

УДК 551.324

БАЛАНС МАССЫ ЛЕДНИКА КОЗЕЛЬСКИЙ НА КАМЧАТКЕ ЗА 1977–2022 гг.

© 2023 г. А. Я. Муравьев^{1,*}, Г. А. Носенко¹, И. К. Миронов²,
В. Н. Двигало², Я. Д. Муравьев²

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

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

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.

После доработки 02.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Дана оценка изменения объёма ледника Козельский на Камчатке за 1977–2022 гг. Площадь ледника за это время практически не изменилась, фронт продвинулся вперёд почти на 0.7 км, объём сократился на 34.15 ± 6.74 млн м³, поверхность в среднем понизилась на 17.3 м, кумулятивный баланс массы составил -14.70 ± 3.94 м в.э., а удельный среднегодовой -0.33 м в.э./год. Продвижение линии фронта в последние 10 лет замедлилось и составляло около 5 м/год.

Ключевые слова: ледник Козельский, Камчатка, геодезический баланс массы, вулканы, исторические данные, спутниковые съёмки

DOI: 10.31857/S2076673423030079, **EDN:** PLDBKZ

ВВЕДЕНИЕ

Сокращение размеров ледников в настоящее время наблюдается почти во всех районах оледенения Земли. Одним из немногочисленных исключений являются районы активного вулканизма Камчатки, где с 1950-х по 2010-е годы не было зафиксировано сокращения площади ледников (Khromova et al., 2019). Один из таких районов — расположенная у юго-восточного побережья Камчатки Авачинская группа вулканов, площадь оледенения которой с 1950 по 2012–2013 гг. увеличилась на 6.5% или 1.3 км² (Муравьев, 2017).

Авачинская группа вулканов (рис. 1, а), находящаяся вблизи г. Петропавловск-Камчатский, исторически является наиболее изученным районом оледенения Камчатки. Она образована цепью вулканов, вытянутой в направлении с юго-востока на северо-запад: Козельский (2189 м), Авачинский (2751 м), Корякский (3456 м), Арик (2166 м) и Ааг (2310 м). Авачинский и Корякский вулканы действующие — их последние извержения датированы 1991 и 2008–2009 гг. соответственно (<http://www.kscnet.ru>).

Первые сведения о ледниках в Авачинской группе вулканов встречаются в публикации (Перфильев, 1912). В ней автор писал о наличии ледников на Авачинском вулкане и привёл несколько фотографий ледниковой поверхности с трещинами. Более подробные сведения о ледниках

Авачинского вулкана приведены в работе (Заварицкий, 1935). Её автор по результатам полевых работ летом 1931 г. отметил наличие ледников, занимающих пространство между гребнем соммы и действующим конусом и стекающих, главным образом, в северном и северо-западном направлениях. Автор работы (Пийп, 1946) отметил наличие на Авачинском вулкане ледников, спускающихся на север и юг с фирнового поля, расположенного в кольцевой долине между гребнем соммы и действующим конусом. В публикации (Заварицкий, 1955), представляющей результаты анализа данных экспедиционных работ 1946 г. и других вулканологических исследований, отмечено наличие ледников на всех вулканах Авачинской группы.

Полная инвентаризация ледников Авачинской группы вулканов была проделана в рамках работ по составлению Каталога ледников СССР (Виноградов, 1968). Каталог содержит сведения о морфологических типах, размерах, высотном положении и экспозиции 24 ледников общей площадью 16.3 км², полученные по данным аэрофотосъёмки 1950 г., дополненных данными полевых работ середины 1960-х годов. Обновлённая инвентаризация ледников района была опубликована в работе (Виноградов, Муравьев, 1992). Она включала в себя актуализированные сведения о 26 ледниках общей площадью 21.3 км². Данные о размерах некоторых ледников в ней были скорректиро-

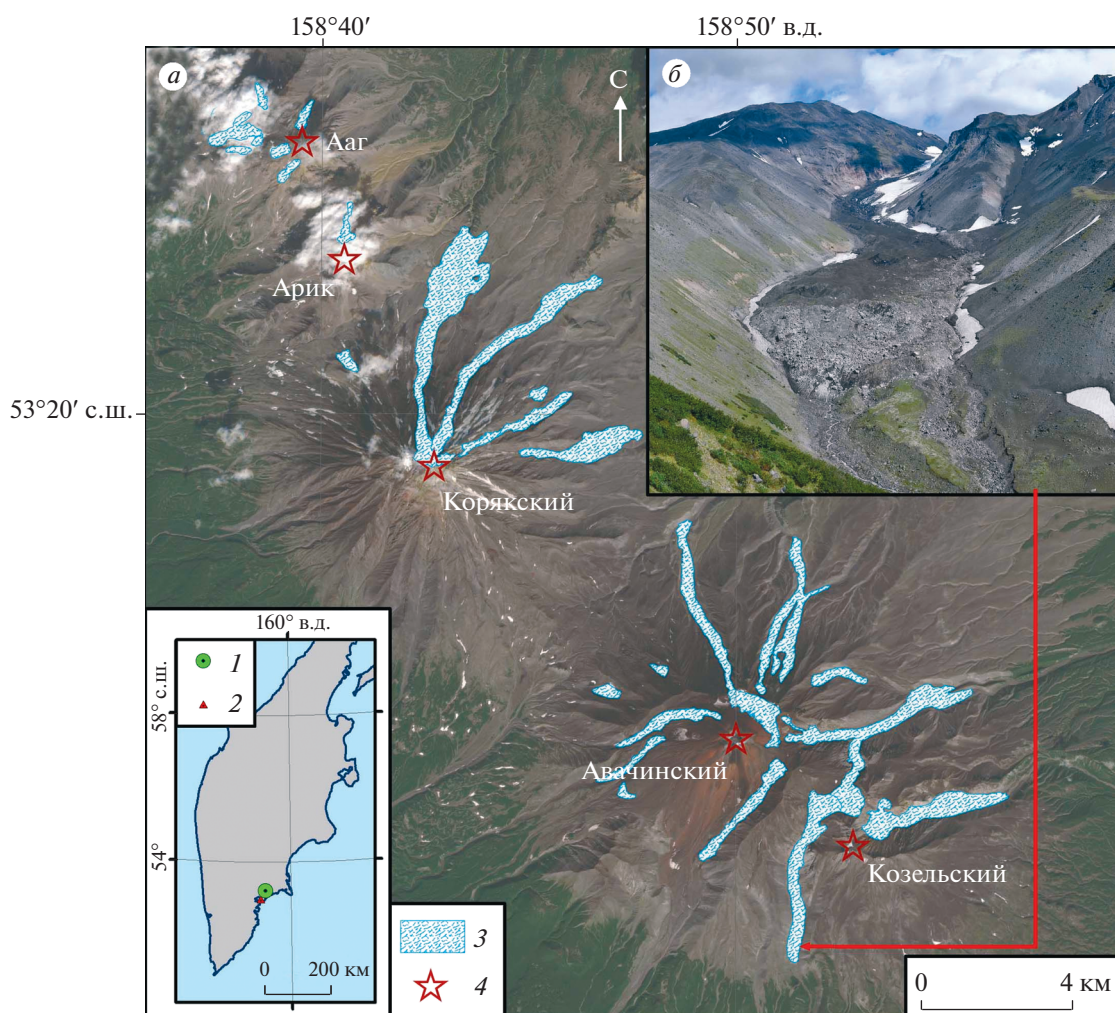


Рис. 1. Авачинская группа вулканов (а) и ледник Козельский 19.08.2022 (фото А.Я. Муравьева) (б): 1 – местоположение Авачинской группы вулканов; 2 – местоположение метеостанции Петропавловск-Камчатский; 3 – ледники; 4 – вулканы

Fig. 1. Avachinsky group of volcanoes (a) and Kozelsky Glacier 19.08.2022 (photo by A.Ya. Muraviev) (b): 1 – location of the Avachinsky group of volcanoes; 2 – location of the weather station Petropavlovsk-Kamchatsky; 3 – glaciers; 4 – volcanoes

ваны относительно данных Каталога ледников СССР.

В последующем более полная инвентаризация ледников Авачинской группы вулканов была выполнена уже в 2010-х годах. Так, работа (Муравьев, 2017) содержит сведения о 27 ледниках данного района общей площадью $22.43 \pm 1.42 \text{ км}^2$ по состоянию на 2012–2013 гг. Каталог ледников Randolph Glacier Inventory (RGI) версии 6.0 (RGI..., 2017) содержит данные о ледниках района по состоянию на 2013 г. Информация о пространственном положении границ ледников Авачинской группы вулканов в нём была получена путём автоматизированного дешифрирования снимка Landsat от 09.09.2013 по границе открытого льда. Поскольку на ледниках района развита поверхностная морена, это привело к неверному опре-

делению границ ледников и существенной (более чем в два раза) недооценке их площадей. Суммарная площадь ледников района в каталоге RGI 6.0 составила 10.25 км^2 .

В Авачинской группе вулканов расположен перемётно-долинный ледник Козельский – наиболее изученный ледник Камчатки и один из самых изученных ледников, расположенных на активных вулканах (см. рис. 1, б). Он спускается в южном направлении с седловины между вулканами Авачинский и Козельский. Ледник входит в список Всемирной службы мониторинга ледников (WGMS).

Первая информация о леднике Козельский встречается в публикации (Заварицкий, 1935). На представленной в этой работе карте выделен “Южный Козельский ледник”, положение кото-

рого соответствует положению ледника Козельский в более поздних публикациях.

В научной литературе доступны данные прямых наблюдений за динамикой ледника Козельский с 1945 г. В феврале 1945 г. в ходе извержения вулкана Авачинский весь ледник был покрыт чехлом пирокластического материала мощностью до 2 м (Виноградов, Муравьев, 1992). В дальнейшем область питания ледника стала восстанавливаться поверх чехла пирокластики. К 1967 г. её площадь составила 0.7 км². В период 1968–1976 гг. благодаря благоприятным климатическим условиям область питания ледника полностью восстановилась, а фронт ледника опустился с 960 до 890 м над ур. моря.

Особенно многоснежные зимы 1971–1974 гг., совпавшие с прохладными периодами абляции, привели к активизации ледника (Виноградов, Муравьев, 1992). До 1974 г. фронт ледника продвинулся на 100–110 м, а за 1975–1976 гг. – ещё на 220–230 м. В итоге, к 1976 г. фронт ледника суммарно продвинулся примерно на 330 м, а площадь ледника увеличилась на 0.09 км². В 1978–1981 гг. наблюдалась стабилизация фронта ледника и его кратковременное отступление.

После 1981 г. фронт ледника наступал практически непрерывно. До 2007 г. он продвинулся примерно на 540 м, и ещё на 130–140 м за 2007–2015 м (Котляков и др., 2017). В целом за 1967–2015 гг. фронт ледника продвинулся на 1010 ± 15 м, а площадь его языковой части увеличилась примерно на 0.35 км².

По данным работы (Муравьев, 2017) площадь ледника Козельский на 28.09.2013 составляла 1.77 ± 0.09 км². Полевые наблюдения 2019, 2021 и 2022 гг. показали, что язык ледника продолжает наступать. В августе 2022 г. он оканчивался на высоте около 790 м над ур. моря.

Ледник Козельский относится к тёплому типу (Виноградов и др., 1976). Температура снежно-фирновой толщи в тёплый период близка к 0°C. Мощность снежно-фирновой толщи в центральной части области аккумуляции составляет 30–40 м. Тёплый период длится 4–5 месяцев у нижней границы ледника и 2–3 месяца в области питания (Виноградов, Муравьев, 1992). Доля метелевого снега в структуре аккумуляции оценивается в 35–40%, лавинного питания – 1–5%. Поверхностная морена на седловине между вулканами Авачинский и Козельский (область ледораздела ледников Козельский и Заварицкого) ежегодно освобождается от снежного покрова. Это следствие того, что большая часть выпадающих твёрдых осадков перераспределяется ветром вниз по леднику Козельский.

Прямые наблюдения за составляющими баланса массы ледника Козельский проводились в 1972–1981 и 1987–1988 гг. (Виноградов, Мура-

вьев, 1992). Средний баланс массы ледника в этот период составлял –411 мм в.э. (зимний баланс в среднем 3411 мм в.э., летний –3822 мм в.э.). Высота границы питания в эти годы изменялась от 1160 м в 1973/74 г. до 1360 м в 1980/81 г. Устойчивой связи между высотой границы питания ледника и его балансом массы не обнаружено. После 1988 г. прямые массбалансовые наблюдения на леднике Козельский не проводились. Однако была предложена методика расчёта баланса массы ледника на основе материалов наблюдений на метеостанции Петропавловск-Камчатский с опорой на эмпирические данные измерений в течение 10 лет (Виноградов, Муравьев, 1992; Глазырин и др., 1999).

Цель работы – оценка баланса массы ледника Козельский в последние десятилетия в условиях существенного роста летних температур воздуха. Поскольку прямые измерения составляющих баланса массы ледника не проводятся уже более 30 лет, для достижения цели предполагается использовать геодезический метод и разновременные материалы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе использованы данные: спутниковый снимок WorldView-2 от 31.08.2016 с пространственным разрешением в мультиспектральном режиме 1.84 м (панхроматический канал 0.46 м); ортофотоплан, покрывающий южную часть (32% площади) ледника Козельский, с пространственным разрешением около 15 см, созданный по материалам съёмки с БПЛА 05.09.2022; отдельные фрагменты “strip” цифровой модели рельефа (ЦМР) ArcticDEM v3.0 (Porter et al., 2018) и ArcticDEM v4.1 (Porter et al., 2022) с пространственным разрешением 2 м от 18.09.2015, 08.10.2016, 06.10.2021 и 09.10.2021 (табл. 1); ЦМР от 05.09.2022, охватывающая южную часть (31% площади) ледника Козельский, с пространственным разрешением около 0.15 м; ЦМР 1977 г., созданная по материалам аэрофотосъёмки (АФС) от 05.08.1977; данные о среднемесячной температуре воздуха (Булыгина и др., 2023) и месячных суммах осадков с устранением погрешностей осадкомерных приборов (<https://meteo.ru...>) на гидрометеостанции (ГМС) Петропавловск-Камчатский (расположена примерно в 28 км к юго-юго-западу от ледника на высоте 32 м над ур. моря) из архива ВНИИГМИ-МЦД за 1950–2021 гг.; данные реанализа метеопараметров ECMWF ERA5 за 1950–2022 гг. с разрешением 0.5° × 0.5° (<https://www.ecmwf.int>), полученные с ресурса (Monthly., 2023); исходные данные работы (Муравьев, 2017) о пространственном положении границ ледника Козельский в 1967, 2007 и 2012 гг.

Таблица 1. Используемые в работе цифровые модели рельефа (ЦМР)

ЦМР	Дата съёмки	Идентификатор
Отдельные ЦМР “strip” из коллекции ArcticDEM версий 3.0 и 4.1	18.09.2015	SETSM_WV01_20150918_1020010045D91900_1020010042 42A100_seg1_2m_v3.0
	08.10.2016	SETSM_WV03_20161008_1040010022570B00_1040010022 929800_seg1_2m_v3.0
	06.10.2021	SETSM_s2s041_WV01_20211006_10200100B8274C00_102 00100B93AF000_2m_lsf_seg1
	09.10.2021	SETSM_s2s041_WV03_20211009_104001006D3C4100_10 40010070C74C00_2m_lsf_seg1
ЦМР, созданная по материалам съёмки с БПЛА	05.09.2022	не находится в открытом доступе
ЦМР, созданная по АФС 1977 г.	05.08.1977	

Используемые в работе спутниковые снимки, ортофотоплан и ЦМР были зарегистрированы в проекции UTM (зона 57) на эллипсоиде WGS 1984. Их обработка производилась в программных продуктах ESRI ArcGIS и QGIS.

Ортофотоплан и ЦМР от 05.09.2022 созданы по результатам обработки в программных продуктах Agisoft Metashape Pro и Pix4 Denterprise фотоснимков, полученных с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Phantom 4 Pro V2.0 южной части (32% площади) ледника Козельский. Разрешение съёмки составило 0.14 м/пиксель. На БПЛА был установлен приёмник DGPS L1/L2 Torodrone PPK (второй приёмник DGPS – на точке с известными координатами). Расчётная программным обеспечением погрешность определения координат в плане составила 0.10 м, вертикальная погрешность – 0.05 м.

Границы ледника на спутниковых снимках и ортофотоплане дешифрировались вручную. Все использованные в работе спутниковые снимки датированы концом августа – началом сентября (конец периода абляции на леднике Козельский). Это позволило минимизировать влияние на результат остатков сезонного снежного покрова и снежников.

Ледник Козельский имеет протяжённый (около 0.6 км) ледораздел с ледником Заварицкого, спускающегося с пологой седловины между вулканами Авачинский и Козельский на северо-восток. Граница между этими ледниками была проведена с использованием спутникового снимка WorldView-2 от 31.08.2016, на котором хорошо видны трещины и эрозионные врезы на чехле поверхностной морены, и цифровой модели наклона поверхности, построенной с использованием ЦМР ArcticDEM v3.0.

Сравнение с исходными материалами работы (Муравьев, 2017) показало, что пространственное положение границы ледника в области аккумуля-

ции имеет низкую изменчивость (с 2012 по 2016 г. практически без изменений). Основные изменения происходят в нижней, заморенной части ледника. Поэтому было сделано допущение о том, что граница ледника в области аккумуляции с 31.08.2016 по 05.09.2022 не изменилась.

Погрешность определения пространственного положения современных границ ледника принята равной 2 м, исходя из разрешения спутникового снимка WorldView-2 в мультиспектральном диапазоне (1.84 м). Погрешность определения площади ледника в 2022 г. принята равной произведению протяжённости периметра ледника на погрешность определения пространственного положения его границ (2 м). Погрешность определения пространственного положения границ ледника в 1977 г. (по ортотрансформированным АФС), учитывая развитую поверхностную морену и сложный рельеф, принята равной 5 м.

Согласно документации к ЦМР ArcticDEM (<https://www.pgc.umn.edu/>), её точность (вертикальная и в плане) без использования наземных контрольных точек находится в пределах 4 м. Все ЦМР из коллекций ArcticDEM версий 3.0 и 4.1, использованные в работе, прошли вертикальную корегистрацию. В качестве опорной ЦМР для корегистрации была использована ЦМР от 05.09.2022, созданная на основе данных фотосъёмки с БПЛА.

Корегистрация ЦМР проводилась по стабильным поверхностям в зоне охвата ЦМР от 05.09.2022, для чего в этой области была создана регулярная сетка точек с шагом 10 м. Далее, опираясь на визуальные данные ортофотоплана от 05.09.2022 и спутникового снимка WorldView-2 от 31.08.2016, были удалены потенциально нестабильные точки, расположенные: на леднике, снежниках, в эрозионных врезках и руслах ручьёв, крутых осыпных склонах, на кустарниковой растительности (ольховый стланик). Кроме того, бы-

ли удалены точки, расположенные на поверхностях с наклоном более 25° . Получившемуся массиву точек были присвоены значения высот всех использованных в работе ЦМР. Для минимизации влияния на результат мелких дефектов ЦМР из коллекции ArcticDEM, из используемой для корегистрации выборки удалялись точки, высота которых отличалась от значения на ЦМР 05.09.2022 более чем на 4 м. Для минимизации влияния микрорельефа поверхности ЦМР от 05.09.2022 (разрешение около 15 см) на корегистрацию других ЦМР она была предварительно пересчитана в разрешение 2 м по границам ячеек ЦМР от 09.10.2021 из коллекции ArcticDEM v3.0.

Далее, по полученному массиву расположенных на стабильных поверхностях точек производилась систематическая коррекция высот ЦМР на величину медианного отклонения их высоты от высоты ЦМР 05.09.2022. Так, ЦМР от 18.09.2015 была систематически повышена на 1.11 м (медианное отклонение по 1758 точкам), ЦМР от 08.10.2016 — понижена на 1.59 м (по 1616 точкам), ЦМР от 06.10.2021 — повышена на 0.52 м (по 1608 точкам), ЦМР от 09.10.2021 — понижена на 0.21 м (по 1809 точкам). За вертикальную погрешность ЦМР принималось среднее квадратичное отклонение их высоты от высоты ЦМР 05.09.2022 по массиву точек, расположенных на стабильных поверхностях. Она составила 1.12 м для ЦМР от 18.09.2015, 1.60 м — для 08.10.2016, 1.06 м — для 06.10.2021 и 1.08 м — для 09.10.2021.

Так как ЦМР от 05.09.2022 покрывает лишь нижнюю часть (31% площади) ледника Козельский, для получения современной ЦМР поверхности ледника она была дополнена данными скорректированной по высоте ЦМР от 09.10.2021 из коллекции ArcticDEM v4.1. При этом для небольшого (0.13 км^2) участка в северо-западной оконечности ледника, не покрытого данными ЦМР от 09.10.2021, была использована ЦМР от 06.10.2021. Участок площадью менее 0.01 км^2 в северной части ледника не покрыт данными ЦМР 2021–2022 гг., что не может существенно повлиять на результаты исследования, учитывая его малую площадь. Для приведения используемого участка ЦМР 2021 г. к 2022 г. она была дополнительно скорректирована: к значениям высот её ячеек была прибавлена $1/6$ разницы изменения высоты с 2015 по 2021 г.

ЦМР от 18.09.2015 покрывает 93% площади ледника в 2022 г. 7% (0.12 км^2) площади поверхности ледника заняты участками, не покрытыми данными этой ЦМР. Эти участки были заполнены данными ЦМР от 08.10.2016. Учитывая малый размер таких участков, можно сделать допущение о том, что итоговая ЦМР отражает состояние поверхности ледника на конец сезона абляции 2015 г.

ЦМР 1977 г. создана в программном продукте Agisoft Metashape Pro на базе материалов АФС 05.08.1977. Пространственное разрешение данных АФС составляет около 0.3 м. Корегистрация данной ЦМР была проведена аналогично корегистрации ЦМР из коллекции ArcticDEM. В результате среднее квадратичное отклонение корегистрированной ЦМР 05.08.1977 от ЦМР 05.09.2022 по 1111 точкам составило 1.80 м.

Погрешность определения высоты поверхности между ЦМР 1977, 2015 и 2021–2022 гг. определялась как среднее квадратичное значение погрешностей каждой из слагающих их ЦМР в зоне перекрытия. Так, расчётная погрешность в зоне перекрытия ЦМР от 05.09.2022 и 18.09.2015 составила 1.12 м, 09.10.2021 и 18.09.2015 — 1.56 м, 09.10.2021 и 08.10.2016 — 1.93 м, 06.10.2021 и 18.09.2015 — 1.54 м, 05.09.2022 и 05.08.1977 — 1.80 м, 05.08.1977 и 09.10.2021 — 2.10 м, 05.08.1977 и 06.10.2021 — 2.09 м, 05.08.1977 и 08.10.2016 — 2.41 м, 05.08.1977 и 18.09.2015 — 2.12 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наступание фронта ледника Козельский в 1967–2022 гг. показано на рис. 2. Общее продвижение фронта за этот период составило $1030 \pm 15 \text{ м}$, 52 м из которых пришлось на 2012–2022 гг. Средняя скорость наступания фронта ледника в последние 10 лет составляла около 5.2 м в год. Площадь ледника в конце сезона абляции 2022 г. составляла $1.72 \pm 0.02 \text{ км}^2$, длина — около 5030 м, высота высшей точки — 1955 м, высота низшей точки — 790 м, вертикальная протяжённость — 1165 м, средняя взвешенная по площади высота — около 1420 м. Несмотря на практически непрерывное наступание фронта ледника его площадь за 2012–2022 гг. не увеличилась, а сократилась на 0.05 км^2 . Это произошло в результате разрушения небольших краевых участков нижней части языка ледника термоэрозией.

Площадь ледника по высоте распределена неравномерно. В 2022 г. ниже 1000 м располагалось 19.3% площади ледника, в интервале 1000–1200 м — 16.4%, в интервале 1200–1400 м — 12.9%, в интервале 1400–1600 м — 10.2%, в интервале 1600–1800 м — 17.7%, выше 1800 м — 23.5%. На высотный интервал 1400–1600 м приходится самая узкая часть ледника, большая часть которой занята зоной трещинообразования.

Зафиксировано уменьшение скорости наступания ледника Козельский в последнее десятилетие. В 1977–2007 гг. фронт ледника продвинулся на $537 \pm 15 \text{ м}$ (учитывая стабилизацию фронта в 1978–1981 гг., средняя скорость наступания составит около 20.7 м/год), в 2007–2012 гг. — на $100 \pm 15 \text{ м}$ со средней скоростью около 20.0 м/год,

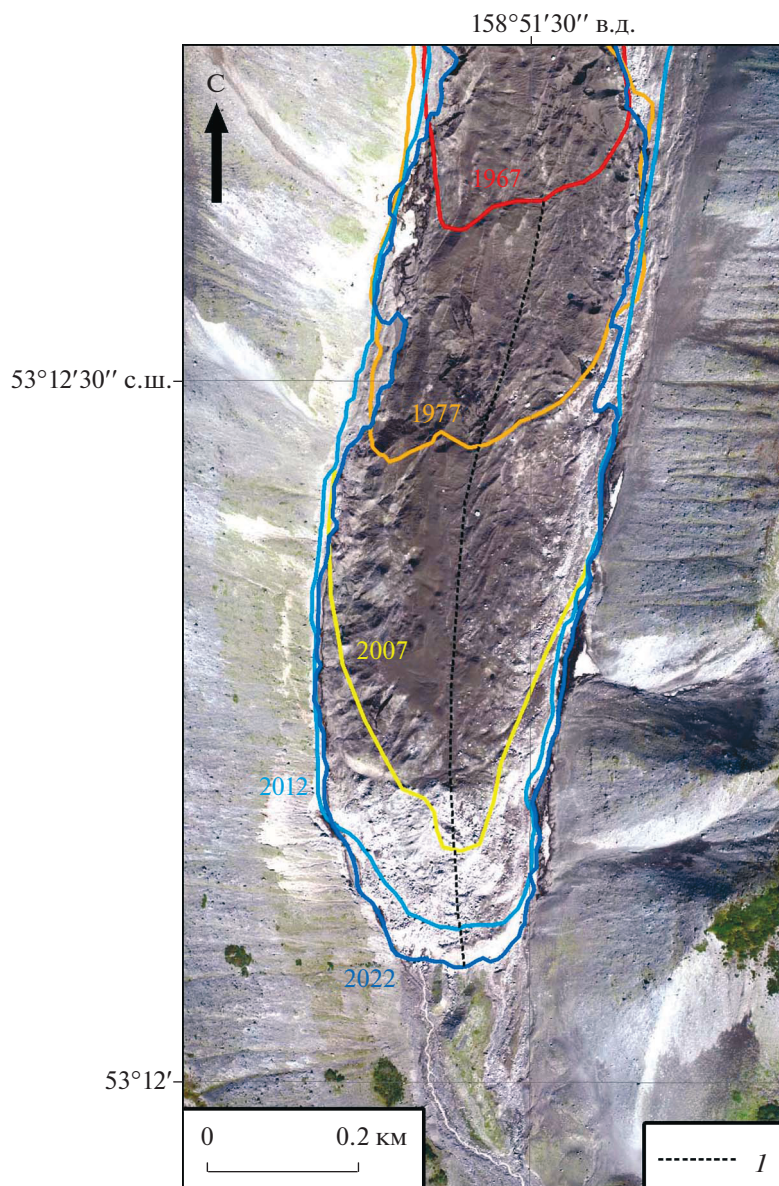


Рис. 2. Продвижение фронта ледника Козельский в 1967–2022 гг.

Границы ледника определены в результате анализа следующих данных: 1967 г. – АФС от 26.08.1967; 1977 г. – АФС от 05.08.1977; 2007 г. – спутниковый снимок ASTER от 16.07.2007; 2012 г. – спутниковый снимок WorldView-2 от 18.09.2012; 2022 г. – ортофотоплан от 05.09.2022

I – осевая линия ледника, вдоль которой проводились измерения.

Fig. 2. Advancement of the Kozelsky Glacier front in 1967–2022.

The boundaries of the glacier are determined as a result of the analysis of the following data: 1967 – aerial photograph 26.08.1967; 1977 – aerial photograph 05.08.1977; 2007 – ASTER satellite image 16.07.2007; 2012 – WorldView-2 satellite image 18.09.2012; 2022 – orthophotoplan 05.09.2022

I – center line of the glacier along which the measurements were made.

в 2012–2022 гг. – на 52 ± 5 м со средней скоростью около 5.2 м/год.

Площадь ледника Козельский в 1977 г. составляла 1.77 ± 0.06 км² (т.е. практически соответствовала его площади в 2012 г.), высота высшей точки – около 2000 м, высота низшей точки – около 910 м, вертикальная протяжённость – 1090 м,

средняя взвешенная по площади высота – около 1510 м. С тех пор площадь ледника практически не изменилась. Однако произошло её перераспределение – язык ледника стал существенно длиннее (примерно на 0.7 км) и уже. Приращение площади нижней части языка ледника за 1977–2022 гг. составило около 0.21 км². С 1977 по 2022 г. фронт ледника продвинулся на 692 ± 5 м.

Среднее по площади изменение высоты поверхности ледника с 1977 по 2022 г. (рис. 3) составило -17.30 м (-0.38 м/год). Объём ледника за этот период сократился на 34.15 ± 6.74 млн м³. Для пересчёта результата геодезических измерений в размерность гляциологического баланса массы (м в.э.) была использована плотность льда 850 ± 60 кг/м³, как в работах (Huss, 2013; Hugonnet et al., 2021a). При такой плотности льда кумулятивный баланс массы ледника Козельский за 1977–2022 гг. составил -14.70 ± 3.94 м в.э. Среднее значение баланса массы ледника в данный период составляло -0.33 м в.э./год. Это сопоставимо с балансом массы ледников Нежданный и Соседний (гора Ледяная на Корякском нагорье) в период 1961–2016 гг., составлявшим, по данным работы (Носенко и др., 2022), -0.362 м в.э./год. Близкие значения баланса массы наблюдались на леднике ИГАН (Полярный Урал) в период 1963–2008 гг. (-0.317 м в.э./год) и 2008–2018 гг. (-0.336 м в.э./год) (Носенко и др., 2020). Наибольшее понижение высоты поверхности ледника за 1977–2022 гг. приурочено к высотному интервалу 1200–1400 м. На втором месте по этому показателю находится высотный интервал 1400–1600 м, в котором наблюдается сужение ледникового языка и наибольшее количество трещин, что свидетельствует о самых больших для ледника скоростях движения льда.

Среднее по площади изменение высоты поверхности ледника Козельский с 1977 по 2015 г. составило -17.84 м. Объём ледника в этот период сократился на 35.21 ± 7.20 млн м³, а кумулятивный баланс массы составил -15.16 ± 4.17 м в.э. Среднее значение баланса массы ледника в 1977–2015 составляло -0.40 м в.э./год. Эта величина близка к данным прямых наблюдений за 1972–1981 и 1987–1988 гг. (в среднем -0.411 м в.э.), опубликованным в работе (Виноградов, Муравьев, 1992).

Среднее по площади изменение высоты поверхности ледника Козельский с 2015 по 2022 г. (рис. 4) составило 0.59 ± 1.55 м. Объём ледника в данный период увеличился на 1.01 ± 2.65 млн м³. Кумулятивный баланс массы ледника Козельский за 2015–2022 гг. составил 0.50 ± 1.35 м в.э. (0.07 м в.э./год). Из этого следует, что среднегодовой баланс массы ледника в данный период был близок к нулю. Участки с увеличением высоты поверхности приурочены, в основном, к понижениям поверхности верхней половины ледника, в которых скапливается переносимый ветром снег. В нижней, заморененной части ледника такие участки – следствие перемещения выпуклых форм ледникового рельефа за семь лет продвижения ледника вниз по долине.

Для понимания согласованности зафиксированной в 1977–2022 гг. динамики ледника с кли-

матическими изменениями были проанализированы изменения средней летней (июнь–август) температуры приземного слоя воздуха (рис. 5, а) и сумм осадков с октября по май (рис. 5, б) (период аккумуляции ледника Козельский). Средние значения летней температуры воздуха в 2016–2021 гг. составили 12.5°C , по данным наблюдений на ГМС Петропавловск-Камчатский (Булыгина и др., 2023), что на 0.7°C выше климатической нормы 1981–2010 гг. Данные реанализа ERA5 (Monthly., 2023) демонстрируют такую же тенденцию к увеличению, хотя и с несколько меньшими значениями температур (разница составляет $1\text{--}1.5^\circ\text{C}$). График аномалий летней температуры воздуха относительно базового периода 1981–2010 гг. (см. рис. 5, в) свидетельствует о том, что на протяжении двух последних десятилетий преобладали положительные значения аномалий. В 2002–2022 гг. их величина достигала 2.0°C . Это означает, что сезон абляции на леднике с 2010-х годов стал существенно теплее, чем в 1980–2000-х годах.

Линия тренда на графике сумм твёрдых осадков (см. рис. 5, б) свидетельствует о том, что, несмотря на значительную межгодовую изменчивость в период исследований их величина в настоящее время мало отличается от климатической нормы 1981–2010 гг. Средние значения сумм осадков с октября по май в 2016–2021 гг., по данным наблюдений на ГМС Петропавловск-Камчатский (<https://meteo.ru...>), составляли 815.6 мм, что на 53 мм (6.5%) меньше, чем в период 1981–2010 гг. Данные реанализа ERA5 показывают рост количества осадков с 917.0 мм в период 1981–2010 гг. до 940.2 мм (2.5%) в 2016–2022 гг. Можно предположить, что количество твёрдых осадков в горах практически не изменилось.

Из приведённых выше данных можно сделать вывод о том, что современные изменения климатических условий должны способствовать сокращению площади ледника Козельский и понижению его поверхности. Однако, как показано выше, понижение поверхности ледника наблюдается при практически неизменной площади, а его фронт продвигается вниз по долине. Это означает, что действие неблагоприятных климатических изменений на динамику ледника компенсируется иными природными факторами.

Как было отмечено ранее (Муравьев, 2017), колебания размеров ледников, расположенных вблизи активных вулканов, определяются прежде всего вулканической деятельностью, которая по силе воздействия на режим и динамику ледников часто превосходит влияние климатических изменений. Основными механизмами влияния вулканизма на оледенение служат бронирующая роль чехла моренного материала вулканогенного происхождения и сейсмическое воздействие вулканов на ледники (Муравьев, 2020). Эти виды влия-

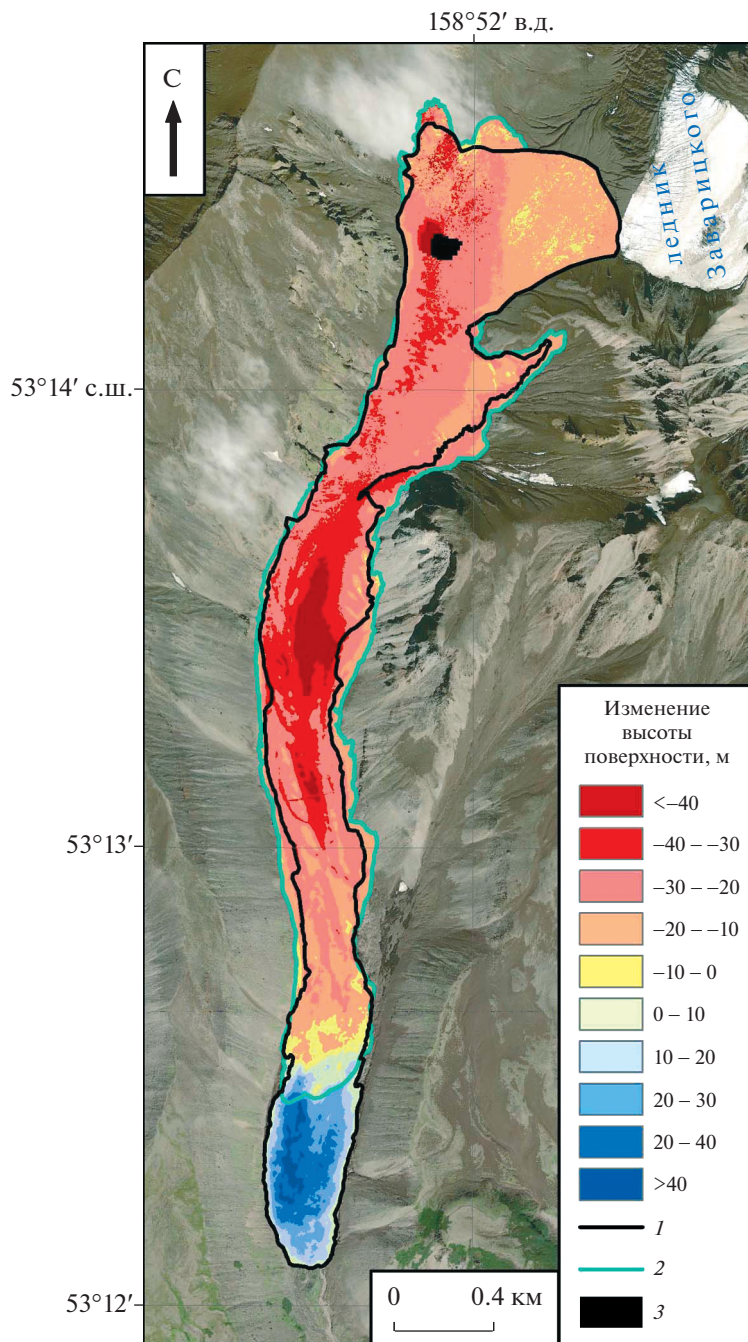


Рис. 3. Изменение высоты поверхности в границах ледника Козельский с 1977 по 2022 г., м.: 1 – граница ледника в 2022 г.; 2 – граница ледника в 1977 г.; 3 – участок, не покрытый данными современной ЦМР.

Fig. 3. Change in surface height within the boundaries of the Kozelsky Glacier from 1977 to 2022, m.: 1 – glacier boundaries in 2022; 2 – glacier boundaries in 1977; 3 – areas not covered by the current DEM data.

ния вулканов на ледники характеризуются наибольшей областью и длительностью воздействия.

Ледник Козельский расположен вблизи Авачинского вулкана и находится под его непосредственным влиянием. Поверхностная морена, сложенная материалом вулканогенного происхождения, в 2016 г. покрывала почти 72% площади ледника (1.25 ± 0.03 из 1.74 ± 0.02 км²). Морен-

ным чехлом забронирован язык ледника ниже 1280 м, выположенная поверхность в районе ледодораздела выше 1810 м и широкая полоса вдоль правого края ледника, на который поступает большое количество вулканического шлака и обломочного материала с осыпей правого борта долины (см. рис. 3). Участки наибольшей убыли льда за 1977–2022 гг. на рис. 3 (–30 м и ниже) со-

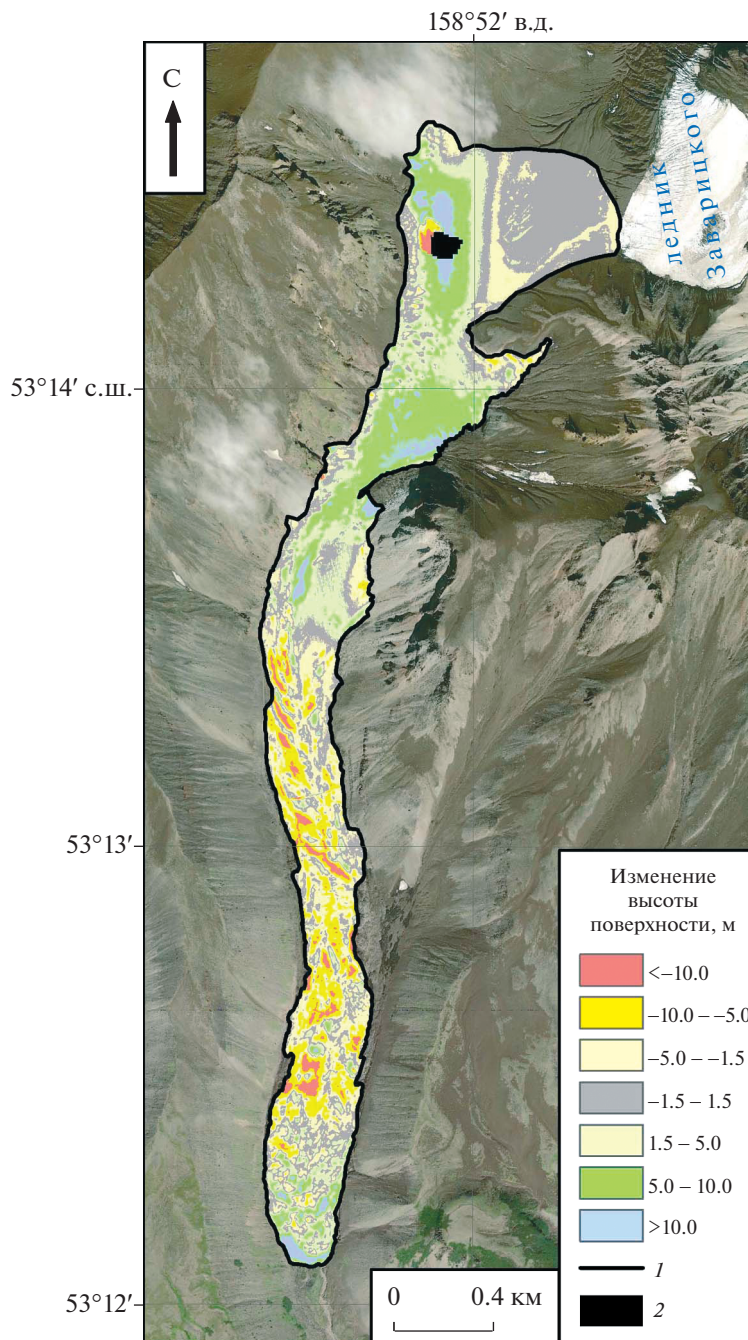


Рис. 4. Изменение высоты поверхности в границах ледника Козельский с 2015 по 2022 г., м.: 1 – граница ледника в 2022 г.; 2 – участок, не покрытый данными современной ЦМР.

Fig. 4. Change in surface height within the boundaries of the Kozelsky Glacier from 2015 to 2022, m.: 1 – glacier boundaries in 2022; 2 – areas not covered by the current DEM data.

ответствуют области открытого льда. Убыль льда на участке в области ледораздела с ледником Заварицкого (северо-восточные окраины ледника на рис. 3), вероятно, обусловлена не столько поверхностной абляцией, сколько метелевым переносом зимних осадков на более низкие уровни и растеканием льда с перевала. Вероятно, понижение поверхности нижней части языка ледника

выше его границы 1977 г. также обусловлено не только термоэрозией, которая наиболее интенсивна на низких высотных уровнях, но и перемещением льда вниз по долине.

В настоящее время ледник располагается в значительном высотном диапазоне от 790 до 1955 м, обеспечивающим температурный режим, необходимый для накопления и сохранения твёрдых

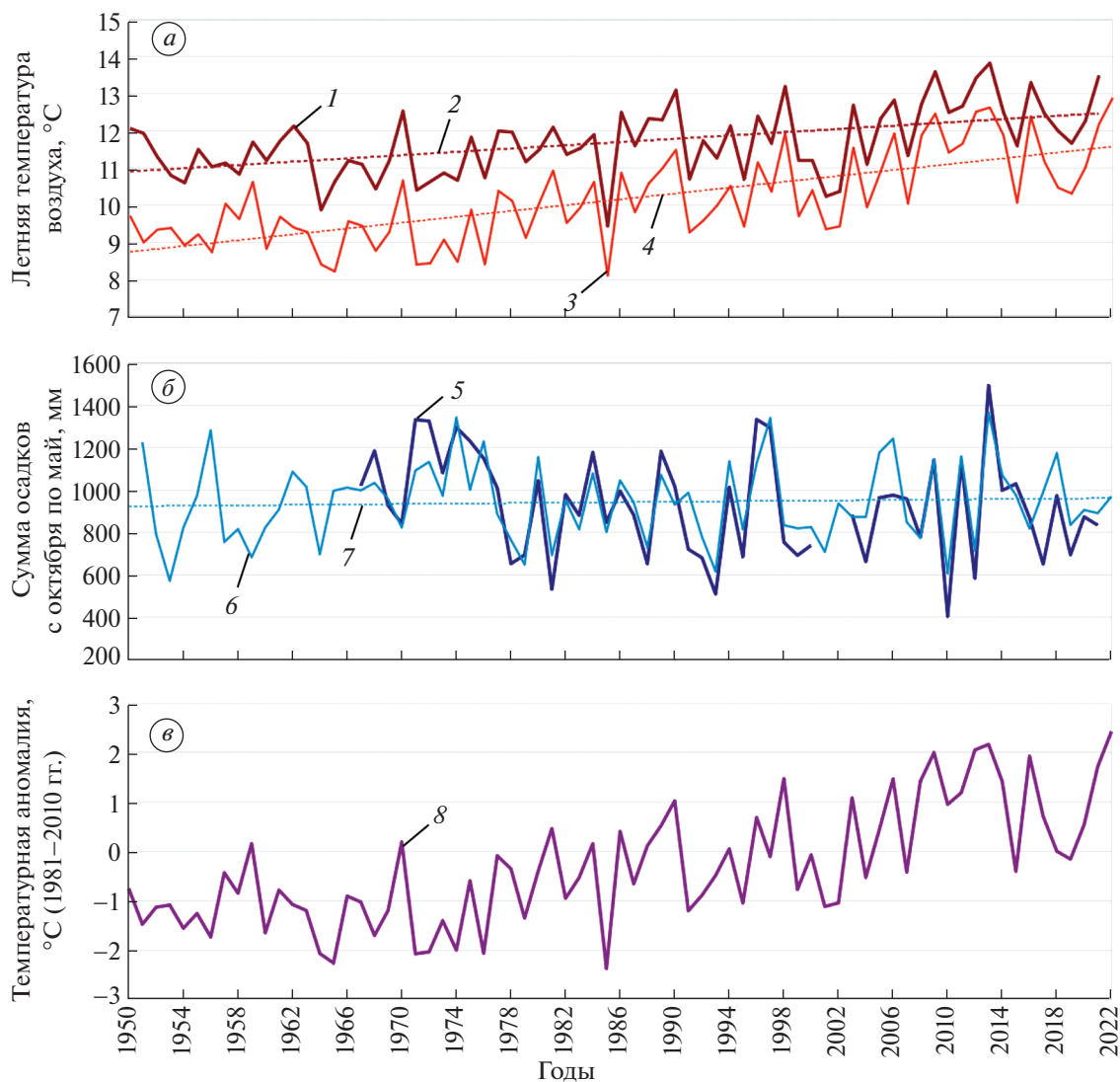


Рис. 5. Изменения:

a – средних летних температур воздуха (июнь–август) по данным наблюдений на ГМС Петропавловск–Камчатский (1) (2 – линия тренда) и реанализа ECMWF ERA5 (Monthly..., 2022) (3) (4 – линия тренда);

b – сумм осадков с октября по май по данным наблюдений на ГМС Петропавловск–Камчатский (5) и реанализа ECMWF ERA5 (Monthly..., 2022) (6) (7 – линия тренда);

в – аномалии летних температур воздуха (8) (базовый период 1981–2010 гг.) в районе исследований в 1950–2022 гг. по данным реанализа ECMWF ERA5 (Monthly..., 2022).

Fig. 5. Changes:

a – of average summer air temperatures (June–August) according to observational data at the Petropavlovsk–Kamchatsky meteorological station (1) (2 – trend line) and ECMWF ERA5 reanalysis (Monthly..., 2022) (3) (4 – trend line);

b – amount of precipitation from October to May according to observational data at the Petropavlovsk–Kamchatsky meteorological station (5) and ECMWF ERA5 reanalysis (Monthly..., 2022) (6) (7 – trend line);

в – summer air temperature anomalies (8) (base period 1981–2010) in the study area in 1951–2022 according to ECMWF ERA5 reanalysis (Monthly..., 2022).

осадков. Однако определение положения границы области питания затрудняют метелевый перенос и лавинное питание. В годы полевых балансовых наблюдений её высота изменялась от 1160 м в 1973/74 г. до 1360 м в 1980/81 г. (Виноградов, Муравьев, 1992). В настоящее время условно можно выделить область питания выше уровня 1600 м,

где сохраняется сезонный снежный покров и существуют участки многолетних фирнов разного генезиса. Увеличение высоты её положения не противоречит наблюдаемому росту летних температур воздуха за прошедший период. Соответственно, область расхода располагается ниже этого уровня, где свободная от снега поверхность

льда постепенно исчезает под сплошным покровом пирокластического материала и обломками горных пород. Площадь области абляции составляет около 60% от площади ледника и именно здесь в интервале высот 1200–1400 м наблюдается наибольшее понижение поверхности за 1977–2022 гг. (см. рис. 3). На втором месте высотный диапазон 1400–1600 м.

Как показано выше, особенность данного ледника заключается в сочетании отрицательного баланса с практически непрерывным продвижением линии фронта вниз по долине. Причиной такого динамического режима ледника может быть повышенная сейсмичность, связанная с положением в сейсмически активной зоне и близостью активного вулкана, и особенности рельефа ложа. После известного эксплозивного извержения в 1945 г. были зафиксированы и другие проявления активности этого вулкана: извержения 1991 и 2001 гг., повышенная сейсмичность в 2005 и 2019 гг., представленная последовательностью роевых землетрясений с максимальным энергетическим классом $K_s = 6.6$ (Фирстов и др., 2021). Кроме таких, разнесённых по времени событий, существует ещё и микросейсмичность, которая представлена землетрясениями энергетического класса $2 < K_s < 4$ и фиксируется в фоновом режиме в количестве до 30–50 событий в сутки (Сенюков и др., 2006).

Данные для оценки современного состояния баланса массы ледника Козельский можно найти в результатах исследований, недавно опубликованных в работе (Hugonnet et al., 2021a) и находящихся в открытом доступе. Они представляют собой набор данных глобального охвата (включающий все ледниковые районы планеты, в том числе и Камчатку), содержащий информацию об изменении высоты поверхности ледников в период с 01.01.2000 по 01.01.2020 (Hugonnet et al., 2021b). Эта база данных создана в результате сравнения разновременных цифровых моделей поверхности, полученных с использованием стереопар спутниковых снимков ASTER. В этой работе при выполнении расчётов использованы данные о пространственном положении границ ледников Камчатки из RGI 6.0. Разрешение сведений об изменении высоты поверхности ледников в этом наборе данных составляет 100×100 м. Средняя скорость изменения высоты поверхности ледника Козельский в период 01.01.2015–01.01.2020 (наиболее близкий к периоду нашего исследования) по этим материалам составляла -0.51 ± 0.63 м/год. Суммарное изменение высоты поверхности ледника за этот период составило -2.55 ± 3.15 м.

Однако материалы RGI 6.0 на район исследований, как было отмечено выше, существенно занижают площади ледников, игнорируя заморенные участки. Так, площадь ледника Козельский, по

данным RGI 6.0, в 2013 г. составляла 0.88 км^2 – вдвое меньше площади ледника в 2012 г. ($1.77 \pm 0.09 \text{ км}^2$) по данным работы (Муравьев, 2017) и в 2022 г. ($1.72 \pm 0.02 \text{ км}^2$) по данным нашего исследования. Заморенная часть языка ледника и перевала между вулканами Авачинский и Козельский в данные RGI 6.0 не включена и поэтому не использована в расчётах изменения высоты поверхности ледника, результаты которых представлены в таблицах исходных материалов (Hugonnet et al., 2021b). Также следует отметить, что временные интервалы в наборе данных (Hugonnet et al., 2021b) начинаются и заканчиваются 1 января разных лет, то есть в разгар периода аккумуляции на ледниках Авачинской группы вулканов. Учитывая высокую снежность зим района исследований и интенсивный метелевый перенос в горах, можно предположить наличие неучтённых погрешностей измерений, обусловленных разницей снегонакопления в разные годы. Изложенные выше факты позволяют нам полагать, что результаты нашего исследования баланса массы ледника Козельский – более точные и достоверные, чем данные (Hugonnet et al., 2021b).

Среди полученных результатов можно выделить два момента, выяснение причин возникновения которых вызывает дополнительные вопросы. Первый связан с изменением величины и знака баланса массы ледника за последние семь лет (с 2015 по 2022 г.). Из области отрицательных значений (-0.40 м в.э./год) он перешёл в положительную, хотя и близкую к нулю, величину (0.07 м в.э./год). С одной стороны, мы могли бы и не узнать об этом, если бы не имели возможность оценить баланс массы на коротком временном интервале. Баланс массы конкретного года зависит от комбинации метеорологических факторов (количество осадков и их распределение по времени, время начала и конца периода абляции, характер облачности и т.п.), и можно допустить, что при высокой чувствительности ледника такие ситуации уже возникали в прошлом, но при осреднении за 45 лет остались незамеченными. С другой стороны, по доступным для нас данным о температуре и осадках (см. рис. 5) можно увидеть, что средние летние температуры воздуха в 2016–2022 гг. были на 0.2°C ниже, чем в предыдущие пять лет (2010–2015 гг.), а суммы осадков холодного периода практически не изменились (-4.2%). Такими, не очень существенными отличиями метеорологических параметров, трудно объяснить околонулевой баланс массы ледника в 2015–2022 гг., по сравнению со значениями 1977–2015 гг. Для этого необходима дополнительная информация.

Второй момент связан с уменьшением скорости перемещения линии фронта ледника по долине с 20 до 5 м/год. Пока можно только констати-

ровать этот факт, но для обсуждения возможных причин и прогноза дальнейшего развития ситуации необходимы дополнительные исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование позволило оценить изменение границ, высоты поверхности и объёма ледника Козельский на Камчатке за 45-летний период 1977–2022 гг., а также два более коротких периода — 1977–2015 и 2015–2022 гг. Установлено, что за прошедшие 45 лет площадь ледника практически не изменилась (сокращение с 1.77 ± 0.06 до 1.72 ± 0.02 км²). При этом длина ледника увеличилась примерно на 0.7 км, а ширина уменьшилась почти на всём протяжении. Высота его поверхности понизилась в среднем на 17.3 м. Кумулятивный баланс массы ледника Козельский в 1977–2022 гг. был отрицательным и составил -14.70 ± 3.94 м в.э. (в среднем -0.33 м в.э./год).

В последние 45 лет на леднике Козельский происходила убыль льда и его перераспределение на более низкие гипсометрические уровни, не компенсирующееся абляцией. В последнее десятилетие наблюдается замедление наступания фронта ледника. Средняя скорость наступания фронта ледника в 2012–2022 гг. составляла около 5.2 м/год при 17.9 м/год в 1977–2007 гг. и 20.0 м/год в 2007–2012 гг.

Изменения высоты поверхности ледника Козельский и его объёма в 1977–2022 гг. происходили неравномерно. Так, за период 1977–2015 гг. среднее понижение поверхности составило 17.84 м, объём сократился на 35.21 ± 7.20 млн м³, кумулятивный баланс массы составил -15.16 ± 4.17 м в.э. (в среднем -0.40 м в.э./год). В 2015–2022 гг. ситуация была принципиально иной — за 6 лет поверхность в среднем повысилась на 0.59 ± 1.55 м, объём увеличился на 1.01 ± 2.65 млн м³, кумулятивный баланс массы составил 0.50 ± 1.35 м в.э. (0.07 м в.э./год). Возможно, что эта ситуация имеет временный характер и была обусловлена благоприятной комбинацией метеорологических факторов, сохранявшейся на протяжении нескольких лет. Для ответа на вопрос о причинах произошедших изменений и устойчивости такого состояния ледника необходимо провести более детальные исследования чувствительности составляющих баланса массы к изменениям синоптических показателей в течение балансового года.

Современные климатические условия в регионе не благоприятны для развития ледника. В 1977–2022 гг. наблюдался тренд на повышение летних температур воздуха при относительно стабильном количестве атмосферных осадков, выпадающих в холодный период. Наблюдаемую динамику ледника, практически непрерывное (кроме

1978–1981 гг.) наступание его фронта в 1977–2022 гг. можно объяснить только воздействием вулканического фактора. Мощная поверхностная морена, покрывающая более 2/3 площади ледника, препятствует поверхностной абляции. Связанная с активным вулканизмом повышенная сейсмичность способствует движению льда.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РГО № 38/2022-И.

Acknowledgments. This research was supported by the Russian Geographical Society (project 38/2022-I).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485 // Электронный ресурс: URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature> (Дата обращения: 15.04.2023).
- Виноградов В.Н. Каталог ледников СССР. Т. 20. Ч. 2–4. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 75 с.
- Виноградов В.Н., Будников А.Е., Каразия Н.Ф. Черты режима ледника Козельского // Гляциологические исследования. 1976. № 25. С. 36–44.
- Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Ледник Козельский (Авачинская группа вулканов). СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 119 с.
- Глазырин Г.Е., Муравьев Я.Д., Ширавва Т. Расчёт показателей баланса массы горного ледника по данным наблюдений на ближайшей метеостанции // МГИ. 1999. Вып. 87. С. 95–97.
- Заварицкий А.Н. Вулкан Авача на Камчатке и его состояние летом 1931 г. // Тр. ЦНИГРИ. 1935. Вып. 35. 37 с.
- Заварицкий А.Н. Вулканы Камчатки. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 81 с.
- Котляков В.М., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Хромова Т.Е., Зверкова Н.М. Изменения горных ледников в Северном и Южном полушариях за последние 160 лет // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 4. С. 453–467.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-4-453-467>
- Муравьев А.Я. Колебания ледников Камчатки во второй половине XX — начале XXI вв. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Институт географии РАН, 2017. 168 с.
- Муравьев А.Я. Распределение и морфология современных ледников Камчатки // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 3. С. 325–342.
<https://doi.org/10.31857/S2076673420030043>
- 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., Муравьев А.Я., Никитин С.А. Баланс массы ледников Корякского нагорья Нежданский и Соседний за 1961–2016 гг. // Лёд и Снег. 2022.

- Т. 62. № 1. С. 5–16.
<https://doi.org/10.31857/S2076673422010112>
- Перфильев Б.В. Два восхождения на Авачинскую сопку // Изв. ИРГО. 1912. Т. 48. Вып. 1–5. С. 67–100.
- Пийп Б.И. Извержения вулканов Камчатки в 1944–1945 гг. // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1946. № 6. С. 39–56.
- Сенюков С.Л., Нурждина И.Н., Дроздина С.Я., Кожевникова Т.Ю. Сейсмичность Авачинского вулкана в 1994–2005 гг. // Сб. трудов конф. “Геофизический мониторинг Камчатки. Научно-техническая конференция”. Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 101–105.
<https://doi.org/10.13140/2.1.4322.7847>
- Фирстов П.П., Шакирова А.А., Максимов А.П., Черных Е.В. Активизация Авачинского вулкана в 2019 г. // Вулканология и сейсмология. 2021. № 3. С. 3–17.
<https://doi.org/10.31857/S0203030621030032>
- 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*. 2021a. V. 592. P. 726–731.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F., Kääb A. // *Nature*. 2021b. V. 592. P. 726–731
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Huss M. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change // *The Cryosphere*. 2013. V. 7. P. 877–887.
<https://doi.org/10.5194/tc-7-877-2013>
- Kamchatka Volcanic Eruption Response Team // Электронный ресурс: URL: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volcano> (Дата обращения: 15.03.2023)
- ECMWF // Электронный ресурс: URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (Дата обращения: 15.03.2023)
- Unified State Data Fund on the state of the environment, its pollution // Электронный ресурс: URL: <https://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov>. Дата обращения: 15.04.2023.
- Polar Geospatial Center // Электронный ресурс: URL: <https://www.pgc.umn.edu/guides/stereo-derived-elevation-models/pgcs-dem-products-arcticdem-remap-and-earthdem/> (Дата обращения: 15.03.2023)
- Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyayeva V. Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries // *Regional Environmental Change*. 2019. V. 19. № 5. P. 1229–1247.
<https://doi.org/10.1007/s10113-018-1446-z>
- Monthly Reanalysis Timeseries from Climate Reanalyzer. Climate Change Institute, University of Maine, USA // Электронный ресурс: URL https://climatereanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/ (Дата обращения: 07.02.2023)
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey 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. Harvard: ArcticDEM, Dataverse, V1. 2018,
<https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>
- Porter C., Howat I., Noh M.-J., Husby E., Khuvis S., Danish E., Tomko K., Gardiner J., Negrete A., Yadav B., Klassen J., Kelleher C., Cloutier M., Bakker J., Enos J., Arnold G., Bauer G., Morin P. Harvard: ArcticDEM – Strips, Version 4.1. 2022.
<https://doi.org/10.7910/DVN/C98DVS>
- RGI Consortium Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space. Colorado, USA. Digital Media, 2017.
<https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>

Citation: Muraviev A.Ya., Nosenko G.A., Mironov I.K., Dvigalo V.N., Muraviev Ya.D. Mass balance of the Kozelsky Glacier in Kamchatka in 1977–2022. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (3): 317–331. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423030079

The Mass Balance of the Kozelsky Glacier in Kamchatka for 1977–2022

A. Ya. Muraviev^{a, #}, G. A. Nosenko^a, I. K. Mironov^b, V. N. Dvigalo^b, and Ya. D. Muraviev^b

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

^b*Institute of Volcanology and Seismology Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

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

Received May 26, 2023; revised June 6, 2023; accepted June 27, 2023

The change in the volume of the Kozelsky Glacier in Kamchatka for the period 1977–2022 (1977–2015 and 2015–2022) was estimated using historical data and modern DEM. During this period, the area of the glacier did not change much. At the same time, its length increased by about 0.7 km, while the width decreased over

its almost whole extent. The volume of the glacier decreased by 34.15 ± 6.74 million m^3 , and its surface became lower by 17.30 m, on the average. The cumulative mass balance amounted 14.70 ± 3.94 m w.e., and the mean annual value -0.33 m w.e. yr^{-1} . In the last 45 years, the ice loss and redistribution to lower hypsometric levels took place on the Kozelsky Glacier. In 1977–2015, the average area change in the altitude of the glacier surface was equal to -17.84 m, the volume decreased by 35.21 ± 7.20 million m^3 , the cumulative mass balance amounted -15.16 ± 4.17 m w.e., and the mean annual balance -0.40 m w.e. yr^{-1} . In the period 2015–2022, an elevation of the glacier surface was recorded by 0.59 ± 1.55 m on the average, the volume increased by 1.01 ± 2.65 million m^3 , the cumulative mass balance amounted to 0.50 ± 1.35 m w.e., and the mean annual balance – to 0.07 m w.e. yr^{-1} . During the last decade, a slowdown in the movement of the glacier front down the valley was recorded. In 2012–2022, the glacier front advanced with a velocity of about 5.2 m/year, while it was 17.9 m/year in 1977–2007, and 20.0 m/year in 2007–2012. The current climatic conditions are not favorable for development of glaciers. In 1977–2022, a trend of the summer air temperature rise was observed with a relatively stable amount of precipitation falling during the cold period. The almost continuous (except 1978–1981) advance of the glacier in 1977–2022 can be explained by the influence of the volcanic factor. A thick surface moraine covers more than 2/3 of the glacier area and, thus, prevents the surface ablation. Increased seismic activity associated with active volcanism promotes the ice movement.

Keywords: Kozelsky Glacier, Kamchatka, geodetic mass balance, volcanoes, historical data, satellite imagery

REFERENCES

- Buligina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V.* *Opisanie massiva dannikh srednemesyachnoi temperaturi vozdukh na stantsiyakh Rossii.* Description of the data array of average monthly air temperature at stations in Russia. Certificate of state registration of the database № 2014621485. Retrieved from: URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature> (Last access: April 15 2023) [In Russian].
- Vinogradov V.N.* *Katalog lednikov SSSR.* USSR Glacier Inventory. V. 20. Parts 2–4. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1968: 75 p. [In Russian].
- Vinogradov V.N., Budnikov A.E., Karaziya N.F.* Features of regime of the Kozelsky Glacier. 1976, 25: 36–44 [In Russian].
- Vinogradov V.N., Muraviev Ya.D.* Kozelsky Glacier (The Avachinsky Volcanic Group). Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992: 119 p. [In Russian].
- Glazyrin G.E., Muraviev Ya.D., Shiraiva T.* Estimation of mountain glacier mass balance components by meteorological data from nearest meteorological station. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1999, 87: 95–97 [In Russian].
- Zavaritskii A.N.* *Vulkan Avacha na Kamchatke I ego sostoyanie letom 1931 g.* Avacha volcano in Kamchatka and its state in the summer of 1931. *Trudi TsNIGRI.* Proc. of the Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals. 1935, 35: 37 p. [In Russian].
- Zavaritskii A.N.* *Vulkani Kamchatki.* Volcanoes of Kamchatka. Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Sciences. 1955: 81 p. [In Russian].
- Kotlyakov V.M., Chernova L.P., Muraviev A.Y., Khromova T.E., Zverkova N.M.* Changes of mountain glaciers in the Southern and Northern Hemispheres over the past 160 years. *Ice and Snow.* 2017, 57 (4): 453–467. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-4-453-467> [In Russian].
- Muraviev A.Ya.* *Kolebaniya lednikov Kamchatki vo vtoroy polovine XX – nachale XXI vekov.* Fluctuations in the glaciers of Kamchatka in the second half of the XX – the beginning of the XXI century. PhD-thesis. Moscow: Institute of Geography RAS. 2017: 168 p. [In Russian].
- Muraviev A.Ya.* Distribution and morphology of present-day glaciers on Kamchatka. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2020, 60 (3): 325–342. <https://doi.org/10.31857/S2076673420030043> [In Russian].
- Nosenko G.A., Muraviev A.Y., Ivanov M.N., Sinitzky 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 [In Russian]. <https://doi.org/10.31857/S2076673420010022>
- Nosenko G.A., Muraviev A.Ya., Nikitin S.A.* Mass balance of the Nezhdannyy and Sosedny glaciers of the Koryak Highlands in 1961–2016. *Led i Sneg.* Ice and Snow 2022, 62 (1): 5–16. <https://doi.org/10.31857/S2076673422010112> [In Russian].
- Perfiliev B.V.* *Dva voskhoshdeniya na Avachinskuyu sopku.* Two ascents to Avachinsky bald mountain. *Izvestiya Imperatorskogo Russkogo Geograficheskogo Obshchestva.* Proc. of the Russian Geographical Society. 1912, 48 (1–5): 67–100 [In Russian].
- Piip B.I.* *Izversheniya vulkanov Kamchatki v 1944–1945 gg.* The Eruptions on Kamchatka volcanoes in 1944–1945. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya geologicheskaya.* Proc. of the USSR Academy of Sciences. Geological series. 1946, 6: 39–56 [In Russian].
- Senyukov S.L., Nuzhdina I.N., Droznina S.Ya., Kozhevnikova T.Yu.* *Seismichnost' Avachinskogo vulkana v 1994–2005 gg.* Seismicity of Avachinsky Volcano in 1994–2005. In: Proc. of the conf. “Geophysical monitoring of Kamchatka. Scientific and technical conference”. Petropavlovsk-Kamchatsky. 2006: 101–105. <https://doi.org/10.13140/2.1.4322.7847> [In Russian].
- Firstov P.P., Shakirova A.A., Maksimov A.P., Chernykh E.V.* The 2019 resumption of activity on Avachinsky volcano. *Journ. of Volcanology and Seismology.* 2021, 3: 3–17. <https://doi.org/10.31857/S0203030621030032>
- Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant L., Brun F., Kääb A.* Accelerated global glacier mass loss in

- the early twenty-first century. *Nature*. 2021a, 592: 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F., Käb A.* *Nature*. 2021b, 592: 726–731 <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Huss M.* Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *The Cryosphere*. 2013, 7: 877–887. <https://doi.org/10.5194/tc-7-877-2013>
- Kamchatka Volcanic Eruption Response Team. Retrieved from: URL: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volcano> (Last access: March 15 2023)
- ECMWF. Retrieved from: URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (Last access: March 15 2023)
- Unified State Data Fund on the state of the environment, its pollution. Retrieved from: URL: <https://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-us-traneniem-sistemicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov>. (Last access: March 15 2023)
- Polar Geospatial Center. Retrieved from: URL: <https://www.pgc.umn.edu/guides/stereo-derived-elevation-models/pgcs-dem-products-arcticdem-remand-earthdem/> (Last access: March 15 2023)
- Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyayeva V.* Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries. *Regional Environmental Change*. 2019, 19 (5): 1229–1247. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1446-z>
- Monthly Reanalysis Timeseries from Climate Reanalyzer. Climate Change Institute, University of Maine, USA. Retrieved from: URL: https://climatoreanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/ (last access: 07 February 2023).
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.J., Bates B., Peterman K., Keeseey 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.* Harvard: ArcticDEM, Dataverse, V1. 2018. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>
- Porter C., Howat I., Noh M.-J., Husby E., Khuvis S., Danish E., Tomko K., Gardiner J., Negrete A., Yadav B., Klassen J., Kelleher C., Cloutier M., Bakker J., Enos J., Arnold G., Bauer G., Morin P.* Harvard: ArcticDEM – Strips, Version 4.1. 2022. <https://doi.org/10.7910/DVN/C98DVS>
- RGI Consortium Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space. Colorado, USA. Digital Media. 2017. <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>