

Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.324

doi: 10.31857/S2076673422010112

Баланс массы ледников Корякского нагорья Нежданный и Соседний за 1961–2016 гг.

© 2022 г. Г.А. Носенко*, А.Я. Муравьев, С.А. Никитин

Институт географии РАН, Москва, Россия

*nosenko@igras.ru

Mass balance of the Nezhdanny and Sosedny glaciers of the Koryak Highlands in 1961–2016

G.A. Nosenko*, A.Ya. Muraviev, S.A. Nikitin

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*nosenko@igras.ru

Received August 6, 2020 / Revised September 28, 2021 / Accepted December 23, 2021

Keywords: north-east Asia, Koryak Highlands, glaciers, historical data, satellite imagery, geodetic mass balance.

Summary

The Koryak Highland is one of the areas of the present-day mountain glaciation in the north-east of the Asian part of Russia. Its remoteness and inaccessibility are serious obstacles to the ground-based (field) researches, so our knowledge of the regime of glaciers in this area is still incomplete. Objective of this study was to obtain data on changes in the state of glaciers for about a half-century period. For this purpose, the following information was used: results of ground-based phototheodolite surveys of two glaciers on the Ledyanaya Mountain massif (2,453 m) in the central part of the highland, carried out in August 1961 by the expedition of the Institute of Geography of the USSR Academy of Sciences, data from recent space surveys SPOT 6, and a digital relief model ArcticDEM v3.0 2016. The glaciers under investigation are Nezhdanny and Sosedny. Using these data, the mass balance of glaciers was estimated by the geodetic method. It was found that for 55 years, the area of glaciers decreased by 0.75 km² (15.2%), the volume – by 71.74 ± 16.51 million m³, and the average lowering in height of the surface – 16.7 m. For the period 1961–2016 the average annual specific mass balance of glaciers was equal to -0.362 ± 0.065 m w.e. yr⁻¹. In this region the main factors exerting influence upon changes in the size of glaciers are the following: first, the summer air temperature rise of about 2 °C since the end of the twentieth century, and the second, a decrease in the amount of solid precipitation by 0.15 m w.e. per year. Degradation of glaciers is caused by changes in conditions of glacial alimentation, increased ablation, and the active cryogenic factors. At the same time, a new rock glacier is being formed in the alimentation area. It is possible that in the future the new one will replace the degrading glacier.

Citation: Nosenko G.A., Muraviev A.Ya., Nikitin S.A. Mass balance of the Nezhdanny and Sosedny glaciers of the Koryak Highlands in 1961–2016. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (1): 5–16. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673422010112.

Поступила 6 августа 2021 г. / После доработки 28 сентября 2021 г. / Принята к печати 23 декабря 2021 г.

Ключевые слова: северо-восток Азии, Корякское нагорье, ледники, исторические данные, космические съёмки, геодезический баланс массы.

Оценены изменения объёма двух ледников в центральной части Корякского нагорья за период 1961–2016 гг. с использованием исторического топоплана масштаба 1:5000 и данных современных космических съёмок высокого разрешения. Площадь этих ледников сократилась на 15,2% (0,75 км²), объём – на 71,74±16,51 млн м³. Их поверхность понизилась в среднем на 16,7 м, а средний удельный баланс массы составил $-0,362 \pm 0,065$ м в.э. в год. На фоне деградации ледника развивается процесс его преобразования в каменный глетчер.

Введение

Несмотря на постоянное расширение наших знаний о современных изменениях ледников во всём мире, оледенение Корякского нагорья до сих

пор остаётся малоизученным. Занимая обширную территорию на северо-востоке Азиатской части России, нагорье примыкает к побережью Берингова моря между Анадырским заливом и п-ом Камчатка. Овальное в плане сводообраз-

ное поднятие с высотами 500–600 м у окраин и высшей точкой 2453 м (гора Ледяная в центре нагорья) сильно расчленено в результате разновозрастных тектонических движений и разрушительной деятельности рек и ледников [1]. Несколько стадий активизации криосферных процессов на протяжении голоцена привели к многообразию гляциально-криогенных образований, существующих в настоящее время в этом районе [2]. Большое количество переходных состояний и форм между классическими ледниками и каменными глетчерами абляциянно-мерзлотного типов затрудняет их идентификацию и возможность использования в качестве индикаторов происходящих изменений современного климата. Удалённость и труднодоступность объекта исследований до сих пор — серьёзное препятствие для организации наземных наблюдений.

Первые сведения о ледниках Корякского нагорья были получены в 1937 г. [3]. Геологи обнаружили каровые и долинные ледники в верховьях р. Ледниковая и посетили один из них. В 1955 г. были опубликованы результаты подсчёта числа ледников по данным аэрофотосъёмки [4]. Материалы последующих исследований постепенно дополняли и уточняли неоднородную и разноречивую информацию о числе и параметрах ледников Корякского нагорья [5], и в наиболее полном виде она была представлена в Каталоге ледников СССР [6].

Первые инструментальные гляциологические исследования в этом районе были выполнены в 1961 г. экспедицией Института географии АН СССР [1] в рамках проводившихся работ по каталогизации ледников СССР. Небольшой гляциологический отряд из четырёх человек в течение месяца (17 июля — 22 августа) выполнил фототеодолитную съёмку двух ледников в центре нагорья в районе горы Ледяной, провёл измерения скоростей движения их поверхности, исследования условий питания ледников, метеонаблюдения и описал особенности их морфологии. С тех пор подобные исследования в этом районе не проводились.

В отделе гляциологии ИГ РАН сохранился оригинал топоплана в масштабе 1:5000 с сечением рельефа 5 м на поверхности ледников Нежданного и Соседнего, составленного по результатам фототеодолитной съёмки специалистом по фотограмметрии Д.Г. Цветковым. Это позволило хотя бы частично восполнить пробел в информации о режиме ледников данного региона. В настоящей

работе показаны результаты использования топоплана 1961 г. и современных дистанционных данных для оценки изменений массы ледников в центральной части Корякского нагорья.

Район и объект исследований

Корякское нагорье находится на северо-востоке Азиатской части России, на побережье Берингова моря между Анадырским заливом и п-ом Камчатка. Протяжённость его с юга на север порядка 900 км, ширина около 300 км. Диапазон преобладающих высот 600–1800 м; высшая точка в центральной части — гора Ледяная (2453 м) [1]. Мы вели наблюдения на двух ледниках — Нежданном и Соседнем (рис. 1), на которых в 1961 г. была проведена стереофотограмметрическая съёмка. Ледники начинаются на северном склоне горы Ледяной. Сливаясь, они образуют сложно-долинный ледник, общая площадь которого на момент посещения составляла около 5 км². Язык ледника спускался в долину р. Укелят Правая до высоты 1000 м, фирновая линия находилась на уровне 1600 м, высшая точка ледника — вершина горы Ледяной.

Северные широты (60–64° с.ш.) и муссонный характер климата определяют внутригодовое распределение температур и осадков на территории нагорья. Для него характерна не очень холодная (относительно) и продолжительная зима (до восьми месяцев), в течение которой преобладают сухие и охлаждённые воздушные массы сибирского антициклона. Осадки приносят вторжения тихоокеанских циклонов. Основное количество твёрдых осадков выпадает в первую половину зимы, но их распределение по территории неравномерно. Частота и мощность их выпадения резко уменьшаются по мере удаления от побережья. Лето — короткое и холодное из-за преобладающего переноса воздуха с океана на сушу. В работе [2] отмечено, что наибольший градиент роста континентальности соответствует центральной части Корякского нагорья — массиву горы Ледяной. Однако, как показали результаты полевых исследований и данные современных космических съёмок, это не служит препятствием для существования ледников и каменных глетчеров в наиболее поднятых центральной и северной частях массива. В этом районе на больших

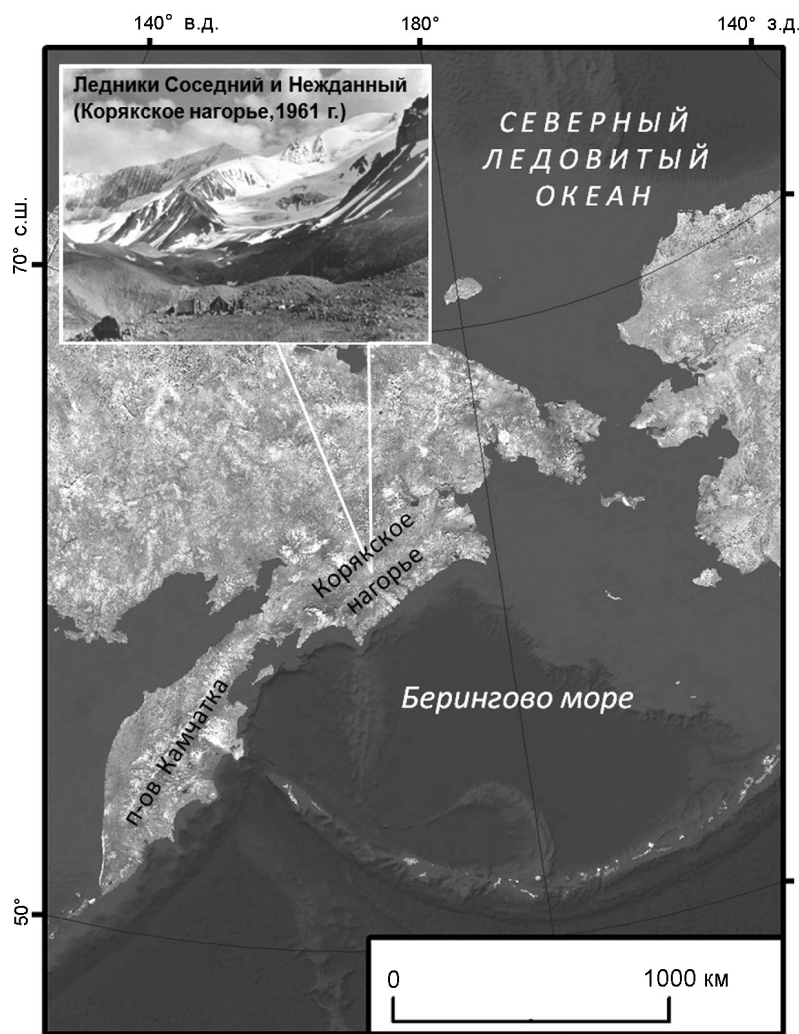


Рис. 1. Район и объект исследований (на врезке — лагерь гляциологов у фронта ледников Нежданного и Соседнего (Корякское нагорье, фото 1961 г.)

Fig. 1. Region and object of study area (inset — the camp of glaciologists at the tongue of the Nezhdannny and Sosedny glaciers, Koryak Highlands, photo 1961)

высотах снег может выпадать и летом. В июле—августе 1961 г. на леднике Нежданном было неоднократно зафиксировано выпадение твёрдых осадков, когда толщина снежного покрова на высоте 1400 м достигала 30 см [1]. По предварительной оценке, площадь оледенения массива горы Ледяной в 1961 г. составляла около 20 км² [1].

Близко расположенных к району исследований метеостанций нет, но представление о характере изменений основных климатических факторов (летних температур воздуха и зимних осадков), влияющих на режим и баланс массы ледников, можно получить по данным реанализа (ECMWF ERA5 (0,5 × 0,5 deg) [7]. Из графика изменения этих климатических показателей (рис. 2) следует, что температура и осадки имеют разнонаправленные тренды с середины XX в. Температуры увеличились за этот период примерно на 2 °С, а твёрдые осадки имеют слабовыраженный отрица-

тельный тренд и уменьшились на 0,15 м в.э. Исходя из этого, естественно предположить, что баланс массы у ледников должен быть отрицательным.

Данные и методы

Наличие топоплана 1961 г. и материалов современных космических съёмок позволило реализовать геодезический метод для количественной оценки величины баланса массы дистанционно за период с момента его создания по 2016 г. В работе использовались следующие материалы: 1) топоплан ледников Нежданного и Соседнего масштаба 1:5000, отражающий состояние их поверхности в 1961 г., с сечением рельефа на поверхности ледника 5 м (рис. 3, а); 2) мозаика цифровой модели рельефа (ЦМР) ArcticDEM v3.0 [8] с пространственным разрешением 2 м (по данным

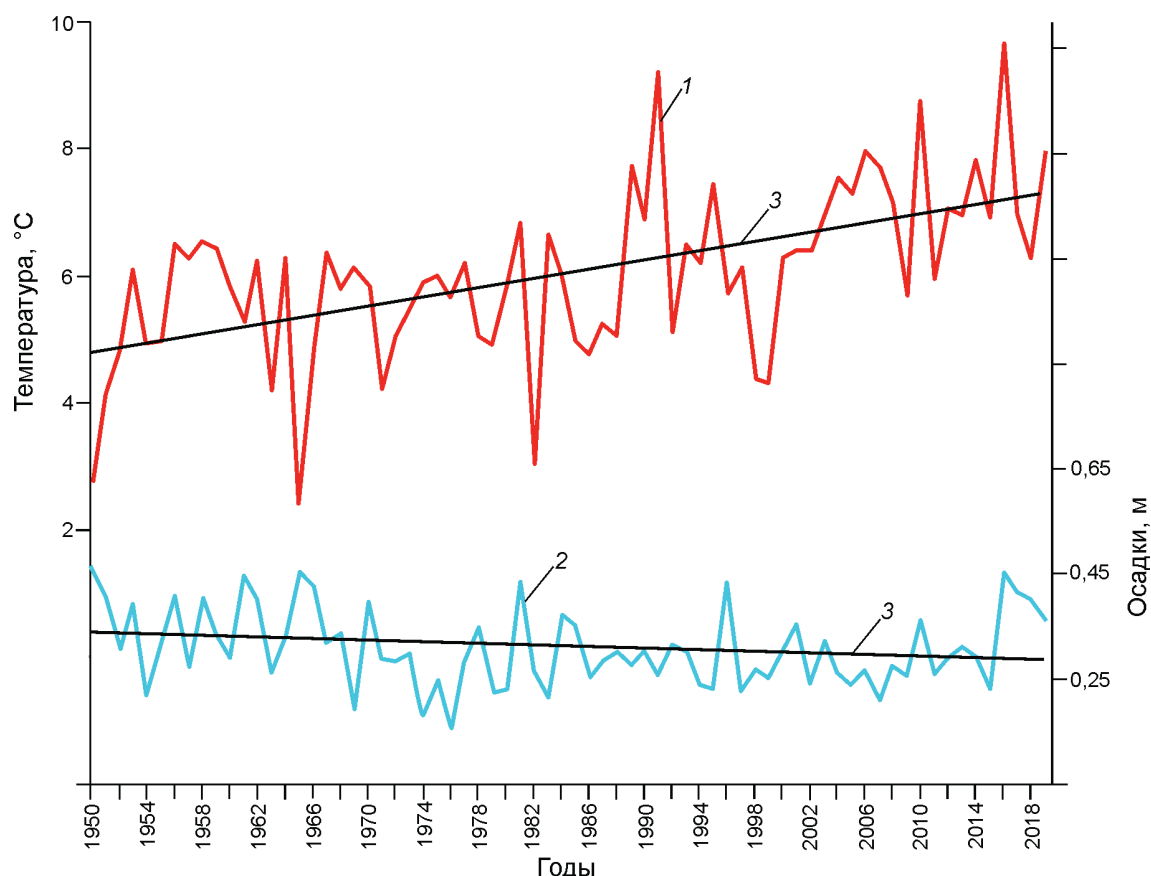


Рис. 2. Изменения средних летних температур воздуха (июнь–август) и сумм зимних осадков (октябрь–апрель) в районе исследований по данным реанализа ECMWF ERA5 [7]:

1 – температура; 2 – осадки; 3 – линии трендов изменения температуры и осадков в период 1950–2019 гг.

Fig. 2. Changes in average summer air temperatures (June–August) and total winter precipitation (October–April) in the study area according to ECMWF ERA5 reanalysis data [7]:

1 – temperature; 2 – precipitation; 3 – trend lines of temperature and precipitation changes in the period 1950–2019

2016 г.); 3) отдельные фрагменты («strip») ЦМР ArcticDEM v3.0 от 22.03.2015 г. и 23.06.2017 г. с пространственным разрешением 2 м [8]; 4) фрагменты спутниковых снимков SPOT 6 (орто) от 05.08.2017 г. и 25.08.2017 г. (см. рис. 3, б).

Топоплан, ЦМР и спутниковые снимки обрабатывались в программных пакетах ESRI ArcGIS и QGIS. При этом топоплан и данные дистанционного зондирования Земли были зарегистрированы в проекции UTM зоны 59N на эллипсоиде WGS 1984. Привязка топоплана и его регистрация в проекции UTM выполнена с использованием фрагментов спутниковых снимков SPOT 6 (орто) по четырём опорным точкам, уверенно идентифицируемым на топоплане и спутниковых снимках. При этом расхождения не превышали ± 7 м. Горизонтالي и границы ледников на топоплане 1961 г. были оцифрова-

ны вручную. Исходя из погрешности отображения контуров на топоплане, составляющей $\pm 0,5$ мм (в масштабе топоплана $\pm 2,5$ м), и максимальной измеренной невязки опорных точек ($\pm 7,0$ м), погрешность пространственного позиционирования топоплана относительно спутниковых снимков SPOT 6 можно оценить в 7,4 м (среднеквадратичное отклонение). На основе оцифрованных горизонталей топоплана была создана ЦМР ледников Нежданного и Соседнего, а также приледниковых участков по состоянию на 1961 г. Точность определения высоты поверхности ледников на топоплане составляет $\pm 2,5$ м (половина высоты сечения рельефа).

Пространственное положение границ ледников в 2017 г. определено ручным дешифрированием фрагментов двух спутниковых снимков SPOT 6 (орто): 1) от 25.08.2017 г., охватывающе-

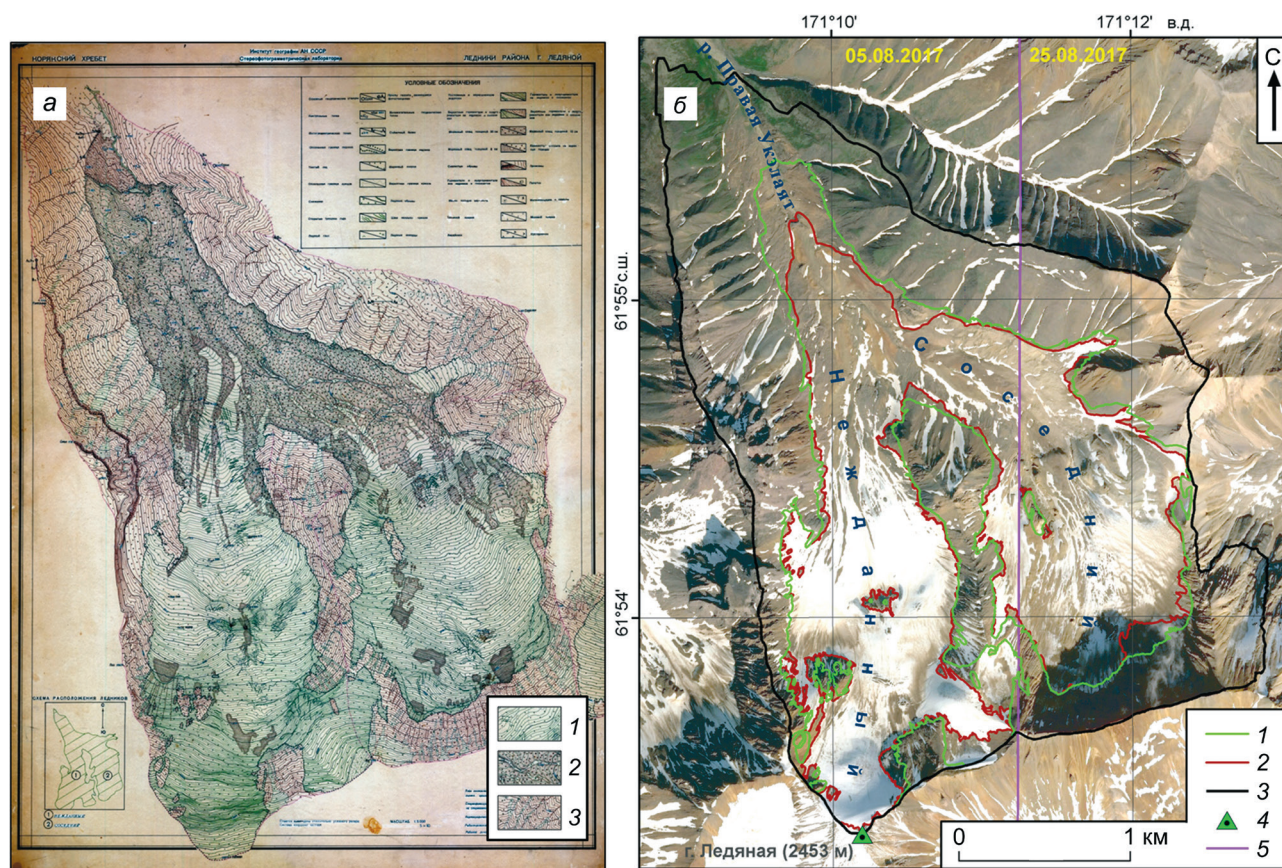


Рис. 3. Объект исследований — ледники Нежданный и Соседний.

a — топоплан ледников Нежданного и Соседнего, масштаб 1:5000, 1961 г.: 1 — поверхность ледника, свободная от моренного покрова; 2 — моренный покров; 3 — скалы; *б* — фрагменты снимков SPOT 6: 1 — границы ледников в 1961 г.; 2 — границы ледников в 2017 г.; 3 — границы территории, охваченной данными топоплана 1961 г.; 4 — вершина горы Ледяная (2453 м); 5 — граница между фрагментами спутниковых снимков SPOT 6 от 05.08.2017 г. и 25.08.2017 г.

Fig. 3. The object of research is the Nezhdanny and Sosedny glaciers.

a — a topographic map of the Nezhdanny and Sosedny glaciers, scale 1:5000, 1961: 1 — glacier surface free from moraine cover; 2 — moraine cover; 3 — rocks; *b* — fragments of SPOT 6 images: 1 — glacier boundaries in 1961; 2 — glacier boundaries in 2017; 3 — boundaries of the territory covered by the 1961 topographic plan; 4 — top of Ledianaya mountain (2453 m); 5 — border between fragments of SPOT 6 satellite images from 08/05/2017 and 08/25/2017

го ледник Нежданный и западную часть ледника Соседнего; 2) от 05.08.2017 г., охватывающего восточную часть ледника Соседнего. Погрешность определения пространственного положения границ ледников на этих снимках составляет ± 6 м (разрешение мультиспектральных снимков SPOT 6 при съёмке в нади́р). Итоговая величина площади ледников в 2017 г. равнялась $4,18 \pm 0,18$ км². В качестве современной ЦМР для сравнения с топопланом 1961 г. была использована ArcticDEM v3.0 с пространственным разрешением 2 м. Покры́тие мозаики данной ЦМР на исследуемую территорию создано из скорректированных с использованием данных съёмки IceSAT результатов обработки спут-

никовых снимков WorldView-3 от 14.05.2016 г. Мозаика покрывает 81,5% площади ледников Нежданного и Соседнего в границах 1961 г. Для покрытия данными не охваченных участков ледников использованы фрагменты полос («strip») мозаики данной ЦМР от 22.03.2015 г. и 23.06.2017 г., созданных на основе спутниковых снимков WorldView-2 и WorldView-1 соответственно. В результате не обеспечено данными Arctic DEM v3.0 оказалось только два участка в верхней части области питания ледника Соседнего, общая площадь которых — около 0,03 км² (0,6% общей площади ледников) (рис. 4).

Точность пространственной привязки спутниковых снимков WorldView-1, WorldView-2 и

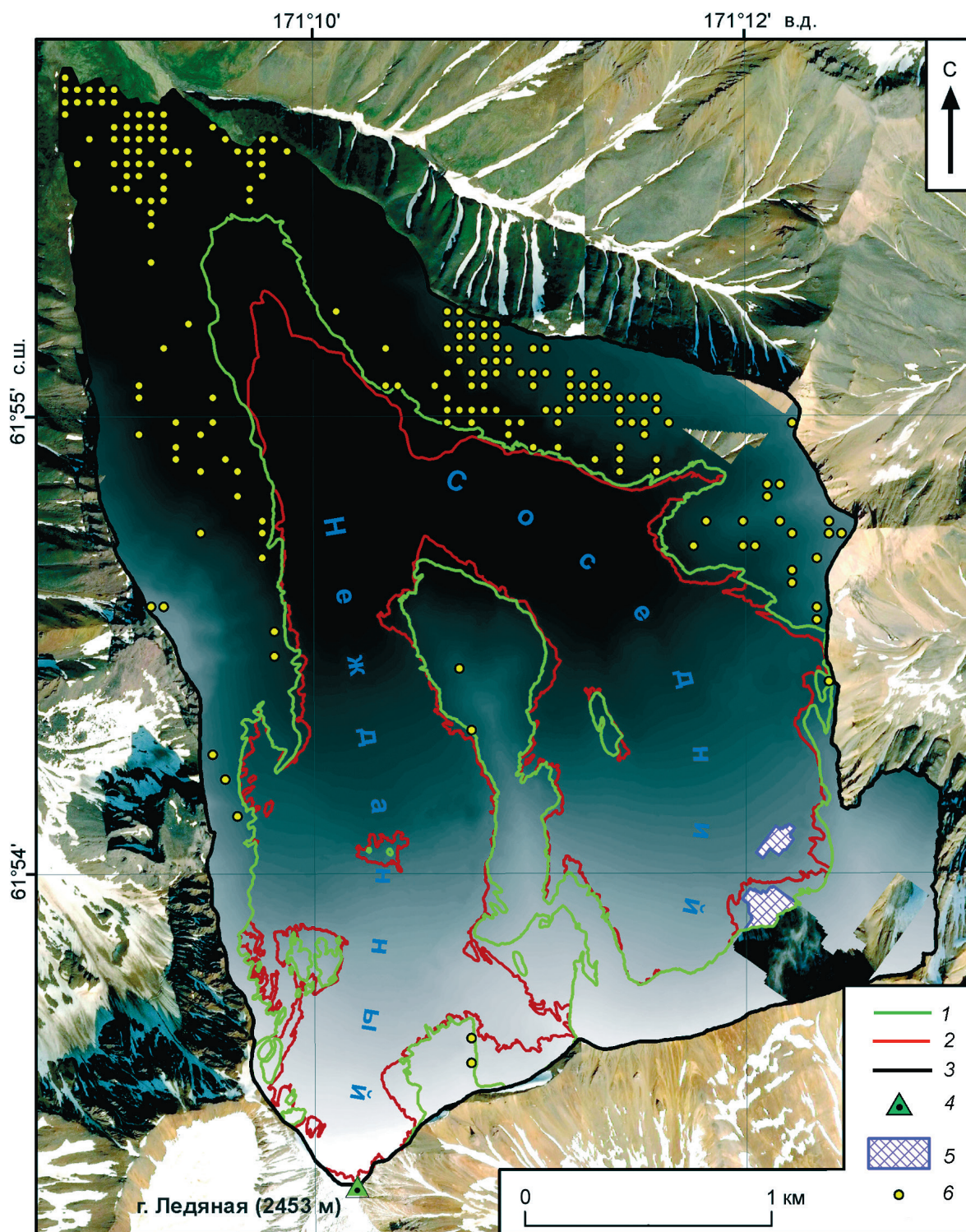


Рис. 4. Границы и точки корегистрации цифровых моделей рельефа (ЦМР), использованные в работе: 1 – границы ледников в 1961 г.; 2 – границы ледников в 2017 г.; 3 – границы территории, охваченной данными топоплана 1961 г.; 4 – вершина горы Ледяной (2453 м); 5 – участки, не охваченные данными современной ЦМР; 6 – точки корегистрации ЦМР 1961 и 2015–2017 гг.

Fig. 4. Boundaries and points of digital elevation models (DEM) co-registration used in the work: 1 – glacier boundaries in 1961; 2 – glacier boundaries in 2017; 3 – boundaries of the territory covered by the 1961 topographic plan; 4 – the top of Mount Ledyanaya (2453 m); 5 – areas not covered by the current DEM data; 6 – points of co-registration of the DEM 1961 and 2015–2017

WorldView-3, на основе которых были сформированы фрагменты «strip» и мозаика ArcticDEM v3.0, без использования наземных контрольных точек находится в пределах 4, 3,5 и 3,5 м соответственно. В совокупности с высоким пространственным разрешением (2 м) и коррекцией, выполненной с использованием данных съёмки IceSAT, это делает мозаику ArcticDEM v3.0 наиболее точной и детализированной современной ЦМР, находящейся в открытом доступе, на район исследований. Поэтому она была принята за базовую ЦМР, к которой по стабильным (не ледниковым) поверхностям привязывались остальные.

Вертикальная коррекция фрагментов «strip» от 22.03.2015 г. и 23.06.2017 г. выполнена аналогично работе [9]. На район площадью около $5,7 \times 6,9$ км² была создана регулярная сетка точек с шагом 50 м. Из неё были исключены точки, которые на использованных в данной работе снимках SPOT 6 попадали на нестабильные поверхности (ледники, снежники, эрозионные врезь, русла горных ручьёв) и крутые горные склоны, где высока вероятность развития обвально-осыпных процессов. Оставшимся точкам, расположенным на относительно стабильных поверхностях, были присвоены значения высот мозаики ArcticDEM v3.0 и фрагментов «strip» от 22.03.2015 г. и 23.06.2017 г.

Статистический анализ полученных данных о высотах в точках проводился в программе LibreOffice Calc. По его результатам было выполнено систематическое повышение поверхности фрагмента «strip» ArcticDEM v3.0 от 22.03.2015 г. на 2,91 м для компенсации медианного отклонения его высоты от поверхности мозаики по 674 точкам. Поверхность фрагмента «strip» ArcticDEM v3.0 от 23.06.2017 г. была систематически повышена на 1,65 м для компенсации медианного отклонения его высоты от поверхности мозаики по 1758 точкам. Далее скорректированные фрагменты «strip» от 22.03.2015 г. и 23.06.2017 г. использовались для заполнения участков мозаики Arctic DEM v3.0, не покрытых данными. В результате была сформирована ЦМР, покрывающая 99,4% площади ледников Нежданного и Соседнего в границах 1961 г. Для оценки вертикальной погрешности ЦМР ArcticDEM v3.0 непосредственно в районе исследований данных было недостаточно. Однако подобная оценка была выполнена в работе [10] с использованием

результатов наземных геодезических измерений и составила $\pm 2,5$ м с уровнем доверия 93,6%. Мы полагаем, что на такую же величину можно ориентироваться и в настоящей работе.

Совмещение по высоте топоплана и современной ЦМР выполнено тем же методом, что и коррекция по высоте фрагментов «strip» ЦМР ArcticDEM v3.0. Из сетки используемых точек также были исключены точки, расположенные в пределах границ ледников и снежников на топоплане 1961 г. В результате поверхность ЦМР 1961 г. была скорректирована по высоте на величину медианного отклонения от поверхности Arctic DEM v3.0 по 194 точкам, расположенным на относительно стабильных поверхностях (см. рис. 4). После «вычитания» разновременных ЦМР получен массив данных, характеризующий изменение высоты поверхности ледника за исследуемый период. На основе этих данных сформировано растровое изображение разницы высот поверхностей современной ЦМР (на базе Arctic DEM v3.0) и скорректированной ЦМР 1961 г. (на базе топоплана) (рис. 5). Погрешность определения изменения высоты поверхности составила $\pm 3,54$ м (среднеквадратичное отклонение определения высоты поверхности по топоплану 1961 г. и ЦМР Arctic DEM v3.0).

Результаты и обсуждение

Площадь ледников по топоплану в 1961 г. составляла $4,93 \pm 0,20$ км². Как было уже показано, в 2017 г. она уменьшилась до $4,18 \pm 0,18$ км², т.е. сократилась на 15,2%. Перед выполнением расчётов изменения объёма ледников было оценено качество полученных данных. «Плохими» данными оказались три участка на крутых склонах горы Ледяной, на которых были получены либо положительные, либо аномально высокие величины изменений высоты поверхности. Причина их появления — как интерполяции высот по горизонталям на не охваченных фототеодолитной съёмкой участках при создании топоплана 1961 г., так и искажения при трансформации снимков высокого разрешения на крутых склонах при создании ЦМР ArcticDEM. Такие данные отбраковывали и не использовали в расчётах изменений объёма ледников. Площадь этих участков составила 0,26 км² (или 5,3% общей

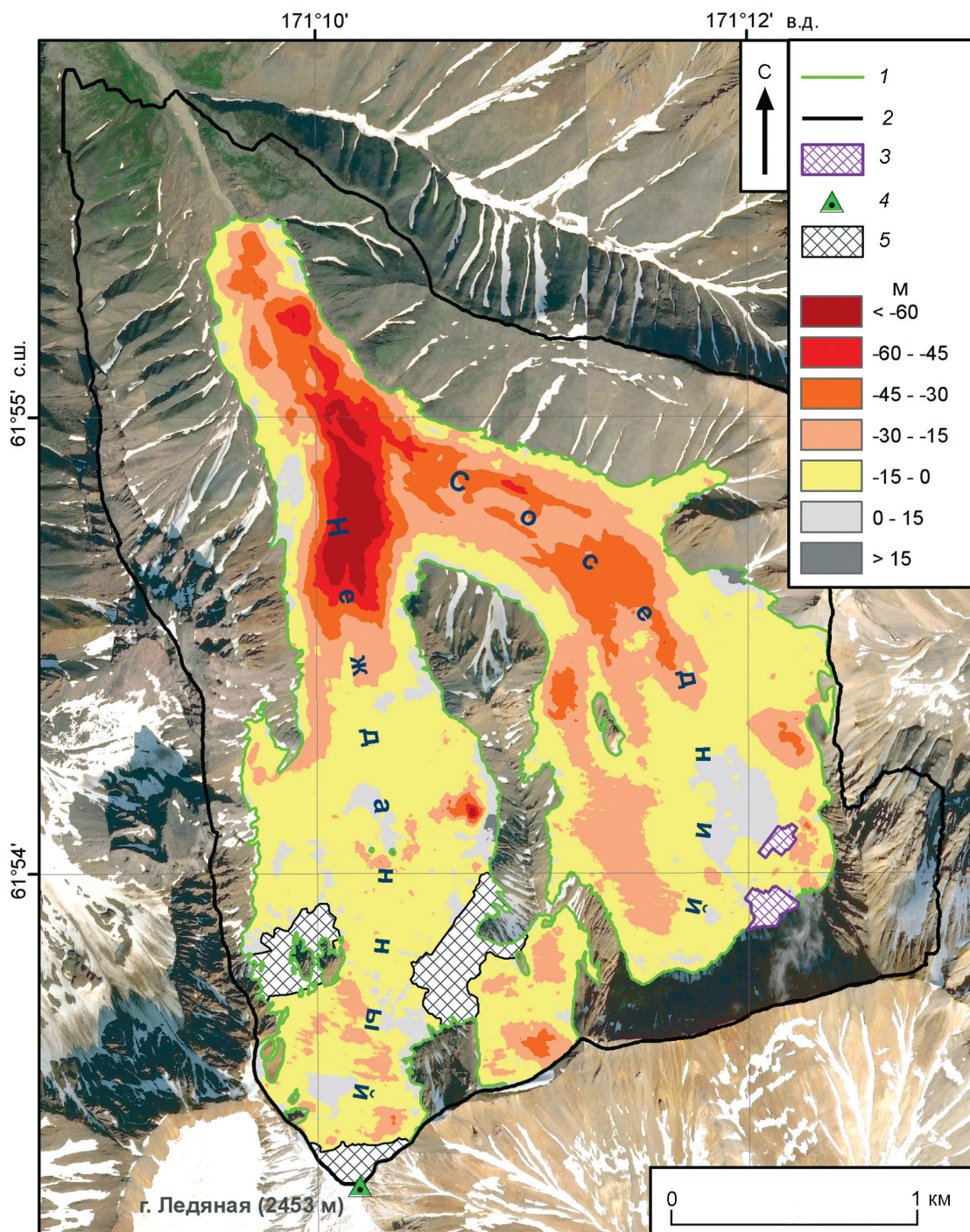


Рис. 5. Изменение высоты поверхности в границах ледников Нежданного и Соседнего с 1961 по 2016 г., м:
1 – границы ледников в 1961 г.; 2 – границы территории, охваченной данными топоплана 1961 г.; 3 – участки, не охваченные данными современной ЦМР; 4 – вершина горы Ледяной (2453 м); 5 – участки «плохих» данных

Fig. 5. Change in surface height within the boundaries of the Nezhdanny and Sosedny glaciers from 1961 to 2016, m:
1 – glacier boundaries in 1961; 2 – boundaries of the territory covered by the 1961 topographic plan data; 3 – areas not covered by the current DEM data; 4 – the top of Mount Ledyanaya (2453 m); 5 – areas of «bad» data

площади). После вычета участков с «плохими» данными и участков, не покрытых данными ArcticDEM v3.0, осталось $4,67 \pm 0,20$ км².

Среднее (арифметическое) по площади изменение высоты поверхности ледников за 55 лет составляет $-16,70$ м, а максимальное достига-

ет $-86,22$ м. Область максимальных понижений приурочена к нижней границе поверхности открытого льда в 1961 г. и располагается на высотах 1200–1400 м. Минимальные понижения поверхности наблюдаются в верховьях области аккумуляции, где существуют наиболее благоприятные условия питания, а также на языке и у бортов, где мощность моренного покрова обеспечивает температурный режим, способствующий сохранению льда.

По данным изменений высоты поверхности в пределах границ ледников Нежданного и Соседнего 1961 г. было вычислено изменение их объёма за 1961–2016 гг., которое составило $-71,74 \pm 16,51$ млн м³. Плотность льда тающей поверхности ледника была принята равной 840 ± 60 кг/м³ [11]. С учётом этой величины средний годовой удельный баланс массы ледника в период 1961–2016 гг. составил $-0,362 \pm 0,065$ м в.э. в год.

В публикации [12] представлены результаты оценки изменений высоты поверхности для ледников всего мира (свыше 200 000) за 20 последних лет (2000–2019 гг.), полученные дистанционно геодезическим методом с использованием данных разных видов космических съёмок (преимущественно ASTER). Среди них можно найти и два рассмотренных нами ледника. Согласно этим данным, средняя скорость понижения поверхности для ледников Нежданного и Соседнего в этот период была $0,72 \pm 0,60$ м/год (соответственно и средний удельный баланс $-0,605 \pm 0,51$ м в.э./год). Таким образом, скорость потери массы в период 2000–2019 гг. почти в 1,7 раза превышает наш результат, который соответствует периоду 1961–2016 гг. Мы не можем судить, насколько эти цифры соответствуют реальным величинам баланса, но в целом такая ситуация не противоречит общей тенденции изменения метеопараметров в данном регионе (см. рис. 2) и ускорения таяния ледников, наблюдаемого во многих других горных районах с начала XXI в. [10, 13–15]. Возможно, это ускорение не проявилось в явной мере при оценке изменений за 1961–2016 гг. из-за большого периода осреднения, включающего в себя годы с более благоприятными условиями в начале периода (1961–2000 гг.). Однако на коротком интервале, в который входят дополнительно три последних года интенсивного таяния, оно стало

вполне заметным. Данные работы [12] показывают также распространение зоны максимальных величин понижения поверхности ледника на более высокие уровни (до 1600 м), что может быть следствием наблюдаемого роста температур в данном регионе. Одновременно увеличиваются площадь и мощность моренного покрова на нижних уровнях, что приводит к постепенному уменьшению скорости понижения поверхности до значений, близких к нулю.

На снимках SPOT 6 (см. рис. 3, б) можно увидеть на поверхности областей питания ледников следы интенсивного сноса лавинами с крутых бортов и стенок каров мелкодисперсного и крупного обломочного материала, образующегося в результате криогенных процессов. Увеличение его концентрации на поверхности ледника (по сравнению с описаниями состояния ледника в 1961 г. [1]) также указывает на изменение условий питания. Загрязнение поверхности снежно-фирновой зоны уменьшает её альбедо, что, в свою очередь, ускоряет таяние. Одновременно на более низких уровнях увеличивается толщина моренного покрова и сокращается поверхность открытого льда. В настоящее время лёд можно обнаружить лишь в виде отдельных пятен и полос между поверхностными моренами в области границы питания на леднике Нежданном. На леднике Соседнем он присутствует уже только в виде узкой каймы вдоль нижней границы фирново-ледяной зоны. Скорее всего, это уже не поверхность ледника, а обнажившийся край зоны ледяного питания – инфильтрационно-конгеляционный лёд. При этом почти вся область абляции ледника забронирована сплошным моренным чехлом.

Возможная причина таких различий – особенности в строении областей питания этих ледников. У ледника Нежданного более пологий продольный профиль области аккумуляции и благоприятные для накопления участки присутствуют на разных высотных уровнях, вплоть до предвершинного взлёта горы Ледяной. Область питания ледника Соседнего – тыловая часть крутостенного кара, расположенная на более низком высотном уровне, где происходит накопление обломочного материала со стен кара и его последующее перемещение вниз по леднику. На рис. 6 можно увидеть, что в правой части кара эти перемещения оформились в характерные для камен-

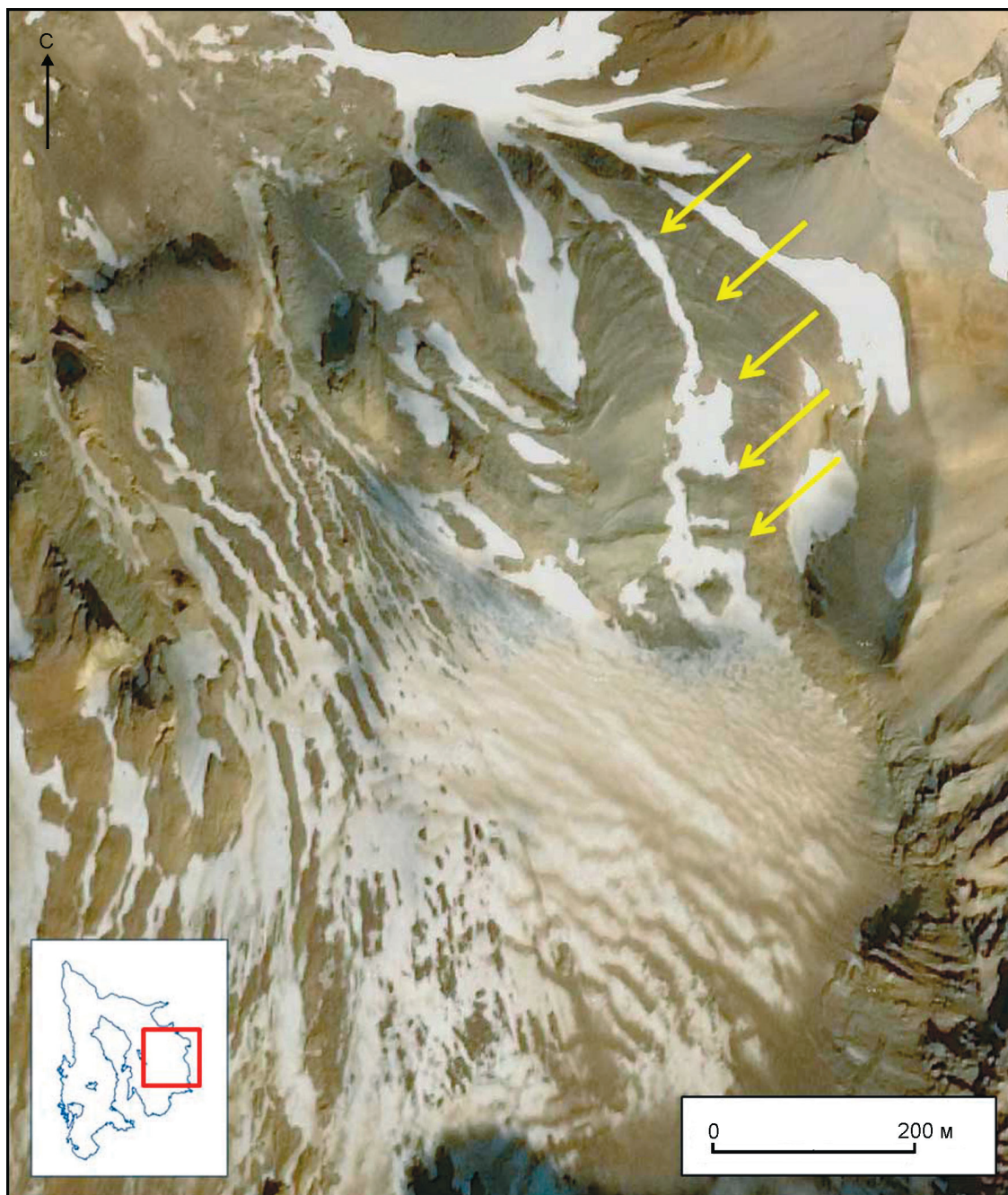


Рис. 6. Формирование нового каменного глетчера в области аккумуляции ледника Соседнего.

На врезке показано положение увеличенного фрагмента снимка SPOT 6 (25.08.2017 г.). Жёлтые стрелки указывают на характерные элементы поверхности каменного глетчера

Fig. 6. Formation of a new rock glacier in the accumulation area of the Sosedny Glacier.

The inset shows the position of an enlarged fragment of the SPOT 6 image (25.08.2017). The yellow arrows point to the characteristic features of the stone glacier surface

ного глетчера серповидные валы и понижения, периодически возникающие в результате деформаций при движении нарастающих слоёв. Это показывает, что на фоне постепенной деградации ледника на его месте идёт процесс образования и

развития каменного глетчера, обусловленный как изменением климата, так и интенсивным разрушением скальных пород цирка под воздействием криогенных факторов. Вполне вероятно, что в перспективе это приведёт к образованию на Ко-

рякском нагорье ещё одного комплексного каменного глетчера абляционного типа (в соответствии с существующей терминологией [2]).

В работе [16] на основании сравнения границ ледников Корякского нагорья на космических снимках 2003 г. с данными Каталога ледников СССР для рассмотренных нами ледников даётся оценка сокращения в 40–50% и высказывается предположение, что на рубеже столетий оледенение этого района вступило в фазу равновесия с современным климатом. Наши результаты показывают, что до равновесия, видимо, ещё далеко, а полученные аналогичным геодезическим методом данные работы [12], более того, показывают ускорение потери массы ледников Корякского нагорья в последние два десятилетия.

Заключение

Выполненное исследование позволило оценить изменения массы двух ледников Корякского нагорья за более чем полувековой интервал 1961–2016 гг. В результате совместного использования данных исторических наземных фототеодолитных съёмок 1961 г. и современных космических съёмок установлено, что за 55 лет площадь ледников Нежданного и Соседнего сократилась на 0,75 км² (15,2%), а изменение объёма составило $-71,74 \pm 16,51$ млн м³. Средний удельный баланс массы ледника в период 1961–2016 гг. составил $-0,362 \pm 0,065$ м в.э. в год. Основные факторы, влияющие на сокращения размеров ледников в данном регионе, — существенный (на 2 °C) рост летних температур воздуха, а также, хотя и незначительное, уменьшение количества зимних осад-

ков. На фоне постепенной деградации ледников, происходящей в результате изменений условий питания и при активном участии нивально-криогенных факторов, в области аккумуляции ледника Соседнего идёт процесс образования и развития каменного глетчера. Возможно, в недалёком будущем это приведёт к замещению ледника карово-долинного типа комплексным каменным глетчером абляционного типа.

Сравнение с результатами оценок, полученными аналогичным геодезическим методом для данного региона [12], указывает на тенденцию ускорения потери массы ледников в последние десятилетия. В этих условиях возрастает актуальность регулярного мониторинга происходящих изменений. Использование разновременных исторических данных и материалов космических съёмок расширяет возможности применения геодезического метода для оценки баланса массы ледников труднодоступных районов. Полученные результаты — первая количественная оценка баланса массы ледников для данного региона, основанная на использовании наземных инструментальных данных, и их можно рекомендовать для сравнения при дальнейшем мониторинге состояния ледников.

Благодарности: Работа выполнена в рамках темы Государственного задания Института географии РАН AAAA-A19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004).

Acknowledgments: The paper includes the results obtained withing the framework of the research project AAAA-A19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004) of the Research Plan of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences.

Литература

1. Сватков Н.М., Цветков Д.Г. Исследование ледников центральной части Корякского нагорья // Тепловой и водный режим снежно-ледниковых толщ. М.: Наука, 1965. С. 31–65.
2. Галанин А.А. Каменные глетчеры северо-востока Азии: картографирование и географический анализ // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 4. С. 49–61.
3. Николаев И.Г., Колосов Д.М. Современные ледники в Коряцком хребте // Изв. Гос. геогр. об-ва. 1939. Т. 71. Вып. 8. С. 1154–1162.
4. Васильковский А.П. Современное оледенение Северо-Востока СССР // Материалы по геологии и по-

References

1. Svatkov N.M., Tsvetkov D.G. Study of glaciers in the central part of the Koryak Upland. *Teplovoy i vodnyy rezhim snezhno-lednikovyykh tolshch*. Moscow: Science, 1965: 31–65 p. [In Russian].
2. Galanin A.A. Stone glaciers of northeast Asia: mapping and geographic analysis. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2009, 13 (4): 49–61. [In Russian].
3. Nikolaev I.G., Kolosov D.M. Modern glaciers in the Koryatsky ridge. *Izvestiya Gosudarstvennogo geograficheskogo obshchestva*. News of the State Geographical Society. 1939, 71 (8): 1154–1162. [In Russian].

- лезным ископаемым Северо-Востока СССР. 1955. Вып. 9. С. 71–91.
5. Сватков Н.М. Современное оледенение хребта Малиновского // МГИ. 1965. Вып. 15. С. 111–119.
6. Каталог ледников СССР. Т. 20. Ч. 1. Корякское нагорье. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 75 с.
7. Электронный ресурс: http://ecm.um.maine.edu/reanalysis/monthly_tseries/.
8. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C.; Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. // «ArcticDEM». Harvard Dataverse. 2018. V1. doi: 10.7910/DVN/OHHUKH.
9. Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Природная катастрофа ледниково-подпрудного озера Спартакосское на о. Большевик (Северная Земля) // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 4. С. 58–68. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-4(58-68).
10. 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. doi: 10.31857/S2076673420010022.
11. 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.
12. Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F., Kääb A. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century // Nature. 2021. V. 592. P. 726–731. doi: 10.1038/s41586-021-03436-z.
13. Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D. Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017 // Front. Earth Sci. 2019. V. 7. 153. doi: 10.3389/feart.2019.00153.
14. Торопов П.А., Алешина М.А., Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Никитин С.А. Современная деградация горного оледенения Алтая, её последствия и возможные причины // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 118–130. doi:10.3103/S1068373920050088.
15. Муравьев А.Я. Сокращение ледников северной части Срединного хребта на Камчатке в период с 1950 по 2016–2017 гг. // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 4. С. 498–512. doi: 10.31857/S2076673420040055.
16. Ананичева М.Д. Современное состояние ледников Корякского нагорья и оценка их эволюции к середине текущего столетия // Лёд и Снег. 2012. № 1 (117). С. 15–23. doi: 10.15356/2076-6734-2012-1-15-23.
4. Vas'kovsky A.P. *Sovremennoe oledenenie Severo-Vostoka SSSR*. Modern glaciation of the North-East of the USSR. *Materiali po geologii i poleznim iskopaemim Severo-Vostoka SSSR*. Materials of geology and mineral resources of the North-East of the USSR. 1955, 9: 71–91. [In Russian].
5. Svatkov N.M. Modern glaciation of the Malinovsky ridge. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1965, 15: 111–119. [In Russian].
6. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 20. Pt. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982: 75 p. [In Russian].
7. http://ecm.um.maine.edu/reanalysis/monthly_tseries/.
8. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. «ArcticDEM». Harvard Dataverse. 2018. V1. doi: 10.7910/DVN/OHHUKH.
9. Chernov R.A., Muraviev A.Ya. Catastrophic outburst-flood of the Spartakovskoye glacier-dammed lake on the Bolshevik Island (Severnaya Zemlya). *Earth's Cryosphere*. 2020, 24 (4): 50–59. doi: 10.21782/EC2541-9994-2020-4(50-59).
10. Nosenko G.A., Muraviev A.Ya., Ivanov M.N., Sinitskiy A.I., Kobelev V.O., Nikitin S.A. The response of the glaciers of the Polar Urals to modern climate changes. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 42–57. doi: 10.31857/S2076673420010022. [In Russian].
11. Troitsky L.S., Khodakov V.G., Mikhalev V.I. Guskov A.S., Lebedeva I.M., Adamenko V.N., Zhivkovich L.A. The glaciation of the Urals. Moscow: Science, 1966: 355 p. [In Russian].
12. Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F., Kääb A. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*. 2021, 592: 726–731. doi: 10.1038/s41586-021-03436-z.
13. Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D. Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017. *Front. Earth Sci*. 2019, 7: 153. doi: 10.3389/feart.2019.00153.
14. Toropov P.A., Aleshina M.A., Nosenko G.A., Khromova T.E., Nikitin S.A. Modern degradation of mountain glaciation in Altai, its consequences and possible causes. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2020, 5: 118–130. doi: 10.3103/S1068373920050088.
15. Muraviev A.Ya. Reduction of glaciers in the northern part of the Sredinny Range in Kamchatka in the period from 1950 to 2016–2017. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (4): 498–512. doi: 10.31857/S2076673420040055. [In Russian].
16. Ananicheva M.D. The current state of glaciers within the Koryak Highland and assessment of their development by the middle of this century. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2012, 1 (117): 15–23. doi: 10.15356/2076-6734-2012-1-15-23. [In Russian].