ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ
Российской академии наук
основан в 1918 году

Презентация результатов по проекту РГО № 38/2022-И «Исследование баланса массы ледников в районах активного вулканизма Камчатки на примере ледника Козельский»

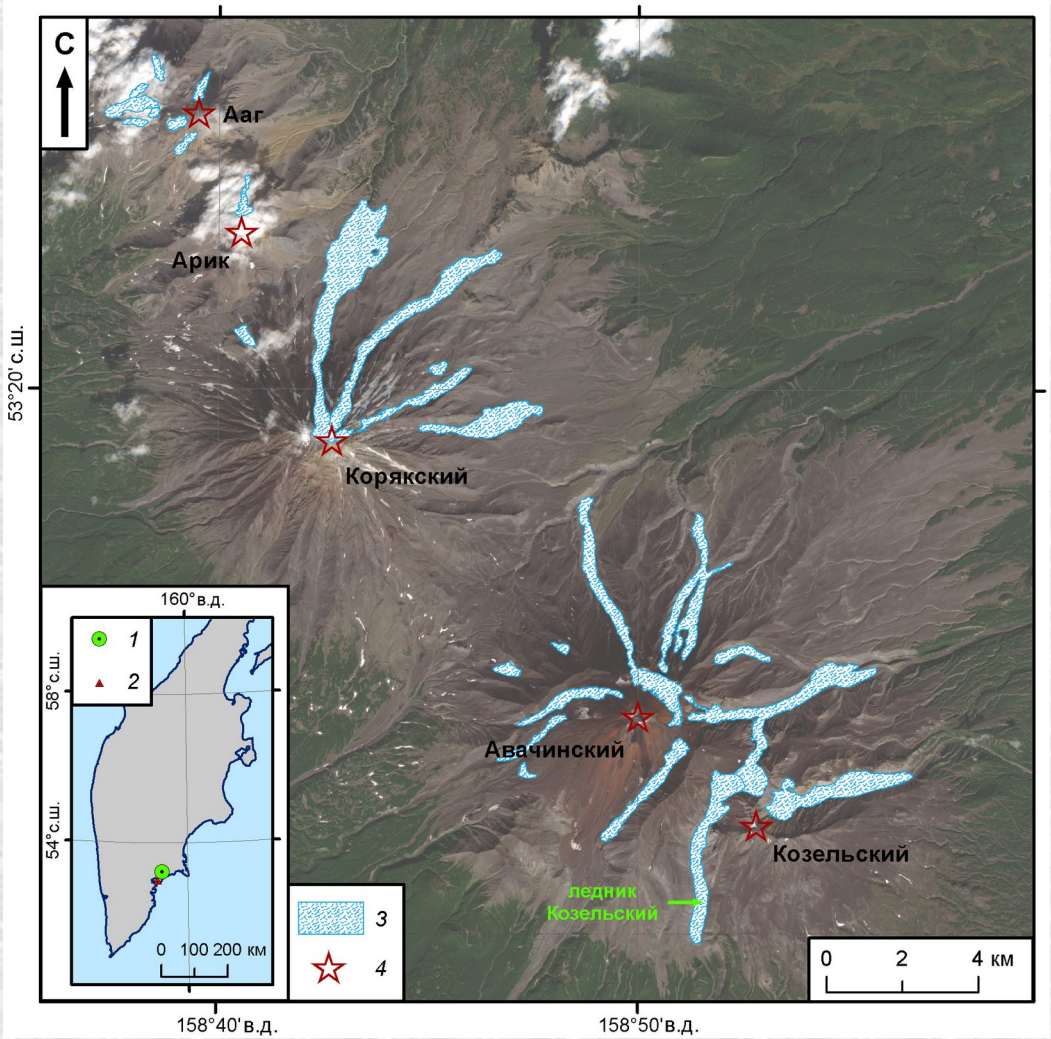
А.Я. Муравьев[1], ГА. Носенко[1], Я.Д. Муравьев[2]

[1]Институт географии РАН, Москва, Россия;

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

Москва 2023

Район исследований



Авачинская группа вулканов. *1* – местоположение Авачинской группы вулканов, *2* – местоположение метеостанции Петропавловск-Камчатский, *3* – ледники, *4* – вулканы

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 гг. не было зафиксировано сокращения площади ледников [Khromova et al., 2019].

Одним из таких районов является 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 км^2 [Муравьев, 2017].

В Авачинской группе вулканов расположен перемётно-долинный ледник Козельский – наиболее изученный ледник Камчатки и один из наиболее хорошо изученных ледников, расположенных на активных вулканах. Он входит в список Всемирной службы мониторинга ледников (WGMS).

Новизна исследования. Данных современных прямых наблюдений за балансом массы и изменениями объёма ледников Камчатки в научной литературе нет. Результаты исследования являются новыми и уникальными.

Цели и задачи работы



Ледник Козельский 19.08.2022
(фото А.Я. Муравьева)

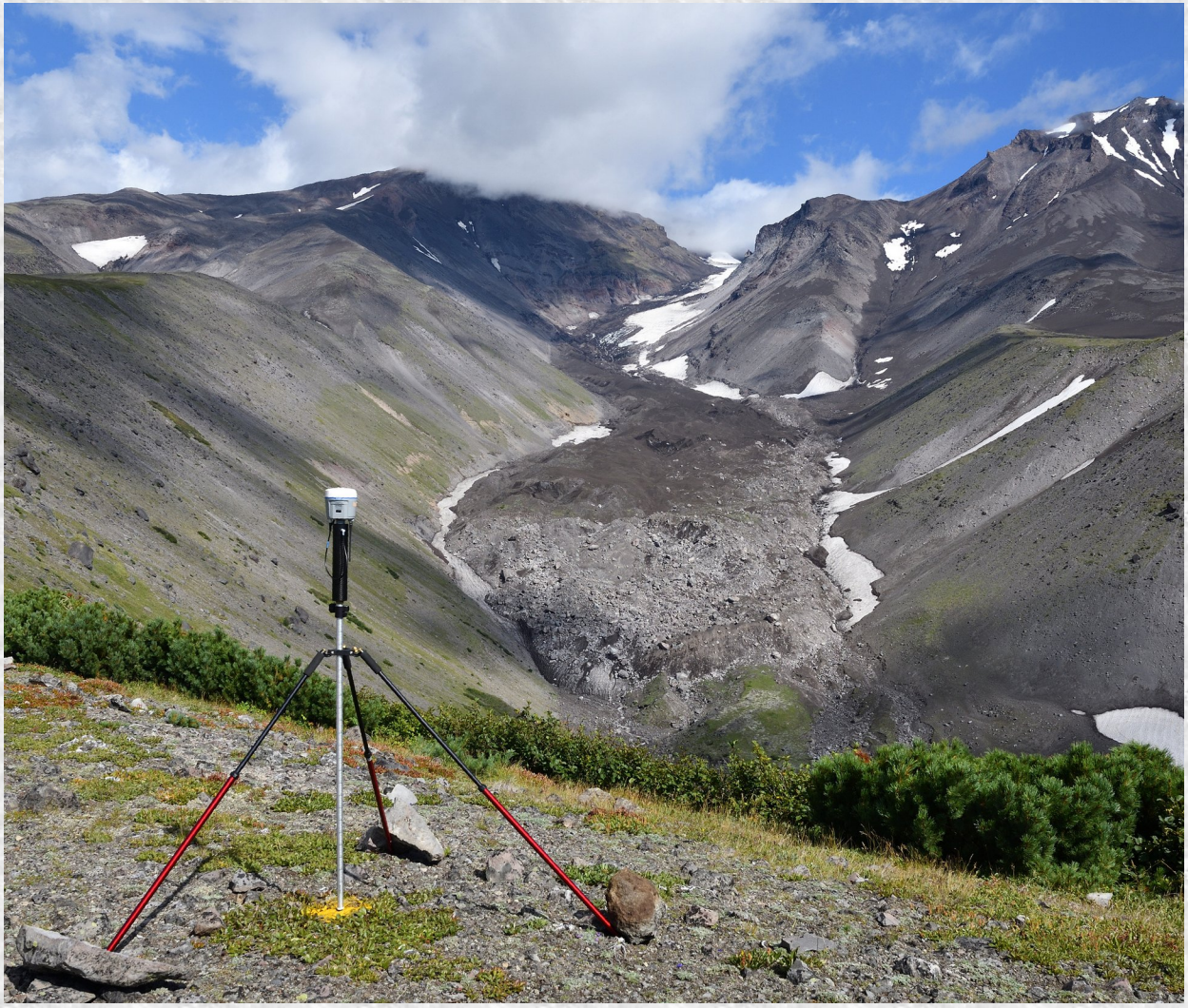
Цель проекта – оценка изменений баланса массы ледников, находящихся под влиянием активного вулканизма. В качестве объекта исследования используется ледник Козельский на Камчатке, наступающий в настоящее время на фоне глобального сокращения ледников Земли.

Основная задача проекта – оценка баланса массы ледника Козельский в последние десятилетия:

– Получение количественных показателей современного баланса массы ледника

– Оценка роли климата и активного вулканизма в его формировании.

Полевые работы 2022 г.



Приёмник DGPS, установленный в качестве базы на борту долины ледника Козельский 19.08.2022 (фото А.Я. Муравьева)

Во второй половине августа – начале сентября 2022 г. в рамках выполнения работ по проекту на леднике Козельский был проведён комплекс полевых работ.

Работы включали в себя:

– маршрутное обследование ледника (фотофиксация и описание состояния ледника)

– геодезическую съёмку поверхности ледника и прилегающей к нему неледниковой поверхности

– съёмку с БПЛА DGI Phantom 4 Pro V2.0 поверхности ледника, а также прилегающих к леднику дна и склонов горной долины



Полевые работы 2022 г.

В середине мая 2023 г. в области питания ледника Козельский была выполнена снегосъёмка георадаром «Пикор-Лёд».

В настоящее время материалы снегосъёмки находятся в обработке. Это задел для будущих исследований.



Ледник Козельский, вид на г. Угловая с перевала 17.05.2023. (Фото А.Я. Муравьева)



Работа на леднике Козельский 17.05.2023. (Фото Я.Д. Муравьева)



Пример радарограммы

Данные и методы, использованные в исследовании

В исследовании использовались:

1. Спутниковый снимок WorldView-2 от 31.08.2016 с пространственным разрешением в мультиспектральном режиме 1.84 м (панхроматический канал 0.46 м)

2. Ортофотоплан с пространственным разрешением около 15 см, созданный по материалам съёмки с БПЛА 05.09.2022

3. 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

4. ЦМР от 05.09.2022 с пространственным разрешением около 0.15 м

5. ЦМР 1977 г., созданная по материалам аэрофотосъёмки (АФС) от 05.08.1977

6. Данные наблюдений на гидрометеостанции Петропавловск-Камчатский из архива ВНИИГМИ-МЦД за 1950–2021 гг. с портала https://meteo.ru

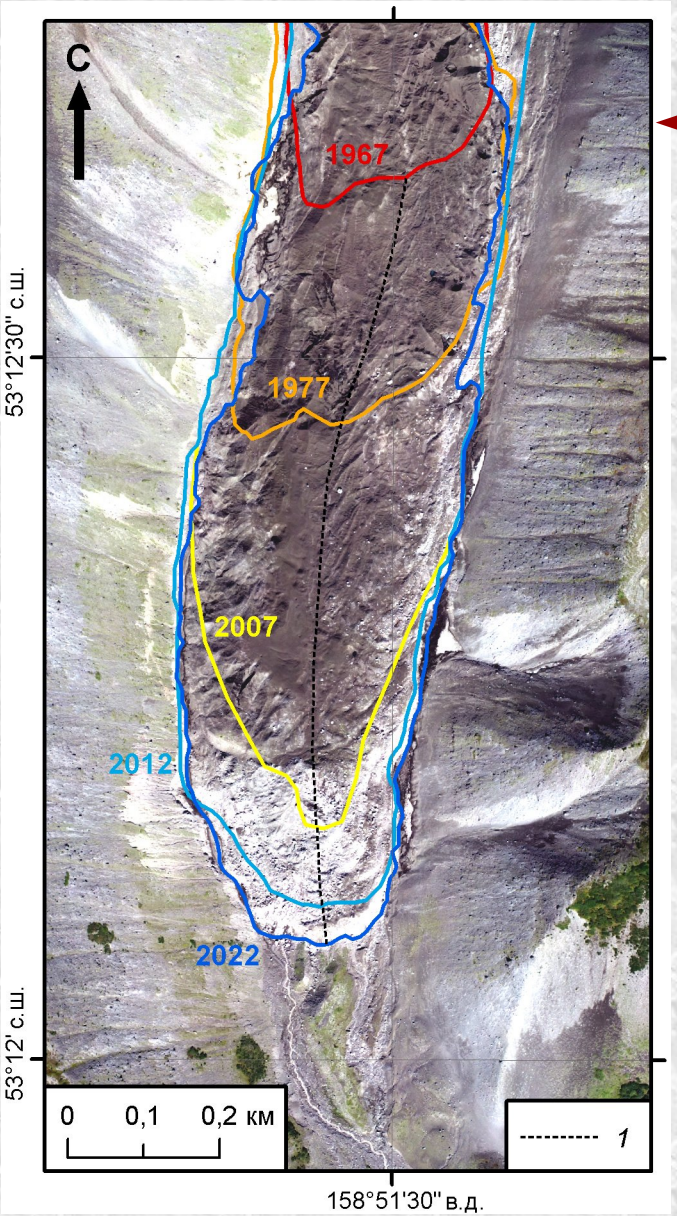
7. Данные реанализа метеопараметров ECMWF ERA5 за 1950–2022 гг. с разрешением 0,5°×0,5° [Monthly.., 2023]

8. Исходные данные работы [Муравьев, 2017] о пространственном положении границ ледника Козельский в 1967, 2007 и 2012 гг.





Результаты исследования



Продвижение фронта ледника Козельский в 1967–2022 гг.

Границы ледника определены в результате дешифрирования следующих данных съёмок:

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,

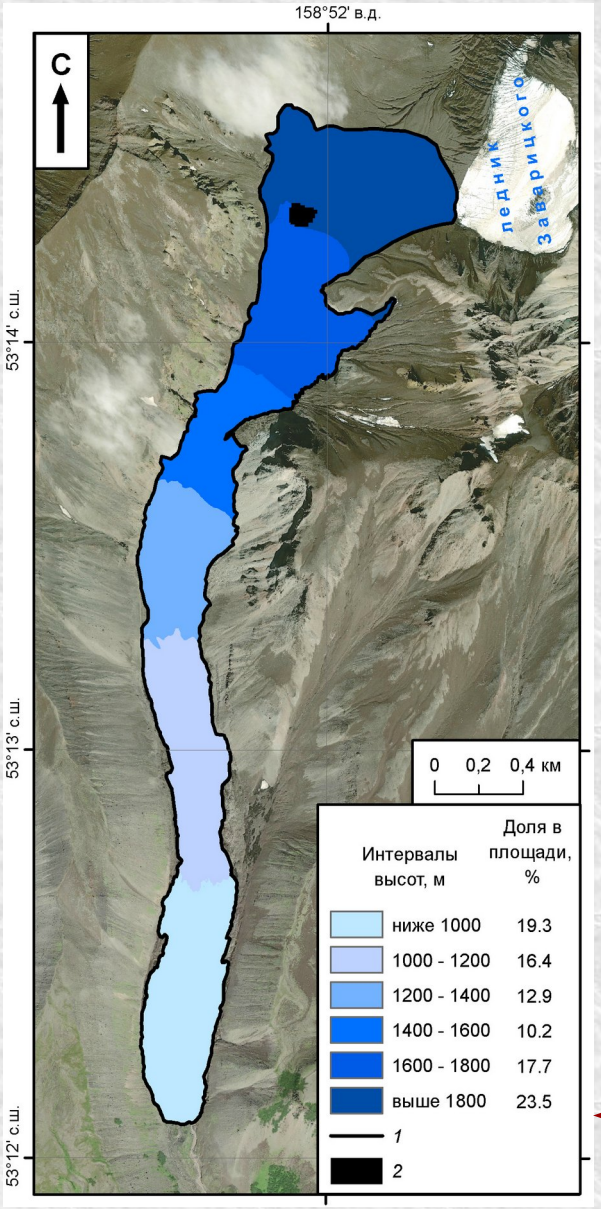
2022 г. – ортофотоплан от 05.09.2022

1 – осевая линия ледника, вдоль которой проводились измерения

Общее продвижение фронта ледника за 1967–2022 гг. составило 1030±15 м, за 2012–2022 гг. – 52 м.

Средняя скорость наступания фронта ледника в последние 10 лет составляла около 5.2 м в год.

Результаты исследования



В конце сезона абляции 2022 г.

площадь ледника составляла **1.72±0.02 км^2**

длина ледника – около **5030 м**

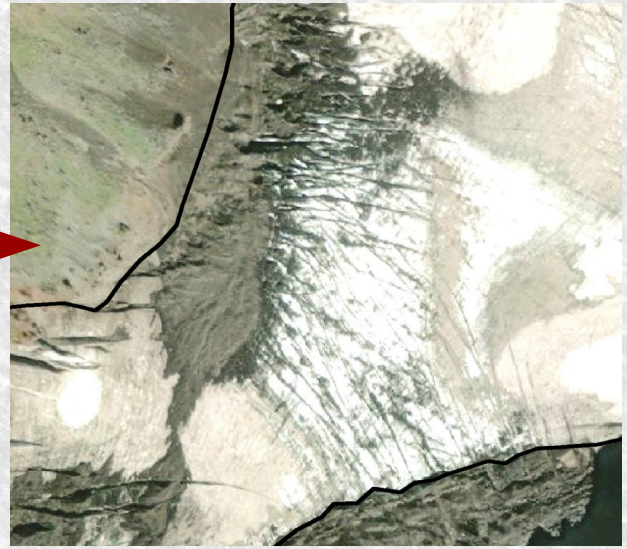
высота высшей точки – **1955 м**

высота низшей точки – **790 м**

вертикальная протяжённость – **1165 м**

средняя взвешенная по площади высота – около **1420 м**

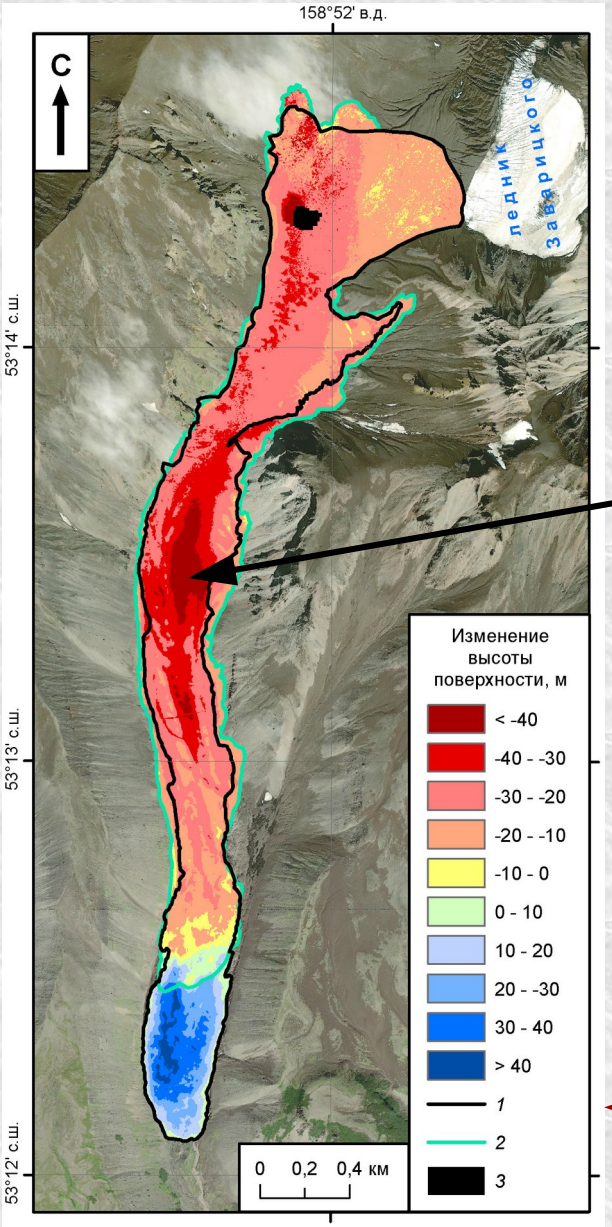
Площадь ледника по высоте распределена не равномерно. На высотный интервал 1400–1600 м приходится самая узкая часть ледника, большая часть которой занята зоной трещинообразования.



Распределение площади ледника Козельский по высоте в 2022 г.

1 – граница ледника в 2022 г., *2* – участок, не покрытый данными современной ЦМР

Результаты исследования



Изменения ледника Козельский с 1977 по 2022 г.

– Среднее по площади изменение высоты поверхности: **-17.30 м** (**-0.38 м/год**)

– Объём ледника сократился на **34.15±6.74 млн м³**

– Кумулятивный баланс массы ледника составил **-14.70±3.94 м в.э.**

При плотности льда 850±60 кг/м³ (Huss, 2013)

– Среднее значение баланса массы ледника **-0.33 м в.э./год**

– Наибольшее понижение высоты поверхности ледника приурочено к высотному интервалу 1200–1400 м.

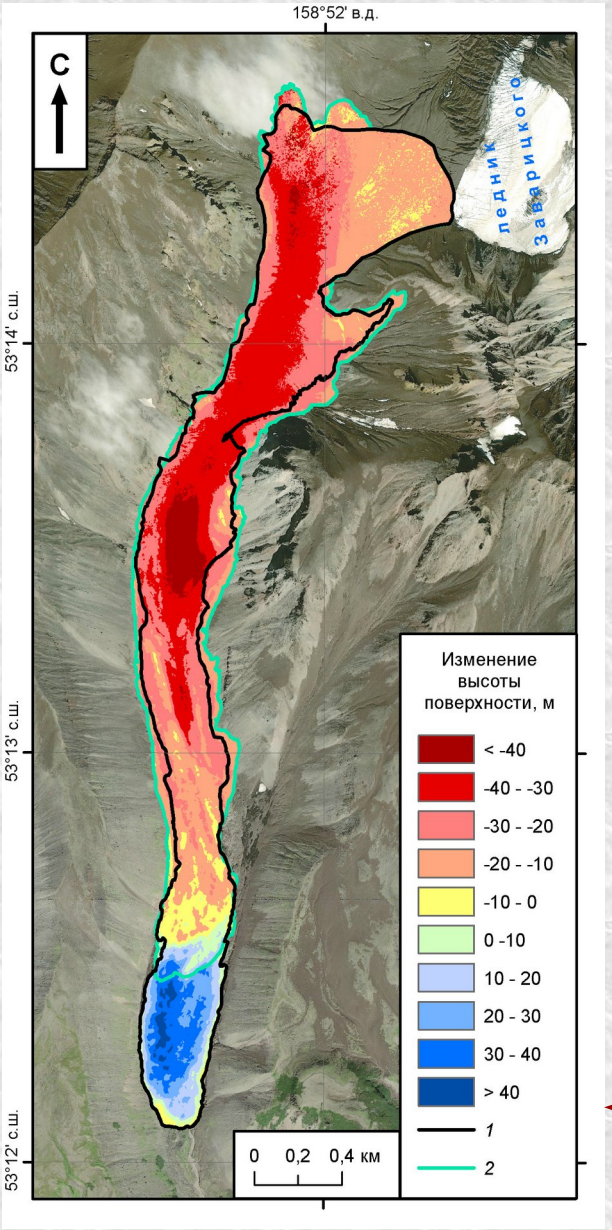
– На втором месте по этому показателю находится высотный интервал 1400–1600 м, в котором наблюдается сужение ледникового языка и наибольшее количество трещин, что свидетельствует о наибольших для ледника скоростях движения льда.

Изменение высоты поверхности в границах ледника Козельский с 1977 по 2022 г.

1 – граница ледника в 2022 г., *2* – граница ледника в 1977 г.,

3 – участок, не покрытый данными современной ЦМР

Результаты исследования



Изменения ледника Козельский с 1977 по 2015 г.

– Среднее по площади изменение высоты поверхности: **-17.84 м** (**-0.47 м/год**)

– Объём ледника сократился на **35.21±7.20 млн м³**

– Кумулятивный баланс массы ледника составил **-15.16±4.17 м в.э.**

При плотности льда 850±60 кг/м³ (Huss, 2013)

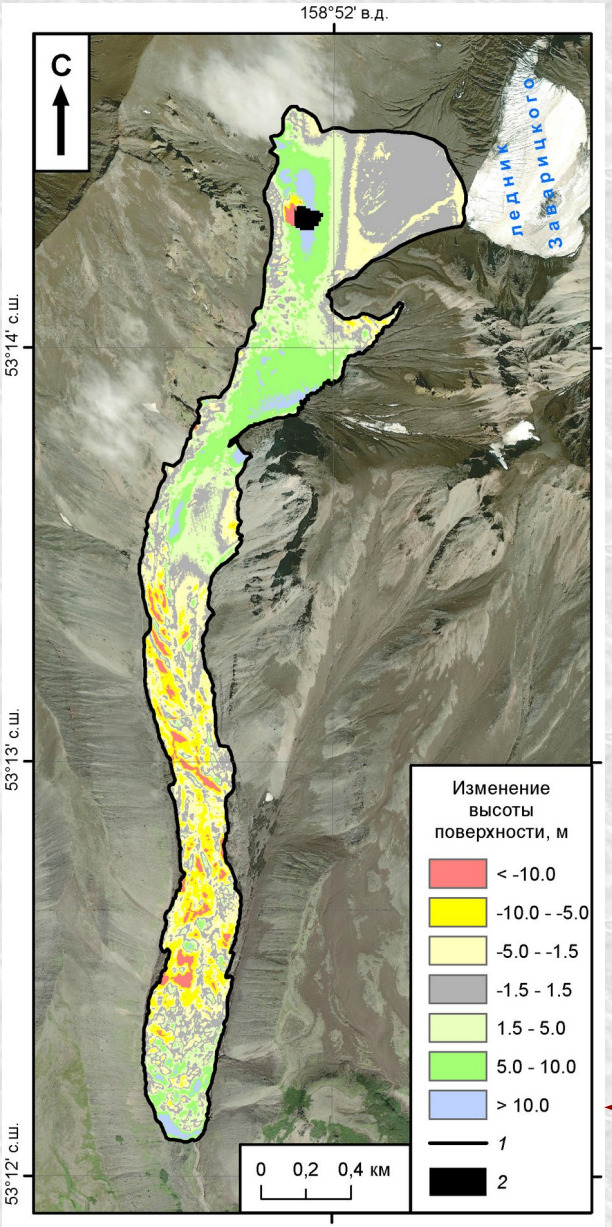
– Среднее значение баланса массы ледника **-0.40 м в.э./год**

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).

Изменение высоты поверхности в границах ледника Козельский с 1977 по 2015 г.

1 – граница ледника в 2022 г., *2* – граница ледника в 1977 г.

Результаты исследования



Изменения ледника Козельский с 2015 по 2022 г.

– Среднее по площади изменение высоты поверхности: **0.59±1.55 м** (**0.08 м/год**)

– Объём ледника увеличился на **1.01±2.65 млн м³**

– Кумулятивный баланс массы ледника составил **0.50±1.35 м в.э.**

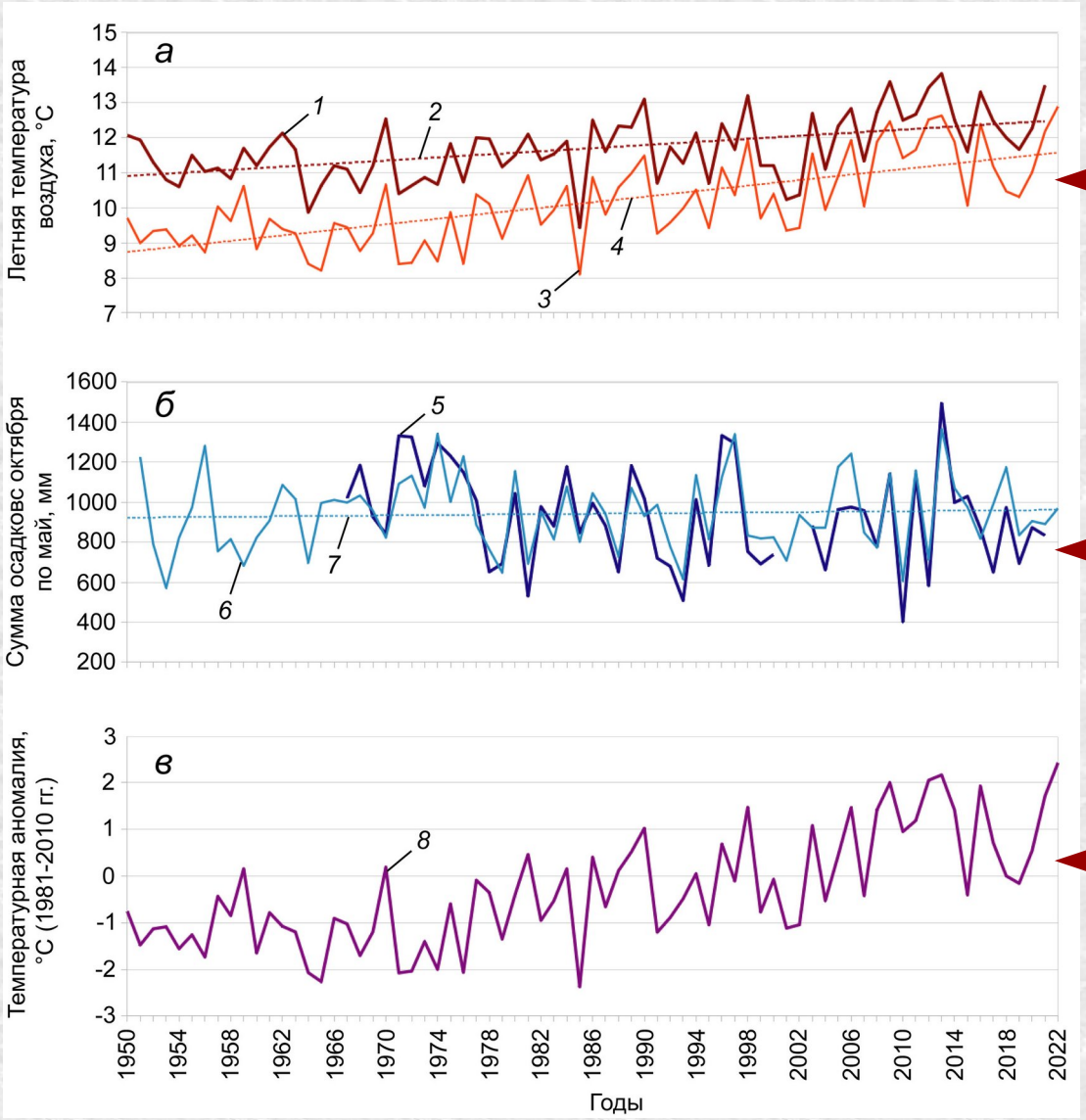
При плотности льда 850±60 кг/м³ (Huss, 2013)

– Среднее значение баланса массы ледника **0.07 м в.э./год**

Изменение высоты поверхности в границах ледника Козельский с 2015 по 2022 г.

1 – граница ледника в 2022 г., *2* – участок, не покрытый данными современной ЦМР

Изменение климата района исследований



Изменения климатических условий существования ледника:

а – 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);

б – 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)

Изменение климата района исследований

Изменения климатических условий существования ледника

Средние значения летней (с июня по август) температуры воздуха в 2016–2021 гг. составили **12.5 °C**, по данным наблюдений на гидрометеостанции Петропавловск-Камчатский [Булыгина и др., 2023]. Это 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 1–1.5 °C).

График *аномалий летней температуры воздуха* относительно базового периода 1981–2010 гг. свидетельствует о том, что на протяжении двух последних десятилетий преобладали положительные значения аномалий. В период 2002–2022 гг. их величина достигала 2.0 °C. Это означает, что сезон абляции на леднике с 2010-х гг. стал существенно теплее, чем в 1980-х–2000-х гг.

Линия тренда на графике *сумм твёрдых осадков* свидетельствует о том, что, несмотря на значительную межгодовую изменчивость на протяжении периода исследований, их величина в настоящее время мало отличается от климатической нормы 1981–2010 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.

Влияние вулканического фактора на режим ледника



Область формирования сплошного покрова поверхностной морены на леднике Козельский. 22.08.2022 (фото А.Я. Муравьева)

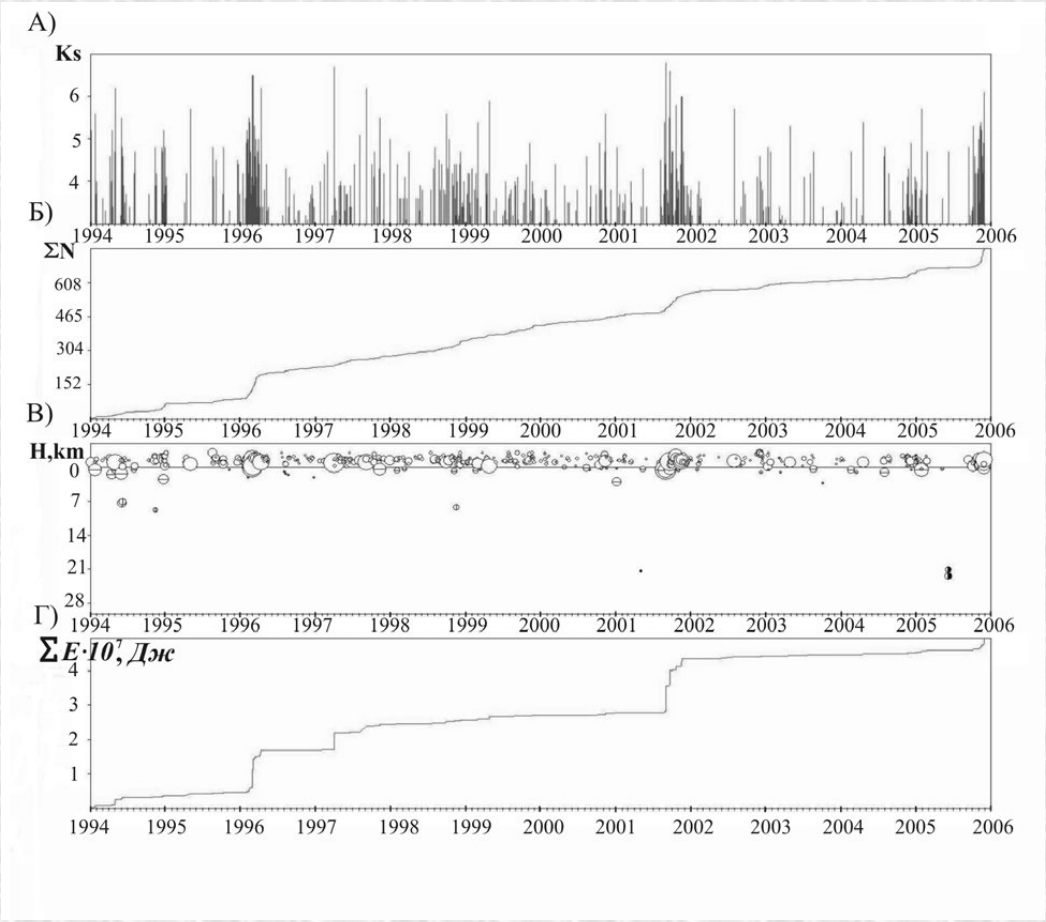
Основными механизмами влияния вулканизма на оледенение являются бронирующая роль чехла моренного материала вулканогенного происхождения и сейсмическое воздействие вулканов на ледники [Муравьев, 2020]. Эти виды влияния вулканов на ледники характеризуются наибольшей областью и длительностью воздействия.

Поверхностная морена, сложенная материалом вулканогенного происхождения, в 2016 г. покрывала почти 72% площади ледника (1.25±0.03 из 1.74±0.02 км^2).

Моренным чехлом забронирован язык ледника ниже 1280 м, выположенная поверхность в районе ледораздела выше 1810 м и широкая полоса вдоль правого края ледника. Она существенно сокращает поверхностную абляцию.

Участки наибольшей убыли льда за 1977–2022 гг. соответствуют области открытого льда.

Влияние сейсмичности на динамику ледника



Графики распределения во времени различных параметров землетрясений вулкана Авачинский в 1994-2005 гг.:
А) энергетический класс по S-волне; Б) кумулятивное количество землетрясений; В) глубина гипоцентров; Г) кумулятивная энергия.
Иллюстрация из работы [Сенюков и др., 2006]

Особенностью ледника Козельский является сочетание отрицательного баланса массы с практически непрерывным продвижением линии фронта вниз по долине. Причиной такого динамического режима ледника может быть повышенная сейсмичность, связанная с расположением 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: извержение 1991 г., извержение 2001 г., 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, разнесенных по времени событий, существует еще 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].

Основные научные результаты и выводы исследования

1) 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.
2) Было установлено, что за прошедшие 45 лет площадь ледника Козельский практически не изменилась (сокращение с 1.77±0.06 до 1.72±0.02 км^2). При этом длина ледника увеличилась примерно на 0.7 км, а ширина уменьшилась почти на всем протяжении.
3) Высота поверхности ледника Козельский за период 1977–2022 гг. понизилась в среднем на 17.30 м, его кумулятивный баланс массы составил -14.70±3.94 м в.э. (в среднем -0.33 м в.э./год).
4) В последние 45 лет на леднике Козельский происходила убыль льда и его перераспределение на более низкие гипсометрические уровни, не компенсирующееся абляцией.
5) 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.
6) Изменения высоты поверхности ледника Козельский и его объёма в период 1977–2022 гг. были неравномерными. Так за 30-летний период 1977–2015 гг. среднее понижение поверхности составило 17.84 м, объём сократился на 35.21±7.20 млн м^3, кумулятивный баланс массы составил -15.16±4.17 м в.э. (в среднем -0.40 м в.э./год). В период 2015–2022 гг. ситуация была принципиально иной – за 6 лет среднее повышение поверхности составило 0.59±1.55 м, объём увеличился на 1.01±2.65 млн м^3, кумулятивный баланс массы составил 0.50±1.35 м в.э. (0.07 м в.э./год).
7) Современные климатические условия в регионе не благоприятны для развития ледника. В 1977–2022 гг. наблюдается тренд на повышение летних температур воздуха при относительно стабильном количестве атмосферных осадков, выпадающих в холодный период.
8) 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.

Литература

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. http://meteo.ru/data/156-temperature. Дата обращения: 15.04.2023.

Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Ледник Козельский (Авачинская группа вулканов). СПб: Гидрометеоиздат, 1992. 119 с.

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. doi: 10.31857/S2076673420030043

Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю. Сейсмичность Авачинского вулкана в 1994–2005 гг. В сборнике трудов конференции «Геофизический мониторинг Камчатки. Научно-техническая конференция». Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 101–105. doi: 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. doi: 10.31857/S0203030621030032

Huss M. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change // The Cryosphere. 2013. V. 7. Pp. 877–887. doi: 10.5194/tc-7-877-2013

Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyaeva V. Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries // Regional Environmental Change. 2019. V. 19. № 5. Pp. 1229–1247. doi: 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).

Литература

Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummens P., Laurier F., Bojesen M. 2018, «ArcticDEM», Harvard Dataverse, V1. doi: 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. 2022, "ArcticDEM - Strips, Version 4.1", https://doi.org/10.7910/DVN/C98DVS, Harvard Dataverse, V1.