

Оценка поверхностной абляции и баланса массы ледника Восточный Грэнфьорд (Западный Шпицберген)

© 2019 г. Р.А. Чернов, А.В. Кудиков, Т.В. Вшивцева, Н.И. Осокин

Институт географии РАН, Москва, Россия
rob31@mail.ru

Estimation of the surface ablation and mass balance of Eustre Grønfjordbreen (Spitsbergen)

R.A. Chernov, A.V. Kudikov, T.V. Vshivtseva, N.I. Osokin

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
rob31@mail.ru

Received January 30, 2018 / Revised June 15, 2018 / Accepted October 16, 2018

Keywords: *ablation, Krenke–Khodakov formula, mass balance, snow cover, summer air temperature.*

Summary

Due to climatic changes in Spitsbergen the glaciation of the Nordenskjold Land (West Spitsbergen) has significantly degraded over the past 100 years. Changes in glaciers are undoubtedly associated with intensive melting caused by a rise of summer air temperatures. Based on the results of field measurements of ablation on the East Grenford glacier, data on the ice reduction were obtained since 2004. Analysis of the results showed that magnitude of the surface ablation is in a good agreement with the values calculated by the Krenke–Hodakov formula, in which the argument is the average summer air temperature. The parabolic dependence of the Krenke-Hodakov formula with the exponent of 3.25 presented the best approximation to the field measurements for all high-altitude zones of the glacier with a correlation coefficient of 0.96. The calculated values of ablation of ice and snow were used to estimate the mass balance of the East Grenford glacier since 2004. The calculations were based on the following: measured values of jump in temperature at the boundary of the glacier, averaged values of the air temperature gradient, and averaged data on snow storage on the glacier. Data on the mass balance of the glacier is indicative of its shortening during the last decade, despite the inter-annual variations. In 2016, the glacier mass balance reached the lowest value equal to -1990 mm, the calculated value was equal to -1960 mm. Analysis of the data demonstrated that the average summer air temperature is the major factor affecting the glacier mass balance. These results may be useful for estimating melting and mass balance of a number of mountain glaciers of the Nordenskjold Land.

Citation: 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]. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-59-66.

Поступила 30 января 2018 г. / После доработки 15 июня 2018 г. / Принята к печати 16 октября 2018 г.

Ключевые слова: *абляция, баланс массы ледника, летняя температура воздуха, снежный покров, формула Кренке–Ходакова.*

Многолетние наблюдения на леднике Восточный Грэнфьорд показали значительное сокращение его площади и снижение поверхности ледника. Расчёт абляции проводился по четырём высотным зонам с учётом реальных значений температурного градиента и температурного скачка на краю ледника. Результаты, полученные на этом леднике, позволяют оценить летнюю абляцию и баланс массы горных ледников на западе Земли Норденшельда.

Введение

Земля Норденшельда расположена в центральной части архипелага Шпицберген между проливами Ис-фьорд и Ван-Майен (рис. 1), её протяжённость с запада на восток около 100 км. Влияние тёплого Шпицбергенского течения значительно влияет на климат территории, так как приток тепла со стороны Гренландского моря происходит за счёт широких фьордов, обращённых на юго-запад, а также протяжённых

широтных долин. Благодаря мягкому климату здесь распространены горные ледники сравнительно небольших размеров. Большинство ледников расположено на горных хребтах близ западного и восточного побережий острова, их общая площадь составляет около 500 км^2 [1].

Во второй половине XX в. были определены основные закономерности оледенения Шпицбергена и даны оценки баланса массы ледников архипелага [2, 3]. На западных территориях архипелага, в том числе и на Земле Норденшельда,

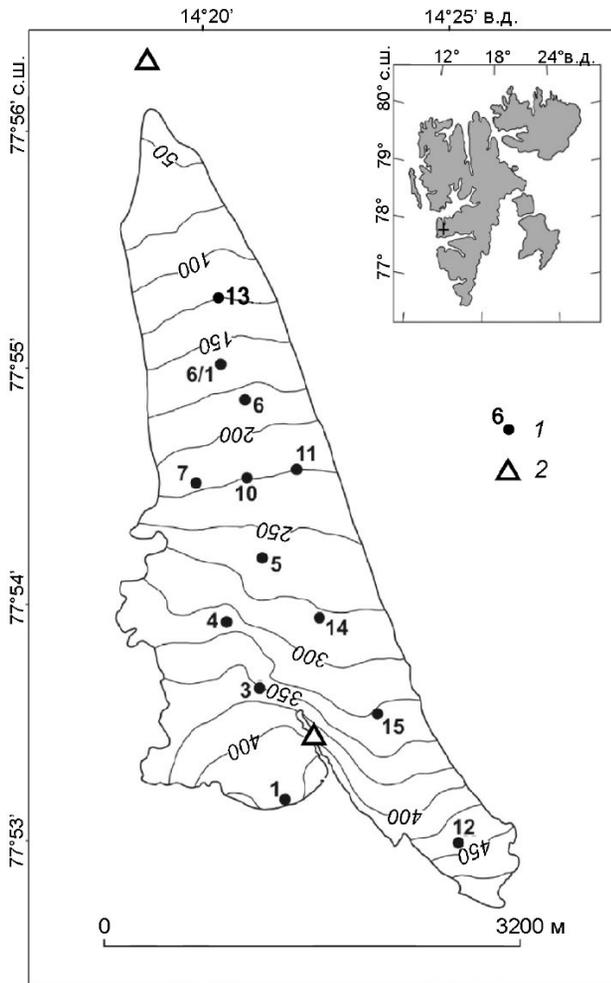


Рис. 1. Схема ледника Восточный Грэнфьорд, расположение абляционных рек (1) и автоматических метеостанций на леднике (2)

Fig. 1. Scheme of Eustre Grønfyordbreen, location of wells (1), automatic weather station (2)

отмечено максимальное сокращение площади горных ледников, которое связано с повышением летней температуры воздуха [1, 4–7]. В период 1980–2010 гг. на этой территории наблюдался положительный тренд летней температуры воздуха, который составил $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие [1]. В этот период на фоне потепления количество зимних осадков оставалось постоянным, а с конца 1990-х годов оно даже уменьшалось. Климатические условия вызвали значительную деградацию ледников, особенно лежащих на низких гипсометрических уровнях, что наиболее характерно для западных территорий Земли Норденшельда. Максимальное сокращение горно-долинных ледников отмечено в районе зали-

ва Грэнфьорд в результате отступления ледниковых языков, находящихся в береговой зоне [8].

Горно-долинный ледник Восточный Грэнфьорд расположен в верховьях залива Грэнфьорд и имеет северную экспозицию. Это – типичный для Западного Шпицбергена горно-долинный ледник. Его площадь – около 7 км^2 , а протяжённость – около 6 км [9]. Язык ледника спускается до уровня 40 м , в верховье ледник разделён на два потока льда: западная ветвь ледника образует общий ледораздел с ледником Фритьоф, а восточная лежит в скальном цирке и поднимается до высоты 460 м . Оба потока льда сливаются в средней части ледника на уровне около $320\text{–}360\text{ м}$, образуя единый язык шириной до 900 м . В последние годы ледник полностью находился в области абляции, хотя в верховье у скал сохранялись небольшие пятна снега. За период регулярных наблюдений в летний период с 2004 г. снежный покров стаивал до высоты 450 м . В 2011–2014 гг. в восточной части ледника и на ледоразделе сохранялась небольшая область аккумуляции, площадь которой не превышает $0,15\text{ км}^2$. С 2015 г. снежный остаток стаивал в августе–сентябре, а снеговая линия поднималась до уровня $450\text{–}500\text{ м}$.

В 1967 г. сотрудники Института географии РАН выполняли на леднике гляциологические исследования для расчёта баланса его массы, а с 2004 г. наблюдения в летний период продолжались ежегодно. Измерения зимой проведены в 2012–2015 гг. В этот период получены оценки толщины льда, температурного режима верхней толщи ледника и зимнего снегонакопления на различных высотах [9, 10].

Методика исследований

Полевые работы выполняли в составе Шпицбергенской гляциологической экспедиции Института географии РАН. Для измерения таяния льда и снега проводили ежегодные измерения по абляционным рейкам, забуренным в лёд, их положение показано на рис. 1. Составные деревянные рейки длиной по 2 м и сечением $25 \times 25\text{ мм}$ были скреплены металлическими шарнирами и забурены в лёд на глубину до 10 м . Отсчёты по рейкам снимались в конце периода абляции с помощью рулетки с точностью 1 см . Ошибка измерений стаявшего слоя, связанная с отклонением

рейки от отвеса и неровностью поверхности ледника в месте установки реек, не превышала 2 см. Среднеквадратическая ошибка измерения абляции на леднике составляла 70 мм в.э. Так как в местах установки реек уклон поверхности ледника не превышал 5° , он не учитывался ввиду минимальных различий истинной толщины стаявшего слоя и отсчёта по отвесу [11]. Для измерений абляции деревянные рейки были забурены на ледяных буграх, что определено особенностью ручного бурения на наименее обводнённых участках. В дальнейшем рейки могут оказаться как в ложбине, так и на скате бугра. Мы полагаем, что избирательность места установки рейки может влиять на результаты лишь в короткий срок измерений – не более двух недель. За летний сезон или даже несколько лет наблюдений этот фактор не может быть существенным, так как в период таяния поверхность льда претерпевает непрерывные изменения микрорельефа.

Измерения положения реек, границ ледника и снеговой линии выполнены с помощью GPS Garmin-10 с точностью около 3 м в плане и 6 м по высоте. Ход температуры воздуха у края ледника и в его верховье получен с помощью двух автоматических метеостанций, оснащённых датчиками НОВО и установленных в апреле 2015 г. Измерения температуры воздуха на леднике проводили при помощи автоматических логгеров типа i-Button DS1921G, установленных в 2016 и 2017 г. на рейках № 10, 12 и 13 (см. рис. 1). Точность измерения температуры воздуха с их помощью составляет $1,0^\circ\text{C}$.

Измерения зимнего снегонакопления на леднике проводили в точках установки реек. Получены значения среднего снегонакопления на леднике и межгодовой изменчивости снегозапасов. Основные результаты этих исследований отражены в работе [12]. Расчёт удельного баланса массы ледника выполнен по четырём высотным зонам. Их нижние, верхние границы и площадь определены следующим образом: 50–150 м ($1,07\text{ км}^2$); 150–250 м ($1,69\text{ км}^2$); 250–350 м ($2,35\text{ км}^2$); 350–450 м ($1,61\text{ км}^2$) в зоне 1–4 соответственно. Плотность льда принята равной $0,88\text{ г/см}^3$. По данным снегомерных измерений на леднике средняя плотность снега принята равной: 0,40; 0,38; 0,37 и $0,35\text{ г/см}^3$, а средний водозапас в снежном покрове: 870, 550, 460 и 280 мм в.э. в зонах 1–4 соответственно.

Значения поверхностной абляции осреднялись в каждой высотной зоне на основе показаний реек. До 2015 г. в верхних зонах находилось по одной рейке, а в нижней зоне было две рейки. С 2015 г. их число увеличилось до 12, в зоне 1 установлены три рейки, по четыре рейки в зонах 2 и 3, в зоне 4 – 1 рейка. Удельный баланс ледника рассчитывался по величине средней абляции в каждой зоне с учётом её площади и без учёта снежного остатка, так как за исключением 2006 г. во всех высотных зонах отмечен отрицательный баланс накопления льда.

Результаты исследований

На основе сравнения картографического материала и многолетних экспедиционных наблюдений отмечено, что на территории Земли Норденшельда больше всего сократились расположенные низко горно-долинные ледники в западной части полуострова [13]. Ледники Альдегонда, Западный и Восточный Грэнфьорд, Янсона, Баалструда, Дальфонна, Эрдмана отступили от своих границ 1930-х годов на расстояние 1–2 км. По сравнению с 1980 г. на этих ледниках установлено повышение границы питания и сокращение площади аккумуляции [8]. Фактически большинство западных ледников Земли Норденшельда, верхний край которых лежит ниже 500 м, потеряли свои области питания полностью или они представлены небольшими пятнами, где летом сохраняется снежный покров.

Регулярные наблюдения на леднике Восточный Грэнфьорд, которые ведутся с 2004 г., показали, что его площадь стремительно сокращается, а поверхность ледника понижается во всех высотных зонах. Основная причина этого процесса связана с интенсивным летним таянием, что обусловлено ростом летних температур воздуха. В последние годы на языке ледника в летний период стаивает до 4 м льда. За счёт утончения языковой части ледника его передний край с 2014 по 2017 г. отступил на 450 м. Современные потери массы ледника существенно превышают известные оценки баланса массы ледников Земли Норденшельда, полученные в 1980-х годах [14]. Измерения величины летнего таяния и зимнего снегонакопления, проводимые на основе сети абляционных реек, показали, что

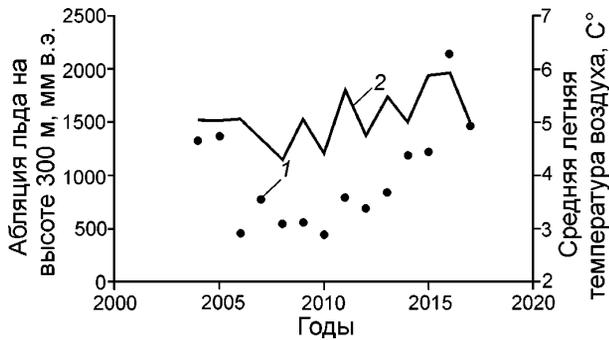


Рис. 2. Величина абляции льда (Восточный Грёнфьорд) на высоте 300 м (1) и средняя летняя температура воздуха по метеостанции Баренцбург (2)

Fig. 2. The value of the annual ice melting (Eustre Grøn-fjordbreen) at an altitude of 300 m (1) and the mean summer air temperature at the weather station Barentsburg (2)

практически во всех высотных зонах ледника происходят потери льда.

Наиболее длинный ряд измерений абляции получен по рейкам, установленным в центральной части ледника на высоте около 300 м. Сопоставление значений абляции на этом высотном уровне с летними температурами воздуха метеостанции Баренцбург показано на рис. 2. Средняя летняя температура использована как универсальная температурная характеристика тёплого сезона (июнь–август). После кратковременного периода похолодания в 2008–2010 гг. наблюдается увеличение летних температур [15], что привело к усилению таяния льда (см. рис. 2). Максимальное таяние отмечено в 2016 г., когда летние температуры достигли абсолютного максимума за столетний период на Шпицбергене, а снегонакопление предшествующей зимы 2015/16 г. было ниже среднего многолетнего значения. В итоге за 13 лет в этой части ледника растаял слой льда толщиной 14,6 м, что составляет в среднем 1,1 м льда в год.

Наблюдения абляции по рейкам, установленным на различных высотах, показали заметные межгодовые отличия. Тем не менее, суммарные потери льда за три года для каждой рейки выявили высотную зависимость, близкую к линейной. На рис. 3 показана абляция на различных высотах в период с мая 2015 г. по сентябрь 2017 г. За этот период на языке ледника поверхность льда понизилась до 11 м, а в его верховьях — не более 2 м. Установленная закономерность указывает на возможность применения расчётного метода с использованием высотно-

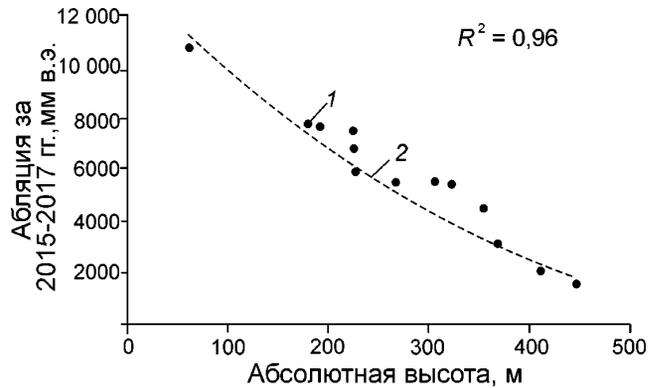


Рис. 3. Абляция на леднике Восточный Грёнфьорд за период с мая 2015 г. по сентябрь 2017 г.:

1 — измерения; 2 — расчёт таяния по формуле (1)

Fig. 3. Total melting on the Eustre Grøn-fjordbreen Glacier in the period from May 2015 to September 2017:

1 — measurements; 2 — calculation of melting according to formula (1)

го градиента температуры, который также был измерен. Высотный градиент температуры воздуха, измеренный с помощью автоматических регистраторов температуры, показал среднее значение равное $-1,05\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$. Даже с учётом большой величины высотного градиента температуры воздуха в верховьях ледника на высоте 350–450 м в летние месяцы температура воздуха была устойчиво положительной.

Связь между летней температурой воздуха и абляцией определена соотношением Кренке–Ходакова [17]. Для расчёта величины абляции A принята зависимость по формуле (1), в которой степенной показатель равен 3,25 (см. формулу на стр. 63). Показатель был получен из условия наилучшей корреляции данных измерений и расчётов абляции. Параметр T_s в формуле (1) — средняя летняя температура воздуха, которая рассчитывается на основе изменения температуры воздуха с высотой по формуле (2), в которой: T — температура у подножия ледника; T_c — температурный скачок; dT — вертикальный градиент температуры; h — высотный уровень, высота от нижней точки ледника в метрах. Величина T_c получена при обработке данных записей о температуре воздуха на метеостанции, расположенной на морене перед ледником, и логгера, установленного на льду. Расчётные значения абляции по формулам (1) и (2) показаны пунктиром на рис. 3. Коэффициент корреляции значений расчётной и измеренной абляции равен 0,96. Расчётная по-

Значения средних летних температур воздуха, абляции и баланса массы ледника Восточный Грэнфьорд с 2004 по 2017 г.

Год	Средняя летняя температура воздуха T_s , °С	Поверхностная абляция A (расчёт по T_s), мм в.э.	Измеренный баланс массы ледника W , мм в.э.	Расчётный баланс массы ледника W_p , мм в.э.	Относительная погрешность W_p , %
2004	5,05	-2076	-1400	-1487	6
2005	5,03	-2066	-1550	-1478	-5
2006	5,07	-2088	-850	-1500	76
2007	4,7	-1863	-1200	-1274	6
2008	4,30	-1637	-800	-1048	31
2009	5,07	-2091	-1000	-1502	50
2010	4,42	-1703	-1100	-1113	1
2011	5,61	-2453	-1320	-1869	42
2012	4,75	-1893	-1240	-1304	5
2013	5,49	-2371	-1510	-1784	18
2014	5,01	-2052	-1400	-1464	5
2015	5,88	-2655	-1780	-2068	16
2016	5,91	-2678	-1990	-2090	5
2017	4,95	-2015	-1790	-1630	-9

верхностная абляция и температура воздуха устанавливаются по следующим соотношениям:

$$A = (T_s + 9,5)^{3,25}, \quad (1)$$

$$T_s = (T + T_c) + dTh/100. \quad (2)$$

В расчёте использованы средние летние температуры воздуха на метеостанции Баренцбург, расположенной в 20 км от ледника. Температуру воздуха на леднике регистрировали с помощью автоматической метеостанции, установленной на морене в 300 м перед фронтом ледника (см. рис. 1). Для летнего периода получено, что средняя летняя температура воздуха у края ледника была в среднем ниже на 1,3 °С, чем в Баренцбурге. Высотный градиент температуры принят равным -1,05 °С на каждые 100 м подъёма на основе измерений температуры воздуха на разных высотах. Величина ледникового скачка температуры на границе ледника принята равной -1,3 °С.

Абляция льда и снега на леднике оценена с учётом осреднённых снегозапасов, полученных на основании результатов весенних снегомерных съёмок на исследуемом леднике в 2012–2015 гг. [12]. Средняя толщина снежного покрова на леднике в 2012–2015 гг. составила 1,3 м и имела небольшую межгодовую изменчивость. В нижней части ледника толщина снежного покрова колебалась от 80 до 125 см, в верхней – от 130 до 175 см. В августе 2017 г. в верховье восточной части ледника снежный покров имел среднюю толщину 20 см, но в сентябре снег стаял

полностью. В августе 2015 и 2016 гг. снег также полностью стаял на всей поверхности ледника. В предыдущие три года на этом участке наблюдалось небольшое накопление снега на площади менее 0,1 км², толщина снежного покрова не превышала 20 см. В западной части ледника на ледоразделе с ледником Фритьоф (высота 408 м) снежный покров стаивал каждое лето с 2004 г., за исключением 2006–2009 гг. В расчётах баланса массы ледника использовались значения абляции, рассчитанные по средней летней температуре воздуха, и средние значения снегонакопления на леднике. Остаток снежного покрова, наблюдаемый в отдельные годы в верховьях ледника, в расчёт не принимался. Расчётный и измеренный баланс массы ледника Восточный Грэнфьорд с 2004 по 2017 г. приведён в таблице.

Обсуждение результатов

Многолетние наблюдения абляции на леднике – наиболее надёжные данные для её моделирования расчётным способом. Использование формулы Кренке–Ходакова для расчёта абляции со степенным показателем 3,25 оказалось оптимальным при сравнении с натурными измерениями 2015–2017 гг. Коэффициент корреляции расчётных данных и измеренных был равен 0,96. Так как в период наблюдений с 2004 г. баланс массы во всех высотных зонах на леднике Восточный Грэнфьорд был отрицательным, можно допустить, что

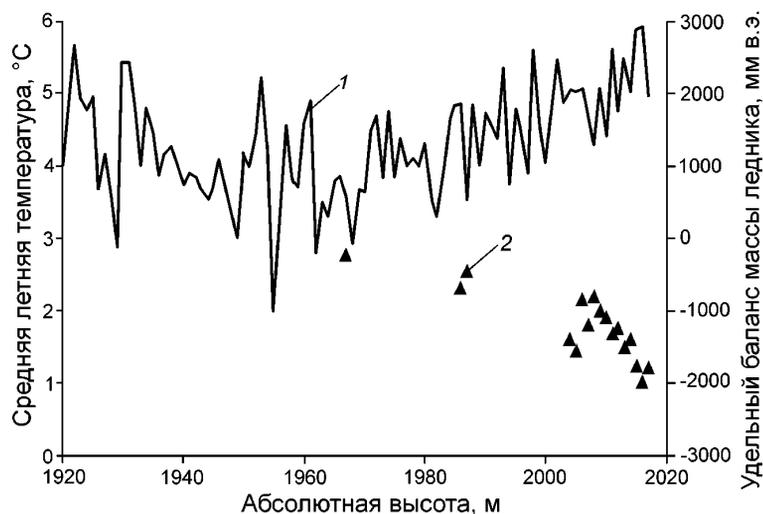


Рис. 4. Средние летние температуры воздуха на метеостанции Баренцбург (1) и баланс массы ледника Восточный Грэнфьорд (2)

Fig. 4. Summer air temperatures of the weather station Barentsburg (1), the mass balance of the glacier East Grøn fjordbreen (2)

величина летней абляции — определяющая в балансе массы ледника. Сравнение расчётного и измеренного значений баланса массы ледника показывает наименьшие различия в наиболее тёплые годы (2004, 2005 и после 2013 г.), когда снежный покров на леднике стаял полностью, а летние температуры были максимальными (см. таблицу). Максимальные различия наблюдались в снежные 2006 и 2009 г., а также в 2011 г., когда летнее таяние продолжалось лишь два месяца. Фактически, сезон таяния 2011 г. закончился на месяц раньше, так как в третьей декаде августа случались ранние снегопады. В этом случае расчёт таяния по средней летней температуре дал большие отрицательные значения, чем реальные значения таяния в период короткого лета.

Расчётные и фактические значения баланса массы ледника показали его уменьшение, которое согласуется с ростом летней температуры воздуха. Эта тенденция наметилась в середине XX в. На рис. 4 показаны летняя температура воздуха по данным метеостанции Баренцбург [16] и значения баланса массы ледника Восточный Грэнфьорд. Наиболее раннее значение баланса массы ледника Восточный Грэнфьорд получено в 1967 г. из сравнения ряда наблюдений баланса массы ледника Вёринг с 1967 по 1987 г. [18]. Установлено, что в этот период значения баланса массы ледника Вёринг и Восточный Грэнфьорд различались в пределах 10%, что, возможно, определено подобным высотным положением и экспозицией ледников.

Для 1986, 1987 и 2004–2010 гг. приведены данные натурных измерений [1, 8]. Баланс массы ледника для 2011–2017 гг. рассчитан авторами на ос-

нове инструментальных измерений таяния по рейкам. Очевидно, что баланс ледника Восточный Грэнфьорд уменьшается с середины 1960-х годов вместе с ростом летних температур, наблюдаемым в этот период, и в последние годы его удельный баланс массы достиг минимальных значений.

Изменения летней температуры воздуха по метеостанции Баренцбург показали, что с 1912 по 1930 г. наблюдался её рост, который сменился стабильным периодом в 1940-е годы (см. рис. 4). В эти годы среднемноголетняя норма летней температуры была равна 4,0 °С. Для периода 1947–1967 гг. в этом районе обнаружен небольшой тренд к понижению летних температур воздуха. В последующие годы наблюдался уверенный рост температуры, особенно заметный с начала 1980-х годов, который продолжается до настоящего времени. Кратковременный период летнего похолодания, наблюдаемый в 2007–2010 гг., оказался малозаметным на фоне дальнейшего потепления.

В последние годы летние температуры воздуха уверенно растут со скоростью около 0,08 °С/год. Экстремально тёплыми оказались летние периоды 2015 и 2016 г.: средняя летняя температура воздуха в эти годы была равна 5,88 и 5,91 °С соответственно. На фоне увеличения летних температур наблюдалось уменьшение зимних осадков, что неблагоприятно для ледников. Особенно заметно зимние осадки уменьшались начиная с зимы 1982/83 г. Чрезвычайно малоснежными оказались зимы во второй половине 1990-х годов и в первой половине 2000-х годов [15]. С начала 2000-х годов баланс масса ледника уменьшался и по сравнению с 1967 г. снизился в 2–3 раза.

В целом за последние 50 лет баланс массы ледника становился всё более отрицательным, в 2016 г. его величина достигла минимального значения (см. таблицу). Значения баланса массы ледника, основанные на расчёте абляции с учётом снегозапасов, оказались ниже реальных значений для ряда лет, что указывает на недостаточный учёт снегонакопления на леднике.

Для улучшения результатов расчёта баланса массы ледника необходимо в дальнейшем учитывать величину снегозапасов, особенно в годы с повышенным снегонакоплением. Как показали модельные расчёты, учёт реальных значений снегозапасов для мало- и многоснежных зим улучшает расчётные значения баланса массы ледника. При этом его возможные отклонения находятся в пределах 20%. Отметим, что с 2013 г. на леднике стаивал весь сезонный снег, поэтому ледник полностью оказывался в области абляции. Вероятно, подобная ситуация может сохраниться и в последующие годы, поэтому оценка баланса массы ледника по величине летнего таяния может быть в дальнейшем успешно применима. Однако возможность использования формулы (1) для расчёта баланса массы других ледников Земли Норденшельда (например, Западный Грэнфьорд и Дальфонна), где сохраняется область питания, может быть ограничена.

Заключение

Инструментальные измерения поверхностной абляции на леднике Восточный Грэнфьорд определили её высотную зависимость, которая сравнивалась с расчётной абляцией по формуле Кренке—Ходакова (1) со степенным показате-

лем равным 3,25. Величина степенного показателя выбиралась из условия наилучшей корреляции данных измерений с расчётом абляции по средней летней температуре воздуха. Для данных поверхностной абляции 2015–2017 гг. коэффициент корреляции измеренных и расчётных данных был равен 0,96. Расчётный баланс массы ледника Восточный Грэнфьорд для периода инструментальных измерений на леднике (2004–2017 гг.) показал наилучшие результаты по сравнению с натурными измерениями в те годы, когда снежный покров на леднике стаивал полностью. Полученные результаты дают возможность оценить летнее таяние и баланс массы других ледников Земли Норденшельда.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания № 01201352474 (0148-2014-0006) «Оценки современного состояния и текущих изменений внутреннего гидро-термического режима ледников, с выделением данных по эталонным ледникам» и при поддержке проекта программы Президиума РАН № 55 «Арктика – научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития». Выражаем благодарность Российскому научному центру на Шпицбергене за логистическую помощь при исследованиях на архипелаге.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state project № 01201352474 (0148-2014-0006) «Assessments of the current state and current changes in the internal hydro-thermal regime of glaciers, with data on reference glaciers» and supported by the draft program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences № 55 «Arctic – scientific foundations of new technologies for development, conservation and development». We express our gratitude to the Svalbard Russian Research Center for logistics support of research.

Литература

1. 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.
2. Гляциология Шпицбергена / Ред. Е.М. Зингер, Л.С. Троицкий, Л.Р. Серебряный, А.В. Орлов, Г.М. Немцова. М.: Наука, 1985. 200 с.
3. Корякин В.С., Троицкий А.С. Основные закономерности современного оледенения Шпицбергена // МГИ. 1969. Вып. 15. С. 101–111.
4. Kohler J., James T.D., Murray T., Nuth C., Brandt O., Barrand N.E., Aas H.F., Luckman A. Acceleration in

References

1. 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.
2. *Glyatsiologiya Shpitsbergena*. Glaciology of Spitsbergen. Eds.: E.M. Zinger, L.S. Troitskiy, L.R. Serebryaniy, A.V. Orlov, G.M. Nemtsova. Moscow: Nauka, 1985: 200 p. [In Russian].
3. Koryakin V.S., Troitskiy A.S. The main regularities of the modern glaciation of Spitsbergen. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1969, 15: 101–111. [In Russian].

- thinning rate on western Svalbard glaciers // *Geophys. Research Letters*. 2007. V. 34 (18). L18502. doi: 10.1029/2007GL030681.
5. Van Pelt W.J.J., Kohler J., Liston G.E., Hagen J.O., Luks B., Reijmer C.H., Pohjola V.A. Multidecadal climate and seasonal snowconditions in Svalbard // *Journ. of Geophys. Research. Earth Surface*. 2016. V. 121. P. 2100–2117. doi: 10.1002/2016JF003999.
 6. Malecki J. Accelerating retreat and high-elevation thinning of glaciers in central Spitsbergen // *The Cryosphere*. 2016. № 10. P. 1317–1329.
 7. Nuth C., Kohler J., König M., von Deschwanden A., Hagen J.O., Kääh A., Moholdt G., Pettersson R. Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard // *The Cryosphere*. 2013. V. 7. P. 1603–1621.
 8. Мавлюдов Б.Р., Саватюгин Л.М., Соловьёнова И.Ю. Реакция ледников Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген) на изменение климата // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2012. Вып. 1 (91). С. 67–77.
 9. Василенко Е.В., Глазовский А.Ф., Лаврентьев И.И., Мачерет Ю.Я. Изменение гидротермической структуры ледников Восточный Грэнфьорд и Фритьоф на Шпицбергене // *Лёд и Снег*. 2014. № 1 (125). С. 5–19.
 10. Чернов Р.А., Васильева Т.В., Кудиков А.В. Температурный режим приповерхностного слоя ледника Восточный Грэнфьорд (Западный Шпицберген) // *Лёд и Снег*. 2015. № 3 (131). С. 38–46.
 11. Дюргеров М.Б. Ошибки определения поверхностной абляции льда в точке // *МГИ*. 1972. Вып. 20. С. 145–151.
 12. Вишивцева Т.В., Чернов Р.А. Особенности пространственного распределения снежного покрова и поля температур в верхнем слое политермического ледника // *Лёд и Снег*. 2017. Т. 57. № 3. С. 373–380.
 13. Электронный ресурс: <http://toposvalbard.npolar.no/>.
 14. Троицкий Л.С. О балансе массы ледников разных типов на Шпицбергене // *МГИ*. 1988. Вып. 63. С. 117–121.
 15. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Накалов П.Р., Чернов Р.А. Оценка абляции на ледниках архипелага Шпицберген в начале XXI века // *Лёд и Снег*. 2010. № 3 (111). С. 13–18.
 16. Электронный ресурс: https://rp5.ru/Погода_в_Баренцбурге
 17. Кренке А.Н., Ходаков В.Г. О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха // *МГИ*. 1966. Вып. 12. С. 153–164.
 18. Зингер Е.М., Михалёв В.И. Аккумуляция снега на ледниках Шпицбергена // *МГИ*. 1967. Вып. 13. С. 86–100.
 4. Kohler J., James T.D., Murray T., Nuth C., Brandt O., Bartrand 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.
 5. Van Pelt W.J.J., Kohler J., Liston G.E., Hagen J.O., Luks B., Reijmer C.H., Pohjola V.A. Multidecadal climate and seasonal snowconditions in Svalbard. *Journ. of Geophys. Research. Earth Surface*. 2016, 121: 2100–2117. doi: 10.1002/2016JF003999.
 6. Malecki J. Accelerating retreat and high-elevation thinning of glaciers in central Spitsbergen. *The Cryosphere*. 2016, 10: 1317–1329.
 7. Nuth C., Kohler J., König M., von Deschwanden A., Hagen J.O., Kääh A., Moholdt G., Pettersson R. Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard. *The Cryosphere*. 2013, 7: 1603–1621.
 8. Mavlyudov B.R., Savatyugin L.M., Solovyanova I.Yu. The reaction of glaciers of the Nordenskjöld Land (Spitsbergen) to climate change. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2012, 1 (91): 67–77. [In Russian].
 9. Vasilenko E.V., Glazovsky A.F., Lavrentiev I.I., Macheret Yu. Ya. Changes of hydrothermal structure of Austre Gronfjordbreen and Fridtjovbreen Glaciers in Svalbard. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 1 (125): 5–19. [In Russian].
 10. Chernov R.A., Vasilieva T.V., Kudikov A.V. Temperature regime of upper layer of the glacier East Gronfjordbreen (Svalbard). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 3 (131): 38–46. [In Russian].
 11. Dyurgerov M.B. Errors in determining the surface ablation of ice at a point. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1972, 20: 145–151. [In Russian].
 12. Vshivtseva T.V., Chernov R.A. Spatial distribution of snow cover and temperature in the upper layer of a polythermal glacier. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 373–380. [In Russian].
 13. <http://toposvalbard.npolar.no/>.
 14. Troitsky L.S. On the mass balance of glaciers of various types on Spitsbergen. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1988, 63: 117–121. [In Russian].
 15. Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Nakalov P.R., Chernov R.A. Assessment of ablation on the Spitsbergen archipelago glaciers at the beginning of 21st century. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2010, 3 (111): 13–18. [In Russian].
 16. https://rp5.ru/Погода_в_Баренцбурге.
 17. Krenke A.N., Khodakov V.G. On the connection between surface melting of glaciers and air temperature. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1966, 12: 153–164. [In Russian].
 18. Zinger E.M., Mikhalev V.I. Accumulation of snow on Spitsbergen glaciers. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1967, 13: 86–100. [In Russian].