

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ
GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-370-383>
УДК 551.321.61, 551.324.4, 551.324.6



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**Изменения объема и геометрии ледника Восточный Дальфонна
(Шпицберген) в 2008–2019 гг.**

А.В. Терехов^{1,2}, У.В. Прохорова¹, А.Л. Борисик¹,
В.Э. Демидов¹, С.Р. Веркулич¹*

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

² — Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

*antonvterekhov@gmail.com

Резюме

В работе представлены результаты топографической и геофизической съемок на леднике Восточный Дальфонна площадью около 2 км², расположенном на архипелаге Шпицберген к югу от поселка Баренцбург. Средняя толщина льда по состоянию на 2019 г. составляет 82 м, максимальная — 170 м. На основе сравнения с архивными данными дистанционного зондирования показано, что за 12 балансовых лет ледник потерял 16 % своего объема, что эквивалентно потере массы в $12,05 \pm 0,85$ м в. э. Сравнением двух шестилетних периодов установлено, что в 2008–2013 гг. потеря массы замедлялась по отношению к последующему интервалу 2013–2019 гг., что согласуется как с наблюдениями на соседнем леднике Восточный Грэнфьорд, так и с общей масс-балансовой изменчивостью на архипелаге. Это приводит к выводу, что на временных интервалах порядка 5–10 лет изменчивость баланса массы ледников в районе Баренцбурга определяется факторами регионального масштаба, а именно сменами режимов атмосферной циркуляции на Шпицбергене, которые могут быть охарактеризованы преобладанием положительной либо отрицательной фазы индекса Северо-Атлантического колебания (NAO) летом.

Ключевые слова: баланс массы, георадарная съемка, изменения климата, индекс NAO, ледник, Шпицберген.

Для цитирования: 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. Т. 68. № 4. С. 370–383. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-370-383>.

Поступила 26.07.2022

После переработки 17.09.2022

Принята 02.10.2022

Changes in volume and geometry of the Austre Dahlfonna glacier (Spitsbergen island) in 2008–2019

Anton V. Terekhov^{1,2}, Uliana V. Prokhorova¹, Alexander L. Borisik¹,
Vasiliy E. Demidov¹, Sergei R. Verkulich¹*

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

² — *State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia*

**antonvterekhov@gmail.com*

Summary

Previously published geodetic mass balance data indicate glacier shrinkage in the Barentsburg area of Svalbard since the beginning of the 20th century on the decadal time scale. However, observations for shorter time spans allowing one to compute the inter-annual variability of the mass balance are scarce. The study presents results of ground-based GNSS and the GPR surveys of the Austre Dahlfonna glacier (2 sq km) located on Spitsbergen island, south of the town of Barentsburg. According to the GPR survey of spring 2019 at 50 MHz frequency, the area-averaged ice thickness was equal to 82 m, while the maximum was 170 m. The results confirm the polythermal structure of the glacier, with a layer of underlying temperate ice. Since the end of the Little Ice Age, the area of Austre Dahlfonna has halved. By comparing the GNSS survey results (the end of the melt season of 2019) with the co-registered archived remote sensing data (ArcticDEM strip of 2013 and S0 Terrenmodell of 2008), it was computed that, within the last 12 years (2008–2019), Austre Dahlfonna lost 16 % of its volume, which corresponds to a geodetic mass balance of -12.05 ± 0.85 m w. e. The mass loss in 2008–2013 (5.22 ± 0.37 m w. e.) was lower than in 2013–2019 (6.83 ± 0.48 m w. e.), which is in agreement with the ongoing direct measurements on the neighboring Austre Grønfyordbreen glacier and with the archipelago-wide mass-balance patterns. We demonstrate that the less intensive glacier mass loss, which occurred in 2005–2012 and was detected previously for the whole archipelago, definitely took place in the Barentsburg area as well. This time interval is characterized by the prevalence of a negative NAO phase (65 % of recurrence), which may indicate more frequent intrusions of colder Arctic air masses. This fact proves that the mass-balance variability of the Barentsburg area glaciers is governed in time spans of 5–10 years by regional-scale factors, presumably by shifts in the atmospheric circulation regimes.

Keywords: Barents Sea, climate change, glacier, GPR, mass balance, North-Atlantic Oscillation, Svalbard.

For Citation: *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. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research.* 2022, 68 (4): 370–383. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-370-383>.

Received 26.07.2022

Revised 17.09.2022

Accepted 02.10.2022

ВВЕДЕНИЕ

Архипелаг Шпицберген — один из крупнейших центров современного оледенения в Арктике. Проведенный в середине первого десятилетия XXI в. анализ данных дистанционного зондирования показал значительное ускорение темпов потери массы ледниками Шпицбергена. В работе [1] авторы на основе повторных лидарных съемок 1996 и 2002 гг. установили, что в этот временной промежуток средний баланс массы ледников архипелага составлял $-0,19$ м в. э. в год, что в 1,6 раза ниже, чем за предыдущие 30 лет. В 2003–2005 гг. снижение высоты поверхности ледников стало еще более интенсивным — в 4 раза выше, чем за первый доступный для расчета по архивным данным период с 1936 по 1962 г. [2]. Рекордно отрицательные показатели

баланса массы наблюдались и прямыми измерениями на абляционных рейках для ледников в окрестностях Баренцбурга [3, 4]. Теперь, в конце второго десятилетия XXI в., стало известно, что в 2005–2012 гг. на Шпицбергене последовал период некоторого повышения баланса массы, вновь сменившийся более отрицательными показателями с 2013 г. [5]. По гравиметрическим данным спутниковой программы GRACE было рассчитано, что в период 2005–2012 гг. суммарная потеря массы ледниками архипелага практически прекратилась [6]. В работе [7] на основе данных реанализа этот факт обоснован сменами атмосферной циркуляции в регионе, в результате которых в 2005–2012 гг. над архипелагом чаще господствовали более холодные арктические воздушные массы, приходящие с северо-запада. Если предположение верно, то подобная периодичность масс-балансовых характеристик должна была одновременно наблюдаться и в окрестностях Баренцбурга.

Несмотря на имеющиеся публикации о балансе массы некоторых ледников в районе Баренцбурга (например, работы [8, 9]), приводимые в них данные относятся либо к предыдущему столетию, либо к значительным по продолжительности интервалам лет, масштаба десятилетий, что не позволяет делать выводы о кратковременной изменчивости масс-балансовых характеристик в рассматриваемой области.

Баланс массы ледников района Баренцбурга в 2005–2012 гг. освещен в современных публикациях слабо. На сегодняшний день известен только один масс-балансовый ряд, охватывающий указанный период, с ледника Восточный Грэнфьорд [10]. Однако в распоряжении авторов имеется достаточное количество данных с ледника Восточный Дальфонна, которые позволят рассчитать баланс массы за два одинаковых по продолжительности периода до и после 2013 г. и проверить, действительно ли в недавнем прошлом имел место эпизод с повышением баланса массы ледников в окрестностях Баренцбурга. Это и является целью данного исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования. Ледник Восточный Дальфонна — горно-долинный ледник площадью около 2 км², расположенный приблизительно в 15 км к юго-западу от населенного пункта Баренцбург. Ледник занимает диапазон высот от 100 до 550 м, спускаясь от ледораздела с более крупным ледником Западный Грэнфьорд в долину Орустдален, относящуюся к водосбору Гренландского моря.

Натурные съемки. Георадиолокационная съемка была выполнена 4 и 6 апреля 2019 г. Маршруты съемки, общая длина которых составила 7 км, показаны на рис. 1. При производстве наблюдений использовался георадар Pulse ЕККО PRO с антенной 50 МГц вместе с ГНСС системой Sokkia GRX2, работавшей в режиме RTK (Real time kinematic). Система сбора геофизической информации была размещена в специальных саях, перемещаемых по профилям при помощи снегохода. Шаг зондирования по профилю составил 0,5 м, при этом для каждой трассы записывались точные плановые и высотные координаты измерений.

Полученный массив геофизических данных был обработан в программе ЕККО_Project V5 (Sensors&Software, Канада) по стандартному графу, включавшему введение поправок и смещений за положение ГНСС-приемника и разнос антенн, частотную фильтрацию сигнала и миграцию полученных разрезов для корректировки положения наклонных границ. На следующем этапе выполнялось ручное пикирование границы ложа ледника и пересчет полученных времен в глубины. Значение скорости электромагнитных волн принято равным 168 м·мкс⁻¹, как было рекомендовано для

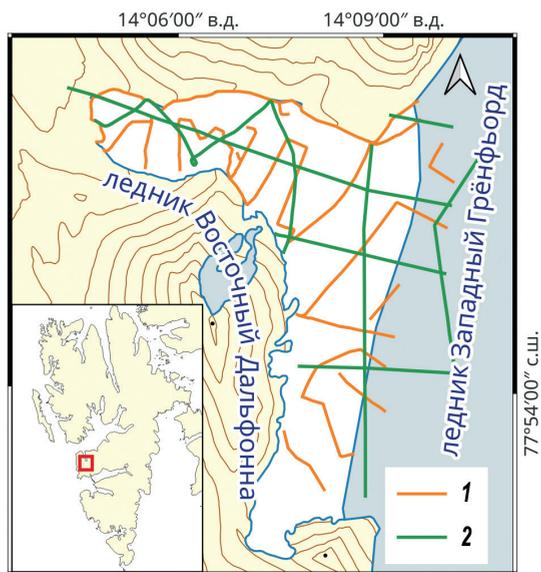


Рис. 1. Расположение ледника Восточный Дальфонна и маршруты съемок 2019 г.: 1 — топографическая съемка, 2 — георадарная съемка

Fig. 1. The location of the Austre Dahlfonna glacier and the routes of 2019 surveys: 1 — ground-based GNSS survey, 2 — GPR survey

ледников этой части Шпицбергена в работе [11]. На основании предыдущих измерений скоростей распространения электромагнитных волн в толще политермических ледников [12] авторами принята относительная погрешность скорости в 2 %, которая далее введена в полученные величины объемов ледника.

Наземная топографическая съемка на леднике была проведена 20 августа 2019 г., ближе к концу сезона абляции. Ее маршруты показаны на рис. 1. Работы проводились многоканальными ГНСС-приемниками Sokkia GRX-2 кинематическим методом с постобработкой. На основе результатов съемки, после предварительного отсева всех точек с вертикальной точностью хуже 10 см, была построена цифровая модель рельефа (ЦМР). Для интерполяции использован алгоритм Thin Plate Spline.

Контуры ледника. Контуры ледника Восточный Дальфонна, необходимые для расчета изменений объема, были определены на три момента времени: для 2008, 2013 и 2019 гг. Также для сравнения площадей и длин ледника нами были оконтурены наиболее ранний из доступных для анализа космических снимков, на 1963 г., и максимальное распространение ледника. Максимальные длина и площадь выделены по наибольшему покрытию морен в долине, отмеченному на топографических картах Kartdata Svalbard [13]. Наиболее вероятно, что эти морены относятся к моменту окончания Малого ледникового периода (далее МЛП, ~1900 г. [14]). Использованные для определения контуров ледника материалы перечислены в табл. 1.

Для оценки погрешности определения площадей по космическим снимкам вдоль контура ледника был построен буфер шириной в половину пикселя снимка. Площадь буфера была условно принята за погрешность. Там, где контур был отрисован по топографической съемке, погрешность принята пренебрежимой, поскольку плановая ошибка спутниковых измерений много меньше пикселя снимка.

Материалы, использованные для получения контуров ледника Восточный Дальфонна
Table 1

Materials for the delineation of the Austre Dahlfonna glacier

Год	Источник	Разрешение
2019	Sentinel-2 + топографическая съемка	10 м
2013	Landsat-8 (LC08_L1TP_216004_20130928_20200912_02_T1)	15 м
2008	Kartdata Svalbard 1:100 000 (S100 Kartdata)	—
1963	ARGON (KH-5) (DS09058A024MC013)	30 м

Погрешность площадей на 2008 г. и на конец МЛП оценить сложно, поскольку для их расчета были использованы готовые картографические материалы. Поэтому эти величины приведены авторами без доверительных интервалов.

Изменения объема и массы ледника. Изменение объема ледника определено вычитанием друг из друга трех разновременных ЦМР: S0 Terrengmodell [15] на 2008 г., фрагмента ArcticDEM на 16 сентября 2013 г. [16] и ЦМР, полученной по топографической съемке 2019 г. Пересчет единиц объема в единицы массы производился путем умножения на величину плотности 850 ± 60 кг м⁻³, как рекомендовано в работе [17].

Перед сравнением высот соответствующих пикселей ЦМР было необходимо предварительно устранить систематические различия в значениях, вызванные ошибками вертикальной привязки ЦМР. Фрагмент ArcticDEM был привязан на основе вектора переноса, рассчитанного создателями ЦМР на основе измерений IceSat и содержащегося в метаданных файла. Вектор сдвига (dz, dx, dy) составил (+1,243, +0,503, +3,088) метра.

Для корегистрации фрагмента ЦМР S0 Terrengmodell к ЦМР ArcticDEM был использован пакет demcoreg [18], реализующий на языке Python алгоритм взаимной привязки, разработанный Nuth и Kaab [19]. Вектор сдвига (dz, dx, dy) составил (+34,181, +0,637, -2,453) метра.

Все расчеты велись в системе высот от эллипсоида WGS84. Для перехода к среднему уровню моря из всех значений вычиталась величина 32,563 м, рассчитанная на основе спутниковых измерений в Баренцбурге и принятая постоянной для всего района работ. Далее все результаты представлены в системе высот от уровня моря.

Индекс Северо-Атлантического колебания (NAO). В работе использованы значения индекса NAO, рассчитанные организацией Climate Prediction Center (NOAA) и доступные на сайте [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Контур и рельеф поверхности ледника Восточный Дальфонна по состоянию на конец сезона абляции 2019 г. показаны на рис. 2а. В расчеты характеристик ледника не включен крупный снежник, расположенный на крутом северном склоне горы Харальдфельлет и недоступный для каких-либо наземных съемок. В последние годы снежник отделился от основной части ледника и распался на несколько частей, быстро деградируя. Чуть более чем за столетие, прошедшее после окончания МЛП, площадь ледника уменьшилась вдвое (табл. 2).

По расчетам авторов [5], современная снеговая линия на архипелаге Шпицберген расположена на высотах 500–550 м. На рис. 2а видно, что поверхность

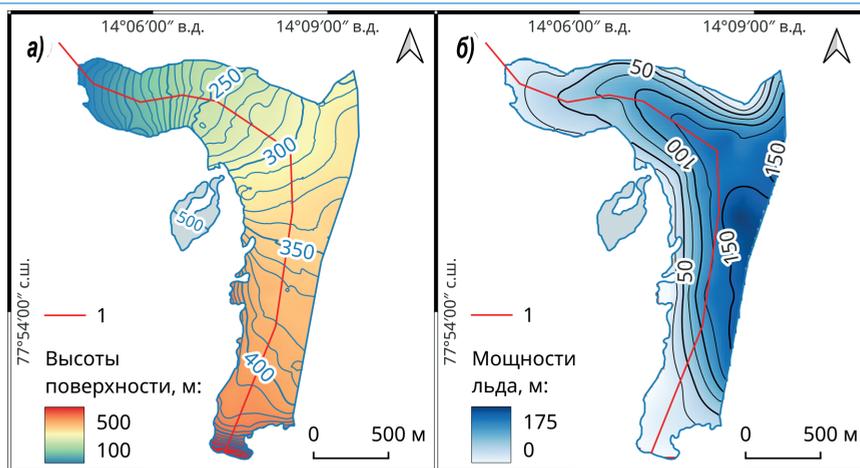


Рис. 2. Высоты поверхности ледника Восточный Дальфонна (а) и мощности льда (б), по состоянию на 2019 г. 1 — условная центральная линия вдоль ледника

Fig. 2. Surface topography of the Austre Dahlfonna glacier (a) and its ice thickness (b) in 2019. 1 — the glacier centerline

Таблица 2

Геометрические характеристики ледника Восточный Дальфонна в 1963, 2008, 2013 и 2019 гг.

Table 2

Geometric characteristics of the Austre Dahlfonna glacier in 1963, 2008, 2013 and 2019

Характеристики	Конец МЛП	1963	2008	2013	2019
Длина вдоль условной центральной линии, м	5 260	4 600	3 890	3 830	3 690
Площадь, км ²	4,12	3,36 ± 0,12	2,25	2,10 ± 0,06	1,92 ± 0,03
Общий объем, км ³	—	—	0,187 ± 0,003	0,174 ± 0,003	0,157 ± 0,003

ледника Восточный Дальфонна в настоящее время расположена полностью ниже этой границы и, следовательно, должна быть практически полностью лишена зоны аккумуляции.

На рис. 2б показано пространственное распределение запасов льда. Область с наибольшими мощностями до 170 м расположена вдоль ледораздела с Западным Грэнфьордом, в то время как средняя мощность льда составляет 82 м. На всех полученных георадиолокационных разрезах были прослежены участки теплого льда, что согласуется с результатами предыдущих геофизических съемок на частоте 20 Гц, представленными в работах [21, 22]. Пример обработанного георадиолокационного разреза с введенным рельефом, где видны отражения от поверхности раздела холодного и теплого льда, а также ложе и поверхность ледника, показан на рис. 3.

Величины снижения поверхности по двум временным интервалам (2008–2013 и 2013–2019 гг.) показаны на рис. 4. Видно, что снижение поверхности за первый из периодов значительно меньше, чем за последующий: средние величины различаются примерно на четверть. Значения убывают с увеличением высоты (рис. 5), из чего можно сделать вывод, что в недавнем прошлом изменения поверхности определялись в большей мере ее таянием, нежели движением и деформациями льда.

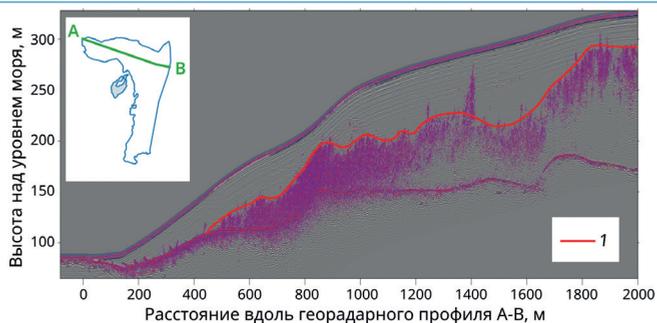


Рис. 3. Обработанный георадиолокационный разрез ледника Восточный Дальфонна по результатам съемки 2019 г.: 1 — поверхность раздела холодного и теплого льда

Fig. 3. Processed cross-section of the Austre Dahlfonna glacier based on GPR-survey of 2019: 1 — boundary between cold and temperate ice

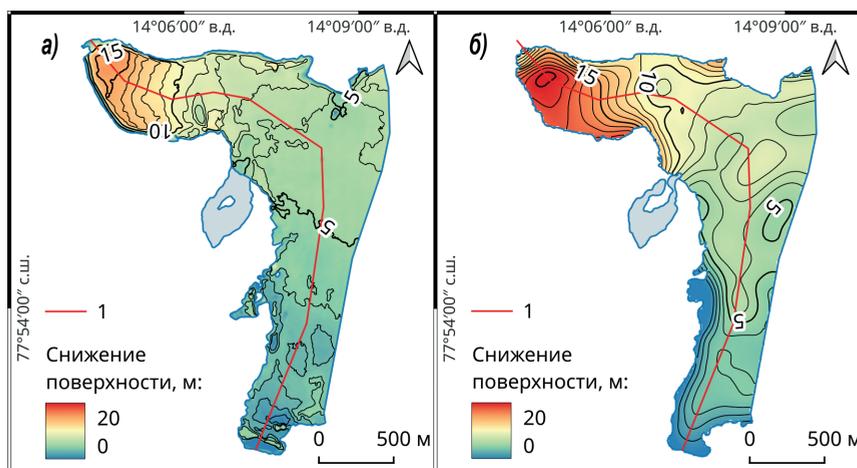


Рис. 4. Изменение высоты поверхности ледника Восточный Дальфонна по двум шестилетним интервалам: 2008–2013 гг. (а), 2013–2019 гг. (б). 1 — условная центральная линия вдоль ледника

Fig. 4. Surface lowering of the Austre Dahlfonna glacier within two six-year spans: 2008–2013 (a), 2013–2019 (b). 1 — the glacier centerline

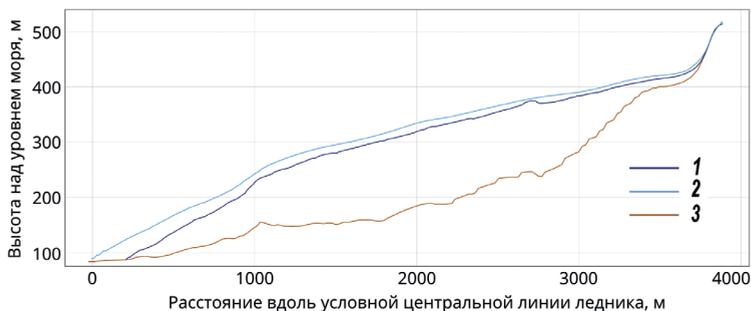


Рис. 5. Изменения продольного профиля ледника Восточный Дальфонна в 2008–2019 гг.: 1 — поверхность в 2019 г., 2 — поверхность в 2008 г., 3 — ложе ледника

Fig. 5. The changes in the longitudinal profile of the Austre Dahlfonna glacier, 2008–2019: 1 — surface in 2019, 2 — surface in 2008, 3 — bed topography

Просуммировав по площади ледника полученные значения, получим, что за период в 12 балансовых лет, с 2008 по 2019 г., Восточный Дальфонна потерял 30,2 млн м³ льда, или 16,1 % своего объема (табл. 3). Это эквивалентно средней по площади потере массы в $12,05 \pm 0,85$ м в. э. Грубая экстраполяция позволяет заключить, что ледник полностью исчезнет примерно через 60 лет, что, для сравнения, в два раза дольше, чем подобная же экстраполяция дает леднику Альдегонда, расположенному в нескольких километрах севернее [23].

Таблица 3

Изменение характеристик и баланс массы ледника Восточный Дальфонна в 2008–2019 гг.

Table 3

Changes in the parameters of the Austre Dahlfonna glacier and its mass balance in 2008–2019

Характеристики	2008–2013 гг.	2013–2019 гг.	2008–2019 гг.
Уменьшение площади, км ²	0,146	0,186	0,332
Уменьшение объема, млн м ³	13,3 млн м ³	16,9 млн м ³	30,2 млн м ³
Уменьшение объема (от объема на 2008 г.)	7,1 %	9,0 %	16,1 %
Потеря массы, млн т	$11,3 \pm 0,8$	$14,3 \pm 1,0$	$25,6 \pm 1,8$
Среднее по площади снижение поверхности, м	6,14	8,03	14,17
Баланс массы за период, м в. э.	$-5,22 \pm 0,37$	$-6,83 \pm 0,48$	$-12,05 \pm 0,85$

Использованный в расчетах фрагмент ArcticDEM, а также ЦМР, построенная по результатам топографической съемки авторов, относятся к концу сезона абляции. Вскоре после проведения топосъемки таяние льда на поверхности замедлилось практически до нуля, что было зафиксировано по абляционным рейкам, установленным на соседнем леднике Западный Грэнфьорд. ЦМР на 2008 г. была получена Норвежским полярным институтом на основе аэрофотосъемки, выполненной в середине июля, когда отступление снеговой линии вверх по леднику только начиналось, а значит, таяние льда было минимально, — поэтому ЦМР можно отнести к самому началу сезона абляции 2008 г. Таким образом, оба рассматриваемых интервала включают в себя ровно по шесть балансовых лет и могут быть сопоставлены друг с другом напрямую, без дополнительных коррекций.

В табл. 3 видно, что в 2008–2013 гг. средняя потеря массы ледником действительно была ниже, чем в 2013–2019 гг. Данных по соседним ледникам для сравнения имеется немного. В статье [24] приводятся результаты масс-балансового мониторинга ледников Альдегонда и Западный Грэнфьорд в 2016–2019 гг. Для аналогичного данной работе шестилетнего интервала 2013–2019 гг. на основе аэрофотосъемки был рассчитан баланс для ледника Веринг [25]. Однако период 2005–2012 гг. освещен в литературе плохо. Так, для ледника Веринг расчет для этого интервала оказался невозможен, поскольку ледник лежит на стыке двух разновременных фрагментов (2008 и 2010 гг.) ЦМР S0 Terengmodell, которая является единственным источником о рельефе поверхности в указанный промежуток времени. На леднике Западный Грэнфьорд мониторинговые работы были начаты только в 2013 г., то есть уже после предполагаемой смены режима циркуляции.

Единственный масс-балансовый ряд, опубликованный в настоящее время и доступный для сравнения, относится к леднику Восточный Грэнфьорд. В работе [10] показано, что геодезический баланс массы Восточного Грэнфьорда соста-

вил $-0,97$ м в. э. в год для периода 2008–2013 гг. и $-1,45$ м в. э. в год для 2013–2017 гг. Прямое сопоставление абсолютных значений с полученными в настоящем исследовании мало информативно, поскольку они зависят от высотного распределения конкретного ледника. Однако видно, что период до 2013 г. также характеризуется значительно менее отрицательным балансом массы.

Циркуляция в атлантическом секторе Арктики хорошо описывается с помощью индекса Северо-Атлантического колебания (NAO). Положительные и отрицательные фазы индекса, рассчитываемого на основе разности давлений между Исландским минимумом и Азорским максимумом, являются характеристикой атмосферной циркуляции в регионе. Предположительные механизмы связи индекса NAO с массовыми характеристиками ледников на севере Европы описаны в работе [26]: при положительной фазе NAO шторм-трек смещается глубоко на север, вследствие чего Шпицберген получает больше тепла за счет его переноса циклонами; при отрицательной фазе шторм-трек смещается южнее, за счет чего архипелаг более подвержен влиянию арктических воздушных масс с севера и востока.

Для анализа индекса NAO повторяемость его положительных и отрицательных фаз в течение месяцев с положительной средней температурой воздуха (июнь–сентябрь) была сгруппирована в равные по продолжительности периоды по шесть лет. Два из периодов (2008–2013 и 2014–2019 гг.) совпадают с интервалами расчета баланса масс ледника Восточный Дальфонна, а предшествующий им период 2002–2007 гг. примерно соответствует наблюдавшемуся в начале столетия усилению интенсивности таяния. На рис. 6, где изображено процентное соотношение фаз NAO по указанным периодам, видно, что более благоприятный для ледников интервал 2008–2013 гг. действительно характеризуется повышенной частотой отрицательной фазы NAO. Это согласуется с заключением о более частых вторжениях арктических воздушных масс в этот промежуток времени летом, сформулированным на основе реанализа в работе [7].

Таким образом, баланс массы ледников Восточный Дальфонна и Восточный Грэнфьорд согласуются между собой и укладываются в общую по архипелагу Шпицберген изменчивость, связанную, вероятно, со сменами режимов атмосферной циркуляции. Результаты измерений, показанные в работах [8, 24], демонстрируют, что в конкретные годы интенсивность таяния ледников района Грэнфьорда различается: максимумы и минимумы потери массы могут приходиться для разных ледников на разные годы.

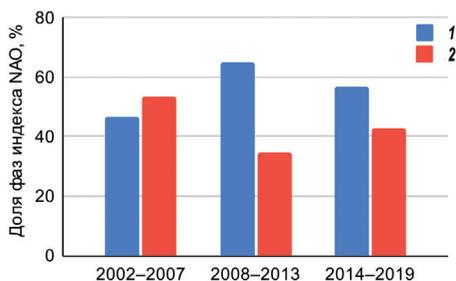


Рис. 6. Соотношение повторяемостей фаз индекса NAO за июнь–сентябрь в 2002–2019 гг.: 1 — отрицательная фаза, 2 — положительная фаза

Fig. 6. Recurrence of the NAO index phases (June–September) in 2002–2019: 1 — negative phase, 2 — positive phase

Этот факт объясняется авторами локальными особенностями местного масштаба, к примеру, различиями в экспозиции и в конфигурации скального обрамления, затевающего ледник. Исходя из нашего анализа, можно предположить, что в более продолжительные периоды времени, порядка 5–10 лет, изменчивость масс-балансовых характеристик в районе Баренцбурга определяется сменами режимов региональной атмосферной циркуляции. Это делает их надежным индикатором климатических изменений масштаба всего архипелага Шпицберген. Подобная гипотеза может быть подтверждена будущей публикацией рядов результатов мониторинга с ледника Альдегонда, которые охватывают последние 20 лет, то есть все три периода, выделяющихся в изменчивости баланса массы ледников Шпицбергена с начала XXI в.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были представлены результаты топографической и геофизической съемок на леднике Восточный Дальфонна, расположенном на архипелаге Шпицберген к югу от поселка Баренцбург. Средняя толщина льда по состоянию на 2019 г. составляет 82 м, максимальная — 170 м. За последнее столетие, с конца МЛП, Восточный Дальфонна потерял около половины своей площади, уменьшившись в размерах до 2 км². На основе сравнения с архивными данными дистанционного зондирования показано, что за 12 балансовых лет (2008–2019) ледник потерял 16 % своего объема, что эквивалентно потере массы в $12,05 \pm 0,85$ м в. э. При этом, в первую половину этого периода, в 2008–2013 гг., потеря массы замедлялась по отношению к последующему интервалу 2013–2019 гг., что согласуется как с наблюдениями на соседнем леднике Восточный Грэнфьорд, так и с общей масс-балансовой изменчивостью на архипелаге. Это приводит авторов к выводу, что на временных интервалах порядка 5–10 лет изменчивость баланса массы ледников в районе Баренцбурга определяется факторами регионального масштаба, а именно сменами режимов атмосферной циркуляции на Шпицбергене, характеризующихся преобладанием положительной либо отрицательной фазы индекса NAO летом. Таким образом, ледники в рассматриваемом районе могут являться надежным индикатором региональных климатических изменений на архипелаге в целом.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы 5.1.4 Плана НИТР Росгидромета «Мониторинг состояния и загрязнения природной среды, включая криосферу, в Арктическом бассейне и районах научно-исследовательского стационара “Ледовая база Мыс Баранова”, Гидрометеорологической обсерватории Тикси и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген».

Благодарности. Авторы выражают благодарность участникам Российской арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген ФГБУ «ААНИИ» за предоставленное оборудование, за помощь в организации и проведении полевых работ.

Competing interests. The authors have no conflicts of interest to disclose.

Funding. This study was funded under Project 5.1.4, “Monitoring of State and Pollution of the Environment, Including the Cryosphere, in the Arctic Basin and in the Area of Scientific Station Ice Base Cape Baranov, Hydrometeorological Observatory of Tiksi and Russian Scientific Centre on Spitsbergen”, within the Plan NITR of Roshydromet 2020–24.

Acknowledgements. The authors are grateful to the Russian Arctic Expedition on Svalbard (Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia) for providing logistics, equipment and for assistance in carrying out the field studies.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bamber J.L., Krabill W., Raper V., Dowdeswell J.A., Oerlemans J.* Elevation changes measured on Svalbard glaciers and ice caps from airborne laser data // *Annals of Glaciology*. 2005. V. 42. P. 202–208.
2. *Kohler J., James T.D., Murray T., Nuth C., Brandt O., Barrand N.E., Aas H.F., Luckman A.* Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers // *Geophysical Research Letters* 2007. V. 34. L18502. doi:10.1029/2007GL030681.
3. *Мавлюдов Б.Р., Соловьянова И.Ю.* Водно-ледовый баланс ледника Альдегонда в 2002/03 г. // *Материалы гляциологических исследований*. 2007. № 102. С. 206–208.
4. *Solovyanova I.Y., Mavlyudov B.R.* Mass balance observations on some glaciers in 2004/2005 and 2005/2006 balance years, Nordenskjöld Land, Spitsbergen // *The Dynamics and Mass Budget of Arctic Glaciers*. 2007. P. 115–120. URL: https://webpace.science.uu.nl/~broek112/home.php_files/Publications_MvdB/2007_Workshop_Pontresina.pdf (дата обращения: 30.11.2022).
5. *Noël B., Jakobs C.L., van Pelt W.J.J., Lhermitte S., Wouters B., Kohler J., Hagen J.O., Luks B., Reijmer C.H., van de Berg W.J., van den Broeke M.R.* Low elevation of Svalbard glaciers drives high mass loss variability // *Nature Communications*. 2020. V. 11. 4597. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18356-1> (дата обращения: 30.11.2022).
6. *Wouters B., Gardner A., Moholdt G.* Global glacier mass loss during the GRACE satellite mission (2002–2016) // *Frontiers in Earth Science*. 2019. V. 7. P. 1–11.
7. *Lang C., Fettweis X., Erpicum M.* Stable climate and surface mass balance in Svalbard over 1979–2013 despite the Arctic warming // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 83–101. <https://doi.org/10.5194/tc-9-83-2015>.
8. *Navarro F.J., Glazovsky A.F., Macheret Y.Y., Vasilenko E.V., Corcuera M.I., Cuadrado M.L.* Ice-volume changes (1936–1990) and structure of Aldegondabreen, Spitsbergen // *Annals of Glaciology*. 2005. V. 42. P. 158–162.
9. *Martín-Español A., Vasilenko E., Navarro F., Otero J., Lapazaran J., Lavrentiev I., Macheret Y., Machio F., Glazovsky A.* Ice volume estimates from ground-penetrating radar surveys, western Nordenskiöld Land glaciers, Svalbard // *Annals of Glaciology*. 2013. V. 54. P. 211–217.
10. *Elagina N., Kutuzov S., Rets E., Smirnov A., Chernov R., Lavrentiev I., Mavlyudov B.* Mass Balance of Austre Grønfjordbreen, Svalbard, 2006–2020, Estimated by Glaciological, Geodetic and Modeling Approaches // *Geosciences*. 2021. V. 11. № 2. URL: <https://doi.org/10.3390/geosciences11020078> (дата обращения: 30.11.2022).
11. *Мачерет Ю.Я.* Радиозондирование ледников. М.: Научный Мир, 2006. 389 с.
12. *Bradford J., Nichols J., Mikesell T., Harper J.* Continuous profiles of electromagnetic wave velocity and water content in glaciers: An example from Bench Glacier, Alaska, USA // *Annals of Glaciology*. 2009. 50 (51). P. 1–9. URL: doi:10.3189/172756409789097540 (дата обращения: 30.11.2022).
13. Norwegian Polar Institute. Kartdata Svalbard 1:100 000 (S100 Kartdata) / Map Data [Data set]. Norwegian Polar Institute. 2014. URL: <https://doi.org/10.21334/npolar.2014.645336c7> (дата обращения: 30.11.2022).
14. *Lovell H., Fleming E., Benn D., Hubbard B., Lukas S., Naegeli K.* Former dynamic behaviour of a cold-based valley glacier on Svalbard revealed by basal ice and structural glaciology investigations // *Journal of Glaciology*. 2005. V. 61 (226). P. 309–328. doi:10.3189/2015JoG14J120.
15. Norwegian Polar Institute. Terrengmodell Svalbard (S0 Terrengmodell) / Map Data [Data set]. Norwegian Polar Institute. 2014. URL: <https://doi.org/10.21334/npolar.2014.dce53a47> (дата обращения: 30.11.2022).
16. *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. “ArcticDEM” Dataset. 2018. URL: <https://doi.org/10.7910/DVN/ОННУКН> (дата обращения: 30.11.2022).

17. *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>.

18. *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 Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. V. 116. P. 101–117. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012.

19. *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. URL: <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011> (дата обращения: 30.11.2022).

20. North Atlantic Oscillation. National Centers for Environmental Prediction — Climate Prediction Center (NOAA). URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml> (дата обращения: 25.07.2022).

21. *Мачерет Ю.Я., Глазовский А.Ф., Лаврентьев И.И., Марчук И.О.* Распределение холодного и теплого льда в ледниках на Земле Норденшельда (Шпицберген) по данным наземного радиозондирования // *Лед и снег*. 2019. Т. 59. № 2. С. 149–166. URL: <https://doi.org/10.15356/20766734-2019-2-430> (дата обращения 25.07.2022).

22. *Лаврентьев И.И., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Мацковский В.В., Муравьев А.А.* Запасы льда в ледниках на Земле Норденшельда (Шпицберген) и их изменения за последние десятилетия // *Лед и снег*. 2019. Т. 59. № 1. С. 23–38. URL: <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-23-38> (дата обращения 25.07.2022).

23. *Holmlund E.* Aldegondabreen glacier change since 1910 from structure-from-motion photogrammetry of archived terrestrial and aerial photographs: Utility of a historic archive to obtain century-scale Svalbard glacier mass losses // *Journal of Glaciology*. 2021. V. 67 (261). P. 107–116. doi:10.1017/jog.2020.89.

24. *Сидорова О.Р., Тарасов Г.В., Веркулич С.Р., Чернов Р.А.* Изменчивость поверхностной абляции горных ледников Западного Шпицбергена // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. № 65 (4). С. 438–448.

25. *Терехов А.В., Демидов В.Э., Казаков Э.Э., Анисимов М.А., Веркулич С.Р.* Определение баланса массы ледника Веринг (Западный Шпицберген) геодезическим методом, 2013–2019 годы // *Криосфера Земли*. 2020. Т. XXIV. № 5. С. 55–63. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-5(55-63).

26. *Bonan D., Christian J., Christianson K.* Influence of North Atlantic climate variability on glacier mass balance in Norway, Sweden and Svalbard // *Journal of Glaciology*. 2019. V. 65 (252). С. 580–594. doi:10.1017/jog.2019.35 (дата обращения: 25.07.2022).

REFERENCES

1. *Bamber J.L., Krabill W., Raper V., Dowdeswell J.A., Oerlemans J.* Elevation changes measured on Svalbard glaciers and ice caps from airborne laser data. *Annals of Glaciology*. 2005, 42: 202–208.

2. *Kohler J., James T.D., Murray T., Nuth C., Brandt O., Barrand N.E., Aas H.F., Luckman A.* Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers. *Geophysical Research Letters*. 2007, 34: L18502. doi:10.1029/2007GL030681.

3. *Mavlyudov B.R., Solov'yanova I.Iu.* Water-ice balance of Aldegonda glacier in 2002/03. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2007, 102: 206–208. [In Russian].

4. *Solovyanova I.Y., Mavlyudov B.R.* Mass balance observations on some glaciers in 2004/2005 and 2005/2006 balance years, Nordenskjold Land, Spitsbergen. *The Dynamics and Mass Budget of Arctic Glaciers*. 2007: 115–120. Available at: https://webpace.science.uu.nl/~broek112/home.php_files/Publications_MvdB/2007_Workshop_Pontresina.pdf (accessed 30.11.2022).

5. Noël B., Jakobs C.L., van Pelt W.J.J., Lhermitte S., Wouters B., Kohler J., Hagen J.O., Luks B., Reijmer C.H., van de Berg W.J., van den Broeke M.R. Low elevation of Svalbard glaciers drives high mass loss variability. *Nature Communications*. 2020, 11 (4597): 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18356-1> (accessed 30.11.2022).
6. Wouters B., Gardner A., Moholdt G. Global glacier mass loss during the GRACE satellite mission (2002–2016). *Frontiers in Earth Science*. 2019, 7 (11): 1–11.
7. Lang C., Fettweis X., Erpicum M. Stable climate and surface mass balance in Svalbard over 1979–2013 despite the Arctic warming. *The Cryosphere*. 2015, 9: 83–101. Available at: <https://doi.org/10.5194/tc-9-83-2015> (accessed 30.11.2022).
8. Navarro F.J., Glazovsky A.F., Macheret Y.Y., Vasilenko E.V., Corcuera M.I., Cuadrado M.L. Ice-volume changes (1936–1990) and structure of Aldegondabreen, Spitsbergen. *Annals of Glaciology*. 2005, 42: 158–162.
9. Martín-Español A., Vasilenko E., Navarro F., Otero J., Lapazaran J., Lavrentiev I., Macheret Y., Machío F., Glazovsky A. Ice volume estimates from ground-penetrating radar surveys, western Nordenskiöld Land glaciers, Svalbard. *Annals of Glaciology*. 2013, 54: 211–217.
10. Elagina N., Kutuzov S., Rets E., Smirnov A., Chernov R., Lavrentiev I., Mavlyudov B. Mass Balance of Austre Grønfjordbreen, Svalbard, 2006–2020, Estimated by Glaciological, Geodetic and Modeling Approaches. *Geosciences*. 2021, 11 (2): 78. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences11020078>. (accessed 30.11.2022).
11. Macheret Iu.Ia. *Radiozondirovanie lednikov*. Radiosounding of glaciers. Moscow: Nauchnyi Mir, 2006: 389 p. [In Russian].
12. Bradford J., Nichols J., Mikesell T., Harper J. Continuous profiles of electromagnetic wave velocity and water content in glaciers: An example from Bench Glacier, Alaska, USA. *Annals of Glaciology*. 2009, 50 (51): 1–9. Available at: [doi:10.3189/172756409789097540](https://doi.org/10.3189/172756409789097540) (accessed 30.11.2022).
13. Norwegian Polar Institute. Kartdata Svalbard 1:100 000 (S100 Kartdata) / Map Data [Data set]. Norwegian Polar Institute. 2014. Available at: <https://doi.org/10.21334/npolar.2014.645336c7> (accessed 30.11.2022).
14. Lovell H., Fleming E., Benn D., Hubbard B., Lukas S., Naegeli K. Former dynamic behaviour of a cold-based valley glacier on Svalbard revealed by basal ice and structural glaciology investigations. *Journal of Glaciology*. 2005, 61 (226): 309–328. [doi:10.3189/2015Jog14J120](https://doi.org/10.3189/2015Jog14J120).
15. Norwegian Polar Institute. Terrengmodell Svalbard (S0 Terrengmodell) / Map Data [Data set]. Norwegian Polar Institute. 2014. Available at: <https://doi.org/10.21334/npolar.2014.dce53a47> (accessed 30.11.2022).
16. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M. Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. “ArcticDEM” Dataset. 2018. Available at: <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH> (accessed 30.11.2022).
17. 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> (accessed 30.11.2022).
18. 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 Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016, 116: 101–117. [doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012).
19. 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. Available at: <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011> (accessed 30.11.2022).

20. North Atlantic Oscillation. National Centers for Environmental Prediction — Climate Prediction Center (NOAA). Available at: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml> (accessed 25.07.2022).

21. Macheret Y.Y., Glazovsky A.F., Lavrentiev I.I., Marchuk I.O. Distribution of cold and temperate ice in glaciers on the Nordenskiöld Land, Spitsbergen, from ground-based radio-echo sounding. *Led i sneg. Ice and Snow*. 2019, 59 (2): 149–166. [In Russian]. Available at: <https://doi.org/10.15356/20766734-2019-2-430> (accessed 30.11.2022).

22. Lavrentiev I.I., Glazovsky A.F., Macheret Y.Y., Matskovsky V.V., Muravyev A.Y. Reserve of ice in glaciers on the Nordenskiöld Land, Spitsbergen, and their changes over the last decades. *Led i sneg. Ice and Snow*. 2019, 59 (1): 23–38. [In Russian]. Available at: <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-23-38> (accessed 30.11.2022).

23. Holmlund E. Aldegondabreen glacier change since 1910 from structure-from-motion photogrammetry of archived terrestrial and aerial photographs: Utility of a historic archive to obtain century-scale Svalbard glacier mass losses. *Journal of Glaciology*. 2021, 67 (261): 107–116. doi:10.1017/jog.2020.89.

24. Sidorova O.R., Tarasov G.V., Verkulich S.R., Chernov R.A. Surface ablation variability of mountain glaciers of West Spitsbergen. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (4): 438–448. [In Russian].

25. Terekhov A.V., Demidov V.E., Kazakov E.E., Anisimov M.A., Verkulich S.R. Geodetic mass balance of Voring glacier, Western Spitsbergen, in 2013–2019. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2020, XXIV: 55–63. doi:10.21782/KZ1560-7496-2020-5(55-63).

26. Bonan D., Christian J., Christianson K. Influence of North Atlantic climate variability on glacier mass balance in Norway, Sweden and Svalbard. *Journal of Glaciology*. 2019, 65 (252): 580–594. doi:10.1017/jog.2019.35.