

Запасы льда в ледниках на Земле Норденшельда (Шпицберген) и их изменения за последние десятилетия

© 2019 г. И.И. Лаврентьев*, А.Ф. Глазовский, Ю.Я. Мачерет, В.В. Мацковский, А.Я. Муравьев

Институт географии РАН, Москва, Россия

lavrentiev@igras.ru

Reserve of ice in glaciers on the Nordenskiöld Land, Spitsbergen, and their changes over the last decades

I.I. Lavrentiev, A.F. Glazovsky, Yu.Ya. Macheret, V.V. Matskovsky, A.Ya. Muravyev

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

lavrentiev@igras.ru

Received September 6, 2018 / Revised October 19, 2018 / Accepted December 21, 2018

Keywords: glaciers, ground-based radio-echo sounding, ice thickness and volume, Svalbard.

Summary

Data on thickness and area of 16 glaciers on the Nordenskiöld Land (Svalbard) were obtained in 1999 and 2010–2013. These data were used to determine volume of the glaciers and to establish statistical local relationship between the volume V and the area A (V - A scaling) in the form of the power function $V = cA^\gamma$, and then to calculate the total ice volume of all 202 glaciers in this area and its changes during the period since 1936 to 2002–2008. The total area of 16 glaciers was 129.9 ± 0.35 km², 14 of which had areas from 0.2 to 8.1 km². The two largest ones, the Fridtjof and the West Grenfjord, had the areas 17.5 and 47.3 km², respectively, and thus occupied about 50% (64.8 km²) of the total area of 16 glaciers. These two glaciers account for 67% of the total measured volume (10,034 km³) of the 16 glaciers. A nonlinear least-squares method was used to estimate ice reserves in all 202 glaciers from data on the volume and area of 16 glaciers. The relation between volume V and area A of the glaciers (V - A scaling) was obtained as the ratio $V = 0.03637A^{1.283}$ with 95%-th confidence intervals of the coefficients c and γ , (0.02303–0.4971) and (1.184–1.381), respectively. This made possible to calculate total volume of 202 glaciers as of 2002–2008 state using data from RGI v.6.0, and that prove to be equal to 32.89 (16.75–56.63) km³. To verify this estimation, we applied the bootstrapping method for chosen 43 glaciers and calculated the volume by means of sequential use of data for large and smaller glaciers. According to this estimate, the total volume of 202 glaciers amounted to 30.34 km³ with a 95% confidence interval of 15.42–44.27 km³, that turned out to be slightly smaller than the volume calculated by nonlinear least squares method basing on measurements on 16 glaciers. Despite the large error (on the average, from –49% to +84%) in estimating the total volume of 202 glaciers in the Nordenskiöld Land, the data obtained were used for assessment of relative changes in the total volume of glaciers in this area over different time intervals. During the period from 1936 to 1990 (54 years), the total area of all glaciers reduced from 738.1 to 546.7 km², and the total volume decreased from 49,205 to 34,857 km³. Similar results for the period 1990–2002–2008 (~15 years) are the total area changes from 546.7 to 507.9 km² and their total volume - from 34.857 to 32.890 km³. The rate of decrease of the volume for the period 1936–1990 was equal to -0.266 km³/year, for the period 1990–2002–2008 – minus 0.131 km³/year, and as a whole for the studied period (since 1936 to 2002–2008) – minus 0.236 km³/year. The average mass balance in the first period was equal to -0.372 m w.e./year, in the second one -0.224 m w.e./year, and for the whole time -0.342 m w.e./year.

Citation: Lavrentiev I.I., Glazovsky A.F., Macheret Yu.Ya., Matskovsky V.V., Muravyev A.Ya. 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]. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-23-38.

Поступила 6 сентября 2018 г. / После доработки 19 октября 2018 г. / Принята к печати 21 декабря 2018 г.

Ключевые слова: ледники, наземное радиозондирование, толщина и объём льда, Шпицберген.

Приведены результаты наземных радиолокационных измерений в 1999 и 2010–2013 гг. толщины и объёма 16 ледников на Земле Норденшельда (Шпицберген) с применением статистической связи между объёмом и площадью ледников. Оценены запасы льда во всех 202 ледниках этого района и их изменения за последние десятилетия с использованием данных о площади ледников по состоянию на 1936, 1990, 2002–2008 гг. и на годы радиолокационных измерений.

Введение

В настоящее время данные об объёме ледников имеются для 362 (около 0,2%) из более чем 200 тыс. ледников на земном шаре [1]. Согласно оценкам IPCC [2], их общий вклад в повышение

уровня Мирового океана за 1993–2010 гг. составил 27%. По сценариям изменения климата на период 2006–2100 гг. этот вклад составит 155 ± 41 мм (RCP 4.5) или 216 ± 44 мм (RCP 8.5) (29 и 41% соответственно) [3], тогда как применение других климатических моделей [4] увеличивает эту оцен-

ку до 247,3 мм. Заметный разброс в этих величинах указывает на необходимость более точной оценки запасов льда в ледниках и их возможных изменений при разных сценариях изменения климата. Для решения этой задачи необходимы массовые данные о толщине и объёме ледников.

Один из возможных путей её решения — применение косвенных методов, использующих статистическую связь между измеренным объёмом ледников V и их измеренной площадью A (A – V скейлинг) [5–7], а также применение физически обоснованных моделей, связывающих распределение толщины и объёма ледников с их геометрией, динамикой, балансом массы, скоростью движения [8, 9] и другими гляциоклиматическими параметрами [4]. Эта задача актуальна и для архипелага Шпицберген (Свальбард), где насчитывается 1615 ледников общей площадью около 33 922 км² [10]. Их объём, оценённый с применением метода A – V скейлинг, по данным измерений на 60 ледниках, равен 6700 ± 835 км³, а вклад в повышение уровня моря составляет 17 ± 2 мм [11], что согласуется с оценкой $17 \pm 4,6$ мм по данным [4]. Однако применение имеющихся глобальных [12] и региональных [11] статистических связей между объёмом и площадью ледников может давать заметные ошибки при оценке запасов льда в ледниках в отдельных районах оледенения, так как при этом не учитываются морфологические и другие особенности ледников [11, 13].

В настоящей статье с помощью статистических методов мы оцениваем запасы льда во всех 202 ледниках на Земле Норденшельда на архипелаге Шпицберген и их изменения за последние десятилетия. Для этого используются наши и опубликованные ранее [14, 15] следующие данные: площадные наземные радиолокационные измерения 1999 и 2010–2013 гг.; толщина и объём 16 ледников в этом районе; наземные и воздушные измерения 1970–80-х годов 60 ледников в этом и других районах архипелага [11], их площади на год измерений и материалы космических съёмки 2002–2008 гг. [16] и аэрофото съёмки 1936 и 1990 гг. [18]. Учитывая заметное сокращение площади ледников Свальбарда за последние десятилетия [17], мы также используем космические снимки для определения площади и уточнения объёма ледников на Земле Норденшельда на год радиолокационных измерений.

Связь между объёмом и площадью ледников

Связь между объёмом V и площадью A ледников в виде показательной функции

$$V = cA^\gamma \quad (1)$$

с коэффициентами $c = 0,027$ и $\gamma = 1,5$ была предложена Н.В. Ерасовым в 1968 г. [19] для оценки объёма ледников долинного типа в Джунгарском Алатау в предположении параболического сечения их подлёдных долин. Возможность использования подобной зависимости, но с другими коэффициентами (a и γ) для оценки объёма ледников разных морфологических типов доказана теоретически [6]. Для 144 ледников из разных районов горного и полярного оледенения было предложено использовать показатель степени $\gamma = 1,36$ и коэффициент $c = 0,03$ (при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,9684$). Однако показатель степени γ может быть принят равным 1,375, если коэффициент c определять с учётом региональных и морфологических особенностей ледников, климатических параметров, времени и числа ледников в выборке [7]. По данным разных авторов [3, 12, 20], коэффициент c может изменяться от 0,0285 до 0,0538, а величина показателя степени γ — от 1,20 до 1,375.

Проще всего коэффициенты c и γ по формуле (1) вычисляются с применением стандартной программы Excel, позволяющей также оценить тесноту связи вычисленных и измеренных объёмов по величине коэффициента детерминации R^2 . В логарифмическом масштабе разность этих объёмов определяется соотношением [6]

$$\text{logmse}p = \sum (\log[V_{\text{model}(p,i)}] - \log(V_{\text{obs},i}))^2, \quad (2)$$

где n — число ледников; $V_{\text{model}(p,i)}$ — объёмы, предсказанные уравнением A – V связи с набором параметров p ; $V_{\text{obs},i}$ — наблюдаемые объёмы ледников в используемой базе данных.

Это уравнение очень чувствительно к выбору калибровочных ледников с измеренным объёмом [12]. Тесноту связи также характеризует наименьшее абсолютное отклонение (absdev) модельных $V_{\text{model}(p,i)}$ и измеренных $V_{\text{obs},i}$ объёмов, которое минимизирует их отличие в выбранном наборе ледников [12]:

$$\text{absdev}p = \sum [|V_{\text{model}(p,i)} - V_{\text{obs},i}| / (A_{\text{obs},i})^{1/2}], \quad (3)$$

где $A_{\text{obs},i}$ — измеренная площадь каждого ледника.

Эта функция взвешивается путём извлечения квадратного корня из площади, что уменьшает вклад более крупных ледников, выбранных для калибровки в предположении, что переменные A_i ($i = 1, \dots, n$), c и γ распределены случайно и независимы друг от друга [11]. Ошибка определения объёма ледника δV может быть оценена по формуле [11]

$$\delta V^2 = (\partial V/\partial c)^2 \delta c^2 + (\partial V/\partial \gamma)^2 \delta \gamma^2 + \sum (\partial V/\partial A_i)^2 \delta A_i^2 = \sum (A_i^\gamma)^2 \delta c^2 + (\sum c A_i^\gamma \log A_i)^2 \delta \gamma^2 + \sum (c \gamma A_i^{\gamma-1})^2 \delta A_i^2, \quad (4)$$

где δc , $\delta \gamma$ и δA_i представляют собой ошибки определения коэффициентов c и γ и площади ледников A в уравнении (1).

Суммарный объём ледников методом $A-V$ скейлинг вычисляется как

$$V_\Sigma = \sum c A^\gamma. \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) следует, что ошибка определения суммарного объёма ледников в исследуемом районе зависит от их общего числа, числа ледников с измеренным объёмом и площадью, распределения их площади, ошибок определения коэффициентов c и γ , а также площади ледников A . Для оценки ошибки и достоверности определения коэффициентов c и γ , а также общего объёма ледников по корреляционной связи между объёмом и площадью ледников мы применили нелинейный метод наименьших квадратов [21], реализуемый в программах MATLAB и Solver Excel, который в отличие от алгоритма, используемого в стандартной программе Excel, позволяет определить не только коэффициент детерминации R^2 , но и доверительные интервалы коэффициентов c и γ в уравнении (1). Минимизация суммы квадратов разности между реальными значениями и их аппроксимацией достигается постепенным итеративным изменением параметров.

Ледники на Земле Норденшельда

Земля Норденшельда расположена на западе острова Шпицберген между Ис-фьордом и Ван-Майен-фьордом ($77^\circ 45' - 78^\circ 20'$ с.ш., $13^\circ 50' - 17^\circ 10'$ в.д.). Согласно Каталогу ледников Randolph Glacier Inventory [16], в этом районе насчитывается 202 ледника общей площадью $507,9 \text{ км}^2$. Положение их границ [16] по состоянию на 2002–2008 гг. показано на рис. 1. Лед-

ники на Земле Норденшельда располагаются в высотном диапазоне $0 - 1196 \text{ м}$ и имеют площадь от $0,079$ до $50,408 \text{ км}^2$ (средний размер $2,515 \text{ км}^2$) [16]. Большинство ледников оканчиваются на суше, имеют площадь более $0,5 \text{ км}^2$ и длину от 2 до $11,5 \text{ км}$, относятся к ледникам долинного типа. Лишь один, самый крупный ледник Фритъоф длиной около 13 км оканчивается в море и относится к ледникам пульсирующего типа. Его последняя подвижка наблюдалась в 1990-х годах и продолжалась семь лет [22].

Аппаратура, методика измерений и интерпретация данных радиозондирования. Большинство измерений на ледниках выполнено с применением локаторов ВИРЛ-6 и ВИРЛ-7 [23] с центральной частотой 20 МГц , длительностью зондирующего импульса около 25 нс и периодом дискретизации $2,5 \text{ нс}$. Для излучения и приёма использовались резистивно-нагруженные диполи длиной $5,6 \text{ м}$. С целью уменьшения фона помех в ближней зоне расстояние между центрами передающей и приёмной антенн составляло $16 - 18 \text{ м}$. Все используемые в 1999 и 2010–2013 гг. локаторы были снабжены системой цифровой регистрации радарных и GPS-данных с интервалом $1 - 2 \text{ м}$ с точностью плановой привязки с помощью GPS около 5 м . Передающее и приёмно-регистрирующее устройства монтировались на санях, которые транспортировали по леднику снегоходом со скоростью $10 - 20 \text{ км/ч}$. Для синхронизации излучённых и принятых сигналов применялся оптоволоконный кабель. Положение профилей наземного радиозондирования ледников на Земле Норденшельда показано на рис. 2. Общая длина профилей измерений составила 547 км .

Визуализация и обработка радарных данных. Для визуализации и последующей обработки радарных данных использовался разработанный компанией Deco Geophysical пакет программ Radex Pro [24] с применением модулей Amplitude Correction, Bandpass Filtering, Apply Statics, Picking и Stolt-FK Migration. Первые два модуля служили для лучшей визуализации радарных записей, модуль Apply Statics – для введения статической поправки в начало зондирующих импульсов и учёта изменения высоты поверхности ледника вдоль профиля измерений, модуль Picking – для оцифровки (пикирования) в ручном или полуавтоматическом режиме времени запаздывания отражённых от ложа сигнала-

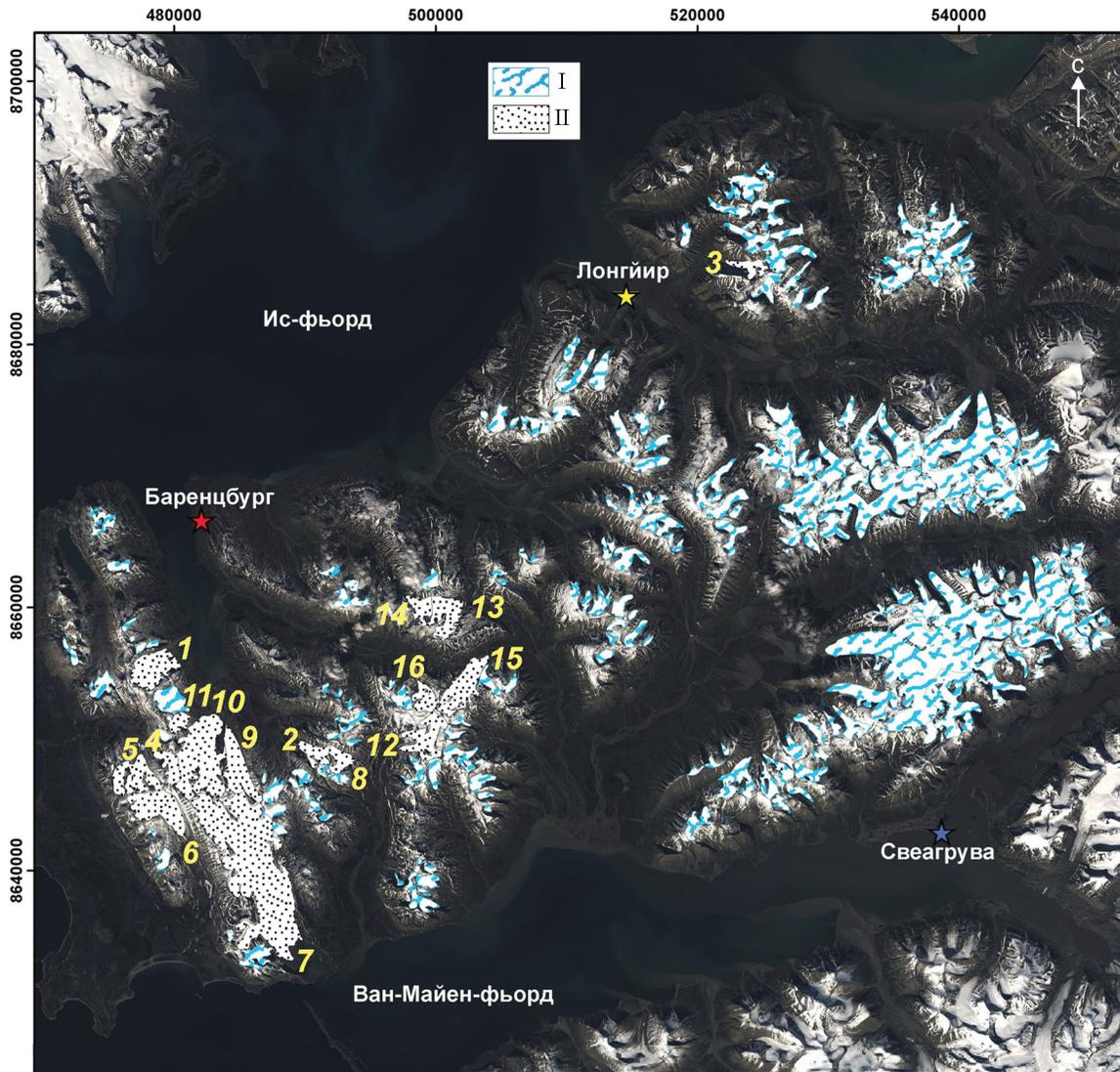


Рис. 1. Ледники на Земле Норденшельда, Шпицберген.

I – контуры ледников по состоянию на 2002–2008 гг. по данным Мирового каталога ледников RGI v.6.0. [16]; II – контуры ледников, на которых в 1999 и 2010–2013 гг. проводились наземные радиолокационные измерения. На рис. 1, 2, 4 номерами обозначены ледники: 1 – Альдегонда; 2 – Баалсруд; 3 – Блекум; 4 – Восточный Дальфонна; 5 – Западный Дальфонна; 6 – Эрдман; 7 – Фриттьоф; 8 – Гледичфонна; 9 – Восточный Грёнфьорд; 10 – Западный Грёнфьорд; 11 – Западное Поле (бывшая часть ледника Западный Грёнфьорд); 12 – Марстандер; 13 – Восточный Пассфьелль; 14 – Западный Пассфьелль; 15 – Тавле; 16 – Тунге. На рис. 1, 2, 4 прямоугольные координаты пересчитаны для проекции UTM Зона 33

Fig. 1. Glaciers in Nordenskiöld Land, Svalbard.

I – Glacier outlines for 2002–2008 are shown according to Randolph Glacier Inventory (RGI), v. 6.0. [16]; II – Glacier outlines for the years of GPR measurements made in 1999 and 2010–2013. Numbers on Fig 1, 2, and 4 indicate: 1 – Aldegondabreen; 2 – Baalsrudbreen; 3 – Blekumbreen; 4 – Austre Dahlfonna; 5 – Vestre Dahlfonna; 6 – Erdmanbreen; 7 – Fridtjovbreen; 8 – Gleditschfonna; 9 – Austre Grøn fjordbreen; 10 – Vestre Grøn fjordbreen; 11 – Vestre Field (former part of Vestre Grøn fjordbreen); 12 – Marstranderbreen; 13 – Austre Passfjellbreen; 14 – Vestre Passfjellbreen; 15 – Tavlebreen; 16 – Tungebreen. Rectangular coordinates are recalculated for UTM Zone 33 projection

лов относительно начала зондирующих импульсов, модуль Stolt-FK Migration – для миграции радарных записей с применением Фурье-анализа, позволяющего уточнить толщину льда и геометрию ложа за счёт коррекции глубины и поло-

жения боковых отражений. Пример полученных радарных записей приведён на рис. 3.

Отражения от ложа показывают общую толщину ледника h_{Σ} , глубина CTS – толщину холодного льда h_{cold} , а разность толщин h_{Σ} и h_{cold}

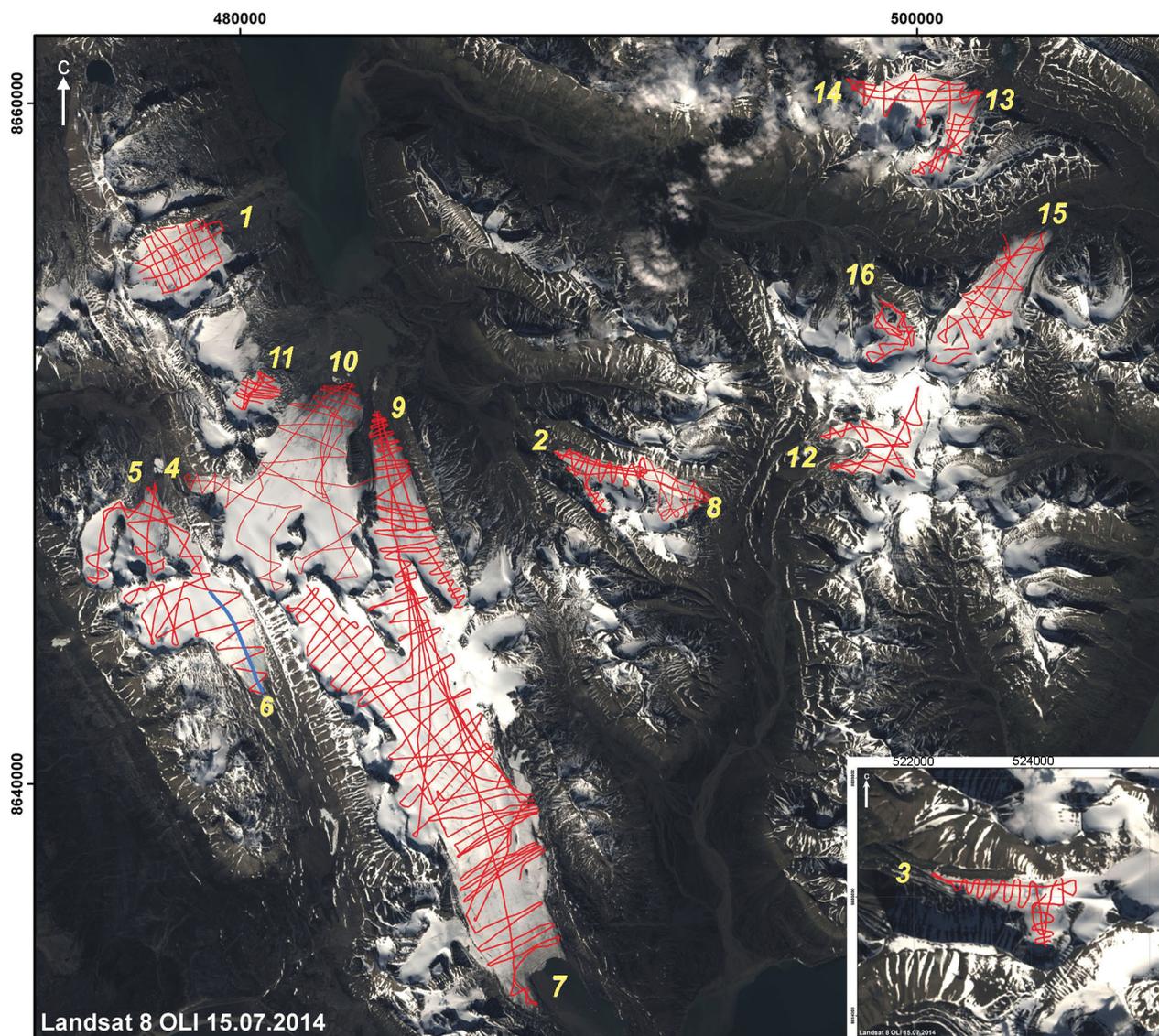


Рис. 2. Профили наземных радиолокационных измерений в 1999 и 2010–2013 гг. на ледниках Земли Норденшельда (красные линии)

Fig. 2. Profiles of ground-based GPR measurements in 1999 and 2010–2013 on Nordenskiöld Land glaciers (red lines)

представляет собой толщину тёплого льда h_{temp} . В этой статье мы используем данные радиозондирования только для определения общей толщины h_{Σ} и общего объёма V_{Σ} ледников.

Толщина и объём ледников. Методика определения общей толщины и объёма ледников по данным радиозондирования с применением моноимпульсных локаторов детально рассмотрена в работах [14, 23], а точность их определения – в работах [25–27]. На мигрированных с учётом геометрии поверхности радарных записях (см. рис. 3, б) в точках с измеренными GPS-координатами (x , y) измерялось время запаздывания τ_B отражений

от ложа и вычислялась общая толщина ледника h_{Σ} при одной и той же средней скорости распространения радиоволн $v_{cp} = 168$ м/мкс, соответствующей скорости распространения радиоволн в плотном холодном льду с плотностью 917 кг/м³. Общая толщина ледника h_{Σ} с учётом расстояния x_0 между передающей и приёмной антеннами находилась из соотношения

$$h_{\Sigma} = [(v_{cp}\tau_B/2)^2 - (x_0/2)^2]^{1/2}, \quad (6)$$

где v_{cp} – средняя скорость распространения радиоволн во всей толще холодного и тёплого льда; τ_B – время запаздывания отражений от ложа.

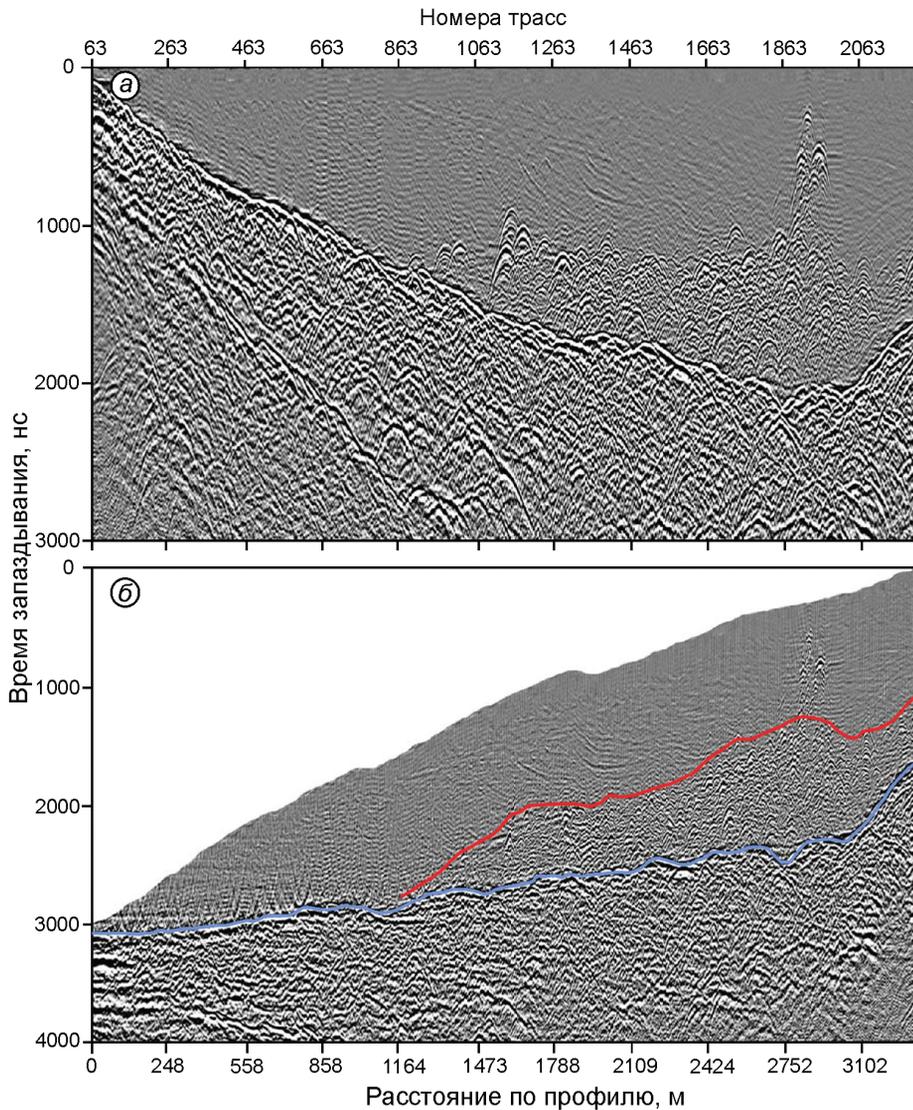


Рис. 3. Исходная радарограмма (а), полученная вдоль продольного профиля ледника Эрдман, и она же (б), но мигрированная с учётом изменения высоты поверхности ледника вдоль профиля изменений. Красная линия показывает границу раздела холодного и тёплого льда, синяя линия – ложе ледника. Положение профиля дано синим цветом на рис. 2

Fig. 3. Initial radargram (a) obtained along longitudinal profile of Erdmanbreen and the same record (b) but migrated and counting the glacier surface elevation changes along radar profile. Red line shows the boundary between cold and temperate ice, and blue line shows the radar reflections from bedrock. Location of the transect is given at Fig. 2

Если толщина льда в 7–20 раз превышает расстояние x_0 между антеннами, то для её вычисления с погрешностью 1–0,1% вместо формулы (6) можно применять более простое соотношение [25]:

$$h_{\Sigma} = v_{cp} \tau_B / 2. \quad (7)$$

При вычислении общей толщины h_{Σ} холодных и политермических ледников в областях абляции и аккумуляции обычно используют одну среднюю скорость распространения радиоволн v_{cp} . Это, по оценкам [25], приводит к ошибкам в средней скорости до 5% ($\pm 8,4$ м/мкс), переоценке локальной толщины льда в области абляции и её недооценке в области аккумуляции за счёт слоя снега и фирна и вариаций его толщины, плотности и влажности. В нашем случае ошибки в скорости за счёт вариаций влажности снега

и фирна можно не учитывать, так как измерения выполнялись до начала таяния на ледниках, когда вся снежно-фирновая толща до глубины 15–20 м имела отрицательные температуры [23]. В политермических ледниках средняя скорость v_{cp} зависит также от соотношения толщины холодного h_{cold} и тёплого h_{temp} льда и скорости распространения радиоволн в холодном v_{cold} и тёплом льду v_{temp} и содержания воды в тёплом льду.

В работе [15] для вычисления общей толщины ледников средняя скорость распространения радиоволн v_{cp} принималась равной 166–170 м/мкс в зависимости от географического положения ледника, его средней толщины, термической структуры (холодной или политермической) и имеющихся данных измерений v_{cp} . Для наших вычислений мы использовали постоянную скорость

$v_{cp} = 168$ м/мкс, что могло приводить к ошибкам измерения средней толщины ледников $\pm 3 \div 10$ м.

Результаты

Площадь, толщина и объём ледников. Для определения границ и площади ледников мы использовали космические снимки Landsat, полученные в год проведения наших радиолокационных измерений. По этой причине определённые нами границы ледников (см. рис. 2) и их площади отличаются от указанных в Каталогах

ледников Randolph Glacier Inventory (RGI, v. 3.2 и v. 6.0) [16] и приведённых ранее в работах [14, 15] по состоянию на 2002–2008 гг.

Для построения карт толщины ледников использовались данные измерений h_z вдоль профилей зондирования и точки на краях ледников, где толщина льда $h_o = 0$. В результате создавалась регулярная сеть точек на всей площади ледника и, используя инструмент *Toro to Raster* в программной среде ESRI ArcGIS, строились соответствующие карты (рис. 4) и вычислялся объём ледников. Правильность построения карт толщины ледников с учётом возможных ошибок идентификации

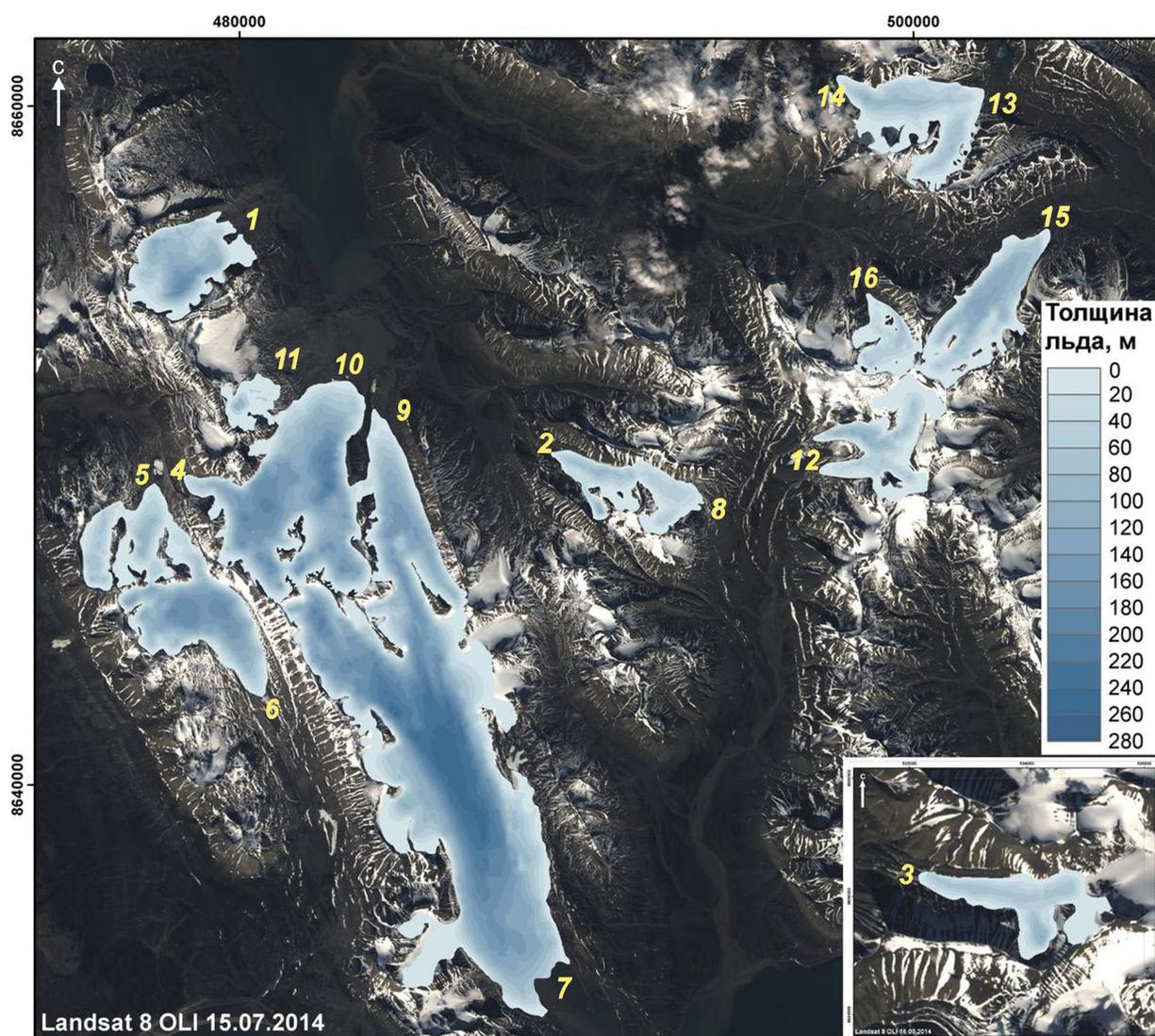


Рис. 4. Толщина ледников на Земле Норденшельда в пределах их границ на год радиолокационных измерений в 1999 и 2010–2013 гг. (табл. 1)

Fig. 4. Ice thickness of Nordenskiöld Land glaciers and their boundaries in year of ground-based GPR measurements in 1999, 2010–2013 (Table 1)

Таблица 1. Площадь A , объём V , средняя H_{mean} и максимальная H_{max} толщина ледников на Земле Норденшельда по данным наземного радиозондирования 1999 и 2010–2013 гг.*

Ледник, год измерений	Площадь A , км ²	Объём V , км ³	H_{mean} , м	H_{max} , м	Площадь ледников, км ²		
					2017 г.	1990 г.	1936 г.
Альдегонда, 1999	6,86±0,23** 7,18±0,29	0,424±0,042 0,468±0,031	61 65±7	188 191±25	5,25±0,09	7,67	10,6
Баалсруд, 2013	2,61±0,17 2,70±0,11	0,090±0,009 0,077±0,04	33 28±3	108 98±5	2,11±0,08	3,28	4,2
Блекум, 2013	2,10±0,16 2,16±0,09	0,069±0,007 0,083±0,06	32 38±4	106 106±5	1,74±0,05	2,38	3,13
Дальфонна Восточная, 2010	2,84±0,17 2,55±0,10	0,195±0,019 0,184±0,012	81 72±7	191 189±5	2±0,05	2,86	3,97
Дальфонна Западная, 2012	6,23±0,34 6,92±0,28	0,198±0,02 0,259±0,025	31 37±5	103 151±6	5,32±0,13	7,7	9,94
Эрдман, 2012	8,14±0,24 8,96±0,36	0,753±0,075 0,823±0,041	91 92±9	190 190±5	7,84±0,09	9,75	12,71
Фритьюф, 2010	47,31±1,01 50,37±2,01	5,085±0,5 5,433±0,246	106 108±10	266 265±16	43,21±0,41	46,39	55,89
Гледичфонна, 2011	2,26±0,12 2,76±0,11	0,059±0,006 0,076±0,005	26 27±3	64 79±4	1,71±0,05	3,34	4,45
Грэнфьорд Восточный, 2010	7,59±0,27 8,41±0,34	0,570±0,057 0,671±0,046	74 80±8	160 162±5	6,51±0,09	8,88	11,69
Грэнфьорд Западный, 2010	17,58±0,43 18,09±0,72	1,617±0,161 1,775±0,094	94 98±9	214 215±5	16,2±0,17	19	24,21
Западное поле***, 2010	1,79±0,12	0,020±0,002	11	—	1,24±0,03	—	—
Марстандер, 2013	6,24±0,32 6,92±0,55	0,180±0,018 0,233±0,017	29 34±4	122 125±4	5,04±0,15	7,25	9,36
Пассфьелль Восточный, 2013	5,46±0,29 5,13±0,41	0,181±0,018 0,198±0,015	33 39±4	87 87±5	4,08±0,12	5,19	6,27
Пассфьелль Западный, 2013	2,51±0,14 2,32±0,19	0,09±0,009 0,103±0,007	37 44±5	106 108±5	1,22±0,04	2,47	3,21
Тавле, 2010	7,47±0,30 8,02±0,32	0,400±0,04 0,426±0,019	53 53±5	131 128±3	6,71±0,12	8,62	10,37
Тунге, 2011	2,91±0,18 2,88±0,12	0,069±0,007 0,088±0,12	25 32±3	87 88±5	2,38±0,09	2,96	4,51
Всего	129,9±0,35 128,24	10,034±0,034 10,902			128,56±0,14	137,74	174,51

*Площади ледников A приведены на год радиолокационных измерений, а также по состоянию на 2017, 1990 и 1936 гг. [18]. **Жирный шрифт – данные наших измерений, обычный – данные из работы [15]. ***Данные об этом леднике, отделившемся после 2007 г. от ледника Западный Грэнфьорд, в работе [15] не приводятся. Прочерки – нет данных.

отражений от ложа и ошибок измерений времени запаздывания τ_B этих отражений контролировалась путём сравнения измеренных толщин h_Σ в точках пересечения радарных профилей. В нашем случае различие не превышало ± 5 м. Данные наших и предыдущих измерений площади, объёма, средней H_{mean} и максимальной H_{max} толщины ледников на Земле Норденшельда, а также определения площади ледников на год радиолокационных измерений по состоянию на 2017, 2002–2008 [16], 1990 и 1936 гг. [18] приведены в табл. 1.

Границы ледников при дешифрировании определялись в соответствии с правилами

GLIMS [28]. Площадь ледников находилась по результатам ручного дешифрирования спутниковых снимков Landsat-5, -7, -8 (для 1999, 2010–2013 гг.) в видимом диапазоне с разрешением 30 м (синтезированное изображение) и снимков SENTINEL-2 для 2017 г. с разрешением 10 м. Панхроматический канал снимков Landsat (для 2010–2013 гг.) с пространственным разрешением 15 м мы использовали с целью повышения качества дешифрирования границ ледников там, где это было возможно. Для оцифрованных границ ледников в виде полигональных шейп-файлов создавалась буферная зона шириной 1 пиксел от

разрешения конкретного космического снимка: для Landsat – это 30 м, для SENTINEL-2 – 10 м. Погрешность определения площади ледников предполагалась равной $\pm 1/2$ площади буферной зоны (или \pm периметр ледника, умноженный на половину разрешающей способности снимка) и в среднем составляла 5% для площадей, определённых по снимкам Landsat и 2% для площадей по снимкам Sentinel-2.

По другим оценкам эта погрешность, как правило, выше – в среднем от 4,53 [14] до 8% [18]. Расхождение наших данных по площади, средней и максимальной толщине и общем объёме ледников с данными [15] и Каталогом ледников RGI, v.3.2, 6.0 [16], могут быть объяснены в основном изменением площади ледников за период с 2007 по 2010–2013 гг., поскольку площадь ледников определялась нами в пределах границ, оцифрованных по космическим снимкам, полученным в год проведения радиолокационных измерений, тогда как в работах [13, 15] площадь ледников взята из Каталога RGI, v.3.2 и приведена к состоянию на 2007 г. В Каталоге RGI (v.3.2) также в основном использованы снимки 2002–2008 гг., хотя по данным наших измерений за последующие годы площадь ледников на Земле Норденшельда заметно сократилась (см. табл. 1). Особенно это касается ледников Дальфонна Западный, Дальфонна Восточный, Эрдман, Грэнфьорд Восточный и Грэнфьорд Западный, площадь которых сократилась на 0,5–0,8 км², а ледника Фритьюф – почти на 3 км². После 2007 г. (см. рис. 3, а) от ледника Западный Грэнфьорд отделилась его западная часть (Западное поле) (см. рис. 2 и табл. 1) площадью около 1,8 км². В целом площадь 16 ледников с 1990 по 2002–2008 гг. сократилась на 47,6 км².

Другой причиной расхождений может быть разный метод интерполяции данных измерений толщины льда в регулярную сеть с целью построения карт общей толщины ледников и толщины холодного льда: мы использовали аппроксимацию ANUDEM (инструмент Торо to Raster), тогда как в работе [15] применялся метод анизотропного простого кригинга со сферической вариограммой. Ещё одна причина – ошибки, связанные с идентификацией отражений и определением времени запаздывания отражения от ложа. С учётом этих возможных ошибок мы оцениваем погрешность измерений средней толщины ледни-

ков ($\pm 3 \div 10$ м) и их общего объёма величиной, близкой к приведённой в работе [15] (см. табл. 1).

Связь между объёмом и площадью ледников на Земле Норденшельда. Для 16 ледников связь между объёмом и площадью, оценённая нелинейным методом наименьших квадратов, определяется соотношением $V = cA^\gamma$ в следующем виде:

$$V = 0,03637A^{1,283}. \quad (8)$$

Здесь 95%-е доверительные интервалы коэффициентов c и γ равны соответственно $0,02303 \div 0,04971$ и $1,184 \div 1,381$. По этим коэффициентам суммарный объём 202 ледников с площадями по данным RGI 6.0 [16] составляет 32,89 км³ с нижней и верхней оценкой 95%-го интервала достоверности соответственно 16,75 и 56,63 км³. Для 15 ледников, по данным [15], связь между их объёмом и площадью определяется соотношением

$$V = 0,04097A^{1,249}, \quad (9)$$

Здесь 95%-е доверительные интервалы коэффициентов c и γ равны соответственно $0,02537 \div 0,05657$ и $1,148 \div 1,35$, и суммарный объём 202 ледников составляет 34,31 (12 \div 59,8) км³. Связь между измеренным объёмом V и измеренной площадью 15 и 16 ледников описывается близкими показательными функциями с близкими доверительными интервалами (рис. 5).

Для сравнения на рис. 6 приведены «региональные» (для всего архипелага Шпицберген) и «локальные» (для Земли Норденшельда) зависимости объёма ледников от площади. Региональная зависимость между объёмом V и площадью A ледников получена для 60 ледников с использованием алгоритмов (2) и (3) и описывается соотношением [11]:

$$V_1 = 0,0343A^{1,329}; \quad (10)$$

$$V_2 = 0,0454A^{1,264}. \quad (11)$$

Общий объём 202 ледников, оценённый по формулам (10) и (11), составляет соответственно 34,49 и 39,31 км³. При этом 60 калибровочных ледников оказалось достаточно, чтобы с использованием этих соотношений оценить запасы льда примерно в 1500 ледниках Шпицбергена с погрешностью около 19 и 14% [15].

Для Земли Норденшельда такие данные имеются только для 16 ледников, поэтому, согласно модельным расчётам [29], погрешность оцен-

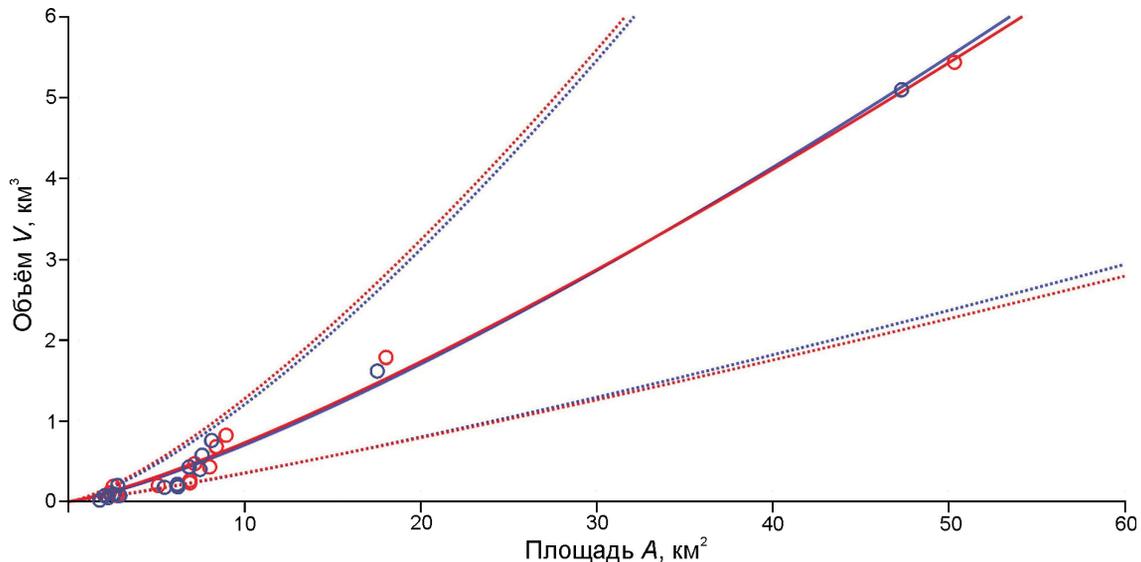


Рис. 5. Связь между объёмом V (км^3) и площадью A (км^2) ледников на Земле Норденшельда (сплошная линия) и её верхний и нижний 95%-е доверительные интервалы (пунктирная линия).

Синим цветом показаны данные по 16 ледникам (включая Западное поле), красным цветом – данные [15] для 15 ледников (исключая Западное поле)

Fig. 5. The relationship between volume V (км^3) and area A (км^2) of Nordenskiöld Land glaciers (solid line) and its upper and lower 95% confidence intervals (dotted line).

Blue shows data on 16 glaciers (including the Western Field), red – data [15] for 15 glaciers (excluding the Western Field)

ки запасов льда в ледниках возрастает до 80% и выше. Чтобы уменьшить погрешность оценки общего объёма всех 202 ледников на Земле Норденшельда с применением локальных зависимостей (8) и (9) объёма от площади ледников, мы оценили, насколько величины и достоверность коэффициентов c и γ в уравнении (1) зависят от числа ледников и площади самых крупных ледников с измеренным объёмом и площадью. В нашем случае к ним относятся только два ледника (см. табл. 1) – Западный Грэнфьорд и Фритьоф, имеющие площадь соответственно около 17 и 47 км^2 . Поэтому для оценки запасов льда в 202 ледниках на Земле Норденшельда из списка в 60 ледников этого и других районов архипелага Шпицберген, приведённого в работе [11], мы более осторожно выбрали 43 ледника – 31 крупный площадью более 20 км^2 и 12 меньшего размера. Мы не включили в них ледники, объём которых был вычислен по данным наземных и воздушных измерений толщины льда вдоль одного или нескольких профилей с визуальной привязкой к картам 1936 г. Норвежского Полярного института масштаба 1:100 000 в предположении параболического поперечного сечения ледников [30, 31] и по расчётным данным для ледника Хорнбреен, так

как предполагали, что объём ледников по этим данным определён с большой погрешностью. Для набора из 43 ледников связь между их объёмом и площадью принимает следующий вид:

$$V = 0,01885A^{1,4875}. \quad (12)$$

Здесь 95%-е доверительные интервалы коэффициентов c и γ равны соответственно $0,00836 \div 0,02934$ и $1,371 \div 1,604$, а суммарный объём 202 ледников составляет 28,08 км^3 , 95%-й доверительный интервал – $9,29 \div 69,71 \text{ км}^3$. Полученное уравнение (12) даёт несущественную ошибку при оценке суммарного объёма 16 измеренных ледников (1,1%). Используемые нами региональные и локальные связи между объёмом и площадью ледников приведены в табл. 2 и показаны на рис. 6.

Для определения погрешности оценки общего объёма 202 ледников мы применили метод бутстрэппинга [32], так как предыдущие оценки не учитывали разный вклад мелких и крупных ледников и давали очень высокие погрешности, достигающие, а иногда и превышающие 100% [29]. Для этого выбранные 43 ледника были произвольно разбиты на две группы – 31 ледник площадью меньше 20 км^2 и 12 более крупных ледников.

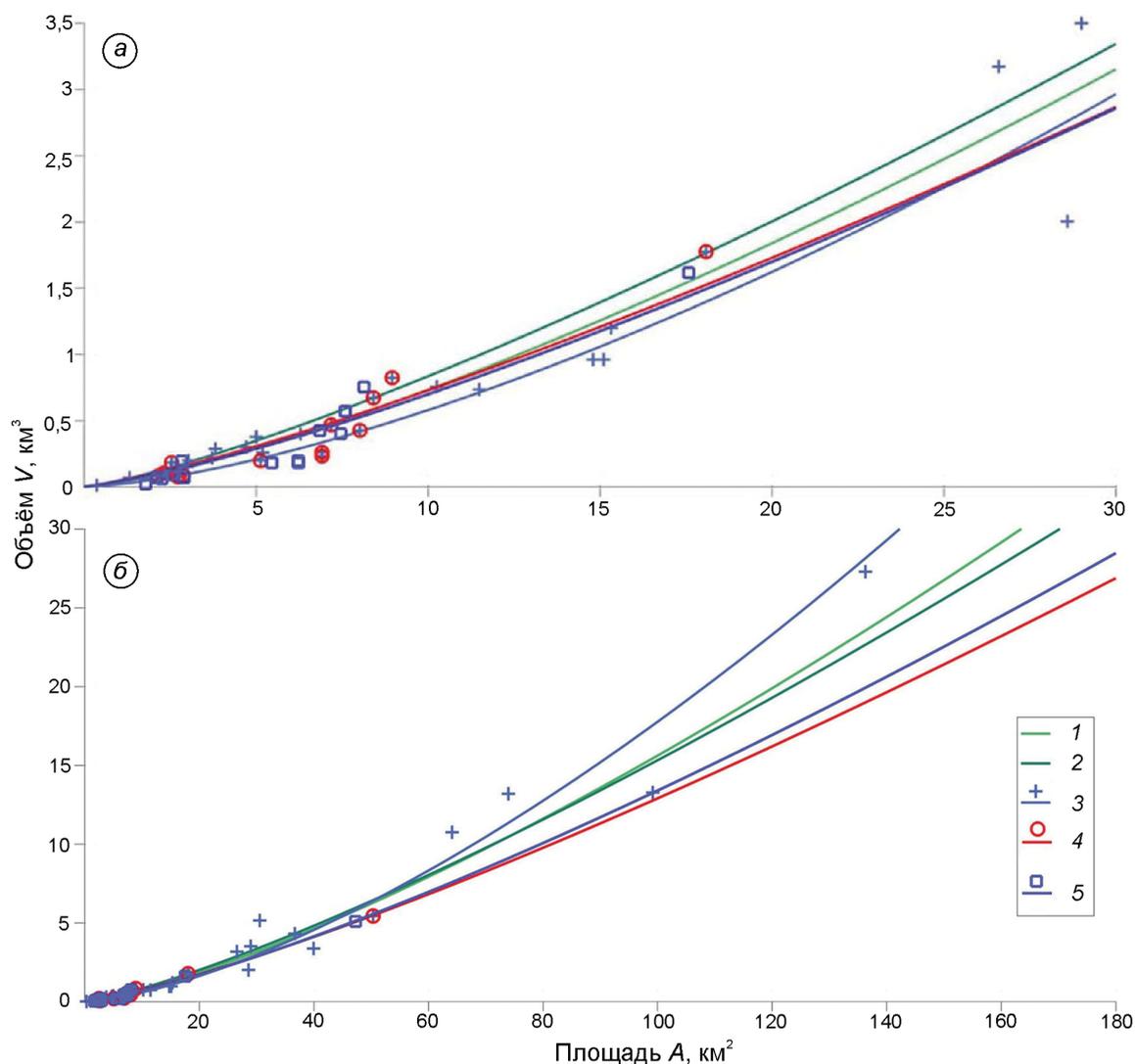


Рис. 6. Зависимость объёма ледников V от площади A :

ледники с прямыми измерениями объёма на Земле Норденшельда (а) и другие ледники Шпицбергена площадью более 17 km^2 (б); 1 и 2 – «региональные» зависимости (10) и (11), полученные для 60 ледников [11]; 3 – «региональная» зависимость (12), построенная по 43 ледникам; 4 – «локальная» зависимость (9) для 15 ледников по данным [14]; 5 – «локальная» зависимость (8) по данным этой работы для 16 ледников

Fig. 6. Dependence of glacier volume V on area A :

glaciers with direct measurements of volume in Nordenskiöld Land (a), and on other Spitsbergen glaciers with an area of more than 17 km^2 (b); 1 and 2 – regional dependencies (10) and (11) obtained for 60 glaciers [11]; 3 – regional dependence (12), constructed from 43 glaciers; 4 – local dependence (9) for 15 glaciers according to data from [14]; 5 – local dependence (8) according to this work for 16 glaciers

Для расчёта коэффициентов связи A – V брали все ледники площадью меньше 20 km^2 и добавляли всевозможные комбинации крупных ледников – сначала по одному, потом по два и т.д., вплоть до всех 12 крупных ледников, что давало 4095 комбинаций. Для каждой комбинации нелинейным методом наименьших квадратов рассчитывали коэффициенты уравнения связи A – V , и на его основе вычисляли общий объём всех 202 ледников

на Земле Норденшельда. С применением метода бутстрэппинга объём оценён равным $30,42 \text{ km}^3$ с 95%-м доверительным интервалом $15,4 \div 44,3 \text{ km}^3$ (рис. 7, а). Дополнительно был проведён аналогичный эксперимент, но с полным набором крупных ледников и подвыборкой меньшей площади. В результате 27 000 расчётов дали узкий 95%-й доверительный интервал – $27,5 \div 28,4 \text{ km}^3$ (см. рис. 7, б), что ещё раз подтвердило наши предпо-

Таблица 2. «Региональные», формулы (10)–(12), и «локальные», формулы (8) и (9), связи между объёмом V и площадью A ледников Свальбарда и на Земле Норденшельда

Район	Ледники	Число ледников	Связь между объёмом V и площадью A ледников (номер формулы)	Источник	Суммарный объём 16 измеренных ледников по формуле связи*, км ³	Суммарный объём 202 ледников по формуле связи, км ³
Свальбард	Все ледники за исключением ледниковых куполов на Северо-Восточной Земле	60	$V_1 = 0,0343A^{1,329}$ (10) $V_2 = 0,0454A^{1,264}$ (11)	[11]	11,20 12,26	34,49 39,31
	Включая 31 крупный ледник площадью более 20 км ² и 12 ледников меньшей площади	43	$V = 0,01885A^{1,4875}$ (12)	Настоящая статья	10,01	28,08
Земля Норденшельда	Горные	15	$V = 0,04097A^{1,249}$ (9)	[15]	10,59	34,31
		16**	$V = 0,03637A^{1,283}$ (8)	Настоящая статья	10,38	32,89

*Измеренный объём равен 10,034 км³. **Включая Западное поле.

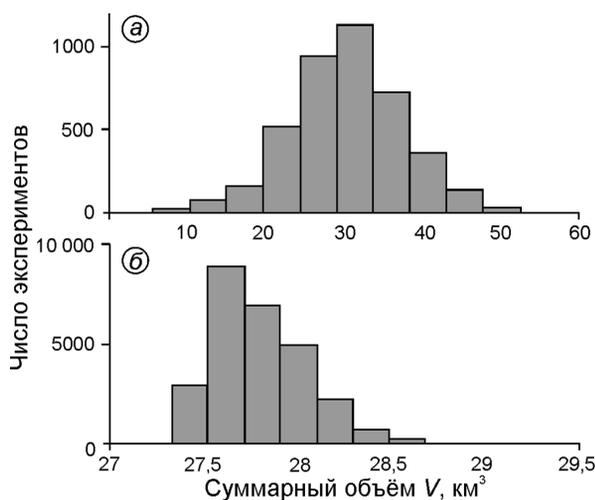


Рис. 7. Распределение результатов расчёта суммарного объёма 202 ледников с помощью процедуры бутстрэппинга:

a – с включением всех ледников площадью менее 20 км² и с различными поднаборами крупных ледников; b – с включением всех крупных ледников и с различными поднаборами ледников площадью менее 20 км²

Fig. 7. Distribution of the results of the calculation of the total volume of 202 glaciers using the bootstrapping procedure: a – with the inclusion of all glaciers with an area of less than 20 km² and with various subsets of large glaciers; b – with the inclusion of all large glaciers and various subsets of glaciers with an area of less than 20 km²

ложения о значительно большем влиянии крупных ледников на расчётную связь A – V .

Общий объём ледников на Земле Норденшельда и ошибки его определения. Общая площадь 16 измеренных ледников на Земле Норденшельда, по данным Каталога RGI v.6.0 [16], равна 128,24 км² (см. табл. 1). Суммарный измеренный объём 16 и 15 прозондированных ледников по нашим дан-

ными и данным [15] составляет соответственно 10,034 и 10,902 км³ и очень близок к вычисленному (10,59 и 10,38 км³) по локальным формулам (9) и (8). При этом вклад двух самых крупных ледников – Фритьюф и Грэнфьорд общей площадью 64,88 км² (51% общей площади 16 ледников) составляет 6,7 км³ (67% их общего измеренного объёма). С учётом этого для оценки запасов льда во всех 202 ледниках на Земле Норденшельда и их изменений за последние десятилетия было применено несколько способов: а) оценка по связи между объёмом и площадью для 16 измеренных ледников по формуле (8); б) оценка путём получения множества уравнений A – V для подвыборок из набора 43 ледников методом бутстрэппинга. Полученные оценки приведены в табл. 3.

Заключение

Сравнение результатов радиозондирования 16 ледников на Земле Норденшельда (настоящая статья) с данными [15] по 15 ледникам показало небольшие отличия в общей, средней и максимальной толщине и объёме ледников (см. табл. 2). Они объясняются тем, что использовались разные данные о площади ледников: мы определяли её по космическим снимкам ASTER и Landsat-7, -8, полученным в год радиолокационных измерений (1999, 2010–2013 гг.), а в работе [15] площади брали из Каталога RGI [16] по данным космических съёмок 2002–2008 гг. Таким образом, в работе [16] не учитывалось сокращение площади ледников за последние годы, приведшее, в частности, к отделению после 2007 г.

Таблица 3. Площадь и запасы льда в 202 ледниках на Земле Норденшельда и их изменения за последние десятилетия

Год	Общая площадь ледников, км ²	Источник данных по площади ледников	Общий объём ледников и 95%-я достоверность его оценки (в скобках дан нижний и верхний предел), км ³	Изменение площади, км ² , и скорость её изменения (в скобках, км ² /год)		Изменение объёма, км ³ , и скорость его изменения (в скобках, км ³ /год)	
2002–2008	507,95	[16]	32,89* (16,75÷56,63) 30,42** (15,4÷44,3)	–	38,79 (2,59)	–	1,97* (0,13)
1990	546,74	[18]	34,86* (22,07÷61,58) 31,78** (15,63÷47,14)	191,36 (3,54)	–	14,34* (0,268)	1,36** (0,091)
1936	738,1	[18]	49,2* (31,51÷90,36) 45,92** (23,37÷65,92)			–	14,14** (0,262)

*По формуле (9). **Методом бутстрэппинга (медиана).

Западного поля от ледника Западный Грэнфьорд (см. рис. 2) и к сокращению площади этого и других ледников (на леднике Фритьоф на 3 км²) (см. табл. 1). Данные о толщине и площади измеренных ледников были использованы для определения их объёма (см. табл. 2), установления статистической связи между объёмом V и площадью A ледников (A – V скейлинг) (см. рис. 5 и табл. 2) и оценки запасов льда во всех 202 ледниках на Земле Норденшельда и их изменений за периоды 1936–1990 и 1990–(2002–2008) гг. (см. табл. 3). Полученные данные показали следующее.

1. Суммарный объём 16 измеренных ледников составил $10,034 \pm 0,13$ км³ и мало отличается от вычисленного ($10,38$ км³) с использованием локальной связи между объёмом V и площадью A ледников в виде степенной функции $V = cA^v$ – уравнение (8).

2. Суммарный объём всех 202 ледников на Земле Норденшельда, вычисленный с применением этой локальной связи, равен $32,89$ км³ и отличается от вычисленного ($34,5$ и $39,3$ км³) с применением региональных связей (10) и (11), полученных по данным об объёме и площади 60 ледников из этого и других районов архипелага Шпицберген [15].

3. Погрешность оценки суммарного объёма 202 ледников на Земле Норденшельда оценена по доверительным интервалам уравнений связи A – V скейлинг полученных нелинейным методом наименьших квадратов для разных лет, и составляет в среднем от -49 до $+84\%$. Метод бутстрэппинга даёт более обоснованную оценку ошибки с меньшим доверительным интервалом (от -51 до $+49\%$). Несмотря на такую большую погрешность, мы использовали полученные данные для оценки относительных изменений суммарного объёма ледников за разные временные интервалы (см. табл. 3).

4. За период с 1936 по 1990 г. (54 года) общая площадь ледников на Земле Норденшельда уменьшилась с $738,1$ до $546,74$ км² (на $191,36$ км², или $3,54$ км²/год), а их суммарный объём сократился с $49,205$ до $34,857$ км³ (на $14,348$ км³). За период с 1990 г. по 2002–2008 гг. (около 15 лет) общая площадь ледников уменьшилась с $546,74$ до $507,95$ км² (на $38,79$ км², или $2,59$ км²/год), а их суммарный объём сократился с $34,857$ до $32,89$ км³ (на $1,967$ км³). За весь период с 1936 по 2002–2008 гг. (т.е. за последние 70 лет) площадь ледников уменьшилась с $738,1$ до $507,95$ км² (на $230,15$ км², или в среднем на $3,34$ км²/год), а их объём сократился с $49,205$ до $32,89$ км³ (на $16,315$ км³). За период с 1936 по 1990 г. темп сокращения объёма ледников на Земле Норденшельда составил $0,266$ км³/год, за период с 1990 по 2002–2008 гг. – $0,131$ км³/год, а за весь период с 1936 по 2002–2008 гг. – $0,236$ км³/год.

5. Средняя скорость снижения ледниковой поверхности составила в первый период $0,414$ м/год, во второй – $0,249$ м/год, а за всё время – $0,380$ м/год, что при средней плотности льда 900 кг/м³ эквивалентно среднему многолетнему балансу массы $-0,372$, $-0,224$ и $-0,342$ м в.э./год соответственно. Из этих данных следует, что средние темпы убыли массы ледников в период 1936–1990 гг. были в 1,7 раза выше, чем в период 1990–(2002–2008) гг. Отчасти это можно объяснить тем, что во второй период размеры ледников более адаптировались к изменениям климата, в результате их баланс массы стал менее отрицателен.

Благодарности. Работа выполнялась в рамках фундаментальных научных исследований по проекту «Оценки современного состояния и текущих изменений внутреннего гидротермического режима ледников, с выделением данных по эталонным ледникам» № 01201352474 и по

Программе президиума РАН № 55 «Арктика – научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития», экспедиционные исследования на архипелаге Шпицберген проводились при финансовой поддержке госзадания и логистической помощи РИЦШ.

Acknowledgments. This research was supported by the project «Assessment of the current state and on-

going changes in the hydrothermal regime of the glaciers, with focus on reference glacier data» (the Government Contract № 01201352474) and the Program of Presidium of RAS № 55 «The Arctic – scientific bases of new technologies of exploitation, preservation and development». Field studies on Svalbard were conducted with financial support from the state assignment and logistical assistance of the Russian Scientific Center on Spitsbergen (RSCS).

Литература

1. Cogley G. The future of the world's glaciers / Eds. A. Henderson-Sellers and K. McGuffie // The future of the world's climate. Elsevier, Waltham, MA, 2012. P. 97–222.
2. Stocker T.F., Qin G.-K. D., Plattner M., Tignor S.K., Allen J., Boschung A., Nauels Y., Xia V. Bex, Midgley P.M. (eds.). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York, NY, USA, 2013. 1535 p.
3. Radić V., Bliss A., Beedlow A.C., Hock R., Miles E., Cogley J.G. Regional and global projections of twenty-first century glacier mass changes in response to climate scenarios from global climate models // Climate Dynamics. 2014. V. 42. № 1–2. P. 37–58. doi: 0.1007/s00382-013-1719-7.
4. Shannon S., Robin S., Wiltshire A., Payne T., Huss M., Betts R., Caesar J., Koutroulis A., Jones D., Harrison S. Global glacier volume projections under high-end climate change scenarios // The Cryosphere. Discussion. 2018. doi: 10.5194/tc-2018-35.
5. Bahr D.B. Global distributions of glacier properties: A stochastic scaling paradigm // Water Resources Research. 1997. V. 33. Is. 7. P. 1669–1679. doi: 10.1029/97WR00824.
6. Bahr D.B., Meier M.F., Peckham S. The physical basis of glacier volume-area scaling // Journ. of Geophys. Research. 1997. V. 102. Is. B9. P. 20355–20362. doi: 10.1029/97JB01696.
7. Bahr D., Pfeffer W., Kaser G. A review of volume-area scaling of glaciers // Reviews of Geophysics. 2015 V. 53. P. 95–140. doi: 615 10.1002/2014RG000470.
8. Farinotti D., Brinkerhoff D.J., Clarke G.K.C., Fürst J.J., Frey H., Gantayat P., Gillet-Chaulet F., Girard C., Huss M., Leclercq P.W., Linsbauer A., Machguth H., Martin C., Maussion F., Morlighem M., Mosbeux C., Pandit A., Portmann A., Rabatel A., Ramsankaran R., Reerink T.J., Sanchez O., Stentoft P.A., Singh Kumari S., van Pelt W.J.J., Anderson B., Benham T., Binder D., Dowdeswell J.A., Fischer A., Helfricht K., Kutuzov S., Lavrentiev I., McNabb R., Gudmundsson G.H., Li H., Andreassen L.M. How accurate are estimates of glacier ice thickness? Re-

References

1. Cogley G. The future of the world's glaciers. Eds. A. Henderson-Sellers and K. McGuffie. The future of the world's climate. Elsevier, Waltham, MA, 2012: 97–222.
2. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P.M. (eds.). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York, NY, USA, 2013: 1535 p.
3. Radić V., Bliss A., Beedlow A.C., Hock R., Miles E., Cogley J.G. Regional and global projections of twenty-first century glacier mass changes in response to climate scenarios from global climate models. Climate Dyn. 2014, 42 (1–2): 37–58. doi: 0.1007/s00382-013-1719-7.
4. Shannon S., Robin S., Wiltshire A., Payne T., Huss M., Betts R., Caesar J., Koutroulis A., Jones D., Harrison S. Global glacier volume projections under high-end climate change scenarios. The Cryosphere. Discussion. 2018. doi: 10.5194/tc-2018-35.
5. Bahr D.B. Global distributions of glacier properties: A stochastic scaling paradigm. Water Resources Research. 1997, 33 (7): 1669–1679. doi: 10.1029/97WR00824.
6. Bahr D.B., Meier M.F., Peckham S. The physical basis of glacier volume-area scaling. Journ. of Geophys. Research. 1997, 102 (B9): 20355–20362. doi: 10.1029/97JB01696.
7. Bahr D., Pfeffer W., Kaser G. A review of volume-area scaling of glaciers. Reviews of Geophysics. 2015, 53: 95–140. doi: 615 10.1002/2014RG000470.
8. Farinotti D., Brinkerhoff D.J., Clarke G.K. C., Fürst J.J., Frey H., Gantayat P., Gillet-Chaulet F., Girard C., Huss M., Leclercq P.W., Linsbauer A., Machguth H., Martin C., Maussion F., Morlighem M., Mosbeux C., Pandit A., Portmann A., Rabatel A., Ramsankaran R., Reerink T.J., Sanchez O., Stentoft P.A., Singh Kumari S., van Pelt W.J.J., Anderson B., Benham T., Binder D., Dowdeswell J.A., Fischer A., Helfricht K., Kutuzov S., Lavrentiev I., McNabb R., Gudmundsson G.H., Li H., Andreassen L. M. How accurate are estimates of glacier

- sults from ITMIX, the Ice Thickness Models Intercomparison experiment // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. Is. 2. P. 949–970. doi: 10.5194/tc-11-949-2017.
9. 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. Is. 5. P. 2003–2032. doi: 10.5194/tc-11-2003-2017.
 10. Pfeffer W.T., Arendt A.A., Bliss A., Bolch T., Cogley J.G., Gardner A., Alex S., Hagen J.-O., Hock R., Kaser G., Kienholz C., Miles E.S., Moholdt G., Mölg N., Paul F., Radić Rastner P., Raup B.H., Rich J., Sharp Martin J. and The Randolph Consortium. The Randolph Glacier Inventory: A globally complete inventory of glaciers // *Journ. of Glaciology*. 2014. V. 60. № 221. P. 537–552. doi: 10.3189/2014JoG13J176.
 11. Martín-Español A., Navarro F.J., Otero J., Lapazarán J.J., Błaszczuk M. Estimate of the total volume of Svalbard glaciers, and their potential contribution to sea-level rise, using new regionally based scaling relationships // *Journ. of Glaciology*. 2015. V. 61. № 225. P. 29–41. doi: 10.3189/2015JoG14J159.
 12. Grinsted A. An estimate of global glacier volume // *The Cryosphere*. 2013. № 7. P. 141–151. doi: 10.5194/tc-7-141-2013.
 13. Мачерет Ю.Я., Кутузов С.С., Мацковский В.В., Лаврентьев И.И. Об оценке объёма льда горных ледников // *Лёд и Снег*. 2013. № 1 (121). С. 5–15. doi: 10.15356/2076-6734-2013-1-5-15.
 14. Martín-Español A., Vasilenko E.V., Navarro F.J., Otero J., Lapazarán J.J., Lavrentiev I.I., Macheret Y.Y., Machío F. Radio-echo sounding and ice volume estimates of western Nordenskiöld Land glaciers, Svalbard // *Annals of Glaciology*. 2013. V. 54. Is. 64. P. 211–217. doi: 10.3189/2013AoG64A109.
 15. Navarro F.J., Lapazarán J., Martín-Español A., Otero J. Ground-penetrating radar studies in Svalbard aimed to the calculation of the ice volume of its glaciers // *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 2016. V. 42. № 2. P. 399–414. doi: 10.18172/cig.2929.
 16. RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA, 2017. Digital Media. doi: 10.7265/N5-RGI-60.
 17. Nuth C., Kohler J., König M., von Deschwanden A., Hagen J.O., Käab A., Moholdt G., Pettersson R. Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard // *The Cryosphere*. 2013. V. 7. Is. 5. P. 1603–1621. doi: 10.5194/tc-7-1603-2013.
 18. König M., Kohler J., Nuth C. Glacier Area Outlines – Svalbard [Data set]. Norwegian Polar Institute, 2013. doi: 10.21334/npolar.2013.89f430f8.
 - ice thickness? Results from ITMIX, the Ice Thickness Models Intercomparison eXperiment. *The Cryosphere*. 2017, 11 (2): 949–970. doi: 10.5194/tc-11-949-2017.
 9. 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 (5): 2003–2032. doi: 10.5194/tc-11-2003-2017.
 10. Pfeffer W.T., Arendt A.A., Bliss A., Bolch T., Cogley J.G., Gardner A., Alex S., Hagen J.-O., Hock R., Kaser G., Kienholz C. Miles E.S., Moholdt G., Mölg N., Paul F., Radić Rastner P. Raup B.H., Rich J., Sharp Martin J. and The Randolph Consortium. The Randolph Glacier Inventory: A globally complete inventory of glaciers. *Journ. of Glaciology*. 2014, 60 (221): 537–552. doi: 10.3189/2014JoG13J176.
 11. Martín-Español A., Navarro F.J., Otero J., Lapazarán J.J., Błaszczuk M. Estimate of the total volume of Svalbard glaciers, and their potential contribution to sea-level rise, using new regionally based scaling relationships. *Journ. of Glaciology*. 2015, 61 (225): 29–41. doi: 10.3189/2015JoG14J159.
 12. Grinsted A. An estimate of global glacier volume. *The Cryosphere*. 2013, 7: 141–151. doi: 10.5194/tc-7-141-2013.
 13. Macheret Y.Y., Kutuzov S.S., Matskovsky V.V., Lavrentiev I.I. On ice volume estimation of mountain glaciers. *Led i Sneg*. Ice Snow. 2013, 1 (121): 5–15. doi: 10.15356/2076-6734-2013-1-5-15. [In Russian].
 14. Martín-Español A., Vasilenko E.V., Navarro F.J., Otero J., Lapazarán J.J., Lavrentiev I.I., Macheret Y.Y., Machío F. Radio-echo sounding and ice volume estimates of western Nordenskiöld Land glaciers, Svalbard. *Annals of Glaciology*. 2013, 54 (64): 211–217. doi: 10.3189/2013AoG64A109.
 15. Navarro F.J., Lapazarán J., Martín-Español A., Otero J. Ground-penetrating radar studies in Svalbard aimed to the calculation of the ice volume of its glaciers. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 2016, 42 (2): 399–414. doi: 10.18172/cig.2929.
 16. RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA, 2017. Digital Media. doi: 10.7265/N5-RGI-60.
 17. Nuth C., Kohler J., König M., von Deschwanden A., Hagen J.O., Käab A., Moholdt G., Pettersson R. Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard. *The Cryosphere*. 2013, 7 (5): 1603–1621. doi: 10.5194/tc-7-1603-2013.
 18. König M., Kohler J., Nuth C. Glacier Area Outlines – Svalbard [Data set]. Norwegian Polar Institute, 2013. doi: 10.21334/npolar.2013.89f430f8.

19. *Erasov N.V.* Method of determination of the volume of mountain glaciers // МГИ. 1968. № 14. С. 307–308.
20. *Chen J., Ohmura A.* Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s // IAHS Publ. 1990. № 193. P. 127–135.
21. *Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика. Исследование зависимостей. М.: Финансы и статистика, 1985. 488 с.
22. *Murray T., James T.D., Macheret Yu.Ya., Lavrentiev I.I., Glazovsky A.F., Sykes H.* Geometric Changes in a tidewater glacier in Svalbard // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2012. V. 44. № 3. P. 359–367. doi: 10.1657/1938-4246-44.3.359.
23. *Василенко Е.В., Глазовский А.Ф., Лаврентьев И.И., Мачерет Ю.Я.* Изменение гидротермической структуры ледников Восточный Грэнфьорд и Фритьюф на Шпицбергене // Лёд и Снег. 2014. № 1 (125). С. 5–19. doi: 10.15356/2076-6734-2014-1-5-19.
24. *Кульницкий Л.М., Гофман П.А., Токарев М.Ю.* Математическая обработка данных георадиолокации и система RADEXPRO // Разведка и охрана недр. 2001. № 3. С. 6–11.
25. *Lapazaran J.J., Otero J., Martín-Español A., Navarro F.J.* On the errors involved in ice-thickness estimates I: Ground-penetrating radar measurement errors // Journ. of Glaciology. 2016. V. 62. Is. 236. P. 1008–1020. doi: 10.1017/jog.2016.93.
26. *Lapazaran J.J., Otero J., Martín-Español A., Navarro F.J.* On the errors involved in ice-thickness estimates II: Errors in digital elevation models of ice thickness // Journ. of Glaciology. 2016. V. 62. Is. 236. P. 1021–1029. doi: 10.1017/jog.2016.94.
27. *Martín-Español A., Lapazaran J.J., Otero J., Navarro F.J.* On the errors involved in ice-thickness estimates III: Error in volume // Journ. of Glaciology. 2016. V. 62. Is. 236. P. 1030–1036. doi: 10.1017/jog.2016.95.
28. Guidelines for the compilation of glacier inventory data from digital sources / Ed. by F. Paul [Electronic resource]. <http://glims.org>.
29. *Farinotti D., Huss M.* An upper-bound estimate for the accuracy of glacier volume–area scaling // The Cryosphere. 2013. V. 7. Is. 6. P. 1707–1720. doi: 10.5194/tc-7-1707-2013.
30. *Macheret Yu.Ya., Zhuravlev A.B.* Radio Echo-Sounding of Svalbard Glaciers // Journ. of Glaciology. 1982. V. 28. Is. 99. P. 295–314. doi: 10.3189/S0022143000011643.
31. *Мачерет Ю.Я., Журавлев А.Б., Боброва Л.И.* Толщина льда, подлёдный рельеф и объём ледников Свальбарда по данным радиозондирования // МГИ. 1984. № 51. С. 49–63.
32. *Wu N.F.L.* Jackknife, bootstrap and other resampling methods in regression analysis (with discussions) // Annals of Statistics. 1986. V. 14. P. 1261–1350.
19. *Erasov N.V.* Method to determine the volume of mountain glaciers. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1968, 14: 307–308. [In Russian].
20. *Chen J., Ohmura A.* Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. IAHS Publ. 1990, 193: 127–135.
21. *Ayvazyan S.A., Yenuykov I.S., Meshalkin L.D.* *Prikladnaya Statistika: Issledovanie zavisimostey.* Applied Statistics: Dependency Studies. Moscow: Finance and Statistics, 1985: 488 p. [In Russian].
22. *Murray T., James T.D., Macheret Yu.Ya., Lavrentiev I.I., Glazovsky A.F., Sykes H.* Geometric Changes in a tidewater glacier in Svalbard. Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2012, 44 (3): 359–367. doi: 10.1657/1938-4246-44.3.359.
23. *Vasilenko E.V., Glazovsky A.F., Lavrentiev I.I., Macheret Y.Y.* Changes of hydrothermal structure of Austre Grønfyordbreen and Fridtjovbreen Glaciers in Svalbard. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2014, 1 (125): 5–19. doi: 10.15356/2076-6734-2014-1-5-19. [In Russian].
24. *Kulnitsky L.M., Gofman P.A., Tokarev M.Yu.* Mathematical processing of georadar data and the RADEXPRO system. *Razvedka i Okhrana Nedr.* Prospect and protection of mineral resources. 2001, 3: 6–11. [In Russian].
25. *Lapazaran J.J., Otero J., Martín-Español A., Navarro F.J.* On the errors involved in ice-thickness estimates I: Ground-penetrating radar measurement errors. Journ. of Glaciology. 2016, 62 (236): 1008–1020. doi: 10.1017/jog.2016.93.
26. *Lapazaran J.J., Otero J., Martín-Español A., Navarro F.J.* On the errors involved in ice-thickness estimates II: Errors in digital elevation models of ice thickness. Journ. of Glaciology. 2016, 62 (236): 1021–1029. doi: 10.1017/jog.2016.94.
27. *Martín-Español A., Lapazaran J.J., Otero J., Navarro F.J.* On the errors involved in ice-thickness estimates III: Error in volume. Journ. of Glaciology. 2016, 62 (236): 1030–1036. doi: 10.1017/jog.2016.95.
28. Guidelines for the compilation of glacier inventory data from digital sources. Edited by F. Paul [Electronic resource]. <http://glims.org>.
29. *Farinotti D., Huss M.* An upper-bound estimate for the accuracy of glacier volume–area scaling. The Cryosphere. 2013, 7 (6): 1707–1720. doi: 10.5194/tc-7-1707-2013.
30. *Macheret Yu.Ya., Zhuravlev A.B.* Radio Echo-Sounding of Svalbard Glaciers. Journ. of Glaciology. 1982, 28 (99): 295–314. doi: 10.3189/S0022143000011643.
31. *Macheret Yu.Ya., Zhuravlev A.B., Bobrova L.I.* Thickness, subglacial relief and volume of Svalbard glaciers from radio echo-sounding data. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1984, 51: 49–63. [In Russian].
32. *Wu N.F.L.* Jackknife, bootstrap and other resampling methods in regression analysis (with discussions). Annals of Statistics. 1986, 14: 1261–1350.