

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.324.4, 551.324.63

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-5(55-63)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ БАЛАНСА МАССЫ
ЛЕДНИКА ВЁРИНГ (ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН) ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ,
2013–2019 ГОДЫ****А.В. Терехов¹, В.Э. Демидов¹, Э.Э. Казаков², М.А. Анисимов¹, С.Р. Веркулич¹**¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт,
199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия; antonvtterekhov@gmail.com²Государственный гидрологический институт,
199004, Санкт-Петербург, 2-я линия ВО, 23, Россия

Приведен расчет баланса массы ледника Вёринг (Земля Норденшельда, Западный Шпицберген) в 2013–2019 гг. Ледник расположен на западном берегу залива Грён-фьорд напротив поселка Баренцбург и питает тальми водами озеро, из которого осуществляется водозабор для нужд населенного пункта. Величина баланса оценена на основе цифровой модели рельефа ArcticDEM, наземной топографической съемки и аэрофотосъемки с применением беспилотного летательного аппарата. Для уточнения взаимной вертикальной привязки фрагмент ArcticDEM и модель рельефа, полученная по результатам аэрофотосъемки, были привязаны к наземным опорным точкам, измеренным в 2019 г. За шесть лет масса ледника уменьшилась на (5.9 ± 0.4) млн т. Средний годовой баланс за период был отрицательным и составил (-1.30 ± 0.17) м водного эквивалента в год, что по модулю больше всех измеренных ранее годовых величин баланса. Получено пространственное распределение удельных величин баланса по поверхности ледника и их высотная зависимость (вертикальный градиент снижения поверхности составил 0.85 м на 100 м). Приведены точные значения площадей высотных зон, используемых для гляциологических вычислений. Общая площадь ледника в 2019 г. составила 0.75 км², интервал высот – от 180 до 400 м, средняя высота поверхности 280 м. На основе анализа данных дистанционного зондирования и топографических карт установлено, что эта площадь примерно в 4.5 раза меньше площади в 1911 г. Полученные результаты могут стать основой для дальнейших мониторинговых балансовых наблюдений геодезическим методом и для реанализа гляциологических измерений по абляционным рейкам.

Баланс массы ледника, беспилотный летательный аппарат, гляциология, дистанционное зондирование, Шпицберген, ArcticDEM

**GEODETTIC MASS BALANCE OF VÖRING GLACIER,
WESTERN SPITSBERGEN, IN 2013–2019****A.V. Terekhov¹, V.E. Demidov¹, E.E. Kazakov², M.A. Anisimov¹, S.R. Verkulich¹**¹ Arctic and Antarctic Research Institute,
38, Bering str., St. Petersburg, 199397, Russia; antonvtterekhov@gmail.com² State Hydrological Institute,
23, 2nd line V.O., St. Petersburg, 199004, Russia

Geodetic mass balance of Vöring glacier, located on Nordenskiöld Land of Western Spitsbergen island (Svalbard archipelago) in 2013–2019, is reported. This glacier is located 4 km away from Barentsburg, and feeds the lake Stemme, where a water-supply of the town starts. Mass balance is computed based on ground-based topographic survey, UAV imagery and ArcticDEM. To eliminate vertical error of ArcticDEM, its strip was co-registered to GCPs on stable ground measured with GNSS methods in 2019. To adjust vertical georeference of used DEMs, ground control points, measured in 2019, were used. Our results reveal that the mean geodetic mass balance value in 2013–2019 was (-1.30 ± 0.17) m w.e. per year, which equals mass loss of (5.9 ± 0.4) Mt total, which is more negative value than earlier reported. Spatial pattern of SMB distribution over the Vöring surface and its relation with elevation above sea level are presented, surface lowering vertical gradient was 0.85 m w.e. for 100 m. Furthermore, based on ortho image and DEM, we provide accurate areas of elevation zones, used in calculations of glaciological mass balance from ablation stakes. In 2019 Vöring glacier, lying in elevation interval of 180–400 m (with a mean altitude of 280 m) is found to have an area of 0.75 km². Since 1911, the glacier area reduced by 4.5 times, as we found from old topographic map, aerial photographs and Landsat images. Results of this study could be used in further studies of mass balance computations and for reanalysis of glaciological data series.

Glacier mass balance, unmanned aerial vehicle, glaciology, remote sensing, Svalbard, ArcticDEM

ВВЕДЕНИЕ

С начала прошлого столетия площадь оледенения архипелага Шпицберген сокращается, причем в XXI в. это сокращение ускорилось [Kohler et al., 2007], что совпадает с общемировой тенденцией [Zemp et al., 2015]. Несмотря на очень незначительный вклад текущей деградации оледенения Шпицбергена в повышение глобального уровня моря (первые миллиметры за сто лет [Nuth et al., 2010]), мониторинг баланса массы ледников, занимающих около 60 % поверхности архипелага [Амлас..., 1997] и по-разному реагирующих на изменения климата, остается актуальной задачей. Наиболее информативными в этом отношении являются ледники, для которых имеются долговременные ряды наблюдений, в частности ледник Вёринг.

Небольшой карово-долинный ледник Вёринг расположен на западном берегу залива Грён-фьорд напротив пос. Баренцбург, вытянут с запада на восток примерно на 1.5 км, имеет ширину менее 700 м и спускается до высоты около 180 м над уровнем моря (рис. 1). Гляциологические исследования на леднике проводились Институтом географии РАН с середины 1960-х до конца 1980-х гг. [Гуськов, 1983; Троицкий, 1988], затем были возобновлены в 2005 г., но имели эпизодический характер [Solovyanova, Mavlyudov, 2007]. Талые воды ледника питают оз. Стемме, из которого берет начало водопровод Баренцбурга. По результатам исследований 2017–2018 гг., доля ледникового стока в общем стоке реки Васстак, вытекающей из оз. Стемме, достигала 30 %, а основная площадь оледенения в озерном бассейне приходится именно на ледник Вёринг [Ромашова и др., 2019]. Поэтому мониторинг баланса массы этого ледника представляет также практический интерес.

Цели исследования: заложить основу в виде подробной цифровой модели рельефа (ЦМР) для будущих масс-балансовых наблюдений за ледником Вёринг; рассчитать на основе полученной ЦМР баланс массы ледника за некоторый промежуток времени в прошлом; выявить динамику площади ледника за последние сто лет.

Далее для краткости под “балансом ледника”, “балансом массы” и просто “балансом” будем понимать средний за рассматриваемый период времени и средний по леднику удельный баланс массы ледника, выраженный в метрах водного эквивалента (в.э.) в год.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Топографическая съемка. Наземная топографическая съемка поверхности ледника была проведена 19 августа 2019 г., в конце сезона абляции, после перехода температуры через нуль и первых снегопадов. На день съемки поверхность ледника была на несколько сантиметров покрыта свежеснеженным снегом, которым мы пренебрежем в расчетах из-за малости вносимой в результат ошибки. Съемка проводилась методом кинематики с постобработкой при помощи спутниковых приемников Sokkia GRX1 и GRX2 относительно базовых станций, одна из которых расположена у оз. Стемме, менее чем в 1 км от ледника, а вторая – на удалении около 4 км, на возвышенности у пос. Баренцбург. Маршруты съемки, приуроченные к перегибам склонов и другим характерным формам рельефа, представлены на рис. 2. Кроме топографических работ на поверхности ледника, был заложен высотный профиль вдоль дороги от берега зал. Грён-фьорд к водозаборной станции на оз. Стемме и далее к леднику (см. рис. 1). Этот

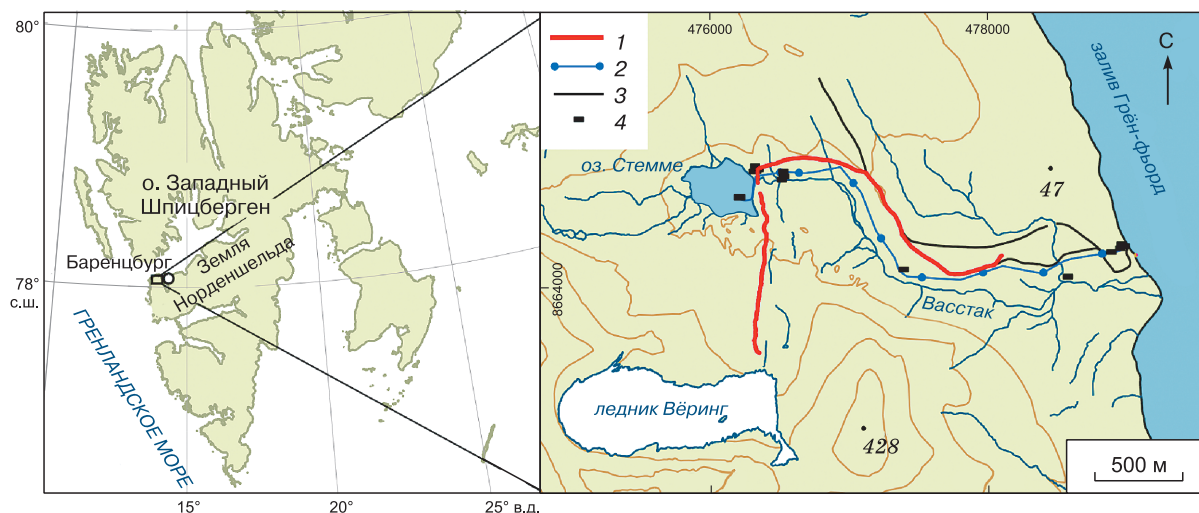


Рис. 1. Местоположение ледника Вёринг:

1 – профиль для привязки ArcticDEM; 2 – водопровод; 3 – дороги; 4 – строения.

профиль необходим для высотной привязки ArcticDEM. Вертикальная точность полученных спутниковыми наблюдениями координат составляет 0.05 м.

Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемка была произведена 20 августа 2019 г. при помощи квадрокоптера DJI Phantom 3 Advanced с некалиброванной фотокамерой. Снимки выполнялись с продольным и поперечным перекрытием 60–70 % с высоты не более 120 м над поверхностью ледника в соответствии с требованиями местного законодательства. Построение ЦМР и ортофотоплана выполнено в программном обеспечении (ПО) Agisoft Photoscan. Для абсолютной привязки использовали шесть наземных опорных точек на поверхности ледника (см. рис. 2), координаты которых были определены с точностью до 0.02 м в плане и 0.03 м по высоте. Для оценки точности полученной модели рельефа мы сравнили ее высоты с высотами соответствующих точек топографической съемки: среднеквадратичное отклонение (СКО) равно 0.30 м.

Определение границ ледника. Для установления границ ледника Вёринг в прошлом были использованы изображения спутников Landsat, наклонный аэрофотоснимок 1936 г., выполненный с высоты около 3000 м в направлении на запад, и норвежская топографическая карта масштаба 1:100 000, датированная 1911 г. [Anmeldelse..., 1912], что позволило проследить динамику оледенения чуть более чем за сто лет. Спутниковые снимки Landsat, использованные для определения контура ледника Вёринг в прошлом: 2008 г. – LE07_L1GT_213004_20080731_20161228_01_T2; 2002 г. – LE07_L1GT_217004_20020711_20170129_01_T2; 1985 г. – LT05_L1GS_216004_19850830_20170218_01_T2; 1976 г. – LM02_L1GS_230004_19760718_20180423_01_T2. Изображения требовали взаимной привязки и для снимков 1976 и 1985 гг. – ортотрансформации. Эти процедуры были выполнены при помощи ПО ScanEX Image-Processor.

Видимый контур ледника по состоянию на 2019 г. был сделан на основе ортофотоплана, полученного по результатам аэрофотосъемки. Определение реальных границ простираения льда затруднено: на северо-востоке край ледникового языка бронируется мореной и выходит на дневную поверхность лишь частично, а южный борт ледника покрыт коллювиальными отложениями.

Цифровая модель рельефа ArcticDEM. Пространственное разрешение ArcticDEM [Porter et al., 2018] составляет 2 м, внутренняя (относительная) точность ArcticDEM составляет 0.20 м (по оценке [Noh, Howat, 2015]). Однако абсолютная высотная привязка фрагментов может иметь ошибку в первые метры, поэтому во избежание грубых ошибок

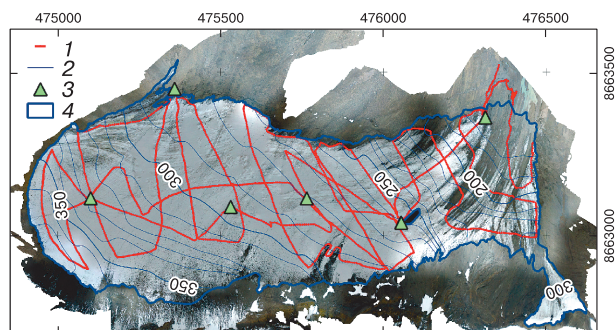


Рис. 2. Рельеф поверхности ледника в августе 2019 г.

1 – маршруты топографической съемки; 2 – изолинии высоты над уровнем моря; 3 – наземные опорные точки аэрофотосъемки; 4 – контур ледника. Рисунки выполнены в системе координат UTM (Universal Transverse Mercator), зона 33N.

подсчета объема стаявшего слоя необходимо выполнить высотную коррекцию модели.

В файле метаданных для используемого фрагмента ArcticDEM содержится вектор линейного переноса, рассчитанный на основе альтиметрических наблюдений ICESat и позволяющий уточнить привязку, выполненную изначально по эфемеридам спутников. Воспользуемся значениями компонент dx и dy и сдвинем ЦМР в плане, поскольку в отсутствие исходных высокдетальных снимков, по которым была построена ЦМР, распознать опорные точки с приемлемой точностью и рассчитать на их основе горизонтальный сдвиг самостоятельно невозможно.

Далее были вычислены разности высот ЦМР ArcticDEM и точек профиля, заложенного вдоль дороги, ведущей к оз. Стемме (см. рис. 1). Медиана разностей составила -1.226 м (т. е. высоты ArcticDEM завышены), а соответствующее значение компоненты $dz = -0.857$ в файле метаданных недооценено почти на полметра. Это может быть объяснено тем, что измерения ICESat, использованные для расчета dz , не одновременны со съемкой, по которой построена ЦМР, а предшествуют ей на месяц и не учитывают величину стаявшего за этот месяц слоя льда. Поэтому для вертикального сдвига ArcticDEM воспользуемся полученным авторами значением. Нормированное значение медианного абсолютного отклонения остатков (NMAD), используемое для оценки качества высотной привязки ЦМР [Nuth, Kääb, 2011], составляет 0.64 м.

Расчет баланса массы. Баланс массы ледника Вёринг определяли геодезическим методом – сравнением высот поверхности ледника в 2013 и 2019 гг. Несмотря на то что значения высот, полученные наземными геодезическими измерениями,

на порядок точнее, чем при использовании данных аэрофотосъемки, их применение для балансовых расчетов требует интерполяции с целью охвата всей поверхности ледника, неизбежно вносящей свою долю в погрешность, которую в данном случае сложно оценить. Поэтому для всей поверхности ледника использовали ЦМР, полученную аэрофотосъемкой, приняв за ее точность величину СКО относительно точек наземных измерений, а именно 0.34 м.

Среднегодовое уменьшение объема ледника за определенный период рассчитывается по формуле [Zemp *et al.*, 2013]

$$V = \frac{\Delta V}{\Delta t \cdot \bar{S}}, \quad (1)$$

где ΔV – изменение объема ледника за временной период Δt (6 лет); $\bar{S}$ – средняя площадь ледника между началом и концом периода.

Таким образом, функция (1) зависит от двух переменных, а ее среднеквадратичное отклонение (σ_V) может быть найдено по формуле

$$\begin{aligned} \sigma_V^2 &= \left(\frac{\partial V}{\partial \Delta V} \right)^2 \sigma_{\Delta V}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \bar{S}} \right)^2 \sigma_{\bar{S}}^2 = \\ &= V^2 \left[\left(\frac{\sigma_{\Delta V}^2}{\Delta V^2} \right) + \left(\frac{\sigma_{\bar{S}}^2}{\bar{S}^2} \right) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где $\sigma_{\Delta V}$, $\sigma_{\bar{S}}$ – погрешности определения изменения объема ледника и средней площади ледника между началом и концом периода соответственно.

Изменение объема ледника находится вычитанием двух значений ЦМР [Zemp *et al.*, 2013]:

$$\Delta V = r^2 \sum_1^k (h_{k2019} - h_{k2013}),$$

где r^2 – площадь пикселя ЦМР; h_{k2019} , h_{k2013} – высоты k -пикселя в 2019 и 2013 гг. соответственно. Тогда погрешность величины ΔV может быть рассчитана по формуле

$$\sigma_{\Delta V}^2 = r^4 k (\sigma_{2019}^2 + \sigma_{2013}^2), \quad (3)$$

где k – количество пикселей ЦМР, участвовавших в расчете объема; σ_{2019}^2 , σ_{2013}^2 – показатели качества ЦМР соответственно в 2019 и 2013 гг.

Погрешность определения средней площади ледника $(S_{2019} - S_{2013})/2$ на начало и конец периода равна

$$\sigma_{\bar{S}}^2 = \frac{\sigma_{S2019}^2}{4} + \frac{\sigma_{S2013}^2}{4}. \quad (4)$$

Подставив значения, найденные по формулам (3) и (4), в уравнение (2), определим погрешность величины среднегодового уменьшения объема ледника Вёринг за рассматриваемый период. Далее, для перехода от объемных единиц к единицам

массы, умножим уравнение (1) на коэффициент ρ , равный отношению средней плотности слагающего ледник материала к плотности воды. Воспользуемся коэффициентом 0.850 ± 0.060 из работы [Huss, 2013]. Полученное значение и будет среднегодовым балансом массы ледника Вёринг за рассматриваемый период:

$$B_{\text{geod}} = \rho V.$$

Итоговая погрешность рассчитывается по формуле

$$\sigma_{B_{\text{geod}}} = B_{\text{geod}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\rho}}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_V}{V} \right)^2}.$$

Подставив необходимые значения, определим погрешность величины среднегодового баланса массы ледника как ± 0.17 м в.э. в год.

Метеорологические данные. Данные о температуре воздуха в районе ледника Вёринг представлены рядами метеорологической станции в пос. Баренцбург и были получены через веб-сервис Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ – МЦД) [meteo.ru/data]. На основе среднесуточных температур нами были рассчитаны годовые суммы положительных температур.

Данные о балансе массы ледников мира.

Для расчета глобальной тенденции изменения баланса массы ледников были взяты данные World Glacier Monitoring Service (WGMS) по опорным ледникам, в число которых входят ледники с более чем 30-летними сериями наблюдений [wgms.ch/global-glacier-state/]. Данные представляют собой ежегодные средние величины баланса массы горных ледников из 19 регионов. Методика расчета подробно изложена в [WGMS, 2020], где авторами заимствованы данные о результатах наблюдений на леднике Восточный Брёггер. Исключение составляют два последних балансовых года (2017/18 и 2018/19), для которых данные получены на веб-странице WGMS [wgms.ch/latest-glacier-mass-balance-data/].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Отступление края ледника и динамика площади ледника Вёринг приведены на рис. 3. С 1911 г., когда ледник Вёринг переливался через северную стенку кара, соединяясь с более мелкими, ныне несуществующими ледниками, располагавшимися в ориентированных на восток углублениях склонов, площадь оледенения сократилась примерно в 4 раза и в августе 2019 г. составила 0.75 км² (определено на основе ортофотоплана). Это значение превышает величину площади оледенения в бассейне оз. Стемме, использованную для расчетов стока в работе [Ромашова и др., 2019], следовательно

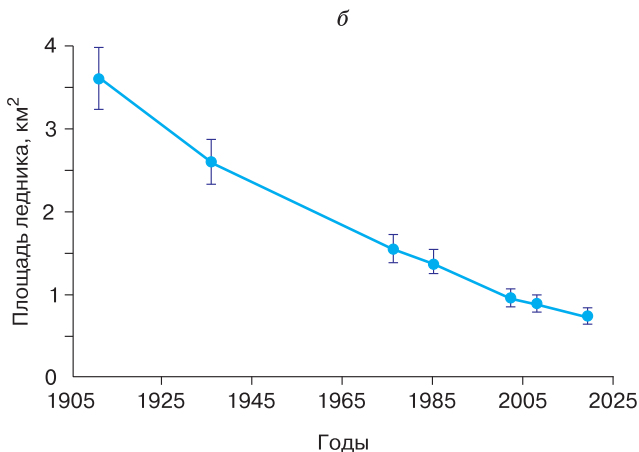
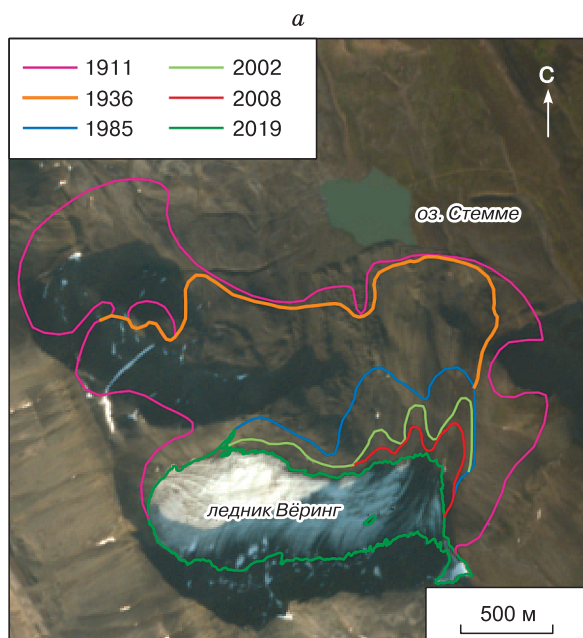


Рис. 3. Границы ледника Вёринг в прошлом (а) и динамика сокращения его площади (б).

Снимок Европейского космического агентства.

но, доля ледникового питания в водном балансе озера может быть выше.

Рельеф ледника Вёринг по состоянию на 2019 г. приведен на рис. 2. Горизонталы проведены по наземной топоъемке, за исключением областей у южного борта ледника, где характеристики рельефа взяты с ЦМР, полученной аэрофотосъемкой, и наложены на ортофотоплан.

Зависимость расчетных значений изменения поверхности ледника в 2013–2019 гг. от высоты над уровнем моря приведена на рис. 4. Здесь отражены только фактически полученные значения, а не интерполированные, и убраны точки измерений на продольных моренах, выходящих на поверхность в низовьях ледника. Высотный гра-

диент снижения поверхности составил 0.85 м на 100 м.

Значения снижения поверхности ниже 180 м, резко контрастирующие своим “обратным” градиентом с остальным ледником (см. рис. 4), принадлежат области, откуда язык Вёринга отступил с 2013 г.: баланс здесь менее отрицателен, так как мощность льда была меньше той, что могла растаять в рассматриваемый период.

Наибольший разброс значений снижения поверхности, наблюдаемый в высотном интервале от 270 до 320 м над уровнем моря, в центральной, наиболее пологой части ледника, объясняется неравномерными условиями инсоляции, возникающими из-за затенения хребтом южного борта кара.

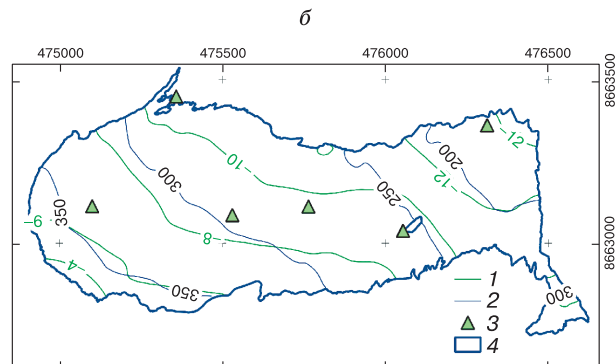
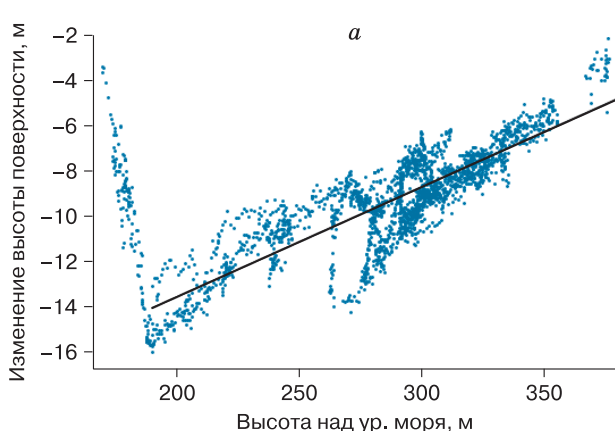


Рис. 4. Распределение значений изменения высоты поверхности ледника Вёринг в 2013–2019 гг. по высоте (а) и по площади (б):

1 – изолинии изменения высоты поверхности; 2 – изолинии высоты над уровнем моря; 3 – наземные опорные точки аэрофотосъемки; 4 – контур ледника. Контур ледника и изогипсы даны по состоянию на 19.08.2019 г.

Влияние скального обрамления четко прослеживается по изолинии изменения высоты поверхности со значением -10 м, в северной части ледника идущей вдоль изогипсы 300 м, а в южной (затененной) части круто поворачивающей к востоку с понижением до изогипсы 250 м (см. рис. 4). Этот результат согласуется с предположением о существенном влиянии экспозиции и характера скального обрамления на параметры абляции горных ледников рассматриваемого района [Сидорова и др., 2019].

Средний за период 2013–2019 гг. баланс ледника Вёринг равен (-1.30 ± 0.17) м в.э. в год, при этом суммарная масса ледника уменьшилась на (5.9 ± 0.4) млн т (в среднем (1.0 ± 0.1) млн т ежегодно). Поверхность ледника снизилась на всей его территории, что, по мнению авторов, в отсутствие интенсивного движения льда может свидетельствовать об отсутствии области аккумуляции на леднике в рассматриваемый период, это подтверждается и визуальными наблюдениями за высотой снеговой линии. Однако заметим, что пространственное распределение снижения поверхности, полученное геодезическим методом (см. рис. 4), не тождественно распределению баланса массы по поверхности ледника, поскольку, кроме

поверхностной абляции и аккумуляции, зависит также от движения ледника, от уплотнения его материала и других факторов [Klug et al., 2018].

Из данных о балансе массы ледника Вёринг (рис. 5) [Solovyanova, Mavlyudov, 2007; WGMS, 2019] следует, что ни одно из измеренных ранее значений годового баланса не достигало столь отрицательной величины, как полученное авторами среднее значение за период 2013–2019 гг. Объяснением этому может служить то, что в рассматриваемый период годовые суммы положительных температур в районе ледника были одними из наиболее высоких за весь период наблюдений (см. рис. 5).

Результаты топографической съемки могут быть применены не только для оценки баланса массы ледника геодезическим методом, но и для расчетов по абляционным рейкам. В таблице приведены площади 50-метровых высотных зон по состоянию на конец сезона абляции 2019 г. Интервал высот ледника и средняя высота поверхности составляют 180 – 390 и 280 м соответственно.

В работе [Hagen, Liestøl, 1990], где были рассмотрены продолжительные (от 13 до 21 года) непрерывные ряды масс-балансовых наблюдений, проводимых на нескольких ледниках о. Западный Шпицберген, показано, что годовые показатели баланса массы ледника Вёринг имеют высокую корреляцию ($R = 0.81$) с аналогичными показателями для ледника Восточный Брёггер (норв. *Austre Brøggerbreen*), который расположен на севере острова в окрестностях населенного пункта Нью-Олесунн. Предположив, что хорошая корреляция сохраняется и в настоящее время, рассмотрим, имело ли место снижение баланса массы ледника Восточный Брёггер, подобное рассчитанному авторами для ледника Вёринг, в период с 2013 по 2019 г. Для этого сгладим ряд ежегодных наблюдений с Восточного Брёггера скользящим средним с периодом 6 лет; отнесем среднее значение к концу периода (например, абсциссе 2019 будет соответствовать среднее годовое значение для шестилетнего периода с 2013 по 2019 г.). Мы ограничимся лишь качественным сравнением, так как, во-первых, количественное потребовало бы рассмотрения интервалов погрешностей используемых величин, а погрешности годовых значений баланса остаются неизвестными, поскольку их оценка не производилась. Во-вторых, ряды наблю-

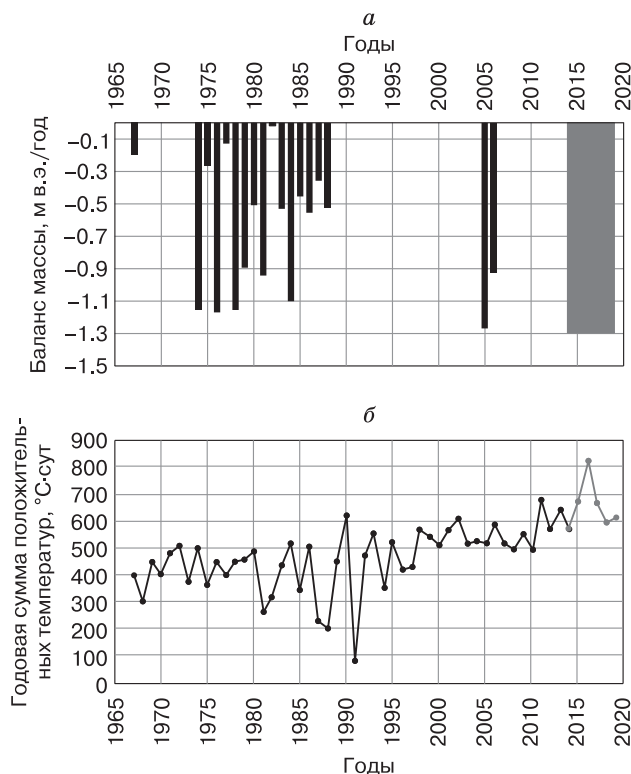


Рис. 5. Значения годового баланса массы ледника Вёринг (а) и годовые суммы положительных температур (б).

Серым цветом показаны значения для рассматриваемого периода (2013–2019).

Площади высотных зон ледника Вёринг в августе 2019 г.

Высотный интервал, м	Площадь		Высотный интервал, м	Площадь	
	га	%		га	%
Ниже 200	0.065	9	300–350	0.213	28
200–250	0.110	15	Выше 350	0.063	8
250–300	0.301	40			

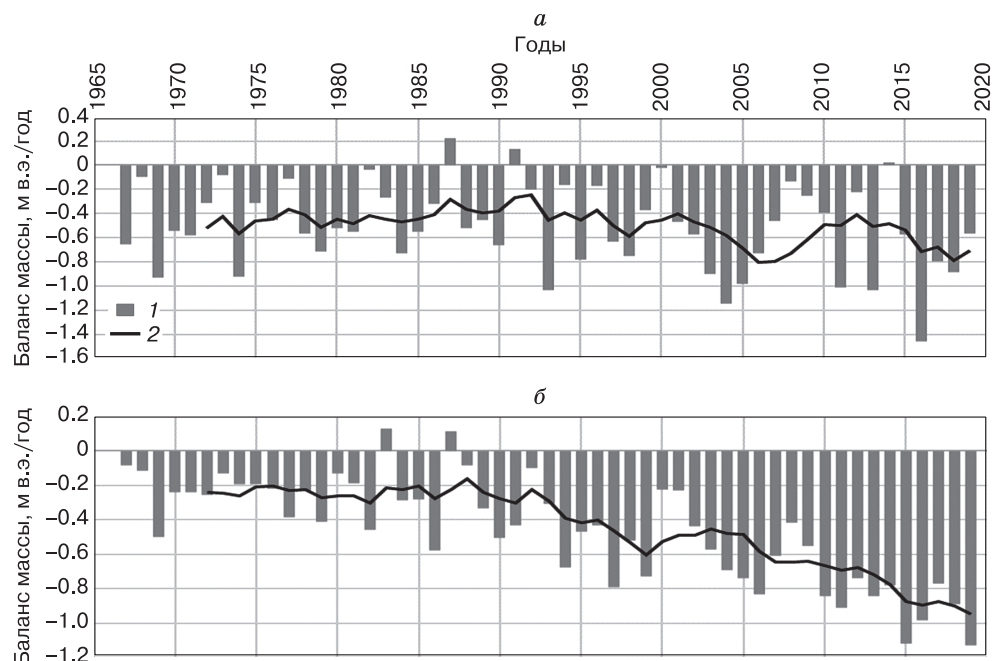


Рис. 6. Значения годового баланса массы ледников (1) и их скользящее среднее с периодом 6 лет (2).

a – ледник Восточный Брёггер; *б* – опорные ледники WGMS (среднее значение).

дений на леднике Вёринг имеют продолжительные перерывы. График для ледника Восточный Брёггер представлен на рис. 6, *a*. Видно, что для периодов 2013–2019 и 2012–2018 гг. характерны наиболее отрицательные показатели баланса массы. За всю историю наблюдений только в 2000–2006 и 2001–2007 гг. был такой же отрицательный баланс. Схожую картину демонстрируют результаты наблюдений на леднике Вёринг: из всех имеющихся значений баланса наиболее отрицательная величина отмечена в 2005 г., и она близка к измеренному авторами среднему за 2013–2019 гг. Кроме того, в работе [van Pelt et al., 2019] приведены обобщенные данные о балансе массы ледников архипелага Шпицберген за последние шесть десятилетий и обнаружен отрицательный тренд баланса массы в -0.06 м в.э. для архипелага в целом.

Аналогичным образом проведем сравнение с глобальными данными о балансе массы ледников, полученными WGMS (подробное описание см. *Материалы и методы*). В 2017/18 балансовом году потеря массы опорных ледников составила 0.89 м в.э. Предварительная оценка баланса массы за 2018/19 балансовый год еще более отрицательна и превышает по модулю 1 м в.э. Таким образом, восемь из десяти лет с наиболее отрицательным балансом за всю историю наблюдений – после 2010 г. Следовательно, ускорение потери массы ледником Вёринг соответствует общей тенденции изменения баланса массы ледников на архипелаге Шпицберген.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам топографической и аэрофото-съемки в августе 2019 г. для всей поверхности ледника Вёринг авторами была получена цифровая модель рельефа, которая станет основой для дальнейших мониторинговых наблюдений за балансом массы ледника геодезическим способом. Площадь ледника составила 0.75 км², что в 4.5 раза меньше площади в 1911 г., уменьшавшейся на протяжении последующих лет. Путем сравнения с фрагментом ArcticDEM авторами рассчитана потеря ледником Вёринг массы за 6 лет (с 2013 по 2019 г.), которая составила (5.9 ± 0.4) млн т, величина среднегодового баланса за этот период (-1.30 ± 0.17) м в.э.

Ни одно из измеренных ранее значений годового баланса (с 1975 г. до конца 1980-х) не достигало по отдельности столь отрицательной величины, как полученное авторами среднее за период 2013–2019 гг. Схожую картину ускорения потери массы за последние годы демонстрирует также ледник Восточный Брёггер, расположенный севернее на архипелаге Шпицберген. Тенденция изменения баланса массы ледника Вёринг совпадает с общей по Шпицбергену и общемировой тенденцией уменьшения ледникового покрова.

Авторы выражают благодарность Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген за помощь в организации и выполнении полевых работ.

Использованный нами фрагмент ArcticDEM был предоставлен Университетом Миннесоты при финансовой поддержке Национального научного фонда США.

Литература

Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Под ред. В.М. Котлякова. М., Изд. РАН, 1997, 392 с.

Гуськов А.С. Водно-ледовый баланс ледников Шпицбергена в 1979/1980 балансовом году // Материалы гляциол. исслед., 1983, вып. 46, с. 136–139.

Ромашова К.В., Чернов Р.А., Василевич И.И. Исследование ледникового стока рек в бассейне залива Грён-фьорд (Западный Шпицберген) // Пробл. Арктики и Антарктики, 2019, № 1 (65), с. 34–45, DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-1-34-45.

Сидорова О.Р., Тарасов Г.В., Веркулич С.Р., Чернов Р.А. Изменчивость поверхностной абляции горных ледников Западного Шпицбергена // Пробл. Арктики и Антарктики, 2019, № 4 (65), с. 438–448, DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-438-448.

Троицкий Л.С. О балансе массы ледников разных типов на Шпицбергене // Материалы гляциол. исслед., 1988, вып. 63, с. 117–121.

Anmeldelse nr. 14 (1912) Green Harbour av Isachsens norske Spitsbergenekspedition 1909–1910 [Электрон. ресурс] // Сайт Норвежского полярного ин-та. 2019. – URL: data.polar.no/map/archive/a13c3abb-0a1b-4671-824e-9ecca7fc9cf7 (дата обращения: 30.12.2019).

Hagen J., Liestøl O. Long-term glacier mass-balance investigations in Svalbard, 1950–88 // Ann. Glaciol., 1990, vol. 14, p. 102–106, DOI: 10.3189/S0260305500008351.

Huss M. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change // The Cryosphere, 2013, vol. 7, p. 877–887. – https://doi.org/10.5194/tc-7-877-2013

Klug C., Bollmann E., Galos S. et al. Geodetic reanalysis of annual glaciological mass balances (2001–2011) of Hintereisferner, Austria // The Cryosphere, 2018, vol. 12, p. 833–849. – https://doi.org/10.5194/tc-12-833-2018

Kohler J., James T.D., Murray T. et al. Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers // Geophys. Res. Lett., 2007, vol. 34, No. 18, L18502, DOI: 10.1029/2007GL030681.

Meteo.ru/data (2020): Доступ к данным ВНИИГМИ–МЦД [Электрон. ресурс]. – URL: www.meteo.ru/data (дата обращения: 10.03.2020).

Noh M.-J., Howat I.M. Automated stereo-photogrammetric DEM generation at high latitudes: Surface extraction with TIN-based search-space minimization (SETSM) validation and demonstration over glaciated regions // GIScience & Remote Sensing, 2015, No. 2 (52), p. 198–217, DOI: 10.1080/15481603.2015.1008621.

Nuth C., Kääb A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change // The Cryosphere, 2011, No. 5, p. 271–290, DOI: 10.5194/tc-5-271-2011.

Nuth C., Moholdt G., Kohler J. et al. Svalbard glacier elevation changes and contribution to sea level rise // J. Geophys. Res., 2010, No. 115, F01008, DOI: 10.1029/2008JF001223.

Porter C., Morin P., Howat I. et al. “ArcticDEM” [Электрон. ресурс] / Harvard Dataverse Web-site, 2018. – http://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH (дата обращения: 30.12.2019).

Solovyayanova I.Y., Mavlyudov B.R. Mass balance observations on some glaciers in 2004/2005 and 2005/2006 balance years,

Nordenskiöld Land, Spitsbergen // The Dynamics and Mass Budget of Arctic Glaciers: Extended abstr. Workshop and GLACIODYN (IPY) Meeting (Pontresina, 15–18 January, 2007), 2007, p. 115–120.

van Pelt W., Pohjola V., Pettersson R. et al. A long-term dataset of climatic mass balance, snow conditions, and runoff in Svalbard (1957–2018) // The Cryosphere, 2019, vol. 13, p. 2259–2280, DOI: 10.5194/tc-13-2259-2019.

WGMS (2019): Fluctuations of Glaciers Database. World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 2019. – URL: dx.doi.org/10.5904/wgms-fog-2019-12 (дата обращения: 30.12.2019).

WGMS (2020): Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016–2017) / M. Zemp, S.U. Nussbaumer, I. Gärtner-Roer et al. (eds.). ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 2020, DOI: 10.5904/wgms-fog-2019-12 (дата обращения: 30.12.2019).

Zemp M., Thibert E., Huss M. et al. Reanalysing glacier mass balance measurement series // The Cryosphere, 2013, vol. 7, p. 1227–1245. – https://doi.org/10.5194/tc-7-1227-2013

Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I. et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century // J. Glaciol., 2015, No. 61 (228), p. 745–762, DOI: 10.3189/2015JG15J017.

URL: wgms.ch/global-glacier-state/ (дата обращения: 10.03.2020).

URL: wgms.ch/latest-glacier-mass-balance-data/ (дата обращения: 10.03.2020).

References

Kotlyakov V.M. (Ed.). Atlas snezhno-ledovikh resursov mira [Atlas of Snow and Ice Resources of the World]. Moscow, Izd. RAN, 1997, 392 p. (in Russian).

Gus'kov A.S. Water-ice balance of glaciers of Spitsbergen in the 1979/1980 balance year. Materialy Glyatsiologicheskikh issledovaniy [Materials of Glaciological Studies], 1983, iss. 46, p. 136–139 (in Russian).

Romashova K.V., Chernov R.A., Vasilevich I.I. Study of the glacial flow of rivers in the Grönfjord bay basin (Western Svalbard). Problemy Arktiki i Antarkтики [Arctic and Antarctic Research], 2019, No. 1 (65), p. 34–45 (in Russian), DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-1-34-45.

Sidorova O.R., Tarasov G.V., Verkulich S.R., Chernov R.A. Variability of surface ablation of mountain glaciers on Western Spitsbergen. Problemy Arktiki i Antarkтики [Arctic and Antarctic Research], 2019, No. 4 (65), p. 438–448, DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-438-448.

Troitskiy L.S. About mass balance of different types of glaciers on Svalbard. Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy [Materials of Glaciological Studies], 1988, iss. 63, p. 117–121 (in Russian).

Anmeldelse nr. 14 (1912) Green Harbour av Isachsens norske Spitsbergenekspedition 1909–1910, Web-site of Norwegian Polar Institute, 2019. – URL: data.polar.no/map/archive/a13c3abb-0a1b-4671-824e-9ecca7fc9cf7 (last visited: 30.12.2019).

Hagen J., Liestøl O. Long-term glacier mass-balance investigations in Svalbard, 1950–88. Ann. Glaciology, 1990, vol. 14, p. 102–106, DOI: 10.3189/S0260305500008351.

Huss M. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. The Cryosphere, 2013, vol. 7, p. 877–887. – https://doi.org/10.5194/tc-7-877-2013

Klug C., Bollmann E., Galos S. et al. Geodetic reanalysis of annual glaciological mass balances (2001–2011) of Hintereis-

- ferner, Austria. The Cryosphere, 2018, vol. 12, p. 833–849. – <https://doi.org/10.5194/tc-12-833-2018>
- Kohler J., James T.D., Murray T. et al. Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers. Geophys. Res. Lett., 2007, vol. 34, No. 18, L18502, DOI: 10.1029/2007GL030681.
- Meteo.ru/data (2020): Dostup k dannim VNIIGMI–MCD [Access to the data of RIHMI–VDC]. – URL: www.meteo.ru/data (last visited: 10.03.2020).
- Noh M.-J., Howat I.M. Automated stereo-photogrammetric DEM generation at high latitudes: Surface extraction with TIN-based search-space minimization (SETSM) validation and demonstration over glaciated regions. GIScience & Remote Sensing, 2015, No. 2 (52), p. 198–217, DOI: 10.1080/15481603.2015.1008621.
- Nuth C., Kääb A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. The Cryosphere, 2011, No. 5, p. 271–290, DOI: 10.5194/tc-5-271-2011.
- Nuth C., Moholdt G., Kohler J. et al. Svalbard glacier elevation changes and contribution to sea level rise. J. Geophys. Res., 2010, No. 115, F01008, DOI: 10.1029/2008JF001223.
- Porter C., Morin P., Howat I. et al. “ArcticDEM”, Harvard Dataverse Web-site, 2018. – <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH> (last visited: 30.12.2019).
- Solovyanova I.Y., Mavlyudov B.R. Mass balance observations on some glaciers in 2004/2005 and 2005/2006 balance years, Nordenskiöld Land, Spitsbergen. In: The Dynamics and Mass Budget of Arctic Glaciers: Extended abstr. Workshop and GLACIODYN (IPY) Meeting (Pontresina, 15–18 January, 2007), 2007, p. 115–120.
- van Pelt W., Pohjola V., Pettersson R. et al. A long-term dataset of climatic mass balance, snow conditions, and runoff in Svalbard (1957–2018). The Cryosphere, 2019, vol. 13, p. 2259–2280, DOI: 10.5194/tc-13-2259-2019.
- WGMS (2019): Fluctuations of Glaciers Database. World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 2019. – <http://dx.doi.org/10.5904/wgms-fog-2019-12> (last visited: 30.12.2019).
- WGMS (2020): Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016–2017). M. Zemp, S.U. Nussbaumer, I. Gärtner-Roer et al. (eds.). ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 2020, DOI: 10.5904/wgms-fog-2019-12 (last visited: 30.12.2019).
- Zemp M., Thibert E., Huss M. et al. Reanalysing glacier mass balance measurement series. The Cryosphere, 2013, vol. 7, p. 1227–1245. – <https://doi.org/10.5194/tc-7-1227-2013>
- Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I. et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. J. Glaciol., 2015, No. 61 (228), p. 745–762, DOI: 10.3189/2015JG15J017.
- URL: wgms.ch/global-glacier-state/ (last visited: 10.03.2020).
- URL: wgms.ch/latest-glacier-mass-balance-data/ (last visited: 10.03.2020).
- Поступила в редакцию 13 марта 2020 г.,
после доработки – 22 мая 2020 г.,
принята к публикации 10 июня 2020 г.*