

Оценка баланса массы ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в 2015–2018 гг. на основе модели ArcticDEM, геодезических и гляциологических данных

© 2020 г. А.В. Терехов*, Г.В. Тарасов, О.Р. Сидорова, В.Э. Демидов, М.А. Анисимов, С.Р. Веркулич

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*antonvterekhov@gmail.com

Estimation of mass balance of Aldegondabreen (Spitsbergen) in 2015–2018 based on ArcticDEM, geodetic and glaciological measurements

A.V. Terekhov*, G.V. Tarasov, O.R. Sidorova, V.E. Demidov, M.A. Anisimov, S.R. Verkulich

Arctic and Antarctic Research Institute, St.Petersburg, Russia

*antonvterekhov@gmail.com

Received April 18, 2019 / Revised July 2, 2019 / Accepted September 19, 2019

Keywords: Arctic, ArcticDEM model, digital elevation model, glacier mass balance, Svalbard.

Summary

Aldegonda (Aldegondabreen) Glacier, located on the Nordenskjold Land, West Spitsbergen, covers the area of about 6 km² (in 2018) and does constantly retreat since the very first observations of 1936. In August 2018, a topographic survey of the glacier was carried out. By comparing the results with the ArcticDEM model, built from space images of 2015, the difference in heights of the surface over three years had been calculated. Comparison of this difference with *in situ* data of glaciological measurements by the ablation stakes, made during the same period 2015–2018, demonstrated a high correlation between them. Considering the almost complete absence of snow cover on the glacier at the end of the summer season, the difference was recalculated into the spatial distribution of the specific mass balance by multiplying the ice density (0.88 g cm⁻³). Using the empirical dependence of the specific mass balance on the altitude above sea level, the obtained values were extrapolated to that part of the glacier which was not surveyed in 2018. The total loss of the Aldegonda Glacier mass for 2015–2018, calculated on the basis of topographic survey and the ArcticDEM, was estimated as 30.3 million tons (about 10.1 million tons per year). This magnitude gives the value of mean annual specific balance of approximately –1.76 m w.e, which is almost 2.5 times larger modulo than the previously published mean for the period 1936–1990, but close to the values of the early 2000s. Despite the small difference in the values obtained by geodetic and glaciological methods, the measurements do not show a systematic shift relative to each other and demonstrate approximately the same intervals of specific balance from the glacier tongue to its upper reaches (–1.08 ÷ –3.01 m w.e). This makes possible to conclude that the ArcticDEM model has the satisfactory vertical accuracy (both relative and absolute) to study on its basis changes in the surface height of an individual glacier.

Citation: 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. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020. 60 (2): 192–200. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420020033.

Поступила 18 апреля 2019 г. / После доработки 2 июля 2019 г. / Принята к печати 19 сентября 2019 г.

Ключевые слова: Арктика, баланс массы ледника, цифровая модель рельефа, Шпицберген, ArcticDEM.

Путём сравнения результатов топографической съёмки с моделью местности ArcticDEM изучено снижение поверхности ледника Альдегонда за 2015–2018 гг. Потеря массы ледником за три года составила 30,3 млн т, или –1,76 м в.э. Исследование показало возможность применения ArcticDEM для масс-балансовых оценок отдельных ледников.

Введение

Преобладающая часть о. Западный Шпицберген характеризуется высокими темпами сокращения оледенения на протяжении почти столетия [1, 2]. Особенно быстро идёт деградация

горного оледенения центральной части острова. Так, на Земле Норденшельда, согласно оценкам отечественных исследователей, с 1936 по 2017 г. площадь ледников уменьшилась на 169,5 км² (49,5%) [3]. Анализу динамики оледенения в последние десятилетия в значительной мере спо-

Материалы и методы

способствует применению активно развивающихся методов дистанционного зондирования. Основные параметры, изучаемые на основе спутниковых снимков, — площадь ледника и её изменения во времени. Цифровые модели рельефа до недавнего времени не позволяли рассчитывать с приемлемой точностью баланс массы из-за их недостаточного пространственного разрешения (например, GTOPO), вертикальной точности (ASTER) либо покрытия (SRTM).

В последние несколько лет на основе оптических спутниковых снимков DigitalGlobe Университетом Миннесоты создаётся и открыта для использования цифровая модель местности (ЦММ) ArcticDEM. ЦММ распространяется в виде растра с пространственным разрешением 2 м [4]. Эта модель была успешно опробована при региональных исследованиях параметров оледенения северо-восточной Гренландии [5], Северной [6] и Новой Земли [7], Камчатки [8], Исландии [9] и Шпицбергена [10]. Однако точность модели ArcticDEM для решения гляциологических задач на уровне отдельных ледников требует проверки — верификации модели результатами натурных наблюдений. Для расчёта параметров баланса массы с применением ArcticDEM в комбинации с топографической съёмкой и последующей проверкой корректности результатов на основе наземных гляциологических наблюдений мы выбрали горно-долинный ледник Альдегонда на о. Западный Шпицберген.

В августе 2018 г. Российской научной арктической экспедицией ФГБУ «ААНИИ» на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) была проведена наземная топографическая съёмка поверхности ледника. Путём сравнения её результатов с ЦММ ArcticDEM за 2015 г. получена пространственная картина изменения высоты поверхности ледника за три года. После верификации данными гляциологических наблюдений по абляционным рейкам изменение высоты было пересчитано в удельный баланс массы. На основе полученной эмпирической зависимости удельного баланса от высоты над уровнем моря измерения были экстраполированы на фрагмент ледника Альдегонда, не покрытый топографической съёмкой, что позволило рассчитать потери массы за три года для всего ледника. Методические аспекты и результаты этих работ излагаются и обсуждаются в настоящей статье.

Горно-долинный ледник Альдегонда расположен на Земле Норденшельда (о. Западный Шпицберген) в 10 км от пос. Баренцбург (рис. 1). Площадь ледника — около 6 км² (по состоянию на 2018 г.), а диапазон высот — преимущественно (более 95% поверхности) от 120 до 450 м над ур. моря (все высоты в статье даны над уровнем моря), хотя отдельные части ледника на юге и юго-западе поднимаются до 650 м. 7–8 августа 2018 г. была выполнена топографическая съёмка поверхности ледника на площади около 4,5 км², за исключением наиболее крутых юго-западных частей ледника. Работы проводились дифференциальным спутниковым методом при помощи двухчастотных многоканальных приёмников Sokkia GRX-2 и полевого контроллера Archer-2. Съёмка проходила в режиме кинематики траверсами через 100–150 м «поперёк» ледника (в направлении север–юг), расстояние между соседними точками в траверсе составляло 5–20 м. Всего получены координаты около 20 тыс. точек. Результаты наблюдений уравниены в свободно распространяемой программе RTKLib. Точность координат, полученных при постобработке, для большинства точек лежит в пределах 2 см в плане и 3 см по высоте (1σ). На основе отснятых точек построена цифровая модель поверхности в виде растра с размером ячейки в плане 10 м.

В качестве данных о высоте поверхности ледника на 2015 г. применена цифровая модель местности (ЦММ) ArcticDEM. В работе использован фрагмент с идентификатором ETSM_WV02_20150720_1030010045167700_10300100460A_SA00_seg1_2m_v2.0_dem, созданный стереофотограмметрическими методами по снимкам спутника WorldView-2 (WV2) на 20 июля 2015 г. В ходе предобработки фрагмента мы провели стандартные процедуры: коррекцию абсолютной высотной привязки, фильтрацию явных выбросов, а также интерполяцию небольших «промежутков» в данных. Коррекция высотной привязки выполнялась параллельным переносом ЦММ в соответствии с вектором сдвига, вычисленным авторами модели на основе 55 точек лазерных измерений со спутника ICESat и распространяемым вместе с самой моделью в файле метаданных. Компоненты векто-

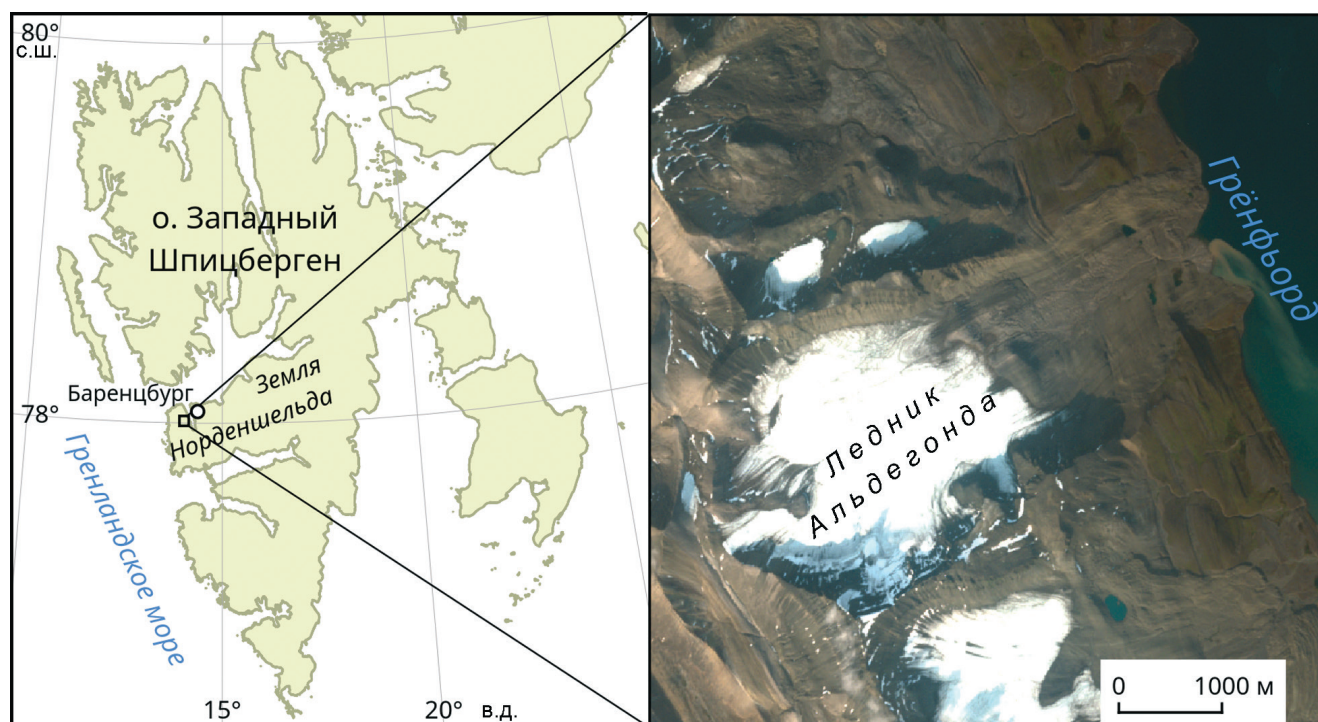


Рис. 1. Местоположение и вид ледника Альдегонда, Западный Шпицберген.

Использованы данные Европейского космического агентства

Fig. 1. Aldegonda Glacier on the map of Spitsbergen.

Produced from European Space Agency remote sensing data

ра dz , dx , dy составили $-0,906$, $-0,365$ и $0,095$ м (соответственно), медианное значение остатков $-0,038$ м. Другие наземные точки привязки не использовались. Явные выбросы размером в первые пиксели, а также промежутки в ЦММ ArcticDEM обусловлены природой исходных данных WV2: на оптических снимках присутствует облачность, а центральная проекция фотоснимков даёт невидимые из-за рельефа зоны. Для фильтрации выбросов мы применили DTM-фильтр, а немногочисленные промежутки были интерполированы сплайнами.

Натурными данными, позволяющими оценить корректность сопоставления результатов топографической съёмки и данных ArcticDEM для расчёта значений снижения поверхности ледника, послужили результаты ежегодных измерений величин абляции в летне-осенние сезоны по сети установленных на леднике абляционных рек [11–14]. Репрезентативные данные за весь рассматриваемый период имеются только для десяти рек, так как остальные рейки либо были установлены после 2015 г., либо вытаяли и были утеряны до 2018 г.

Результаты и обсуждение

В результате топографической съёмки составлена карта рельефа поверхности ледника Альдегонда в августе 2018 г. (рис. 2). Отметим, что поверхность была покрыта льдом, снег на леднике отсутствовал, что регулярно наблюдается здесь в завершающий период абляции. Горизонталы, построенные на основе ArcticDEM, в целом повторяют очертания горизонталей при топографической съёмке 2018 г., но в плане смещены вниз ледника (см. рис. 2). Объяснением этому могут служить естественное снижение поверхности ледника в результате многолетнего расхода льда и возможная абсолютная ошибка высотной привязки модели ArcticDEM (систематическая ошибка).

Чтобы убедиться в отсутствии систематической ошибки — сдвига по высоте, сравним разность полученных по ArcticDEM и по наземной топографической съёмке значений высот с результатами натуральных гляциологических наблюдений. Для этого используем суммы измерений по абляционным рейкам (см. рис. 2) примерно за тот же период — со второй декады июля 2015 г.

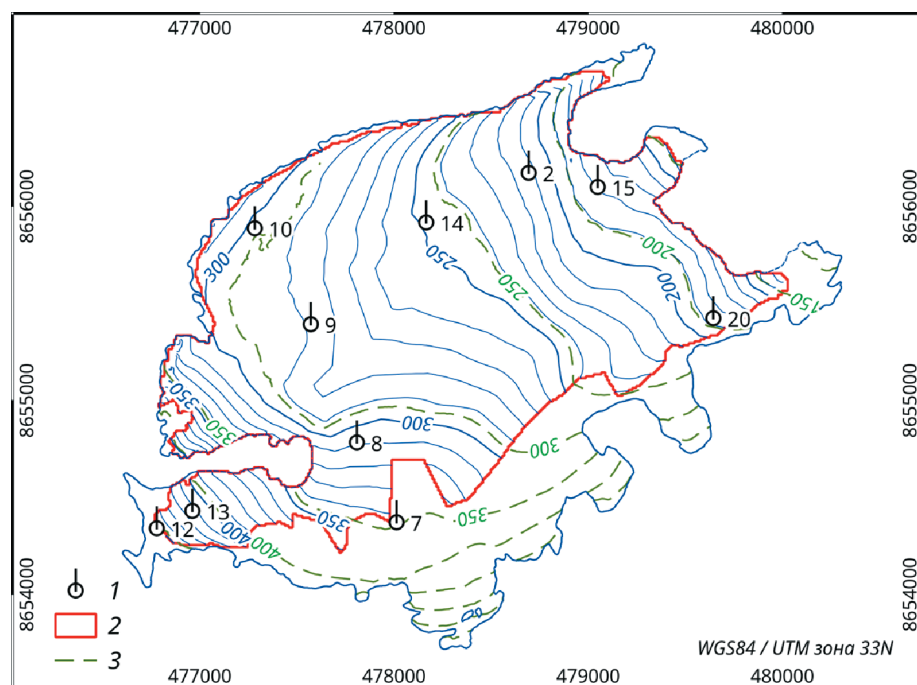


Рис. 2. Рельеф поверхности ледника Альдегонда по результатам топографической съёмки в августе 2018 г. (высоты даны в м над ур. моря) и точки гляциологических измерений: 1 – точки гляциологических измерений по абляционным рейкам с номерами рек; 2 – территория, охваченная топографической съёмкой; 3 – изогипсы по ArcticDEM (через 50 м)

Fig. 2. The surface topography of Aldegonda Glacier on August 2018 (altitudes above mean sea level):

1 – ablation stakes and their numbers; 2 – surveyed territory; 3 – contour lines derived from ArcticDEM (50 m interval)

Таблица 1. Сравнение величин снижения поверхности ледника за период с 2015 по 2018 г., полученных различными методами

Номер рейки	Высота над уровнем моря, м	Сумма измерений абляции по рейке, см	Разность высот ArcticDEM и наземной топосъёмки, см	Невязка за период, см	Невязка в год, см
1	2	3	4	5	6
15	180	990	973	-17	-6
20	185	847	747	-100	-33
2	215	1029	918	-111	-37
14	245	737	739	+2	+1
9	285	642	672	+30	+10
10	295	750	637	-113	-38
8	310	587	541	-46	-15
7	345	449	495	+46	+15
13	415	506	388	-118	-39
12	450	365	481	+116	+39

по первую декаду августа 2018 г., которые приведены в табл. 1. Данные таблицы показывают, что невязки (графа 5) имеют случайный характер и различны по модулю. Из этого можно сделать вывод, что систематическая ошибка высоты при использовании модели ArcticDEM отсутствует. Кроме того, результаты, полученные двумя методами (графы 2, 3), согласуются достаточно хорошо, если иметь в виду различие в длительности периодов расчёта геодезическим и гляциологическим методами (отсчёты по рейкам снимаются раз в 7–12 дней), а также точность измерений по рейкам. Всё это даёт основание для использова-

ния модели ArcticDEM при расчёте балансовых показателей ледника Альдегонда в целом.

Вычитанием растров, образованных интерполяцией точек топографической съёмки и ArcticDEM, получим картину пространственного распределения величины снижения высоты поверхности ледника за период 2015–2018 гг. Приняв плотность ледникового льда равной $0,88 \text{ г/см}^3$ (аналогично работе [15]) и учитывая факт преимущественного отсутствия снега на поверхности ледника Альдегонда в периоды съёмок и гляциологических измерений, пересчитаем полученные значения и получим распределение величины

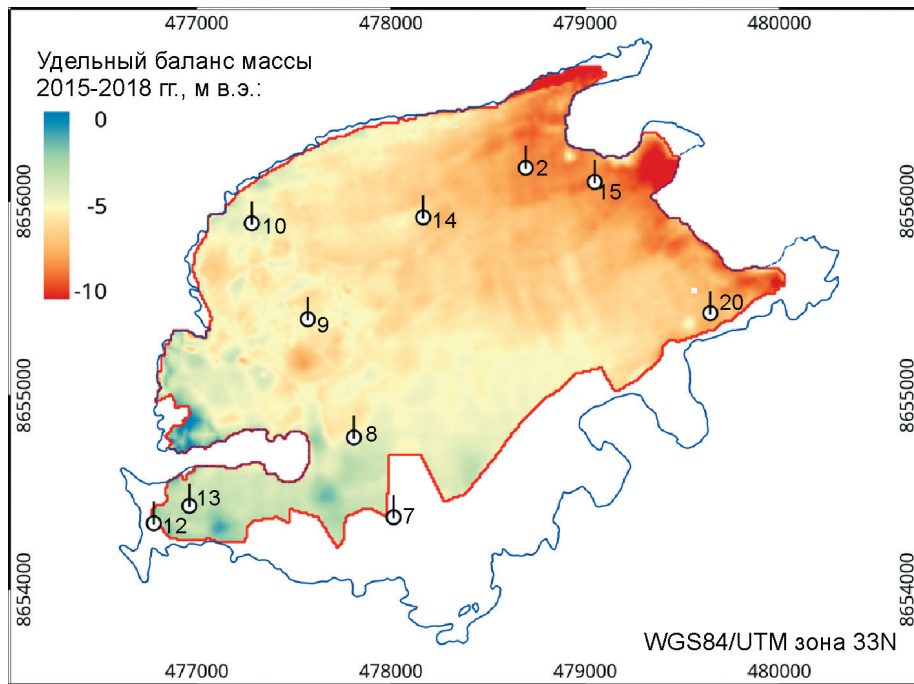


Рис. 3. Удельный баланс массы ледника Альдегонда (суммарный за период 2015–2018 гг.). Усл. обозначения см. рис. 2
Fig. 3. Geodetic mass balance for Aldegonda Glacier (in 2015–2018, cumulative). See Fig. 2

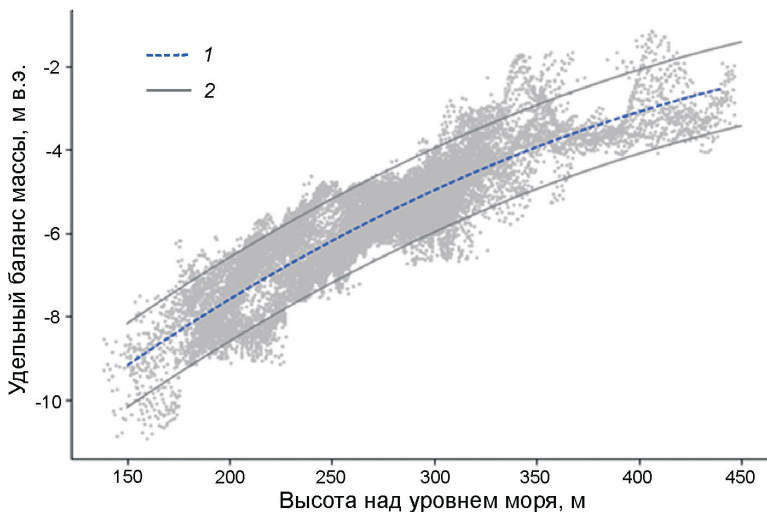


Рис. 4. Балансовая кривая для ледника Альдегонда за период с 2015 по 2018 г., построенная на основе сравнения результатов топографической съёмки и модели ArcticDEM:
1 – линия регрессии; 2 – 95%-й интервал линии регрессии
Fig. 4. Specific mass balance curve of Aldegonda Glacier for period 2015–2018 (cumulative), based on difference between topographic survey and ArcticDEM:
1 – linear regression fit; 2 – prediction band (95%) of the linear regression fit

удельного баланса массы на охваченной топографической съёмкой площади ледника (рис. 3).

На рис. 4 приведена балансовая кривая для ледника Альдегонда. Связь удельного баланса массы от высоты довольно тесная (что подтверждается также данными табл. 2): при использовании параболической зависимости вида (1), где h – высота над уровнем моря, значение коэффициента детерминации R^2 составит 0,85:

$$b(h) = \beta_1 h^2 + \beta_2 h + \beta_3. \quad (1)$$

Найденные коэффициенты регрессии (1) будут равны: $\beta_1 = -0,000037$; $\beta_2 = 0,044486$;

$\beta_3 = -15,021645$. На основе полученной нами линейной регрессии (1) смоделируем распределение значений удельного баланса массы для всей поверхности ледника Альдегонда, экстраполировав тем самым этот показатель на ту часть ледника, которая не была покрыта топографической съёмкой (рис. 5). При сравнении рис. 5 и рис. 3 видно, что пространственное распределение смоделированного и построенного на фактических данных удельного баланса несколько различается. Тем не менее, при подсчёте баланса массы путём интегрирования удельного показателя по площади его величина в пределах

Таблица 2. Распределение удельного баланса массы ледника Альдегонда (среднего за 2015–2018 гг.) по высоте, полученное различными методами

Высота над уровнем моря, м	Удельный годовой баланс, м в.э.		
	гляциологический метод	геодезический метод (с использованием ArcticDEM)	невязка
180	2,91	2,85	-0,06
185	2,46	2,19	-0,27
215	3,01	2,70	-0,31
245	2,16	2,17	+0,01
285	1,88	1,97	+0,09
295	2,20	1,87	-0,33
310	1,72	1,58	-0,14
345	1,32	1,45	+0,13
415	1,49	1,14	-0,35
450	1,08	1,41	+0,33

отснятой части ледника оказывается практически одинаковой при использовании как фактических данных, так и установленной регрессии: -24,001 и -24,009 млн т соответственно. Подобное соответствие результатов позволяет экстраполировать по зависимости (1) значения удельного баланса на часть ледника с отсутствующей топографической съёмкой, а также рассчитать для неё баланс массы, величина которого составит -6,307 млн т с 95%-м доверительным интервалом от -4,843 до -7,648 млн т.

Просуммировав значения для двух частей ледника, получим итоговую оценку баланса массы с 2015 по 2018 г. для всего ледника Альдегонда: он составит от -28,846 до -31,650 млн т с наиболее вероятным значением -30,308 млн т или в среднем -10,1 млн т·год⁻¹. При делении этой величины на площадь ледника в 2018 г. (около 5,8 км²) среднее значение годового удельного баланса массы составит -1,76 м в.э. с 95%-м интервалом от -1,67 до -1,83 м в.э. Отметим, что приводимые нами показатели потери ледником массы следует считать завышенными по двум причинам. Во-первых, экстраполяция проведена для наиболее затенённой части ледника Альдегонда, имеющей северную экспозицию, поэтому реальное значение таяния для этой территории скорее всего будет близко к нижней границе доверительного интервала, т.е. к -4,843 млн т, а для всего ледника - к -28,846 млн т. Во-вторых, наши расчёты не учитывают возможное наличие снежного остатка в верховьях ледника в июле 2015 г. Мы пренебрегли им, так как его площадь на 20 июля 2018 г. составила менее 10% всей площади ледника и до конца лета ещё более сократилась. Количественно оценить ошибку из-за наличия снега в верховьях невозможно без натуральных данных о его плотности и толщине, однако это также приводит к некоторому завышению наших оценок потери массы.

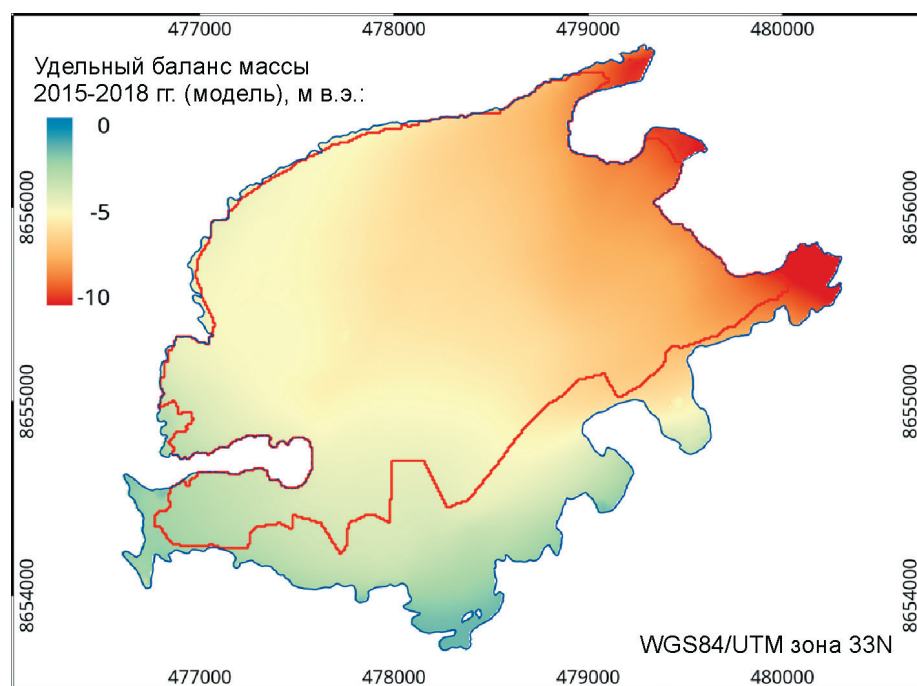


Рис. 5. Экстраполяция удельного баланса массы (суммарного за 2015–2018 гг.) для всей поверхности ледника по полученной балансовой кривой. Усл. обозначения см. рис. 2
Fig. 5. Modelled specific mass balance for Aldegonda Glacier during 2015–2018 (cumulative). See Fig. 2

Несмотря на некоторые количественные различия значений удельного баланса массы, полученного гляциологическим и геодезическим (с использованием ArcticDEM) методами, диапазон этих значений для обоих методов весьма близок ($-1,08 \div -3,01$ м в.э. и $-1,14 \div -2,85$ м в.э. соответственно (см. табл. 2). Сравним приведённый здесь диапазон значений удельного баланса и полученное среднегодовое значение баланса массы ледника Альдегонда за 2015–2018 гг. ($-1,76$ м в.э.) с аналогичными показателями, определёнными ранее. В 2002–2003 гг., когда ледник имел площадь около 7 км^2 , средняя величина его баланса массы составила $-1,61$ м в.э., изменяясь от $-3,46$ м в.э. на языке ледника до $-0,66$ м в.э. в верховьях [16]. В работе [17] приведены также средние годовые значения для 2004, 2005 и 2006 г., составившие $-1,63$, $-1,41$ и $-1,31$ м в.э. соответственно.

В 1975–1976 г. балансовые показатели также были отрицательными, показывая в пределах ледника значения от $-2,07$ до $-0,11$ м в.э. со средней величиной $-1,10$ м в.э. [18]. Наконец, в соответствии с результатами исследования 1990 г., включавшего анализ топографических карт, цифровых моделей местности, аэрофотоснимков разных лет и данных геофизической съёмки, за период 1936–1990 гг. объём ледника Альдегонда сократился с $0,950$ до $0,558 \text{ км}^3$, что даёт значение среднегодового баланса $-0,7$ м в.э. [19], т.е. примерно в 2–2,5 раза меньше значений, полученных в начале XXI в. Приведённые цифры показывают, с одной стороны, почти вековую тенденцию сокращения ледника, а с другой – наличие заметных расхождений в амплитуде потери его массы на разных отрезках времени. Эти расхождения обусловлены как естественными причинами, прежде всего флуктуацией климатических условий в районе, так и разной длительностью осредняемых балансовых периодов – 1, 3 и 54 года. Кроме того, период наблюдений, рассматриваемый в данном исследовании, составляет не ровно три года, а больше на две недели сезона абляции – это ещё одна причина считать полученные показатели несколько завышенными. В этом отношении результаты, полученные на основе топографической съёмки и модели ArcticDEM в сочетании с их верификацией наземными наблюдениями, выглядят вполне достоверными. Тем более, что наше исследо-

вание показывает отсутствие систематических сдвигов по высоте в модели ArcticDEM, способных привести к существенным ошибкам оценки объёмов потери массы ледника.

Заключение

На основе данных наземной топографической съёмки и цифровой модели местности ArcticDEM получено поле пространственного распределения годового удельного баланса массы ледника Альдегонда за 2015–2018 гг., который в среднем составил $-1,76$ м в.э. Картина пространственного распределения абляции, полученная подобным образом, гораздо подробнее той, которую можно получить интерполяцией отсчётов по установленным на леднике абляционным рейкам. Определена эмпирическая зависимость удельного баланса массы от высоты над уровнем моря. Измеренная величина баланса хорошо соответствует величине, смоделированной по этой зависимости, что позволило экстраполировать измерения на фрагмент ледника, не охваченный топографической съёмкой. Суммарный баланс массы ледника за 2015–2018 гг. составил около $-30,3$ млн т, или в среднем за год около $-10,1$ млн т.

Приводимые здесь показатели потери массы ледника, по-видимому, несколько завышены по ряду причин: из-за экстраполяции таяния на затенённую часть ледника и неучтённого снежного остатка в его верховьях в июле 2015 г., а также вследствие того, что период наблюдений продолжался чуть более трёх лет. Наземными измерениями годового баланса массы была верифицирована цифровая модель рельефа ArcticDEM. Это открывает широкие возможности исследовать на её основе другие активно деградирующие ледники на Шпицбергене. Подобные исследования, очевидно, будут способствовать разрешению методического вопроса о вертикальной точности в пределах разных фрагментов ArcticDEM.

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность участникам экспедиции «Шпицберген–2018» РАЭ-Ш за помощь в организации и выполнении полевых геодезических работ. Цифровая модель местности ArcticDEM, использованная в данном исследовании, создана на основе

снимков DigitalGlobe, Inc. при финансовой поддержке Национального научного фонда США. Расчёты и картографическая визуализация результатов проведены с помощью открытых геоинформационных систем QGIS, SAGA GIS.

Acknowledgements. The authors gratefully acknowledge the members of expedition «Spitsbergen—2018» of Russian Arctic Expedition on Svalbard depart-

ment (Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia) for helping in organizing and carrying out the field studies. ArcticDEM used in this study was created from DigitalGlobe, Inc., imagery and funded under National Science Foundation awards 1043681, 1559691, and 1542736. The calculations of mass balance parameters and the cartographic visualization of all the data were done using open-source QGIS and SAGA GIS.

Литература

1. 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 // *Geophys. Research Letters*. 2007. V. 34 № 18. L18502. doi: 10.1029/2007GL030681.
2. Hagen J.O., Kohler J., Melvold K., Winther J.G. Glaciers in Svalbard: Mass balance, runoff and freshwater flux // *Polar Research*. 2003. V. 22. № 2. P. 145–159. doi: 10.1111/j.1751-8369.2003.tb00104.x.
3. Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Современные изменения площади ледников западной части Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген) // *Лёд и Снег*. 2018. Т. 58. № 4. С. 462–472. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-462-472.
4. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummens P., Laurier F., Bojensen M. 2018, «ArcticDEM». <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>. Harvard Dataverse. V1. [20.08.2018].
5. Von Albedyll L., Machguth H., Nussbaumer S.U., Zemp M. Elevation changes of the Holm Land Ice Cap, northeast Greenland, from 1978 to 2012–2015, derived from high-resolution digital elevation models // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2018. V. 50. № 1. e1523638. doi: 10.1080/15230430.2018.1523638.
6. Бушуева И.С., Глазовский А.Ф., Носенко Г.А. Развитие подвижки в западной части ледникового купола Вавилова на Северной Земле в 1963–2017 гг. // *Лёд и Снег*. 2018. Т. 58. № 3. С. 293–306. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-293-306.
7. Rastner P., Strozzi T., Paul F. Fusion of Multi-Source Satellite Data and DEMs to Create a New Glacier Inventory for Novaya Zemlya // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. 1122. doi: 10.3390/rs9111122.
8. Barr I.D., Dokukin M.D., Kougkoulos I., Livingstone S.J., Lovell H., Matecki J., Muraviev A.Y. Using ArcticDEM to Analyse the Dimensions and Dynamics of Debris-Covered Glaciers in Kamchatka, Russia //

References

1. 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. *Geophys. Research Letters*. 2007, 34 (18): L18502. doi: 10.1029/2007GL030681.
2. Hagen J.O., Kohler J., Melvold K., Winther J.G. Glaciers in Svalbard: Mass balance, runoff and freshwater flux. *Polar Research*. 2003, 22 (2): 145–159. doi: 10.1111/j.1751-8369.2003.tb00104.x.
3. Chernov R.A., Muraviev A.Ya. Contemporary changes in the area of glaciers in the western part of the Nordenskjold Land (Svalbard). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018, 58 (4): 462–472. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-462-472.
4. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummens P., Laurier F., Bojensen M. 2018, «ArcticDEM». <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>. Harvard Dataverse. V1. [20.08.2018].
5. Von Albedyll L., Machguth H., Nussbaumer S.U., Zemp M. Elevation changes of the Holm Land Ice Cap, northeast Greenland, from 1978 to 2012–2015, derived from high-resolution digital elevation models. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2018, 50 (1): e1523638. doi: 10.1080/15230430.2018.1523638.
6. Bushueva I.S., Glazovsky A.F., Nosenko G.A. Surge development in the western sector of the Vavilov Ice Cap, Severnaya Zemlya, 1963–2017. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018, 58 (3): 293–306. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-293-306).
7. Rastner P., Strozzi T., Paul F. Fusion of Multi-Source Satellite Data and DEMs to Create a New Glacier Inventory for Novaya Zemlya. *Remote Sensing*. 2017, 9: 1122. doi: 10.3390/rs9111122.
8. Barr I.D., Dokukin M.D., Kougkoulos I., Livingstone S.J., Lovell H., Matecki J., Muraviev A.Y. Using ArcticDEM to Analyse the Dimensions and Dynamics of Debris-Covered Glaciers in Kamchatka, Russia. *Geosciences (Switzerland)*. 2018, 8 (6): 216. doi: 10.3390/geosciences8060216.
9. Johannesson T., Thrastarson R., Morin P., Howat I. The potential of the ArcticDEM satellite-based digital elevation models for mapping glacier change in Iceland. *Geophys. Research. Abstracts*. 2017, 19: EGU2017-14797.

- Geosciences (Switzerland). 2018. V. 8. № 6. 216. doi: 10.3390/geosciences8060216.
9. Johannesson T., Thrastarson R., Morin P., Howat I. The potential of the ArcticDEM satellite-based digital elevation models for mapping glacier change in Iceland // *Geophys. Research Abstracts*. 2017. V. 19. EGU2017-14797.
 10. Fürst J.J., Gillet-Chaulet F., Benham T.J., Dowdeswell J.A., Grabiec M., Navarro F., Pettersson R., Moholdt G., Nuth C., Sass B., Aas K., Fettweis X., Lang C., Seehaus T., Braun M. Application of a two-step approach for mapping ice thickness to various glacier types on Svalbard // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. P. 2003–2032. doi: 10.5194/tc-11-2003-2017.
 11. Изучение метеорологического режима и климатических изменений в районе архипелага Шпицберген: отчет о НИР (итоговый за 2015 г.) // Отчет о НИР, науч. рук. темы Л.М. Саватюгин. СПб.: 2015. 187 с. (Фонды ААНИИ, инв. № Р–6289).
 12. Исследование многолетних изменений гидрометеорологического режима и состояния природной среды архипелага Шпицберген: отчет о НИР (заключительный за 2016 год) // Отчет о НИР, науч. рук. темы Л.М. Саватюгин. СПб.: 2016. 204 с. (Фонды ААНИИ, инв. № Р–6394).
 13. Исследования современного состояния и анализ предшествовавших изменений характеристик природной среды архипелага Шпицберген: отчет о НИР (промежуточный) // Отчет о НИР, науч. рук. темы Л.М. Саватюгин. СПб.: 2017. 237 с. (Фонды ААНИИ, инв. № Р–6458).
 14. Исследования современного состояния и анализ предшествовавших изменений характеристик природной среды архипелага Шпицберген: отчет о НИР (промежуточный) // Отчет о НИР, науч. рук. темы Л.М. Саватюгин. СПб.: 2018. 337 с. (Фонды ААНИИ, инв. № Р–6546).
 15. Чернов Р.А., Кудиков А.В., Вишвецва Т.В., Осokin Н.И. Оценка поверхностной абляции и баланса массы ледника Восточный Грэнфьорд (Западный Шпицберген) // *Лёд и Снег*. 2019. Т. 59. № 1. С. 59–66. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-59-66.
 16. Мавлюдов Б.Р., Соловьянова И.Ю. Водно-ледовый баланс ледника Альдегонда в 2002/03 г. // *МГИ*. 2007. № 102. С. 206–208.
 17. Solovyanova 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*. 2007. С. 115–120.
 18. Гуськов А.С., Гордейчик А.В. Водно-ледовый баланс ледников Шпицбергена в 1975/76 балансовом году // *МГИ*. 1978. Вып. 33. С. 207–211.
 19. Navarro F.J., Glazovsky A.F., Macheret Yu.Ya., Vasilenko E.V., Corcuera M.I., Cuadrado M.L. Ice-volume changes (1936–1990) and structure of Aldegondabreen, Spitsbergen // *Annals of Glaciology*. 2005. № 42. С. 158–162. doi: 10.3189/172756405781812646.
 10. Fürst, J.J., Gillet-Chaulet F., Benham T.J., Dowdeswell J.A., Grabiec M., Navarro F., Pettersson R., Moholdt G., Nuth C., Sass B., Aas K., Fettweis X., Lang C., Seehaus T., Braun M. Application of a two-step approach for mapping ice thickness to various glacier types on Svalbard. *The Cryosphere*. 2017, 11: 2003–2032. doi: 10.5194/tc-11-2003-2017.
 11. *Izuchenie meteorologicheskogo rezhima i klimaticheskikh izmeneniy v raione arhipelaga Shpitsbergen: otchet o NIR (itogoviy za 2015 g.)* The study of meteorological regime and climatic changes in Svalbard archipelago region: scientific report (concluding, 2015). Scientific Report. Scientific supervisor L.M. Savatyugin. Saint Petersburg, 2015: 187 p. (Arctic and Antarctic Research Institute Repository ID № P-6289). [In Russian].
 12. *Issledovanie mnogoletnikh izmeneniy gidrometeorologicheskogo rezhima i sostoyaniya prirodnoy srediy arhipelaga Shpitsbergen: otchet o NIR (zaklyuchitelniy za 2016 god)* The study of multiannual changes of hydro-meteorological regime and environment state of Svalbard archipelago: scientific report (concluding, 2016). Scientific Report. Scientific supervisor L.M. Savatyugin. Saint Petersburg, 2016: 204 p. (Arctic and Antarctic Research Institute Repository ID № P-6394). [In Russian].
 13. *Issledovaniya sovremennogo sostoyaniya i analiz predshestvovavshikh izmeneniy kharakteristik prirodnoy sredy arhipelaga Shpitsbergen: otchet o NIR (promezhutochniy)* The study of present-day state and the analysis of past changes of characteristics of Svalbard archipelago environment: Scientific report (progress report). Scientific Report. Scientific supervisor L.M. Savatyugin. Saint Petersburg, 2017: 237 p. (Arctic and Antarctic Research Institute Repository ID № P-6458). [In Russian].
 14. *Issledovaniya sovremennogo sostoyaniya i analiz predshestvovavshikh izmeneniy kharakteristik prirodnoy sredy arhipelaga Shpitsbergen: otchet o NIR (promezhutochniy)* The study of present-day state and the analysis of past changes of characteristics of Svalbard archipelago environment: Scientific report (progress report). Scientific Report. Saint Petersburg, 2018: 337 p. (Arctic and Antarctic Research Institute Repository ID № P-6546). [In Russian].
 15. Chernov R.A., Kudikov A.V., Vshivtseva T.V., Osokin N.I. Estimation of the surface ablation and mass balance of Eustre Grønfjordbreen (Spitsbergen). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019. 59 (1): 59–66. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-59-66>.
 16. Mavlyudov B.R., Solovyanova I.Yu. Water-ice balance of Aldegonda glacier in 2002/03. *Materialy Glatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2007, 102: 206–208. [In Russian].
 17. Solovyanova 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*. 2007: 115–120.
 18. Guskov A.S., Gordeychik A.V. Water-ice balance of Svalbard glaciers in 1975/76 balance year. *Materialy Glatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1978, 33: 207–211. [In Russian].
 19. Navarro F.J., Glazovsky A.F., Macheret Yu.Ya., 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. doi: 10.3189/172756405781812646.