

УДК 551.324

ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДНИКОВ И СНЕЖНИКОВ МУТНОВСКОГО И ГОРЕЛОГО ВУЛКАНОВ (ЮГ КАМЧАТКИ) ЗА 1973–2023 гг.

© 2026 г. Ю. Ю. Стельмах*, Д. А. Петраков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**e-mail: julia.stelmakh1806@gmail.com*

Поступила 25.09.2025 г.

После доработки 12.12.2025 г.

Принята к печати 23.03.2026 г.

Представлена оценка пространственно-временных изменений площади и баланса массы ледников и снежников, расположенных на вулканах Горелый и Мутновский (юг Камчатки). В качестве исходных данных использованы спутниковые снимки Landsat-8 (2013–2017 гг.), Sentinel-2 (2018–2023 гг.) и КН-9 (1973 г.), а также цифровые модели рельефа, полученные на основе мозаики ArcticDEM с разрешением 2 м и топографической карты масштаба 1 : 50000 по состоянию на 1974 г. Для обеспечения сопоставимости данных проведена корегистрация высот различных ЦМР. Расчёт баланса массы осуществлялся методом дифференцирования высотных значений в программе ArcGIS Pro. Результаты дешифрирования показали общее сокращение площади ледников и снежников в период с 1973 по 2023 г. В интервале 1973–2013 гг. площадь ледников сократилась на 7–81%, в то время как в 2013–2023 гг. изменения варьировали от –66 до +22%, что свидетельствует о локальных положительных тенденциях. Снежники в 2013–2023 гг. более активно сокращались по площади (от 14 до 67%), чем в предыдущие десятилетия. Среднегодовое значение баланса массы ледников в 1974–2022 гг. составило примерно –0.2 м в.э. за год. Подтверждено, что динамика кратерных ледников обусловлена вулканической активностью и обвально-осыпными процессами, тогда как изменения внекратерных ледников и снежников преимущественно зависят от метеорологических условий конкретного года. Отдельные многолетние снежники, обладающие признаками ледников – положительным балансом массы, устойчивостью во времени, ледяной структурой и наличием трещин движения – могут быть классифицированы как малые ледники.

Ключевые слова: ледники, снежники, вулканы, исторические данные, спутниковая съемка, баланс массы, Камчатка

DOI: 10.7868/S2412376526020055

ВВЕДЕНИЕ

Район действующих вулканов Мутновский и Горелый на юге Камчатки (рис. 1) – один из самых многоснежных на полуострове. Здесь, в условиях обильных осадков и специфических орографических условий, существует крупный нивально-гляциальный комплекс во взаимодействии с проявлениями вулканической деятельности (Муравьёв, 1985). Высокая снежность способствует широкому распространению малых форм оледенения – многолетних снежников, включая находящиеся на переходной стадии к ледникам, а также ледников площадью менее 0.1 км² (Виноградов, Муравьёв, 1982). Регион обладает зна-

чительным рекреационным потенциалом: ежегодно пешеходные и автомобильные маршруты к вулканам Мутновский и Горелый привлекают множество туристов (Селянгин, 2009).

Формирование нивально-гляциальных объектов в исследуемом районе связано с особенностями рельефа, климата и вулканической деятельности. Для территории характерна древовидно-ветвящаяся долинная сеть, широко распространены овраги и формы рельефа, связанные с взрывными извержениями и образованием кальдер. Помимо мощных взрывов, разрушение аккумулятивных форм вулканического рельефа связано с денудацией, преимущественно

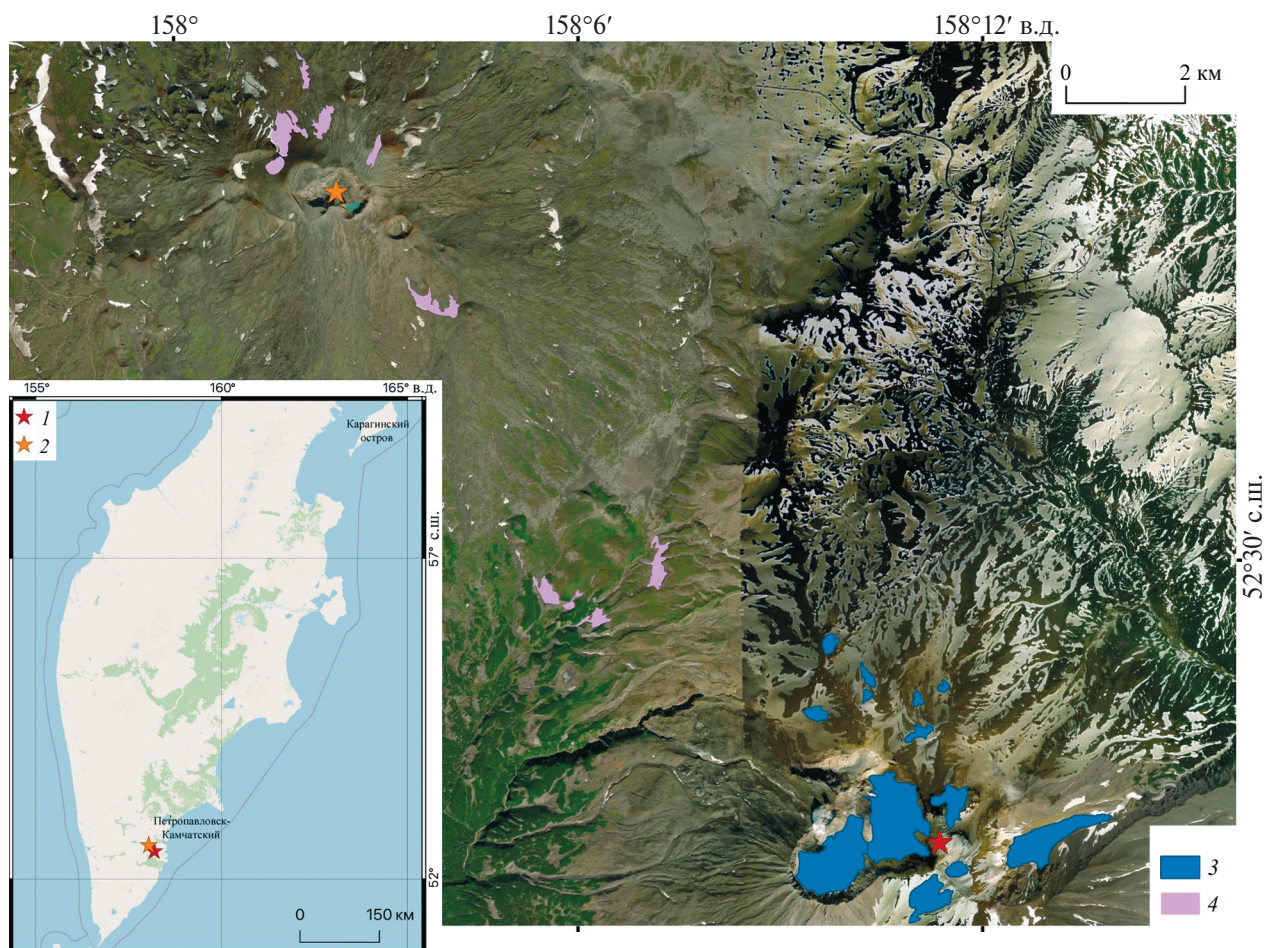


Рис. 1. Мутновский и Горелый вулканы: 1 – расположение Мутновского вулкана, 2 – расположение Горелого вулкана, 3 – ледники, 4 – снежники; подложка ESRI, 2021 г.

Fig. 1. Mutnovsky and Gorely volcanoes: 1 – location of the Mutnovsky volcano, 2 – location of the Gorely volcano, 3 – glaciers, 4 – snow patches; basemap ESRI, 2021

водной эрозией. Основная форма расчленения конусов – барранкосы (Геология СССР, т. XXXI, 1964). В отрицательных формах рельефа формируются снежники, которые с течением времени углубляют понижения рельефа в результате процессов нивации, весьма эффективных в рыхлых вулканических отложениях, в условиях влажного климата полуострова.

Район Мутновского и Горелого вулканов относится к южной вулканической климатической области, на восточных склонах которой выпадает одно из наибольших на Камчатке количество осадков – около 2500 мм (Кондратюк, 1974). Для района весьма типичны как летом, так и зимой значительная облачность и высокий снежный покров – до 10 м (Муравьев, 1985). Высокая

влажность, значительная облачность и обильные осадки в сочетании с ураганными ветрами определяют благоприятные условия для образования ледников и многолетних снежников (Кондратюк, 1974).

Первой экспедицией, которая провела работы и получила некоторые сведения об оледенении юга Камчатки, стала Камчатская экспедиция Русского географического общества 1908–1911 гг. Геологический отдел Камчатской экспедиции опубликовал описание и результаты работ (Конради, Келль, 1925), где впервые описаны ледники в кратере Мутновского вулкана. Авторы отмечают обилие снега в кратере вулкана, описывают “ледяную стену с вырывающимися из нее фумаролами”, разноцветность

и слоистость льда из-за наличия серы. Авторы подмечают наибольшую труднодоступность южного района Камчатки по сравнению с другими изученными экспедицией районами.

В 1968 г. вышел 20-й том Каталога ледников СССР, посвящённый ледникам Камчатки (Виноградов, 1968). В каталоге содержится информация о размерах и площади каждого ледника, их расположении относительно рек и вулканов, данные о высоте над уровнем моря, экспозиции и морфологии ледников; для исследуемого района данная информация касается ледников Мутновский Северо-Восточный и Мутновский Юго-Западный. В каталоге отсутствует информация о пространственном положении границ ледников и приводятся лишь численные данные о площади ледников, поэтому информацию нельзя было использовать в сравнительном анализе.

Первые гляциологические полевые масс-балансовые работы на кратерных ледниках проведены в 1980 г. Выяснено, что в кратерах Мутновского вулкана в среднем накапливается примерно 6 м снега (примерно 3000 мм в. э.). В центральных частях области аккумуляции переход фирна в лёд происходит через 3–4 года на глубине 5–10 м. Измеренный баланс массы 1979/80 г. гляциологического года равен для Мутновского Северо-Восточного ледника $+29 \text{ г/см}^2$ ($+0.29 \text{ м в. э.}$), для Мутновского Юго-Западного $+23 \text{ г/см}^2$ ($+0.23 \text{ м в. э.}$) (Виноградов, Муравьев, 1982).

В упомянутой выше работе Мутновский Северо-Восточный ледник описан как наиболее крупный в узле оледенения, с неоднородной поверхностью и площадью по состоянию на 1979 г. равной 1.34 км^2 . Ледопад начинается с высоты 1600 м. Фронт языка располагается на термальных площадках и удерживается в квазистационарном положении активностью фумарол. Ледник Мутновский Юго-Западный по состоянию на 1979 г. имел площадь 0.96 км^2 и характеризовался более ровной поверхностью и малым количеством трещин по сравнению с Мутновским Северо-Восточным ледником. В высшей части ледника описаны бергшруды в виде трещин глубиной около 30 м, оконтуренные стенкой кратера с одной стороны и гребневидными надувами снега с другой. В области абляции ледник разделялся на два языка: один заполнял дно юго-западного кратера, второй устремлялся к термальной площадке в северо-восточном кратере.

Исследование изменений площади ледников Мутновского вулкана представлено в работе (Муравьев, 2017). По данным исследования, размеры кратерных ледников Мутновского вулкана зависят главным образом от активности вулкана. Анализ выявил рост суммарной площади двух кратерных ледников с 1950 по 1983 г. на 10.5% и сокращение суммарной площади этих ледников с 1983 по 2012 г. на 7.2%. Внекратерные ледники, по данным исследования, сокращались с 1983 г., что соответствует климатическим изменениям в данном регионе.

По данным каталога “Ледники России” (Камчатка – Ледники России..., 2025), на Мутновском вулкане выделены 13 ледников. Ледники на Горелом вулкане, по данным “Ледников России”, отсутствуют. Из проанализированных ледников шесть имеют собственные названия; остальные семь обозначены в ходе работы номерами из каталога “Ледники России”.

Для района южной Камчатки характерно наличие большого количества разного вида снежников: перелетков, многолетних, некоторые из снежников демонстрируют черты, приближающие их к ледникам – фирновая граница, трещины движения, открытые участки льда и т.д. При увеличении снежности и изменении климатических условий снежники-перелетки могут превращаться в ледники и рассматриваться как переходная форма от снежного покрова к оледенению (Войтковский, 1999). В работе (Виноградов, Муравьев, 1982) высказывается предположение о том, что снежники южной части Камчатки относятся к переходной форме снежник–ледник. Их толщина достигает 25 м, а площадь 0.3 км^2 .

Отмечено, что малая площадь всех форм оледенения исследуемого района – одна из важнейших его особенностей, поскольку малые ледники и многолетние снежники – это переходные элементы между сезонным снежным покровом и оледенением. Малые формы оледенения – важные индикаторы изменения климата (Коваленко, 2008). Большая часть снежников Мутновско-Гореловского района имеет навешанный генезис. Широко распространены склоновые и долинские снежники.

Изучение ледников и снежников южной Камчатки отличается обрывочностью и нерегулярностью наблюдений. Данные полевых исследований 1980-х годов обновлены лишь в работе

(Муравьев, 2017). По данным полевых наблюдений летом 2023 г., на вулкане Мутновский происходят очень динамичные изменения – усилились обвалы и осыпи, в связи с увеличением туристического потока возросла антропогенная нагрузка от туристов и хозяйственной деятельности. Цель работы – оценить изменения площади и массы снежников и ледников района вулканов Мутновский и Горелый (юг Камчатского полуострова) с 1973 по 2023 г. в условиях увеличения летних температур.

МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ

В качестве исходных материалов выбраны снимки спутников КН-9, Landsat-8, Sentinel-2. Кроме того, в процессе дешифрирования применялись общедоступные цифровые модели (ЦМР) рельефа ArcticDEM v3.0 и ЦМР, построенные по результатам оцифровки топографической карты масштаба 1 : 50000 (издание 1985 г.) (табл. 1).

В работе использованы два снимка со спутника КН-9, снятые 3 сентября 1973 г. Их разрешение варьирует от 0.9 до 1.1 м. Специфика снимков предполагает большое количество искажений местности, поэтому проведена ортотрансформация снимка методом “сплайн” в программе ArcGis Pro. Искажения распределены по снимку непропорционально, при ортотрансформации участков снимков для исследуемой территории поставлено более 600 точек привязки. Для исследуемой территории также оцифрованы отдельные участки топографических карт масштаба 1 : 50000, отражающие состояние местности на 1974 г. По данным оцифровки построена ЦМР, границы ячеек которой совпадают с ячейками ArcticDEM. На основании ГКИНП 05-029-84, высотная погрешность топографических карт масштаба 1 : 50000 для высокогорных участков составляет 1/2 высоты сечения рельефа, соответственно, вертикальная точность построенной ЦМР составила 5 м.

Таблица 1. Используемые в работе спутниковые снимки и ЦМР

Table 1. Satellite images and DEMs used in the paper

Спутник/ЦМР	Дата съёмки	Разрешение, м
Landsat-8	09.09.2013	15
	12.09.2014	15
	14.08.2015	15
	01.09.2016	15
	03.08.2017	15
Sentinel-2	31.08.2018	10
	21.08.2019	10
	09.09.2020	10
	20.08.2021	10
	05.08.2022	10
	09.09.2023	10
КН-9 (KeyHole-9)	03.09.1973	0.9–1.1
	03.09.1973	0.9–1.1
Фрагменты ЦМР “strips” из мозаики ArcticDEM	26.08.2012	2
	08.09.2021	2
	18.07.2022	2
ЦМР на основе советской топокарты масштаба 1 : 50000	1974	5

В работе применены отдельные фрагменты мозаики ArcticDEM “strips”, с конкретными датами проведения съёмки, что было важно при подборе фрагментов для расчёта баланса массы ледников и снежников (фрагменты должны быть сняты в период абляции). Всего было применено семь фрагментов “strips” для периода 2011–2022 гг.

ЦМР на 1974 г. и ArcticDEM построены в разных системах высот: ArcticDEM – в координатной системе WGS84 (ArcticDEM – Polar Geospatial Center ..., 2025), ЦМР на 1974 г. оцифрована в той же проекции. Однако системы высот этих ЦМР разные: топографические карты составлены в Балтийской системе высот, а в основе ArcticDEM заложены высоты геоида WGS84. Для уравнивания высот проведена ортотрансформация. В первую очередь, к высотам с топографической карты прибавлены гравитационные аномалии модели геоида EGM2008 (Earth Gravitation Model – Гравитационная модель Земли) (Pavlis et al., 2012). Геоид WGS84 уже учитывает гравитационные аномалии (ArcticDEM – Polar Geospatial Center..., 2025).

Далее проведена корегистрация всех применяемых ЦМР. Данная процедура проводится, когда ЦМР не совпадает с эталонной моделью рельефа. Несоответствие может происходить по ряду причин: из-за плохой географической привязки, неизвестных преобразований системы координат или системы высот, искажений, связанных с обработкой. Иными словами, корегистрация ЦМР позволяет выровнять сопоставимые модели рельефа в трёх измерениях и сделать их пригодными для сравнения. Корегистрация обязательно должна проводиться при применении разных ЦМР в исследованиях количественных изменений толщины ледников (Nuth, Kääb, 2011).

В ходе работы корегистрация выполнялась в программе Anaconda на языке программирования Python по методике, созданной О. Moore, Р. Hartzell и J. Shanahan (CODEM..., 2025). За эталонную ЦМР принят фрагмент ЦМР ArcticDEM за 26.08.2012, поскольку этот фрагмент охватывает наибольшую площадь исследуемой территории и наименьшее количество артефактов. К нему последовательно проведена корегистрация всех остальных выбранных ЦМР. После проведения описанных выше процедур, ЦМР стали сопоставимы по высоте и были готовы для проведения расчёта баланса массы ледников.

Расчёт высотной погрешности изменения высоты поверхности ледников и снежников выполнялся по стабильным участкам в пределах зоны покрытия ЦМР от 26.08.2012. Для этого в указанной области создана регулярная сеть точек с шагом 20×25 м. Затем, по результатам визуального анализа спутниковых снимков разных лет, из выборки были исключены потенциально нестабильные точки, расположенные на ледниках, снежниках, в руслах ручьёв, эрозионных врезках, на крутых осыпных склонах, на участках с ольховым стлаником, а также точки, лежащие на поверхностях с уклоном более 25° .

Полученной выборке точек присвоены значения высот из всех ЦМР, использованных в работе. Высотная погрешность определялась по величине среднеквадратичного отклонения значений высот по массиву точек каждой ЦМР относительно ЦМР от 26.08.2012. В результате вертикальная погрешность составила: для ЦМР 2021 г. – 1.7 м (по 4095 точкам); для ЦМР 2022 г. – 1.6 м (по 995 точкам). Погрешность определения высоты поверхности между ЦМР 1974, 2012 и 2021–2022 гг. была вычислена как среднеквадратичное значение погрешностей каждой из ЦМР в зоне перекрытия. Расчётная погрешность в зоне перекрытия ЦМР 1974 и 2012 гг. составила 5.25 м, 2012 и 2021 гг. – 2.33 м, 2012 и 2022 гг. – 2.26 м.

Дешифрирование границ ледников проводилось в соответствии с принципами Руководства по составлению каталога ледников СССР (Виноградов и др., 1966) и методического руководства GLIMS (Raup, Khalsa, 2010). Дешифрирование было проведено в программе QGIS 3.16. После выделения границ ледников в программе были рассчитаны площадь и периметр ледников, данные о которых отражались в атрибутивных таблицах. При дешифрировании неизбежно возникает ряд погрешностей, связанных с состоянием объекта съёмки, условиями съёмки, технологическими погрешностями и концептуальными ошибками. Поэтому расчёт погрешностей оценки площади ледника проводился по формуле произведения периметра ледника и половины значения одного пикселя снимка (Paul et al., 2017).

Из анализа были исключены 2015 и 2017 гг. в связи с высокой снежностью в конце периода абляции, из-за чего невозможно достоверно дешифрировать границы ледников и снежников. Отмечено, что Камчатка характеризуется большим количеством облачных дней, поэтому разброс дат

применяемых снимков составил примерно 1.5 месяца, что также могло повлиять на итог дешифрирования. По снимкам 2018, 2019 и 2020 гг. установлено, что на конец периода абляции в эти годы на исследуемой территории оставалось большое количество нерастаявшего снега. Больше всего снега растаяло летом 2023 г.: почти на всех ледниках обнажились участки открытого льда, ледники и снежники сильно уменьшились в размерах.

Расчёт баланса массы ледников проведён путём вычитания растровых значений высоты одной ЦМР из другой в программе ArcGis Pro. После проведения этой операции получено значение изменения высоты каждой ячейки (пиксела) за заданный период. После этого величина изменения высоты приводилась к среднему значению для всего ледника и пересчитывалась в размерность гляциологического баланса массы – метры водного эквивалента (м. в. э.) с учётом средней плотности ледникового льда $\rho = 850 \pm 60 \text{ кг/м}^3$ по работам (Huss, 2013; Hugonnet et al., 2021; Муравьев и др., 2023). Обработка ЦМР проводилась в хронологическом порядке снимков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение площади ледников и снежников Мутновского и Горелого вулканов. В ходе работы дешифрировано 13 ледников Мутновского вулкана. Данные об изменении площадей за периоды 1973–2013 и 2013–2023 гг. представлены в табл. 2. Также дешифрированы границы 10 снежников Горелого и Мутновского вулканов. Всем снежникам произвольно присвоены порядковые номера от 1 до 10. Данные об изменении площадей за аналогичные периоды представлены в табл. 3.

В период 1973–2013 гг. границы четырёх ледников не оказалось возможным отдешифрировать из-за засветки снимка КН-9.

Говоря об изменении площадей ледников за период с 1973 по 2013 г., можно однозначно сказать о тенденции к их сокращению даже с учётом максимальной возможной погрешности. Ледники сократились в диапазоне 0.01–0.84 км², или 7–81% от площади.

Таблица 2. Площади (1973, 2013 и 2023 г.) и изменение площадей ледников Мутновского вулкана за два периода
Table 2. Area (for 1973, 2013 and 2023) and changes in the areas of the Mutnovsky volcano glaciers over 2 periods

	1973	2013	2023	1973–2013 гг.			2013–2023 гг.		
	км ²	км ²	км ²	км ²	%	% в год	км ²	%	% в год
Клешня	–	0.08 ± 0.01	0.08 ± 0.01	–	–	–	0.01 ± 0.01	4	0.4
Мутновский СВ	1.25 ± 0.01	1.16 ± 0.04	1.16 ± 0.03	–0.09 ± 0.02	–7	–0.2	–0.01 ± 0.01	–0.1	–0.01
Мутновский ЮЗ	1.05 ± 0.01	0.96 ± 0.04	1.00 ± 0.03	–0.09 ± 0.02	–8	–0.2	0.04 ± 0.03	4	0.4
Песчанского	–	0.35 ± 0.02	0.31 ± 0.01	–	–	–	–0.04 ± 0.03	–11	–1.1
Тронова	0.75 ± 0.01	0.65 ± 0.03	0.64 ± 0.02	–0.1 ± 0.01	–13	–0.3	–0.01 ± 0.02	–2	–0.2
Тушинского	1.03 ± 0.01	0.19 ± 0.02	0.17 ± 0.01	–0.84 ± 0.01	–81	–2	–0.03 ± 0.01	–13	–1.3
Ru10-22.0705	–	0.08 ± 0.01	0.08 ± 0.01	–	–	–	–0.01 ± 0.01	–3	–0.3
Ru10-22.0710	0.12 ± 0.01	0.11 ± 0.02	0.04 ± 0.01	–0.01 ± 0.01	–7	–0.2	–0.7 ± 0.01	–66	–6.6
Ru10-22.0711	0.04 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01	–0.01 ± 0.01	–19	–0.5	–0.01 ± 0.01	–10	–1
Ru10-22.0712	0.04 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01	–0.01 ± 0.01	–36	–0.9	0.01 ± 0.01	22	2.2
Ru10-22.0713	–	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01	–	–	–	–0.01 ± 0.01	–5	–0.5
Ru10-22.0714	0.07 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.01	–0.02 ± 0.01	–24	–0.6	–0.01 ± 0.01	–12	–1.2
Ru10-22.0715	0.09 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.08 ± 0.01	–0.03 ± 0.01	–29	–0.7	0.01 ± 0.01	17	1.7

Прочерк – нет данных

Dash – no data available

Таблица 3. Площади (1973, 2013 и 2023 г.) и изменение площадей снежников Мутновского и Горелого вулканов за 2 периода**Table 3.** Area (for 1973, 2013 and 2023) and the changes in the area of the snow patches of Mutnovsky and Gorely volcanoes over 2 periods

	1973	2013	2023	1973–2013 гг.			2013–2023 гг.		
	км ²	км ²	км ²	км ²	%	% в год	км ²	%	% в год
1	0.18 ± 0.01	0.16 ± 0.03	0.14 ± 0.02	-0.02 ± 0.01	-12	-0.3	-0.02 ± 0.01	-14	-1.4
2	0.12 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.03 ± 0.01	-0.02 ± 0.01	-16	-0.4	-0.07 ± 0.01	-67	-6.7
3	0.06 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.03 ± 0.01	-0.01 ± 0.01	-8.5	-0.2	-0.03 ± 0.01	-51	-5.1
4	0.25 ± 0.02	0.22 ± 0.03	0.11 ± 0.01	-0.04 ± 0.01	-14	-0.35	-0.11 ± 0.01	-50	-5
5	0.09 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.04 ± 0.01	-0.03 ± 0.01	-31.5	-0.8	-0.02 ± 0.01	-36.5	-3.65
6	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0	0	0	-0.03 ± 0.01	-58	-5.8
7	0.12 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.07 ± 0.01	-0.02 ± 0.01	-19	-0.5	-0.03 ± 0.01	-32	-3.2
8	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.01 ± 0.01	-0.01 ± 0.01	-12	-0.3	-0.01 ± 0.01	-45	-4.5
9	0.09 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.05 ± 0.01	-0.02 ± 0.01	-20	-0.5	-0.02 ± 0.01	-31	-3.1
10	0.15 ± 0.02	0.15 ± 0.03	0.06 ± 0.01	-0.01 ± 0.01	-0.5	-0.01	-0.09 ± 0.01	-57	-5.7

Максимальное сокращение ледника Тушинского было связано с обрушением большей части его области питания и языка 30 сентября 1996 г. во время аномальных дождевых осадков (773.6 мм за последнюю неделю сентября по данным ближайшей ГМС “Дачные”) (Шайхутдинов, 2005). После этого события остатки ледника сохранились в небольшом каре, а на дне долины образовался большой массив мёртвого льда, расчленённый термоэрозией (Муравьев, 2017). Следствием этих осадков была и подвижка кратерного Мутновского Северо-Восточного ледника, в 1996–1997 гг. перекрывшего часть донного фумарольного поля вулкана (Гавриленко и др., 2001).

Снежники за этот же период сократились в меньшей степени, чем ледники, а некоторые из них оставались в квазистационарном состоянии. Сокращение площадей снежников варьируют от 0.004 до 0.035 км², или от 0.5 до 31.5% от их площади. Снежники № 6 и 10, вероятнее всего, оставались в этот период в квазистационарном положении.

В 2013–2023 гг. у большинства ледников также сократилась площадь: от 0.01 до 0.07 км², или от 0.1 до 66%. Некоторые ледники увеличили свою площадь от 0.01 до 0.04 км², или от 4 до 22% площади. Площадь некоторых ледников, вероятнее всего, оставалась квазистационарной.

Снежники в 2013–2023 гг. изменялись активнее, чем ледники, и на всех исследуемых объектах зафиксировано уменьшение площади. Площадь ледников уменьшилась от 0.01 до 0.11 км², или от 14 до 67%. Площадь некоторых снежников также могла оставаться квазистационарной. Поскольку снежники в целом имеют маленькую площадь, любые изменения их площади, выраженные в процентном показателе, имеют большие величины.

Площади ледников и снежников Мутновского вулкана крайне изменчивы год от года под влиянием метеорологических факторов: снежности, температуры воздуха, количества солнечных дней, господствующего направления ветра в конкретном году. У ледников разброс параметров увеличения и сокращения гораздо меньше, чем у снежников. Многолетние снежники могут в один год сократиться наполовину по сравнению с предыдущим годом, и уже через год увеличиться почти в 4 раза. Анализируя изменения, происходящие с площадями ледников вне кратера Мутновского вулкана в долгосрочном отрезке времени, можно сказать, что они имеют тенденцию к медленному сокращению, но сейчас находятся в достаточно стабильном состоянии. В отдельные краткосрочные периоды колебания площадей ледников заметны сильнее.

Изменения кратерных ледников, по мнению исследователей (Виноградов, Муравьев, 1982; Муравьев, 2017), сильно зависят от степени активности вулкана. Например, в 1950–1983 гг. суммарная площадь кратерных ледников выросла на 10.5%, но после этого началось их сокращение (Муравьев, 2017). Судя по полевым исследованиям в летние периоды 2023 и 2025 гг., в настоящее время изменение площади кратерных ледников скорее связано с вулканическими и обвально-осыпными процессами в кратере, нежели с изменением климата.

С использованием данных портала “Погода и климат” (Летопись погоды в Петропавловске-Камчатском. Погода и климат..., 2025) проведён анализ многолетних метеорологических наблюдений, включающих средние температуры за тёплый период (июнь–сентябрь) и суммы осадков за холодный период (октябрь–май), по данным метеостанций Водопадная, мыс Лопатка и Петропавловск-Камчатский. Анализ выявил устойчивую тенденцию к повышению средних температур летнего периода на всех трёх станциях. Наряду с этим, на метеостанции Водопадная с 2012 г. наблюдается увеличение количества зимних осадков. Сходная тенденция фиксиру-

ется и на метеостанции Петропавловск-Камчатский, где рост зимних осадков отмечается с 1938 г. В отличие от них, на метеостанции мыс Лопатка с 1966 г. в целом прослеживается снижение количества осадков в холодный период; однако при рассмотрении более короткого интервала (2012–2023 гг.) также выявляется увеличение количества зимних осадков, аналогичное наблюдениям на метеостанции Водопадная.

Ледники и снежники исследуемого района имеют тенденцию к медленному сокращению своих площадей в долгосрочной перспективе. Изменение всех форм оледенения, за исключением кратерных ледников, очевидно, связано с изменением климатических характеристик. Кратерные ледники в большей степени зависят от активности вулкана. На коротком промежутке времени состояние оледенения напрямую зависит от параметров конкретного года, что сразу же выражается в увеличении или уменьшении площади ледников.

Изменение баланса массы ледников и снежников Мутновского и Горелого вулканов. Баланс массы для ледников Мутновского вулкана был рассчитан для периодов 1974–2012 и 2012–2022 гг. (табл. 4).

Таблица 4. Баланс массы ледников Мутновского вулкана
Table 4. Mass balance of glaciers of the Mutnovsky volcano

	1974–2012 гг.			2012–2021/22 гг.		
	Изменения высоты, м	м в. э.	м в. э. в ГОД	Изменения высоты, м	м в. э.	м в. э. в ГОД
Клешня*	-6.4 ± 5.25	-5.44 ± 4.46	-0.1	-4.3 ± 2.26	-3.66 ± 1.92	-0.4
Мутновский СВ*	-3.8 ± 5.25	-3.23 ± 4.46	-0.1	-6.8 ± 2.26	-5.78 ± 1.92	-0.6
Мутновский ЮЗ	-17.4 ± 5.25	-14.79 ± 4.46	-0.4	-2.6 ± 2.33	-2.21 ± 1.98	-0.25
Песчанского*	-4 ± 5.25	-3.40 ± 4.46	-0.1	-2.9 ± 2.26	-2.47 ± 1.92	-0.25
Тронова*	-18 ± 5.25	-15.30 ± 4.46	-0.4	-3 ± 2.26	-2.55 ± 1.92	-0.3
Тушинского*	-23 ± 5.25	-19.55 ± 4.46	-0.5	1.9 ± 2.26	1.62 ± 1.92	0.2
Ru10-22.0705*	-19 ± 5.25	-16.15 ± 4.46	-0.4	-3 ± 2.26	-2.55 ± 1.92	-0.3
Ru10-22.0710	6.8 ± 5.25	5.78 ± 4.46	0.15	2.3 ± 2.33	1.96 ± 1.98	0.2
Ru10-22.0711*	-5 ± 5.25	-4.25 ± 4.46	-0.1	-4.9 ± 2.26	-4.17 ± 1.92	-0.4
Ru10-22.0712	-6.1 ± 5.25	-5.19 ± 4.46	-0.1	-1.9 ± 2.33	-1.62 ± 1.98	-0.2
Ru10-22.0713*	6.8 ± 5.25	5.78 ± 4.46	0.15	-4.2 ± 2.26	-3.57 ± 1.92	-0.4
Ru10-22.0714	-8.1 ± 5.25	-6.89 ± 4.46	-0.2	-0.5 ± 2.33	-0.43 ± 1.98	-0.05
Ru10-22.0715	-23.4 ± 5.25	-19.89 ± 4.46	-0.5	-4.2 ± 2.33	-3.57 ± 1.98	-0.4

*Применена ЦМР 2022 г., в остальных случаях – 2021 г.

*The 2022 DEM was used, in other cases – 2021.

Для ледников Клешня, Мутновский Северо-Восточный, Песчанского, Тронова, Тушинского, Ru10-22.0705, Ru10-22.0711, Ru10-22.0713 использовался фрагмент ЦМР 2022 г. (они отмечены знаком *), для остальных – 2021 г. Погрешность приведена из расчёта средней плотности ледникового льда $\rho = 850 \pm 60 \text{ кг/м}^3$ (Huss, 2013; Hugonnet et al., 2021; Муравьев и др., 2023). На рис. 2 представлены данные об изменении высоты поверхности ледников (отображены в границах 2012 г.). При использовании двух фрагментов ЦМР (см. рис. 2, б) на леднике Мутновский Северо-Восточный заметна полоса стыка, на которой не определены значения изменений высоты поверхности.

В целом для исследуемых ледников характерны отрицательные значения баланса массы для обоих периодов. За 38 лет с 1974 по 2012 г. у всех ледников, за исключением двух, уменьшилась высота поверхности в диапазоне от 3.8 ± 5.25 до 23.4 ± 5.25 м. Переводя геодезические значения в размерность баланса массы, кумулятивный баланс ледников варьировал от -3.23 ± 4.46 до -19.89 ± 4.46 м в. э. Среднее значение баланса массы ледников за этот период составляло от -0.1 до -0.5 м в. э. в год. На двух ледниках зафиксированы положительные балансы массы: для ледников Ru10-22.0710 и Ru10-22.0713 кумулятивный баланс составил $+6.8 \pm 4.46$ м в. э. (или $+0.15$ м в. э. в год).

В период с 2012 по 2021/22 гг. для большинства ледников также характерен отрицательный баланс массы. Уменьшение высоты поверхности ледников варьировало от 0.5 ± 2.33 до 6.8 ± 2.26 м. Кумулятивный баланс ледников варьировал от -0.43 ± 1.92 до -5.78 ± 1.98 м в. э., или от -0.05 до -0.6 м в. э. в год. Положительным балансом отличились ледники Тушинского и Ru10-22.0710: кумулятивный баланс массы ледников составил 1.62 ± 1.98 и 1.96 ± 1.92 м в. э. соответственно (~ 0.2 м в. э. в год).

Кратерные ледники Мутновского вулкана имеют тенденцию к отрицательному балансу массы за оба проанализированных периода, несмотря на положительные значения баланса массы, измеренные в 1979/80 балансовом году. По данным работы (Виноградов, Муравьев, 1982), баланс массы Мутновского Северо-Восточного ледника составил $+0.29$ м в. э., Мутновского Юго-Западного – $+0.23$ м в. э. В последнее десятилетие средний баланс массы Мутновского Северо-Восточного ледника стал примерно в 5 раз более отрицательным. Такой результат

может быть связан с участвовавшими случаями обвалов и осыпей, которые связаны с активностью вулкана. На Мутновском Юго-Западном леднике, наоборот, в последнее десятилетие увеличился средний показатель баланса массы по сравнению с периодом 1974–2012 гг.

Ледник Тушинского обвалился в результате дождей в 1997 г. (Гавриленко и др., 2001). Резко отрицательный баланс массы этого ледника напрямую связан с этим обвалом. За 10 лет второго анализируемого периода леднику присущ положительный баланс массы со средним значением 0.2 м в. э. в год. По результатам оценки изменения площади, ледник Тушинского имеет одну из самых малоизменяющихся границ, что в сумме может говорить о стабильном состоянии ледника на протяжении последнего десятилетия.

Ледник Ru10-22.0710 единственный из всех имел положительный баланс массы в течение двух проанализированных периодов. Вероятнее всего, эта тенденция связана с удачным расположением ледника по отношению к господствующим ветрам, что приводит к тому, что большая часть снега в ходе метелевого переноса оседает в области аккумуляции, и это обеспечивает многолетний положительный баланс. При анализе изменения площади данного ледника в разные годы было отмечено, что для ледника Ru10-22.0710 характерны большие вариации, зависящие от снежности года.

Несмотря на тенденцию к изменению климата, на большинстве ледников увеличился показатель среднего баланса массы, хотя он и остался отрицательным. Это говорит о том, что, по сравнению с изменением климата, для малых ледников более важны локальные показатели, такие как господствующее направление ветра, количество снега, температура в летний период и количество солнечных дней.

Кроме того, для периода 2012–2021 гг. рассчитан баланс массы 10 снежников (табл. 5). Для четырёх снежников Мутновского вулкана также рассчитан баланс массы за период 1974–2012 гг. Снежники Мутновского вулкана отмечены знаком *. На рисунках 3 и 4 представлены данные об изменении высоты поверхности снежников в эти периоды.

В период с 1974 по 2012 гг. на двух исследованных снежниках Мутновского вулкана наблюдалось увеличение высоты поверхности

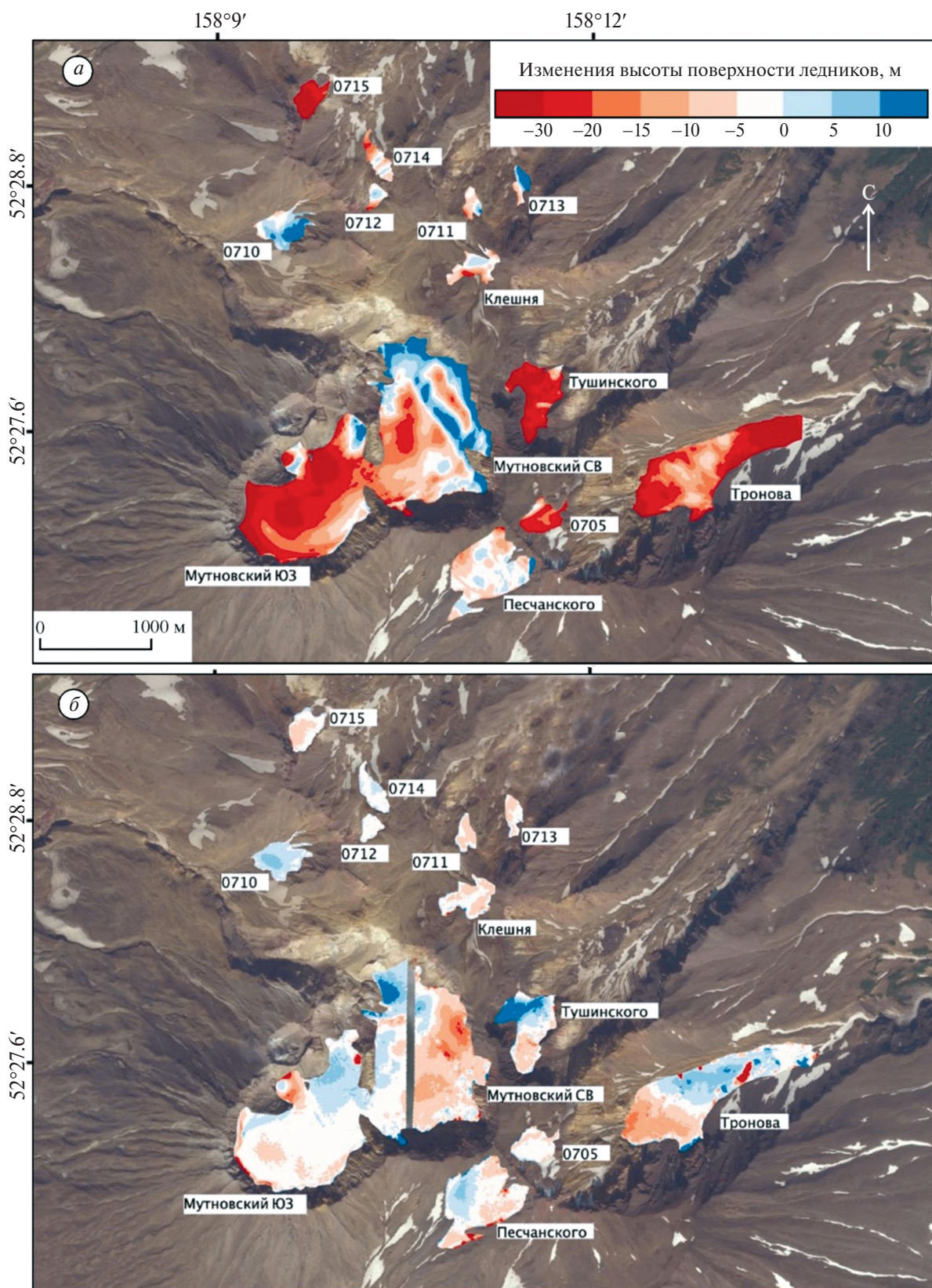


Рис. 2. Изменение высоты поверхности ледников Мутновского вулкана: за период 1974–2012 гг. (а); за период 2012–2021/22 гг.; подложка Bing (б)

Fig. 2. Change in the surface height of the glaciers of the Mutnovsky volcano: for the period 1974–2012 (a); for the period 2012–2021/2022; basemap Bing (b)

Таблица 5. Баланс массы снежников Горелого и Мутновского вулканов
Table 5. Mass balance of the snow patches of Gorely and Mutnovsky volcanoes

	1974–2012 гг.			2012–2021 гг.		
	Изменение высоты, м	м в. э.	м в. э. в год	Изменение высоты, м	м в. э.	м в. э. в год
1	–	–	–	-0.8 ± 2.33	-0.68 ± 1.98	–0.1
2	–	–	–	0.2 ± 2.33	0.17 ± 1.98	0.02
3	–	–	–	2 ± 2.33	1.70 ± 1.98	0.2
4	–	–	–	0.19 ± 2.33	0.16 ± 1.98	0.02
5	–	–	–	1.1 ± 2.33	0.94 ± 1.98	0.1
6	–	–	–	0.1 ± 2.33	0.09 ± 1.98	0.01
7*	-5.7 ± 5.25	-4.85 ± 4.46	–0.1	3.1 ± 2.33	2.64 ± 1.98	0.3
8*	-1.9 ± 5.25	-1.62 ± 4.46	–0.04	0.6 ± 2.33	0.51 ± 1.98	0.1
9*	12.3 ± 5.25	10.46 ± 4.46	0.3	3.1 ± 2.33	2.64 ± 1.98	0.3
10*	3.5 ± 5.25	2.98 ± 4.46	0.1	2.2 ± 2.33	1.87 ± 1.98	0.2

*Снежники Мутновского вулкана

Прочерк – нет данных

*Snow patches of the Mutnovsky volcano

Dash – no data available

(на 3.5 ± 5.25 и 12.3 ± 5.25 м), а на двух других – уменьшение (на 1.9 ± 5.25 и 5.7 ± 5.25 м). Кумулятивный баланс массы варьирует на снежниках от -1.62 ± 4.46 до 10.46 ± 4.46 м в. э., или от -0.04 до 0.3 м в. э. в год. В период с 2012 по 2021 г. все снежники Мутновского вулкана характеризуются положительным балансом массы – от 0.51 до 2.64 ± 2.33 м в.э., или от 0.06 до 0.3 м в.э. в год.

Для снежников Горелого вулкана проведён анализ только за период с 2012 по 2021 г. За 9 лет только один снежник уменьшил высоту поверхности (на 0.8 ± 2.33 м) и имеет отрицательный кумулятивный баланс (снежник № 1) -0.68 м в.э. или -0.1 м в.э. в год. Такой результат обусловлен, вероятнее всего, его южной экспозицией – по наблюдениям, на северном склоне вулкана Горелый располагается гораздо больше многолетних снежников, чем на южном. У остальных пяти снежников высота поверхности увеличилась в диапазоне от 0.1 ± 2.33 до 2 ± 2.33 м. Их кумулятивный баланс варьирует от 0.09 до 1.70 ± 1.98 м в.э. (0.01 – 0.2 м в. э. в год).

Несмотря на то, что все снежники в период 2013–2023 гг. сократились по площади, баланс массы абсолютного большинства из них в период 2012–2021 гг. был положительным. Вероятнее

всего, прирост баланса массы происходит за счёт нескольких особо многоснежных годов, когда в их толстых центральных частях снег успевает пройти преобразования в фирн и далее в лёд. При этом площадь снежников меняется за счёт тонкого слоя сезонного снега по краям, который не сильно влияет на общее состояние снежников. Кроме того, есть основание утверждать, что все исследованные снежники не переставали существовать как минимум на протяжении 10 лет с 2013 по 2023 г., а вероятнее всего, они практически неизменно существуют уже несколько десятков лет. Этот факт в совокупности с полевым обследованием некоторых изучаемых снежников даёт основания называть некоторые из снежников ледниками, так как преобразование снега в лёд на Камчатке происходит примерно за 4–5 лет (Виноградов, Муравьев, 1982).

В исследованиях баланса массы других ледников Камчатского полуострова приводится среднее значение баланса массы ледника Козельский за 1977–2022 гг., составившее -0.33 м в. э. в год (Муравьев и др., 2023), и среднее значение баланса массы ледников Нежданный и Соседний на Корякском нагорье, составившее -0.362 м в. э. в год (Носенко и др., 2022). Данные о балансе массы в целом сопоставимы, но можно сделать

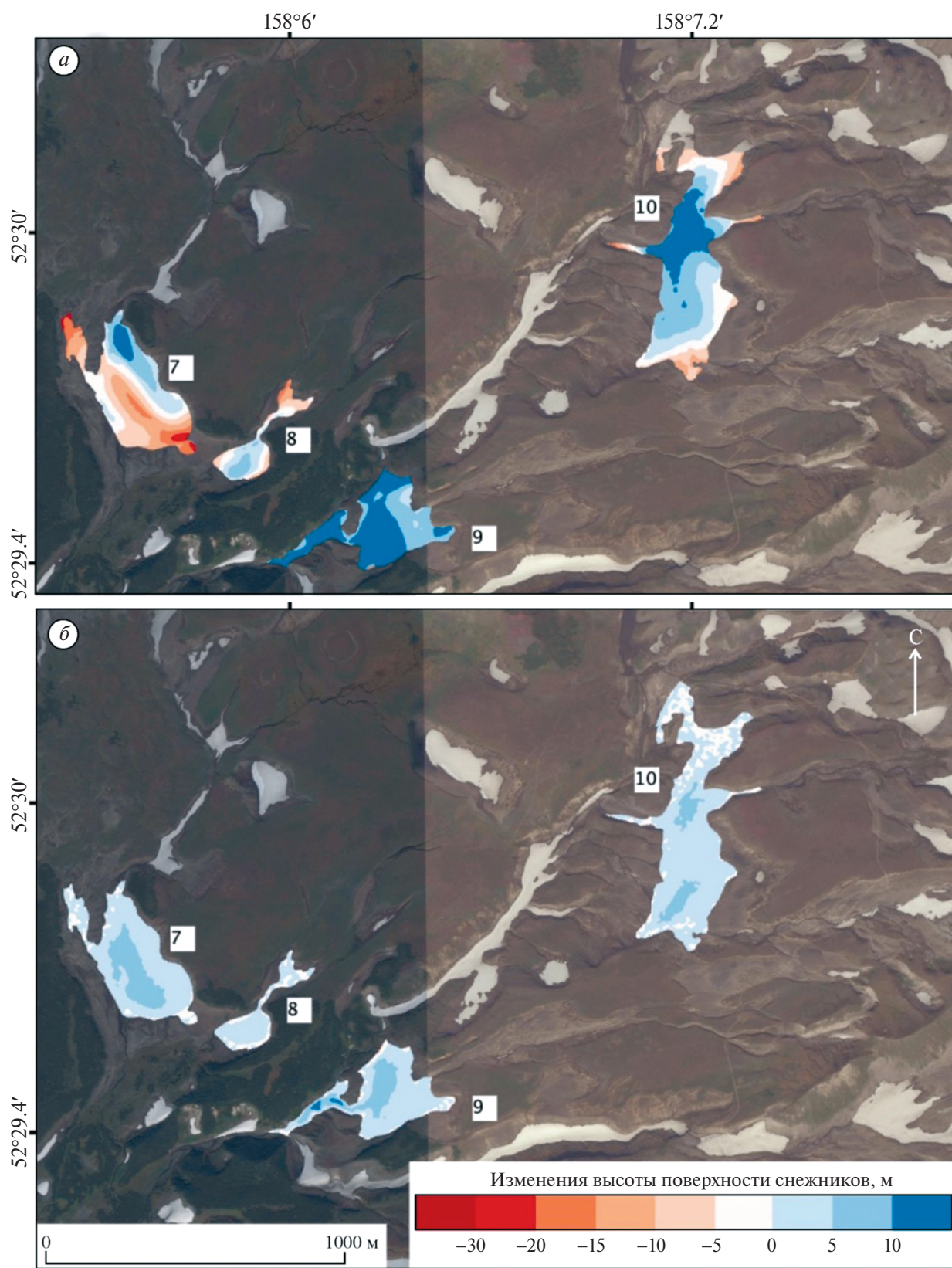


Рис. 3. Изменение высоты поверхности снежников вулкана Мутновский: в период 1974–2012 гг. (а); в период 2012–2021 гг.; подложка Bing (б)

Fig. 3. Change in the surface height of the snow patches of the Mutnovsky volcano: for the period 1974–2012 (a); for the period 2012–2021; basemap Bing (b)

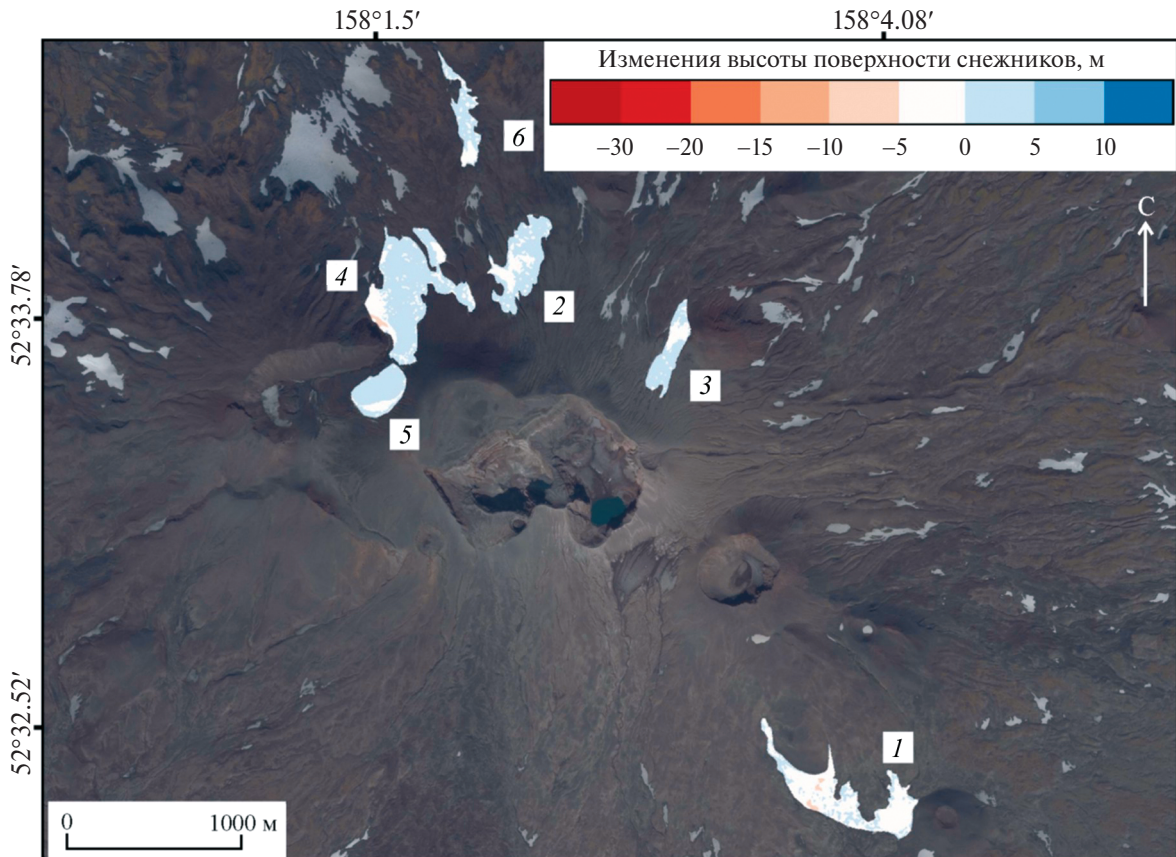


Рис. 4. Изменение высоты поверхности снежников вулкана Горелый в период 2012–2021 гг.; подложка Bing
 Fig. 4. Change in the surface height of the snow patches of the Gorely volcano for the period 2012–2021; basemap Bing

вывод о менее отрицательной тенденции для большинства ледников Мутновского вулкана по сравнению с ледниками других районов Камчатки в долгосрочной перспективе. С другой стороны, в период 2015–2022 гг. ледник Козельский имел слабо положительный баланс $+0.07$ м в.э. (Муравьев и др., 2023), что также коррелирует с отдельными ледниками Мутновского вулкана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ пространственно-временных изменений ледников показал их общее сокращение: за период 1973–2013 гг. площадь оледенения ледников Мутновского вулкана сократилась на 26% (1.18 км² для 9 исследованных ледников); площади отдельных исследуемых ледников на Мутновском вулкане уменьшились на 7–81%. В 2013–2023 гг. общая площадь оледенения сократилась на 3% (0.11 км² для 13 исследованных ледников), а темпы изменений отдельных ледников стали неодинаковыми – от незначительного сокращения (-0.1%) до значительного увеличения (до 22% площади) на отдельных ледниках.

Снежники также претерпели существенные изменения. В период 1973–2013 гг. общая площадь исследованных снежников уменьшилась на 13% (0.15 км² для 10 исследованных снежников), отдельные их площади сократились на 0.5–31.5%, а в 2013–2023 гг. наблюдалось более активное уменьшение – общая площадь сократилась на 43% (0.43 км² для 10 исследованных снежников), отдельные площади сократились от 14 до 67%, что превышает темпы деградации ледников в те же годы.

Баланс массы ледников за исследуемые периоды в большинстве случаев был отрицательным. Средний баланс массы ледников в период 1974–2022 гг. составил -0.22 м в. э. в год. В 1974–2012 гг. кумулятивные значения составляли от -3.23 ± 4.46 до -19.89 ± 4.46 м в. э., а в 2012–2021/22 гг. – от -0.43 ± 1.98 до -5.78 ± 1.92 м в. э. Исключение составили отдельные ледники с положительным балансом массы. Полученные значения сопоставимы с данными по леднику Козельский, подтверждая общую тенденцию сокращения ледников.

В отличие от ледников, многолетние снежники продемонстрировали в целом положительный средний баланс массы в последние годы, но в пределах погрешности измерений. Из 10 проанализированных снежников в 2012–2021 гг. только один имел отрицательный средний кумулятивный баланс. Для четырёх снежников Мутновского вулкана, по данным за 1974–2012 гг., средний баланс массы варьировал от отрицательного до существенно положительного.

Подтверждена прямая зависимость состояния кратерных ледников от вулканической активности, в то время как изменения внекратерных ледников и снежников, судя по анализу многолетних наблюдений, в большей степени определяются метеорологическими условиями. Многолетние снежники проявляют высокую изменчивость в краткосрочной перспективе, но демонстрируют устойчивость в долгосрочном временном интервале. Некоторые из них, обладая признаками ледников (наличие трещин, устойчивость, положительный баланс массы), могут рассматриваться как малые ледники.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова № 121051100164-0 “Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии”.

Acknowledgements. The study was conducted under the state assignment of Lomonosov Moscow State University No. 121051100164-0 “The cryosphere evolution under climate change and anthropogenic impact”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов В.Н.* Каталог ледников СССР. Т. 20. Ч. 2–4. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 75 с.
- Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д.* Современное оледенение Южной Камчатки // Вопросы географии Камчатки. 1982. № 8. С. 27–33.
- Виноградов О.Н., Кренке А.Н., Огановский П.Н.* Руководство по составлению Каталога ледников СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 155 с.
- Войтковский К.Ф.* Основы гляциологии. М.: Наука, 1999. 255 с.
- Гавриленко Г.М., Зеленский М.Е., Муравьев Я.Д.* Подвижка ледника в северо-восточном кратере вулкана Мутновский (Камчатка) в 1996–1998 гг.: Причины и следствия этого явления // Вулканология и Сейсмология. 2001. № 2. С. 18–23.
- Геология СССР. Том XXXI. Камчатка, Курильские и Командорские острова. Ч. 1. Геологическое описание / Под ред. А.В. Сидоренко. 1964. 734 с.
- ГКИНП-05-029-84 “Основные положения по созданию и обновлению топографических карт масштабов 1 : 10 000, 1 : 25 000, 1 : 50 000, 1 : 100 000, 1 : 200 000, 1 : 500 000, 1 : 1 000 000”. М.: Редакционно-издательский отдел ВТС, 1984. 33 с.
- Камчатка – Ледники России // Электронный ресурс. URL: <https://sites.google.com/view/glaciersrussia/ледниковые-районы/камчатка> (Дата обращения: 25.09.2025).
- Коваленко Н.В.* Режим и эволюция малых форм оледенения. Дис. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во МГУ, 2008. 207 с.
- Кондратьев В.И.* Климат Камчатки. М.: Гидрометеиздат, 1974. 204 с.
- Конради С.А., Келль Н.Г.* Геологический отдел Камчатской экспедиции 1908–1911 гг. // Изв. Русского геогр. общества. 1925. Т. 57. Вып. 1. С. 3–32.
- Летопись погоды в Водопадной. Погода и климат // Электронный ресурс. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/32596.htm> (Дата обращения: 15.03.2024).
- Летопись погоды в м. Лопатка. Погода и климат // Электронный ресурс. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/32596.htm> (Дата обращения: 15.03.2024).
- Летопись погоды в Петропавловске-Камчатском. Погода и климат // Электронный ресурс. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/32583.html> (Дата обращения: 15.03.2024).
- Муравьев А.Я.* Колебания ледников Камчатки во второй половине XX–начале XXI вв. Дис. ... канд. геогр. наук. М.: Институт географии РАН, 2017. 168 с.
- Муравьев А.Я., Носенко Г.А., Миронов И.К., Двигово В.Н., Муравьев Я.Д.* Баланс массы ледника Козельский на Камчатке за 1977–2022 гг. // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. № 3. С. 317–331. <https://doi.org/10.31857/S2076673423030079>
- Муравьев Я.Д.* Снежный покров горных районов Камчатки // Вопросы географии Камчатки. 1985. № 9. С. 30–41.
- 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. С. 5–16. <https://doi.org/10.31857/S2076673422010112>
- Селянгин О.Б.* К вулканам Мутновский и Горелый: Вулканологический и туристический путеводитель. Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. “Новая книга”, 2009. 108 с.
- Шайхутдинов Р.Ш.* Снежно-ледовый обвал на вулкане Мутновском // Вопросы географии Камчатки. 2005. № 11. С. 70.

- ArcticDEM – Polar Geospatial Center // Электронный ресурс. URL: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/> (Дата обращения: 15.03.2024).
- CODEM: Multi-Modal Digital Elevation Model Registration – GitHub // Электронный ресурс. URL: <https://github.com/NCALM-UH/CODEM> (Дата обращения: 15.03.2024).
- 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. <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>
- Nuth C., Kääb A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change // *The Cryosphere*. 2011. V. 5. P. 271–290. <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>
- Paul F., Bolch T., Briggs K., Kääb A., McMillan M., McNabb R., Nagler T., Nuth C., Rastner P., Strozzi T., Wuite J. Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers_cci project // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 203. № 15. P. 256–275. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.038>
- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // *Journ. of Geophys. Research: Solid Earth*. 2012. V. 117. № B4. 38 p. <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>
- Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial. 2010. 15 p.

Citation: Stelmakh Y.Y., Petrakov D.A. Changes in Glaciers and Snow Patches on Mutnovsky and Gorely Volcanoes, Southern Kamchatka, 1973–2023. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (2): 282–297. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526020055

Changes in Glaciers and Snow Patches on Mutnovsky and Gorely Volcanoes, Southern Kamchatka, 1973–2023

© 2026 Yu. Yu. Stelmakh*, D. A. Petrakov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: julia.stelmakh1806@gmail.com

Received September 25, 2025; revised December 12, 2025; accepted March 23, 2026

An assessment of spatio-temporal changes in the area and mass balance of glaciers and snow patches located on the Gorely and Mutnovsky volcanoes (Southern Kamchatka) is presented. The analysis was based on satellite imagery from Landsat-8 (2013–2017), Sentinel-2 (2018–2023), and KH-9 (1973), as well as digital elevation models (DEMs) derived from the ArcticDEM mosaic with 2-meter resolution and a topographic map at a 1 : 50,000 scale dated to 1974. To ensure the comparability of datasets, elevation co-registration of different DEMs was performed. Glacier mass balance was calculated by subtracting raster elevation values of one DEM from another using ArcGIS Pro. The results show a general reduction in the area of glaciers and snowfields from 1973 to 2023. Between 1973 and 2013, glacier area decreased by 7–81%. From 2013 to 2023, area changes ranged from a 66% decrease to a 22% increase, indicating local positive trends. Snow patches showed more pronounced area loss in the 2013–2023 period (14–67%) compared to the previous decades. The average annual mass balance of glaciers from 1974 to 2022 was approximately –0.2 m w.e. per year. The dynamics of crater glaciers are closely related to volcanic activity and mass-wasting processes, while the state of non-crater glaciers and snowfields is primarily influenced by year-to-year meteorological variability. Some of the studied perennial snowfields may be classified as small glaciers, as they exhibit positive mass balance, long-term persistence, ice composition, and visible crevassing.

Keywords: glaciers, snow patches, mass balance, volcanoes, historical data, satellite imagery, Kamchatka

REFERENCES

- Vinogradov V.N. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 20. Pt. 2–4. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1968: 75 p. [In Russian].
- Vinogradov V.N., Muravyev Ya.D. Modern glaciation of Southern Kamchatka. *Voprosy geografii Kamchatki*. Issues of Geography of Kamchatka. Petropavlovsk-Kamchatskii, 1982 (8): 27–33. [In Russian].

- Vinogradov O.N., Krenke A.N., Oganovskiy P.N. *Rukovodstvo po sostavleniyu kataloga lednikov SSSR*. Guide to the compiling of the USSR Glacier Inventory. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1966: 155 p. [In Russian].
- Voitkovskiy K.F. *Osnovy glyciologii*. The basics of glaciology. Moscow: Nauka, 1999: 255 p. [In Russian].
- Gavrilenko G.M., Zelenskiy M.E., Muravyev Ya.D. Glacier movement in the north-eastern crater of Mutnovsky volcano (Kamchatka) in 1996–1998: Causes and consequences of this phenomenon. *Vulkanologiya I seismologiya*. Volcanology and Seismology. 2001, 2: 18–23. [In Russian].
- Geologiya SSSR*. Geology of USSR. V. XXXI. Kamchatka, Kuril and Commander Islands. Pt. 1: Geology description. 1964: 734 p. [In Russian].
- GKINP-05-029-84 “*Osnovniye polozheniya po sozdaniyu I obnovleniyu topograficheskikh kart masshtabov 1: 10 000, 1: 25 000, 1: 50 000, 1: 100 000, 1: 200 000, 1: 500 000, 1: 1 000 000*”. “Basic provisions for the creation and updating of topographic maps at scales of 1: 10000, 1: 25000, 1: 50000, 1: 100000, 1: 200000, 1: 500000”. Moscow: Editorial and publishing department of the Military Topographic Service, 1984: 33p. [In Russian].
- Kamchatka – Glaciers of Russia: official site. Retrieved from: URL: <https://sites.google.com/view/glaciers-russia/ледниковые-районы/камчатка> (Last access: September 25, 2025)
- Kovalenko N.V. *Rezhim I evolyutsiya malykh form oledeneniya*. Regime and evolution of small glaciation forms. PhD. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2008: 207 p. [In Russian].
- Kondratyuk V.I. *Klimat Kamchatki*. Climate of Kamchatka. Moscow: Hydrometeoizdat, 1974: 204 p. [In Russian].
- Konradi S.A., Kell' N.G. Geological Department of the Kamchatka Expedition 1908–1911. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. News of the Russian Geographical Society, 1927, 57 (1): 3–32. [In Russian].
- Weather record in Vodopadnaya. Weather and climate: official site. Retrieved from: URL: <http://www.pogodai-klimat.ru/history/32596.htm> (Last access: September 25, 2025). [In Russian].
- Weather record in Lopatka. Weather and climate: official site. Retrieved from: URL: <http://www.pogodaikli-mat.ru/history/32213.htm> (Last access: September 25, 2025). [In Russian].
- Weather record in Petropavlovsk-Kamchatskiy. Weather and climate: official site. Retrieved from: URL: <https://www.pogodaiklimat.ru/history/32583.html> (Last access: September 25, 2025). [In Russian].
- Muravyev A.Ya. *Kolebaniya lednikov Kamchatki vo vtoroy polovine XX–nachale XXI vv*. Fluctuations of glaciers of Kamchatka in the second half of XX–beginning of XXI centuries. PhD. Moscow: Institute of Geography RAS, 2017: 168 p. [In Russian].
- 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. <https://doi.org/10.31857/S2076673423030079> [In Russian].
- Muravyev Ya.D. Snow cover of the mountainous regions of Kamchatka. *Voprosy geografii Kamchatki*. Issues of Geography of Kamchatka. Petropavlovsk-Kamchatskii, 1985, 9: 30–41. [In Russian].
- Nosenko G.A., Muraviev A.Y., 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].
- Selyangin O.B. *K vulkanam Mutnovskiy i Goreliy: Vulkanologicheskii i turisticheskii putevoditel'*. To the Mutnovsky and Gorely volcanoes: Volcanological and tourist guide. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Company “Novaya kniga”, 2009: 108 p. [In Russian].
- Shaikhutdinov R.Sh. Snow and ice avalanche on Mutnovsky volcano. *Voprosy geografii Kamchatki*. Issues of Geography of Kamchatka. Petropavlovsk-Kamchatskii, 2005, 11: 70. [In Russian].
- ArcticDEM – Polar Geospatial Center: official site. Retrieved from: URL: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/> (Last access: September 25, 2025).
- CODEM: Multi-Modal Digital Elevation Model Registration – GitHub: official site. Retrieved from: URL: <https://github.com/NCALM-UH/CODEM> (Last access: September 25, 2025).
- 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. 2021, 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>
- Nuth C., Kääb A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*. 2011, 5: 271–290. <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>
- Paul F., Bolch T., Briggs K., Kääb A., McMillan M., McNabb R., Nagler T., Nuth C., Rastner P., Strozzi T., Wuite J. Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers_cci project. *Remote Sensing of Environment*. 2017, 203 (15): 256–275. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.038>
- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journ. of Geophysical Research: Solid Earth*. 2012, 117 (B4): 38 p. <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>
- Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial. 2010: 15 p.