S., Lebedeva I.M., Adamenko V.N., Zhivko-

579

vich L.A. Oledenenie Urala. The glaciation of the Urals. Moscow: Nauka, 1966: 355 p. [In Russian].

- Toropov P.A., Aleshina M.A., Nosenko G.A., Khromova T.E., Nikitin S.A. Modern deglaciation of the altai mountains: Effects and possible causes. *Meteorology* and Hydrology. Meteorology and Hydrology. 2020, 5: 118–130. [In Russian].
- Shein A.N., Ivanov M.N., Nosenko G.A., Lavrentiev I.I., The study of IGAN, Anuchin and Photogeodesists glaciers in 2023. Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Nauchny Vestnik Yamalo-Nenetskogo Autonomogo Okruga. 2024, 1 (122): 50– 68. https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2024.122.1.004 [In Russian].
- *Tsvetkov D.G.* 10 years of photogeodetic works on the glaciers of the Polar Urals (Experience of land surveying and mapping of small glaciers with the application of topograps of the IGAN and Obruchev glaciers at a scale of 1:5000. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1970, 16: 245–257. [In Russian].
- ArcticDEM. Retrieved from: https://www.pgc.umn.edu/ guides/arcticdem/datadescription/
- *Cogley J.G.* Geodetic and direct mass-balance measurements: comparison and joint analysis. Annals of Glaciology. 2009, 50 (50): 96–100. https://doi.org/10.3189/172756409787769744
- ECMWF ERA5 (0.5×0.5 deg). Retrieved from: https:// climatereanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/
- *Fischer A*. Comparison of direct and geodetic mass balances on a multi-annual time scale. The Cryosphere. 2011, 5 (1): 107–124. https://doi.org/10.5194/tc-5-107-2011
- ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/ WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. 274 p. Publication based on database version. https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2019-12
- IPCC, 2023: 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 [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 2023: 184 p.

https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Kouki K., Luojus K., Riihelä A. Evaluation of snow cover properties in ERA5 and ERA5-Land with several satellite-based datasets in the Northern Hemisphere in spring 1982–2018. The Cryosphere. 2023, 17 (12): 5007-5026.

https://doi.org/10.5194/tc-17-5007-2023

Korneva I.A., Toropov P.A., Muraviev A. Ya., Aleshina M.A. Climatic factors affecting Kamchatka glacier recession. International Journ. of Climatology. 2024, 44 (2): 345–369.

https://doi.org/10.1002/joc.8328

- Popovnin V., Gubanov A., Lisak V., Toropov P. Recent Mass Balance Anomalies on the Djankuat Glacier, Northern Caucasus. Atmosphere. 2024, 15: 107. https://doi.org/10.3390/atmos15010107
- SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR.Is.41.03/07/2019: https://sentinel.esa.int/ documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_ Quality_Report
- Shahgedanova M., Nosenko G., Bushueva I., Ivanov M. Changes in area and geodetic mass balance of small glaciers, Polar Urals, Russia 1950–2008. Journ. of Glaciology. 2012, 58 (211): 953–964. https://doi.org/10.3189/2012JoG11J233
- *Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st. International Journal of Climatology. 2019, 39: 4703–4720.
- *Toropov P.A., Aleshina M.A., Nosenko G.A., Khromova T.E., Nikitin S.A.* Modern deglaciation of the altai mountains: Effects and possible causes. Russian Meteorology and Hydrology. 2020, 45: 368–376.
- Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Bannwart J., Rastner P., Paul F., Hoelzle M. Global Glacier Change Bulletin. 2016–2017: 3.
- Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Welty E.Z., Dussaillant I., Bannwart J. WGMS 2023. Global Glacier Change Bulletin. 2020–2021: 5.
- ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. 134 p. Publication based on database version. https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2023-09
- Zemp M., Jansson P., Holmlund P., Gartner-Roer I., Koblet T., Thee P., Haeberli W. Reanalysis of multitemporal aerial images of Storglacia Eren, Sweden (1959–99).
 Part 2: Comparison of glaciological and volumetric mass balances. The Cryosphere. 2010, 4 (3): 345–357. https://doi.org/10.5194/tc-4-345-2010