

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-221-235>

УДК 551.324, 551.583



Влияние изменений пространственной конфигурации ледников на баланс их массы на примере ледников Альдегонда и Западный Грэнфьорд (Шпицберген)

А.В. Терехов¹✉, И.Н. Василенко^{1,2}, В.Э. Демидов¹

¹ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

✉ avterekhov@aari.ru

ID АВТ, 0000-0002-8300-6883; ВЭД, 0000-0002-6109-910X

Аннотация. Баланс массы ледников широко используется как индикатор климатических изменений, однако его долговременные ряды могут содержать не только климатический, но и «геометрический» сигнал, возникающий вследствие перестройки пространственной конфигурации ледников. В условиях ускоренного таяния последних десятилетий этот фактор приобретает особую значимость. В работе рассматривается количественный вклад геометрических изменений в баланс массы двух горно-долинных ледников архипелага Шпицберген — Альдегонда и Западный Грэнфьорд, на которых с начала XXI в. проводится регулярный гляциологический мониторинг. Мы рассчитали их удельный баланс массы двумя способами: относительно фиксированной поверхности и с ежегодным обновлением гипсометрической кривой. Показано, что изменения пространственной конфигурации приводят к дополнительной ежегодной потере льда, доля которой составляет 1–2 % от годового объема таяния на леднике Альдегонда и 0,5–1 % на леднике Западный Грэнфьорд. Для обоих ледников из-за малости геометрического сигнала «истинно климатический» тренд за два десятилетия не различается с реальным, составляя $-0,09 \pm 0,03$ м в. э. год⁻¹ для Альдегонды и $-0,13 \pm 0,04$ м в. э. год⁻¹ для Западного Грэнфьорда ($\alpha = 0,05$). Полученные результаты показывают, что влияние геометрического фактора на масштабах одного-двух десятилетий мало, но интерпретация более продолжительных масс-балансовых рядов без учета динамики геометрии ледников может приводить к смещенным оценкам климатического сигнала. Мы отмечаем необходимость повторения подобных расчетов для других регионов и для разных морфологических типов ледников, что позволит оценить величину и значимость геометрического сигнала в разных центрах оледенения.

Ключевые слова: Арктика, изменения климата, ледник, баланс массы, Шпицберген

Для цитирования: Терехов А.В., Василенко И.Н., Демидов В.Э. Влияние изменений пространственной конфигурации ледников на баланс их массы на примере ледников Альдегонда и Западный Грэнфьорд (Шпицберген). *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2026;72(2):221–235. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-221-235>

Поступила 26.01.2026

После переработки 08.04.2026

Принята 07.05.2026

© Авторы, 2026

© Authors, 2026

Effects of changes in glacier geometry on mass balance: a case study of the Aldegondabreen and Vestre Grønfjordbreen glaciers (Spitsbergen)

Anton V. Terekhov¹✉, Ilya N. Vasilenko^{1,2}, Vasiliy E. Demidov¹

¹ State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

✉avterekhov@aari.ru

AVT, 0000-0002-8300-6883; VED, 0000-0002-6109-910X

Abstract. Glacier mass balance is widely used as an indicator of climate change; however, long-term mass-balance records may reflect not only climatic forcing but also a “geometric” signal associated with changes in glacier hypsometry and spatial configuration. In view of the accelerated glacier retreat observed over recent decades, this effect becomes increasingly important. This study quantifies the contribution of geometric changes to the mass balance of two valley glaciers on the Svalbard archipelago — Aldegondabreen and Vestre Grønfjordbreen — where continuous glaciological monitoring has been conducted since the early 21st century. Using elevation data combined with in situ mass-balance measurements, specific mass balance was calculated using two approaches: with a fixed reference surface and with annually updated area–altitudinal distributions. Geometric changes lead to additional mass losses of 0.02–0.04 m w. e. yr⁻¹ for Aldegondabreen, and only of 0.01–0.02 for Vestre Grønfjordbreen. This effect is positive geometric feedback: as the glacier loses mass, its surface becomes less elevated, thus enhancing future mass loss. For both glaciers, the “purely climatic” mass-balance trend does not differ significantly from the observed trend, equaling -0.09 ± 0.03 m w. e. yr⁻¹ for Aldegondabreen and -0.13 ± 0.04 m w. e. for Vestre Grønfjordbreen ($\alpha = 0.05$). These findings indicate that neglecting glacier geometry evolution can bias interpretations of mass-balance time series and associated climate signals. Repeating similar analyses across different glacier types and regions is essential for assessing the magnitude and significance of the geometric signal in diverse glaciated environments.

Keywords: Arctic, climate change, glacier, mass balance, Spitsbergen

For citation: Terekhov A.V., Vasilenko I.N., Demidov V.E. Effects of changes in glacier geometry on mass balance: a case study of the Aldegondabreen and Vestre Grønfjordbreen glaciers (Spitsbergen). *Arctic and Antarctic Research*. 2026;72(2):221–235. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-221-235>

Received 26.01.2026

Revised 08.04.2026

Accepted 07.05.2026

Введение

Баланс массы ледников прежде всего представляет самостоятельный научный интерес, т. к. отражает динамику оледенения как важной части глобального гидрологического цикла [1]. Кроме того, ледники широко рассматриваются как индикаторы климата, поскольку баланс их массы определяется соотношением процессов аккумуляции и абляции, напрямую зависящих от температуры воздуха и количества твердых осадков [2]. Поэтому ряды баланса массы ледников являются ценным инструментом для изучения климатических изменений, особенно в труднодоступных и высокоширотных районах, где регулярные метеорологические наблюдения ограничены или отсутствуют вовсе [3, 4].

Связь динамики ледников с климатом была замечена давно. Первые попытки связать колебания фронта ледников с температурой воздуха и количеством осадков относятся еще к XIX в. [5]. По мере накопления масс-балансовых измерений и расширения географии мониторинга ледников эта связь не только стала очевидной, но

и обрела численное выражение — сначала через простые эмпирические формулы и корреляционные зависимости [6, 7], затем и через более сложные, физически обоснованные модели поверхностной абляции/аккумуляции [8].

В 1960-х гг., в рамках Международного гидрологического десятилетия, во многих странах были организованы мониторинговые измерения на опорных ледниках. При этом во второй половине XX в. постулировалась необходимость тщательного выбора опорных ледников — средних по морфологии, высотному положению, — чтобы они были репрезентативны для целых горных стран [9]. Но уже в начале XXI в. появились подтверждения тому, что для выявления связей баланса массы с климатом в конкретном регионе можно выбрать для мониторинга практически любой из расположенных там ледников [10]. Безусловно, существуют неклиматические факторы, влияющие на баланс массы, — лавинная аккумуляция (например, [11]), изменение заморенности поверхности (например, [12]) и подобные. Однако, несмотря на наличие локальной модуляции, климат горных регионов в целом определяется более крупномасштабной атмосферной циркуляцией, что было показано, например, в работах [13–15], а потому ряды баланса массы внутри одного центра оледенения имеют некоторую долю общего для них климатического сигнала. Как следствие, корреляция рядов для расположенных неподалеку друг от друга ледников не только ожидаема, но и подтверждается многочисленными примерами (см., например, [16, 17]), в том числе для Шпицбергена, о котором пойдет речь ниже (см., например, [18]).

Поскольку баланс массы ледников определяется не только климатом, в ряде работ [19, 20] было показано, что из рядов баланса можно выделить также и «геометрический» сигнал (англ. *geometric signal*), то есть связанный с изменением пространственной конфигурации ледника. При рассмотрении длительных временных интервалов ледник уже не представляет собой тот же объект, каким он был десятилетия назад. С завершения Малого ледникового периода в конце XIX — начале XX в. [21] горное оледенение сокращается практически повсеместно [22], причем в последние три десятилетия скорость этого явления значительно возросла [23]. А в отдельных случаях перестройка пространственной конфигурации ледника приводит к скачкообразным изменениям в рядах баланса массы [24].

В условиях ускоренного отступления ледников, а значит, и изменений их пространственных очертаний вопрос о разделении климатического и геометрического сигналов встает все острее, поскольку тренды в рядах баланса массы на длительном интервале времени не могут быть полностью объяснены климатическими факторами. Более того, можно выдвинуть гипотезу о возникновении положительной обратной связи: по мере таяния высота поверхности ледника снижается, что, в свою очередь, способствует дальнейшему увеличению абляции. Это должно приводить к ускоренному таянию даже при неизменных климатических условиях. Следовательно, выявленный тренд в рядах баланса массы может быть ошибочно интерпретирован как климатический сигнал, связанный с изменениями температуры воздуха или количества твердых осадков.

Мы ставим целью проверку подобной гипотезы для ледников архипелага Шпицберген. В этой статье количественно оцениваются изменения в балансе массы ледников Альдегонда и Западный Грэнфьорд, обусловленные динамикой их пространственной конфигурации, показывается, существует ли предполагаемая обратная связь и насколько велик геометрический сигнал в рядах баланса массы последних лет.

Материалы и методы

Объект изучения

Горно-долинные ледники Альдегонда и Западный Грэнфьорд расположены к юго-западу и югу от населенного пункта Баренцбург, остров Западный Шпицберген (рис. 1). Площадь ледников составляла, по состоянию на 2024 г., 5,0 км² и 15,9 км² соответственно. На ледниках проводятся регулярные измерения баланса массы гляциологическим методом — с 2002/03 балансового года на Альдегонде и с 2013/14 на Западном Грэнфьорде.

За все время наблюдений оба ледника имели устойчиво отрицательный баланс и уменьшались в площади, что подтверждается повторными топографическими съемками и материалами дистанционного зондирования: всего за период 2002–2020 гг. с поверхности ледника Альдегонда убыл слой льда толщиной около 22 м (в среднем по площади, по результатам гляциологического метода) [25]. Для Западного Грэнфьорда кумулятивная потеря массы была оценена за первые семь балансовых лет мониторинга (с 2013/14 по 2019/20 гг.): она составила $7,67 \pm 0,55$ м в. э., что эквивалентно 8 ± 1 % от общего запаса льда [26]. Если рассматривать одинаковый по продолжительности период, о котором идет речь далее в статье (с 2013/14 по 2024/25 балансовый год), то потери массы для изучаемых ледников составляют $-20,18 \pm 0,80$ и $-17,88 \pm 0,82$ м в. э. (Альдегонда и Западный Грэнфьорд соответственно).

Подобная динамика характерна для ледников в этой части Шпицбергена и отражает общую по архипелагу современную тенденцию на сокращение площади и массы

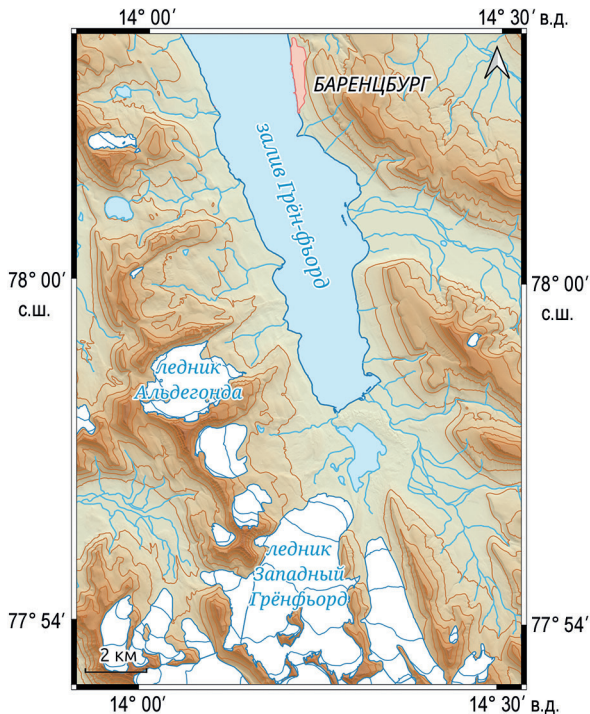


Рис. 1. Расположение изучаемых ледников

Fig. 1. Location of the study area

оледенения [27]. Согласно работе [28], основанной на архивных фотоматериалах, баланс массы ледников в рассматриваемой части архипелага был в среднем отрицательным и на протяжении XX в., по крайней мере с 1911 г. Вероятно, что в последний раз ледники в районе Баренцбурга имели околонулевой баланс и были относительно стабильны в размерах в доиндустриальном периоде, с 1850 по 1900 г. [29].

Исходные материалы

Благодаря гляциологическому мониторингу на указанных ледниках в распоряжении авторов имеются результаты измерений годового баланса массы по абляционным рейкам, а также средние по ледникам удельные годовые балансы. Мониторинговые работы ведутся по общепринятым методикам: натурные измерения проводятся гляциологическим методом, т. е. измерениями стаявшего слоя льда в местах установки абляционных реек. На начало рассматриваемого периода измерительная сеть на указанных ледниках состояла из 14 и 8 абляционных реек соответственно (рис. 2). Расположение реек стационарно, но из-за отступления ледников несколько реек были потеряны, и их количество сократилось к 2025 г. до 12 и 6. Дата окончания балансового года не фиксирована, выбирается в зависимости от хода температуры воздуха в конкретный год и чаще всего приходится на начало-середину сентября.

Пересчет отдельных измерений, выполненных по абляционным рейкам, в средние по леднику величины удельного баланса массы выполняется на основе известного метода высотного балансового профиля (англ. *profile method*). Для этого ледники условно делятся на пятидесяти- (Альдегонда) и стометровые (Западный Грэнфьорд) высотные интервалы, после чего натурные измерения годового баланса аппроксимируются линейной регрессией от высоты над уровнем моря. Затем, с учетом доли

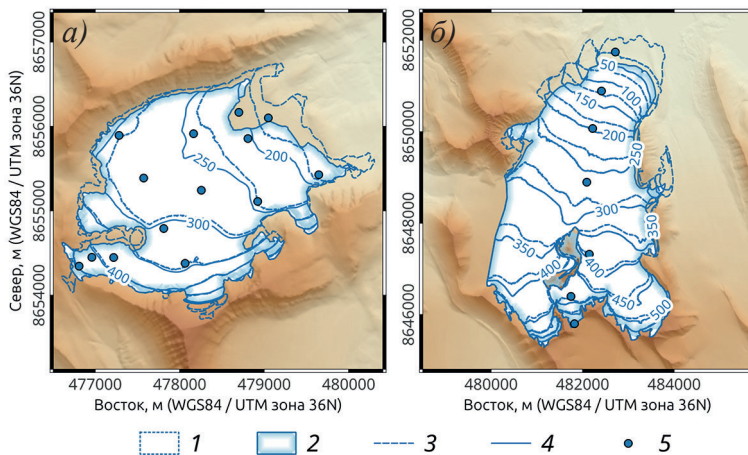


Рис. 2. Отступление рассматриваемых ледников (*а* — ледник Альдегонда, *б* — ледник Западный Грэнфьорд) и измерительная сеть на них.

1 — контуры ледников в 2013 г.; 2 — контуры ледников в 2025 г.; 3 — изогипсы в 2013 г.; 4 — изогипсы в 2025 г.; 5 — абляционные рейки

Fig. 2. Retreat of the glaciers studied (*a* — Aldegondabreen Glacier, *b* — Vestre Grønfyordbreen Glacier) and the measurement network on them.

1 — glacier outlines in 2013; 2 — glacier outlines in 2025; 3 — contour lines in 2013; 4 — contour lines in 2025; 5 — ablation stakes

каждого высотного интервала от общей площади ледника, рассчитывается средне-взвешенный удельный баланс для всего ледника. Более подробно методика, в том числе с оценкой погрешностей, описана в статьях А. Терехова и соавторов [25, 26]. В настоящем исследовании использованы данные за 2013/14–2024/25 балансовые годы, поскольку за этот период есть измерения на обоих ледниках.

В качестве источника данных о рельефе поверхности ледников использованы цифровые модели рельефа (ЦМР) Норвежского полярного института (S0 Terrengmodell) разрешением 5 м на пикс., на 2008 г.; ЦМР ArcticDEM на различные даты (табл.), разрешением 2 м на пикс.; ЦМР, построенная для ледника Альдегонда по материалам топографических съемок конца 2017/18 балансового года разрешением 10 м на пикс. [30] (см. табл.).

Для всех ЦМР была предварительно проведена процедура так называемой «гомогенизации», т. е. устранения возможной систематической невязки по вертикали. Для этого был использован пакет demcoreg [31], реализующий на языке Python алгоритм взаимной привязки ЦМР по С. Nuth и А. Кяаб [32]. Алгоритм устраняет как вертикальные несовершенства взаимной привязки, так и плановые расхождения.

Таблица

Источники данных о рельефе ледников Альдегонда и Западный Грэнфьорд, использованные для расчета баланса массы

Table

Data sources on the glacier topography of Aldegondabreen and Vestre Grøn fjordbreen glaciers used for mass balance calculations

Годы	Ледник Альдегонда	Ледник Западный Грэнфьорд
2008	Terrengmodell Svalbard (S0 Terrengmodell)	
2013/14	Фрагмент ArcticDEM 2013 г.	Фрагмент ArcticDEM 2013 г.
2014/15	Фрагмент ArcticDEM 2013 г.	Фрагмент ArcticDEM 2013 г.
2015/16	Фрагмент ArcticDEM 2015 г.	Фрагмент ArcticDEM 2015 г.
2016/17	Фрагмент ArcticDEM 2015 г.	Фрагмент ArcticDEM 2015 г.
2017/18	Результаты топосъемки августа 2018 г.	Фрагмент ArcticDEM 2017 г.
2018/19	Результаты топосъемки августа 2018 г.	Фрагмент ArcticDEM 2017 г.
2019/20	Результаты топосъемки августа 2018 г.	Фрагмент ArcticDEM 2021 г.
2020/21	Результаты топосъемки августа 2018 г.	Фрагмент ArcticDEM 2021 г.
2021/22	Результаты топосъемки августа 2018 г.	Фрагмент ArcticDEM 2021 г.
2022/23	Результаты топосъемки августа 2024 г.	Фрагмент ArcticDEM 2023 г.
2023/24	Результаты топосъемки августа 2024 г.	Фрагмент ArcticDEM 2023 г.
2024/25	Результаты топосъемки августа 2024 г.	Фрагмент ArcticDEM 2023 г.

Терминология и методы

Основной вопрос, которому посвящена данная работа, — разделение климатического и геометрического факторов в рядах баланса массы. Дополнительной сложностью при рассмотрении этого вопроса является отсутствие устоявшейся русскоязычной терминологии в этой области. Мы вынужденно используем кальки с английских терминов, которые, в свою очередь, также еще не нашли отражения в словарях на гляциологическую тематику [33, 34]. Поэтому термины, предлагаемые нами ниже, дискуссионны.

Под «геометрическим» фактором нами для краткости понимаются изменения пространственной конфигурации ледника, приводящие к тому, что его поверхность изменяет свое высотное положение и, следовательно, меняется чувствительность ледника к метеовеличинам. Количественное выражение влияния этого фактора на баланс массы мы называем *геометрическим сигналом*, по аналогии с более распространенным в гляциоклиматологии и палеоэкологических исследованиях термином *климатический сигнал* [35, 36].

Идея, лежащая в основе используемой нами методики выделения геометрического сигнала, проста: необходимо сравнить фактический удельный годовой баланс массы ледника (B_a) с тем, который данный ледник имел бы в случае неизменной во времени «геометрии» (B_{ref}), т. е. формы и размеров [19]. Разность двух этих балансов массы и принимается за вклад геометрического фактора B_{geom} :

$$B_{geom} = B_a - B_{ref}$$

Для пересчета измерений годового баланса по отдельным рейкам в средние по леднику величины B_a и B_{ref} может использоваться любой известный в гляциологии способ, напрямую учитывающий форму поверхности ледника. Способ пересчета по высотному профилю баланса массы, описанный выше и уже применяемый в нашем мониторинге, идеально подходит для этой задачи, поскольку среднее по леднику значение баланса рассчитывается с учетом гипсометрической кривой ледника. Поэтому в данной работе принят следующий подход: ряды B_a рассчитываются из натуральных измерений по абляционным рейкам с ежегодным обновлением гипсометрической кривой, т. е. с учетом изменений пространственной конфигурации ледников; ряды B_{ref} рассчитываются на основе гипсометрической кривой ледников на 2008 г., без дальнейшего обновления. В англоязычной литературе величина, получаемая на основе описанного выше подхода, известна и называется *fixed surface* либо *reference-surface mass balance*, т. е. «баланс массы, рассчитанный относительно фиксированной поверхности». Одним из примеров использования подобных рядов является работа [19], выполненная для опорного ледника South Cascade на северо-западе США.

Выбор момента времени, на который фиксируется гипсометрическая кривая ледников, определяется годом, на который имеется наиболее ранняя доступная нам ЦМР с приемлемым пространственным разрешением, — 2008 г.; кроме того, данная ЦМР охватывает весь регион, что позволяет повторить описанное в нашей работе исследование и для других ледников архипелага.

Отметим, что описанный выше подход к выделению геометрического сигнала не является единственно возможным; альтернативные способы рассматриваются в следующем разделе.

Результаты и обсуждение

Разделение геометрического и климатического сигналов

Расчет баланса массы ледников Альдегонда и Западный Грэнфьорд относительно фиксированной поверхности на 2008 г. (B_{ref}) показывает, что в действительности за последнее десятилетие (2014–2024 гг.) эти ледники теряют на 0,01–0,04 м в. э. в год больше, чем теряли бы с прежней, более высокой геометрией поверхности (рис. 3). Эта величина — геометрический сигнал B_{geom} — вносит дополнительный вклад, до 2 % в год, в таяние последних лет. Такая оценка может показаться незначительной, но при рассмотрении вклада геометрического сигнала за более длительные

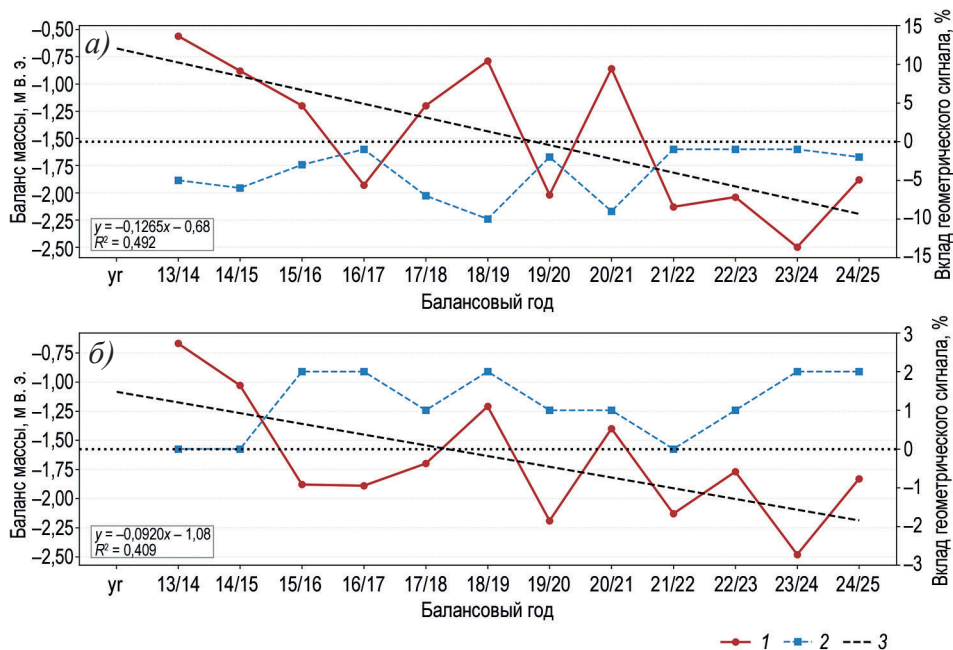


Рис. 3. Баланс массы ледников Альдегонда (а) и Западный Грэнфьорд (б) и вклад геометрического сигнала в баланс их массы.

1 — баланс массы (с обновляемой гипсометрической кривой); 2 — вклад геометрического сигнала в баланс массы; 3 — линейный тренд в балансе массы

Fig. 3. Mass balance of the Aldegondabreen (a) and Vestre Grøn fjordbreen (b) glaciers (Spitsbergen) and the contribution of the geometric signal to the mass balance.

1 — mass balance (with updated area–altitude distribution); 2 — contribution of the geometric signal to the mass balance; 3 — linear trend of the mass balance

промежутки времени, например, тридцатилетней климатической нормы, ее вклад возрастет. Кроме того, потеря массы ледниками Шпицбергена в последние годы носит беспрецедентный характер [27, 29], поэтому существует потенциал к будущему увеличению вклада геометрических изменений.

Наличие подобной обратной связи объясняется тем, что мода гипсометрической кривой ледников сместилась по абсолютной высоте в меньшую сторону (рис. 4). Оба ледника из-за отступления края языка потеряли наиболее низко расположенные участки, но середина и верховья ледника «переходят» в более низкие высотные интервалы. Видно, что прирост доли от общей площади наблюдается в интервале высот 200–300 м над уровнем моря (см. рис. 4).

Оценка вклада геометрического фактора не исчерпывается межгодовым масштабом времени. На наш взгляд, полезно также показать тренд в рядах баланса массы, рассчитанного относительно фиксированной поверхности, и сравнить его с трендом в действительном балансе ледников. Разница в величине трендов будет обусловлена вкладом изменений пространственной конфигурации ледника в баланс его массы. Такой расчет показывает, что из-за малости геометрического сигнала «истинно климатический» тренд не различается с реальным, составляя $-0,09 \pm 0,03$ м в. э. год⁻¹ для

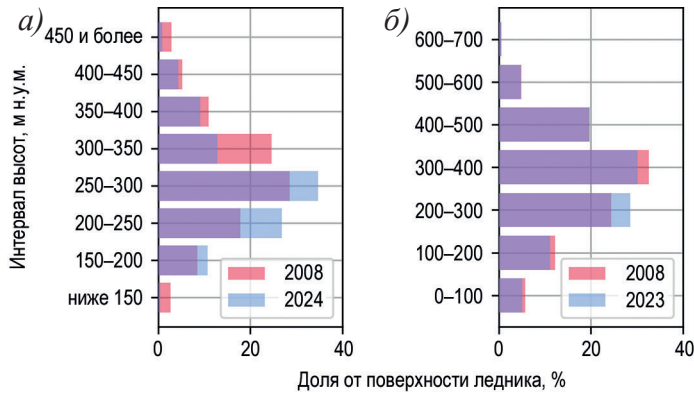


Рис. 4. Изменения гипсометрических кривых ледников Альдегонда (а) и Западный Грёнфьорд (б) с 2008 по 2023–2024 гг.

Fig. 4. Changes in the area–altitude distribution of Aldegondabreen (a) and Vestre Grøn fjordbreen (b) glaciers over the period 2008–2024

ледника Альдегонда и $-0,13 \pm 0,04$ м в. э. год⁻¹ для ледника Западный Грёнфьорд (тренды значимы на уровне $\alpha = 0,05$). Таким образом, на масштабах времени около двух десятков лет проследить влияние геометрического сигнала на долгосрочный тренд не представляется возможным.

Если верно соображение о том, что «истинно климатические» тренды, рассчитанные относительно фиксированной поверхности, полностью освобождены от влияния всех факторов, кроме климатического, то такие тренды для соседних ледников должны совпадать. К сожалению, наши расчеты не позволяют сделать однозначного вывода в подтверждение или в опровержение подобной гипотезы, поскольку доверительный интервал ($0,03–0,04$ м в. э. год⁻¹) слишком велик относительно самой величины трендов, что не позволяет провести сравнение. Проверка этого предположения представляет логичное продолжение работ с использованием данных с других ледников за большие интервалы времени.

Альтернативные методы оценки геометрического сигнала

Использованный в данной работе подход к выделению геометрического сигнала, основанный на сравнении масс-балансовых рядов, рассчитанных по высотным распределениям на разные годы, не является единственным. Ранее в [20] был представлен другой способ, основанный на вычислении «средних климатических» вертикальных профилей баланса массы и применении этого профиля к разным высотным распределениям ледника на ряд лет. Величину, аналогичную по смыслу геометрическому сигналу, авторы называют «геометрической аномалией».

Использовать для ледников в районе Баренцбурга подход, описанный в [20], невозможно из-за недостаточной длительности масс-балансовых рядов. Несмотря на то, что регулярный мониторинг в районе Баренцбурга начался в 2002/03 г., данные измерений по отдельным рейкам доступны лишь с 2008/09 балансового года, а для предшествующего периода сохранились только оценки среднего по леднику баланса. Это самое главное ограничение применимости метода «средних климатических» профилей баланса массы, которое мы попытались обойти: необходимое для подобных расчетов количество лет измерений баланса имеется лишь на малом числе ледников

архипелага, наиболее длительные из них относятся к ледникам Брёггер Восточный и Ловен Средний, где наблюдения были начаты еще в 1960-е гг. Для упомянутых ледников подобный подход принципиально возможен, но все они сгруппированы в районе Нью-Олесунна, на северо-западе острова Шпицберген, что не позволяет распространить расчеты на основе среднего климатического профиля баланса на остальные территории архипелага.

Помимо технических ограничений, существуют также и методические вопросы к использованию среднего климатического баланса массы: в первой четверти XXI в. баланс массы ледников, как и климат, не представляется стационарным [22]. В Арктике, где расположен изучаемый район, тренды потепления в несколько раз выше средних по миру из-за полярного усиления [37], которое в районе Шпицбергена проявляется максимально [38]. Тренды повышения приземной температуры воздуха по измерениям метеостанции Баренцбурга статистически значимы не только для среднегодовой величины ($+0,121\text{ }^{\circ}\text{C год}^{-1}$, 1986–2020 гг.), но и для всех сезонов года, с максимумом в зимний период ($+0,22\text{ }^{\circ}\text{C год}^{-1}$) [39]. Следовательно, из-за нестационарности рассматриваемых величин расчет среднего климатического профиля баланса массы ледников может быть статистически некорректен. Поэтому мы придерживаемся технически более простого способа расчета геометрического фактора — относительно фиксированной поверхности ледника на заданный год.

Ошибки измерений

Практика долговременного масс-балансового мониторинга показывает, что разные исследователи по-разному подходят к оценке погрешности сообщаемого ими годового баланса массы, включая в расчет разные факторы. При этом погрешность собственно единичного натурального измерения, оцениваемая для абляциянных реек в первые сантиметры, едва ли не наименьший из всех факторов; гораздо большую ошибку вносит процедура интер- и экстраполяции «точечных» измерений на весь ледник [40]. Это приводит к тому, что типичные оценки погрешности годового баланса лежат в интервале 0,15–0,30 м в. э. [41], что в разы больше выделенного нами геометрического сигнала.

С методической точки зрения геометрический сигнал может быть трактован как *систематическая* ошибка, которая возникает, если не обновлять гипсометрическую кривую ледника при длительном мониторинге баланса массы [40, 42, 43]. Систематические и случайные ошибки принципиально отличаются друг от друга и могут быть оценены совершенно независимо. Систематическая ошибка может быть небольшой даже при крупной случайной ошибке, и наоборот. Поэтому противоречия между порядком величин *разных видов ошибок* нет. Также нет противоречия в том, что, по мнению ряда других исследователей (например, [19, 20]), разность между тем, как тает ледник в действительности, и тем, как бы он таял при неизменной форме, может быть интерпретирована как влияние изменений формы и размера ледника на его баланс массы.

Экстраполяция результатов

Главный результат исследования — подтверждение наличия обратной связи при потере массы ледником (возможно, и при наборе массы, но для района исследования такое явление не характерно). Факт наличия такого механизма может показаться очевидным; однако, во-первых, он полностью игнорируется при анализе связи существующих на Шпицбергене рядов баланса массы с климатом

(см., например, [18, 25, 26, 44, 45]). Во-вторых, мы смогли охарактеризовать эту связь количественно, через величину геометрического сигнала (т. е. через вклад геометрического фактора в баланс массы одного балансового года) и через вклад геометрического фактора в тренд (т. е. на продолжительных интервалах времени). На примере двух ледников одного морфологического типа, расположенных близко друг другу, т. е. в одинаковых климатических условиях, мы выяснили, что вклад геометрического фактора положителен.

Вероятно, величина геометрического сигнала зависит от некоторого фактора, который помог бы экстраполировать эту величину в пространстве. Оба исследуемых ледника теряют в последние десятилетия массу примерно с одинаковой скоростью, и пик их высотного распределения смещается вниз (см. рис. 4). Несмотря на то, что площадь ледников различается практически в три раза, общим для них является интервал высот, в пределах которого лежит их поверхность. Оба ледника расположены довольно низко, что определяется особенностями рельефа в рассматриваемой части Шпицбергена. Оба ледника полностью потеряли зону аккумуляции и теряют лед со всей поверхности.

Геометрический сигнал противоположного знака могут иметь высоко расположенные ледники в северной части архипелага. Сохраняя питание за счет аккумуляции на крупнейших плато, край выводных ледников может отступать вверх по склону, за счет чего их гипсометрическая кривая будет смещаться выше, а не как у рассмотренных нами ледников. Возможно, для геометрического сигнала существует зависимость от высотного диапазона ледника, в случае чего это могло бы упростить экстраполяцию на все оледенение архипелага; однако по двум ледникам проверить наличие подобной связи невозможно.

Наиболее перспективным регионом для аналогичных исследований выглядят высокие широты, где есть ЦМР “ArcticDEM”, покрывающая всю Арктику, и ЦМР “REMA” для Антарктики. Расширение такого анализа на другие ледники и регионы позволит оценить, насколько универсальны выявленные закономерности, и лучше понять роль геометрического и климатического факторов в формировании современных трендов в рядах баланса массы. Однако расчет удельного баланса методом высотного профиля подходит не для всех ледников мира, поэтому, очевидно, у используемой нами методики имеются ограничения.

Выводы

На примере двух горно-долинных ледников Альдегонда и Западный Грэнфьорд, расположенных в районе населенного пункта Баренцбург (Шпицберген), где с начала XXI в. ведется регулярный мониторинг баланса массы, мы показали вклад изменений пространственной конфигурации ледника в его таяние. Этот вклад оказался примерно равным для двух ледников и количественно составлял до 2 % от суммарной величины баланса ледника Альдегонда в отдельные годы (т. е. ледник терял на 0,02–0,04 м в. э. больше, чем если бы его геометрия осталась неизменной за прошедшие 15 лет) и всего 1 % процент от баланса массы ледника Западный Грэнфьорд. Объясняется это тем, что мода гипсометрических кривых рассматриваемых ледников сдвинулась сонаправленно: средняя высота обоих ледников уменьшилась.

Важным для нас представляется сам факт наличия обратной связи. Она влияет не только на динамику ледников Шпицбергена в ближайшем будущем, но и имеет важные методические последствия для анализа продолжительных масс-балансовых

рядов: изменение скорости таяния ледников следует ожидать даже при стационарном климате, а тренд в масс-балансовых рядах не может быть со стопроцентной уверенностью объяснен трендами в климатических элементах.

Важной особенностью «геометрического» фактора является то, что величина его вклада зависит не только от высоты поверхности ледника, но и от его плановых координат, а также от распределения мощности льда по языку. Следовательно, экстраполяция полученных на выбранном леднике результатов, зависящих от морфологического типа ледника и его очертаний, рельефа ложа и скального обрамления, а не от климатических особенностей центра оледенения, представляет значительную сложность. Это, однако, не исключает того, что для конкретного центра оледенения, при наличии исходных данных, может быть рассчитан средний геометрический сигнал.

Тема разделения геометрического и климатического сигналов в рядах баланса массы ледников требует дальнейшего исследования. Мы призываем исследователей, обладающих первичными данными гляциологического мониторинга, которые необходимы для повторения показанного эксперимента — гипсометрических кривых и масс-балансовых измерений, — проделать схожие расчеты для сравнения вклада геометрического сигнала в разных частях земного шара и для разных морфологических типов оледенения.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках НИТР 5.1 Росгидромета на 2025–2029 гг. «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты, процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики».

Competing interest. The authors have no conflict of interest to declare.

Funding. The research was carried out within the framework of the scientific research and technology work 5.1 of Roshydromet for 2025–2029 “Development of models, methods and technologies for monitoring and forecasting the state of the atmosphere, ocean, sea ice cover, glaciers and permafrost (cryosphere), processes of ice interaction with natural objects and engineering structures for the Arctic”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Radić V., Hock R. Glaciers in the Earth’s hydrological cycle: assessments of glacier mass and runoff changes on global and regional scales. *Surveys in Geophysics*. 2014;35(3):813–837. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9262-y>
2. Zemp M., Hoelzle M., Haeberli W. Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network. *Annals of Glaciology*. 2009;50:101–111. <https://doi.org/10.3189/172756409787769591>
3. Haeberli W., Hoelzle M., Paul F., Zemp M. Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps. *Annals of Glaciology*. 2007;46:150–160. <https://doi.org/10.3189/172756407782871512>
4. Bojinski S., Verstraete M., Peterson T.C., Richter C., Simmons A., Zemp M. The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2014;95(9):1431–1443. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00047.1>
5. Finsterwalder S. Die Theorie der Gletscherschwankungen. *Zeitschrift für Gletscherkunde*. 1907–1908;2:81–103.
6. Кренке А.Н., Ходаков В.Г. О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха. *Материалы гляциологических исследований*. 1966;12:153–164.

- Krenke A.N., Khodakov V.G. On the relationship between surface melting of glaciers and air temperature. *Materials of glaciological studies*. 1966;12:153–164. (In Russ.)
7. Hock R. Glacier melt: a review of processes and their modelling. *Progress in Physical Geography*. 2005;29(3):362–391. <https://doi.org/10.1191/0309133305pp453ra>
 8. Zekollari H., Huss M., Farinotti D., Lhermitte S. Ice-dynamical glacier evolution modeling—A review. *Reviews of Geophysics*. 2022;60(2):e2021RG000754. <https://doi.org/10.1029/2021RG000754>
 9. Fountain A.G., Krimmel R.M., Trabant D. *A strategy for monitoring glaciers*. Washington, DC: US Government Printing Office; 1997. 19 p.
 10. Fountain A.G., Hoffman M.J., Granshaw F., Riedel J. The “benchmark glacier” concept — does it work? Lessons from the North Cascade Range, USA. *Annals of Glaciology*. 2009;50(50):163–168. <https://doi.org/10.3189/172756409787769690>
 11. Поповнин В.В., Сергиевская Я.Е. Об обратной связи доли лавинного питания с аккумуляцией ледника. *Лед и Снег*. 2018;58(4):437–447. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-437-447>
Popovnin V.V., Sergiyevskaya Y.Y. On a feedback of the share of avalanche alimentation with a glacier accumulation. *Ice and Snow*. 2018;58(4):437–447. (In Russ.)
 12. Rounce D.R., Hock R., McNabb R.W., Millan R., Sommer C., Braun M.H., Malz P., Maussion F., Mouginot J., Seehaus T.C., Shean D.E. Distributed global debris thickness estimates reveal debris significantly impacts glacier mass balance. *Geophysical Research Letters*. 2021;48(8): e2020GL091311. <https://doi.org/10.1029/2020GL091311>
 13. Marzeion B., Nesje A. Spatial patterns of North Atlantic Oscillation influence on mass balance variability of European glaciers. *The Cryosphere*. 2012;6:661–673. <https://doi.org/10.5194/tc-6-661-2012>
 14. Фёдоров В.М. *Динамика баланса массы ледников в связи с макроциркуляционными процессами в атмосфере*. М.: Физматлит; 2011. 378 с.
 15. Терехов А.В., Прохорова У.В., Борисик А.Л., Демидов В.Э., Веркулич С.Р. Изменения объема и геометрии ледника Восточный Дальфонна (Шпицберген) в 2008–2019 гг. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022;68(4):370–383. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-370-383>
Terekhov A.V., Prokhorova U.V., Borisik A.L., Demidov V.E., Verkulich S.R. Changes in volume and geometry of the Austre Dahlfonna glacier (Spitsbergen island) in 2008–2019. *Arctic and Antarctic Research*. 2022;68(4):370–383. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-370-383>
 16. Dyurgerov M.B. Mountain glaciers at the end of the twentieth century: global analysis in relation to climate and water cycle. *Polar Geography*. 2001;25(4):241–336. <https://doi.org/10.1080/10889370109377717>
 17. Kaser G., Cogley J.G., Dyurgerov M.B., Meier M.F., Ohmura A. Mass balance of glaciers and ice caps: consensus estimates for 1961–2004. *Geophysical Research Letters*. 2006;33(19). <https://doi.org/10.1029/2006gl027511>
 18. Hagen J.O., Liestøl O. Long-term glacier mass-balance investigations in Svalbard, 1950–88. *Annals of Glaciology*. 1990;14:102–106. <https://doi.ORG/10.3189/S0260305500008351>
 19. Elsberg D.H., Harrison W.D., Echelmeyer K.A., Krimmel R.M. Quantifying the effects of climate and surface change on glacier mass balance. *Journal of Glaciology*. 2001;47(159):649–658. <https://doi.org/10.3189/172756501781831783>
 20. Charalampidis C., Fischer A., Kuhn M., Lambrecht A., Mayer C., Thomaidis K., Weber M. Mass-budget anomalies and geometry signals of three Austrian glaciers. *Frontiers in Earth Science*. 2018;6:218. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00218>

21. Farnsworth W.R., Allaart L., Ingólfsson Ó., Alexanderson H., Forwick M., Noormets R., Schomacker A. Holocene glacial history of Svalbard: Status, perspectives and challenges. *Earth-Science Reviews*. 2020;208:103249. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103249>
22. The GlaMBIE Team. Community estimate of global glacier mass changes from 2000 to 2023. *Nature*. 2025;639:382–388. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08545-z>
23. Menounos B., Huss M., Marshall S., Ednie M., Florentine C., Hartl L. Glaciers in Western Canada—conterminous US and Switzerland experience unprecedented mass loss over the last four years (2021–2024). *Geophysical Research Letters*. 2025;52:e2025GL115235. <https://doi.org/10.1029/2025GL115235>
24. Fischer A. Current state, progress, and challenges of glacier monitoring in Austria. In: *125 years of internationally coordinated glacier monitoring: achievements and future challenges — Summary report on the IUGG General Assembly and the WGMS General Assembly of National Correspondents 2019*. Zurich: World Glacier Monitoring Service; 2020. P. 7–9. <https://doi.org/10.5167/uzh-200589>
25. Terekhov A., Prokhorova U., Verkulich S., Demidov V., Sidorova O., Anisimov M., Romashova K. Two decades of mass-balance observations on Aldegondabreen, Spitsbergen. *Annals of Glaciology*. 2023;64(92):225–235. <https://doi.org/10.1017/aog.2023.40>
26. Terekhov A., Verkulich S., Borisik A., Demidov V., Prokhorova U., Romashova K., Anisimov M., Sidorova O., Tarasov G. Mass balance, ice volume, and flow velocity of the Vestre Grøn fjordbreen (Svalbard) from 2013/14 to 2019/20. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2022;54(1):584–602. <https://doi.org/10.1080/15230430.2022.2150122>
27. Schuler T.V., Kohler J., Elagina N., Hagen J.O.M., Hodson A.J., Jania J.A., Van Pelt W.J. Reconciling Svalbard glacier mass balance. *Frontiers in Earth Science*. 2020;8:156. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00156>
28. Holmlund E.S. Aldegondabreen glacier change since 1910 from structure-from-motion photogrammetry. *Journal of Glaciology*. 2021;67(261):107–116. <https://doi.org/doi:10.1017/jog.2020.89>
29. Terekhov A.V., Prokhorova U., Soloveva D., Demidov V., Vasilevich I.I., Verkulich S.R. Unprecedented mass loss of Aldegondabreen, central Spitsbergen, Svalbard. *Journal of Glaciology*. 2026;72:e3. <https://doi.org/10.1017/jog.2025.10113>
30. Терехов А.В., Тарасов Г.В., Сидорова О.Р., Демидов В.Э., Анисимов М.А., Веркулич С.Р. Оценка баланса массы ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в 2015–2018 гг. *Лед и Снег*. 2020;60(2):192–200. <https://doi.org/10.31857/S2076673420020033>
Terekhov A.V., Tarasov G.V., Sidorova O.R., Demidov V.E., Anisimov M.A., Verkulich S.R. Estimation of mass balance of Aldegondabreen (Spitsbergen) in 2015–2018 based on ArcticDEM, geodetic and glaciological measurements. *Ice and Snow*. 2020;60(2):192–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673420020033>
31. Shean D.E., Alexandrov O., Moratto Z., Smith B.E., Joughin I.R., Porter C.C., Morin P.J. An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very high-resolution commercial stereo satellite imagery. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens*. 2016;116:101–117. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012>
32. Nuth C., Kääb A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*. 2011;5(1):271–290.
33. Mass-balance terms. *Journal of Glaciology*. 1969;8(52):3–7. <https://doi.org/10.3189/S0022143000020736>
34. Cogley J.G., Arendt A.A., Bauder A., Braithwaite R.J., Hock R., Jansson P., Zemp M. *Glossary of glacier mass balance and related terms*. Paris: UNESCO–IHP; 2011. <https://doi.org/10.1017/S0032247411000805>

35. Solomina O., Wiles G., Shirawa T., D'Arrigo R. Multiproxy records of climate variability for Kamchatka for the past 400 years. *Climate of the Past*. 2007;3(1):119–128. <https://doi.org/10.5194/cp-3-119-2007>
36. Ekaykin A.A., Veres A.N., Wang Y. Recent increase in the surface mass balance in central East Antarctica is unprecedented for the last 2000 years. *Communications Earth & Environment*. 2024;5(1):200. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01355-1>
37. Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*. 2022;3:168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
38. Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B., Køltzow M.A., Aaboe S., Gjeltén H.M., Karandasheva T. Exceptional warming over the Barents area. *Scientific Reports*. 2022;12(1):9371. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13568-5>
39. Карандашева Т.К., Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д. Изменения температуры воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в XX–XXI вв. *Российская Арктика*. 2021;(13):26–39. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-2-26-39>
 Karandasheva T.K., Demin V.I., Ivanov B.V., Revina A.D. Air temperature changes in Barentsburg (Svalbard) in XX–XXI centuries. Justification for introducing a new climate standard. *Russian Arctic*. 2021;(13):26–39. (In Russ.).
40. Zemp M., Thibert E., Huss M., Stumm D., Rolstad Denby C., Nuth C., Naussbaumer S.U., Moholdt G., Mercer A., Mayer C., Joerg P.C., Jansson P., Hynek B., Fischer A., Escher-Vetter H., Elvehøy H., Andreassen L.M. Reanalysing glacier mass balance measurement series. *The Cryosphere*. 2013;7(4):1227–1245. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1227-2013>
41. Klug C., Bollmann E., Galos S.P., Nicholson L., Prinz R., Rieg L., Sailer R., Stötter, J., Kaser G. Geodetic reanalysis of annual glaciological mass balances (2001–2011) of Hintereisferner, Austria. *The Cryosphere*. 2018;12(3):833–849. <https://doi.org/10.5194/tc-2017-132>
42. Huss M., Bauder A., Funk M. Homogenization of long-term mass-balance time series. *Annals of Glaciology*. 2009;50:198–206. <https://doi.org/10.3189/172756409787769627>
43. Чернов Р.А., Кудиков А.В., Вшивцева Т.В., Осокин Н.И. Оценка поверхностной абляции и баланса массы ледника Восточный Грэнфьорд (Западный Шпицберген). *Лед и Снег*. 2019;59(1):59–66. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-59-66>
 Chernov R.A., Kudikov A.V., Vshivtseva T.V., Osokin N.I. Estimation of the surface ablation and mass balance of Eustre Grønfyordbreen (Spitsbergen). *Ice and Snow*. 2019;59(1):59–66. (In Russ.).
44. Andreassen L.M., Elvehøy H., Kjølmoen B., Engeset R.V. Reanalysis of long-term series of glaciological and geodetic mass balance for 10 Norwegian glaciers. *The Cryosphere*. 2016;10(2):535–552. <https://doi.org/10.5194/tc-10-535-2016>
45. Ignatiuk D., Błaszczyk M., Budzik T., Grabiec M., Jania J.A., Kondracka M., Stachnik Ł. A decade of glaciological and meteorological observations in the Arctic (Werenskiöldbreen, Svalbard). *Earth System Science Data*. 2022;14(5):2487–2500. <https://doi.org/10.5194/essd-14-2487-2022>