

УДК 55.556

ВЕКОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДОВЫХ РЕСУРСОВ ШПИЦБЕРГЕНА¹

© 2017 г. В. М. Федоров*, Б. Р. Мавлюдов**, Л. М. Саватюгин***

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы

**Институт географии РАН
119017 Москва, Старомонетный пер., 29

***Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт
199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

E-mail: fedorov.msu@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2014 г.

Определена связь многолетней изменчивости суммарного баланса массы ледников Шпицбергена с вариациями солнечной радиации, поступающей на верхнюю границу атмосферы за год в северное полушарие. На основе уравнения регрессии рассчитаны значения суммарного баланса массы ледников Брёггер Восточный и Ловен Средний на период с 1850 по 2050 г. Показано, что тенденция сокращения ледовых ресурсов Шпицбергена связана с усилением межширотного теплообмена и усилением парникового эффекта за счет накопления тепла от приходящей солнечной радиации.

Ключевые слова: ледовые ресурсы, суммарный баланс массы льда, глобальный водообмен, вековые тенденции, сокращение ледовых ресурсов.

DOI: 10.7868/S032105961702002X

Ледники – индикаторы климатических условий, и многолетняя тенденция их развития отражают направленность климатических изменений. В современную эпоху отмечается тенденция глобального потепления климата на Земле [31]. Следствие изменения климатических условий – изменения в системе глобального водообмена, один из элементов которого – горные ледники. Наиболее заметно потепление климата проявляется в арктических районах. Однако причины вековой тенденции изменения климата и, соответственно, ледников, развивающихся в меняющихся климатических условиях, однозначно не определены.

Один из классических районов разнообразных форм оледенения в Арктике – архипелаг Шпицберген. Ледниками покрыто 60% его поверхности [2, 4, 6, 9, 11, 12, 19, 20, 27, 28, 33]. Вековые тенденции изменения суммарного баланса массы ледников Шпицбергена исследуются на примере ледников Брёггер Восточный и Ловен Средний, имеющих наиболее продолжительные (для ледников Шпицбергена) ряды балансовых измерений. Ледники Брёггер Восточный и Ловен Средний расположены на о. Западный Шпицберген и считаются репрезентативными для этого района [2, 10–12, 36]. Считается, что ведущий фактор межгодовой и многолетней изменчивости

баланса массы ледников западной части Шпицбергена – колебания интенсивности юго-западных потоков тепла и влаги [8]. Однако сравнение динамики баланса массы ледников с многолетней изменчивостью солнечной радиации не проводилось. Тем не менее известно, что годовой, сезонный и суточный ход изменения температуры воздуха определяется в основном поступающей от Солнца энергией. Изменение температурных условий – один из ведущих факторов изменения баланса массы ледников, в том числе и в многолетнем режиме. Исследование связи динамики суммарного баланса массы ледников с вариациями приходящей солнечной радиации представляется перспективным в отношении выявления многолетней или вековой тенденции изменения массы ледников. Используемое в статье понятие “суммарного баланса массы ледников” подразумевает сумму годовых балансов массы ледников за вековой отрезок времени. За оценку ледовых ресурсов принимается суммарный баланс массы льда двух репрезентативных для Шпицбергена ледников – Брёггер Восточный и Ловен Средний. Задача изучения баланса массы ледников занимает центральное место в гляциологии, поскольку соотношение прихода и расхода вещества определяет условия их существования и направление эволюции [7, 10, 14, 19, 36]. Динамика массы льда характеризует изменение ледовых ресурсов и от-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты 15-29-06967 и 15-05-07590.

ражает степень их участия в процессах глобального водообмена.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

По данным астрономических эфемерид (JPL Planetary and Lunar Ephemerides) DE-406 [30] рассчитывались значения приходящей солнечной радиации (без учета атмосферы) за тропические годы, полугодия и сезоны года для различных широтных зон (протяженностью по широте 5°) земного эллипсоида в период от 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э. Точность эфемерид (эфемериды – таблицы небесных координат Солнца, Луны и планет, вычисленных через равные промежутки времени) по расстоянию между Землей и Солнцем составляет 10^{-9} а.е. (или 0.1496 км), по времени – 1 с (или 0.0000115 сут). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80) с длинами полуосей, равными 6378137 м (большая) и 6356752 м (малая). Расчеты проводились с использованием ряда формул, из них основная –

$$I_{nm}(\phi_1, \phi_2) = \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_{\phi_1}^{\phi_2} \sigma(H, \phi) \left(\int_{-\pi}^{\pi} \Lambda(H, t, \phi, \alpha) d\alpha \right) d\phi \right) dt,$$

где I , Дж – приходящая солнечная радиация за элементарный n -й фрагмент m -го тропического года; σ , m^2 – площадной множитель, с помощью которого вычисляется площадной дифференциал $\sigma(H, \phi) d\alpha d\phi$ – площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида; α – часовой угол; ϕ – географическая широта, выраженные в радианах; H , м – высота поверхности эллипсоида относительно поверхности Земли; $\Lambda(H, \phi, t, \alpha)$, Вт/м² – инсоляция в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида; t , с – время. Шаги при интегрировании составляли: по долготе – 1° , по широте – 1° , по времени – $1/360$ продолжительности тропического года. При расчетах учитывались изменения расстояния между Землей и Солнцем и продолжительности периода обращения Земли (продолжительности тропического года) в связи с периодическими возмущениями орбитального движения Земли [16, 17, 23–25]. По результатам расчетов для периода с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. сформирована в матричной форме база данных приходящей (без учета атмосферы) солнечной радиации в широтные зоны Земли (протяженностью 5°) с шагом по времени в $1/12$ тропического года [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено сравнение значений суммарного баланса массы ледников Ловен Средний и Брёггер Восточный с рассчитанными значениями солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы (в северном полушарии за

год). Также проводилось сравнение суммарного баланса массы ледников с разностью солнечной радиации, поступающей в экваториальную (0° – 45°) и полярную (45° – 90°) области северного полушария. Ранее были найдены тесные связи между динамикой баланса массы ледников и циркуляционными процессами в атмосфере [14, 15]. В связи с этим в работе проведено сравнение значений суммарного баланса массы ледников с продолжительностью действия циркуляции групп “меридиональная южная” (МЮ) и “нарушения зональности” (НЗ) для вековых интервалов времени [5]. В качестве исходных данных по суммарному балансу массы использовались ряды инструментальных наблюдений (для ледника Брёггер Восточный – с 1967 по 2010 г. и для ледника Ловен Средний – с 1968 по 2010 г.), опубликованные в сборниках “Изменение ледников” (“Fluctuations of Glaciers”) [29], и реконструированные значения (с 1900 г. до начала инструментальных наблюдений за балансом массы ледников) [14, 15]. Предварительно полученные в результате реконструкции величины массы льда оценивались с учетом исторической информации и результатов известных гляциологических реконструкций. Изменение оледенения Шпицбергена с середины 1930-х гг. достаточно хорошо изучено в [1, 2, 6, 12, 13, 21, 22, 26–28, 32, 34], где показана общая тенденция сокращения ледников, продолжающаяся длительное время. Так, осредненный (с 1930-х гг. до 2004 г.) по восьми ледникам западного, северо-западного и центрального Шпицбергена диапазон величин потери слоя льда определяется в пределах от 25 до 110 м [9]. Значения, полученные авторами в результате реконструкции баланса массы ледников Ловен Средний и Брёггер Восточный, входят в этот диапазон ближе к нижней его границе. По имеющимся расчетам, объем льда ледников северо-западного района о. Западный Шпицберген за период с 1900 по 1976 г. сократился на 130 км^3 , или на 9.6% первоначального объема [2, 3]. Известны модели реконструкции динамики баланса массы анализируемых ледников, выполненные на основе данных реанализа и учитывающих значения индекса NAO, температуры воздуха и атмосферных осадков [32, 35]. По данным этих моделей, величина суммарного баланса массы за период с 1912 по 1848 г. на леднике Брёггер Восточный составила –18, а на леднике Ловен Средний –15 м в.э. Полученные авторами в результате реконструкции значения составляют соответственно –13 и –12 м в.э. Суммарная потеря массы с 1912 по 2005 г., по результатам, выполненной авторами, определяется для ледника Брёггер Восточный величиной 42 м в.э., для ледника Ловен Средний 33 м в.э. По результатам реконструкции, выполненной авторами статьи, потери массы льда за тот же период составляют 42.5 м в.э. для ледника Брёггер Восточный и

Значения коэффициента корреляции R суммарного баланса массы ледников с солнечной радиацией и с продолжительностью действия циркуляции НЗ и МЮ (в числителе – для ледника Брёггер Восточный, в знаменателе – для ледника Ловен Средний)

Вековой интервал, годы	Солнечная радиация		Группы циркуляции	
	приходящая	разность	НЗ	МЮ
1900–1999	0.894/0.889	–0.881/–0.874	0.692/0.656	–0.834/–0.809
1901–2000	0.896 /0.893	–0.882/–0.876	0.694/0.655	–0.840/–0.817
1902–2001	0.894/0.894	–0.884/–0.878	0.699/0.660	–0.847/–0.826
1903–2002	0.895/0.891	–0.887/–0.884	0.721/0.686	–0.849/–0.830
1904–2003	0.899/0.898	–0.888/–0.886	0.736/0.702	–0.853/–0.835
1905–2004	0.900/0.898	–0.888/–0.888	0.739/0.707	–0.852/–0.836
1906–2005	0.894/0.894	–0.888/–0.890	0.733/0.700	–0.851/–0.838
1907–2006	0.900/0.903	–0.884/–0.888	0.745/0.715	–0.847/–0.835
1908–2007	0.898/0.900	–0.881/–0.886	0.766/0.740	–0.839/–0.829
1909–2008	0.894/0.897	–0.879/–0.884	0.784/0.762	–0.831/–0.823
1910–2009	0.895/0.899	–0.876/–0.881	0.802/0.784	–0.826/–0.820
1911–2010	0.893/0.885	–0.876/–0.880	0.812/0.796	–0.821/–0.816
Среднее	0.896/0.896	–0.883/–0.883	0.744/0.714	–0.841/–0.826
1900–2010	0.905/0.903	–0.890/–0.887	0.764/0.734	–0.826/–0.811

36.7 м в.э. для ледника Ловен Средний. Таким образом, с применением различных моделей получены сходные результаты, согласующиеся также с историческими свидетельствами. Это позволяет считать результаты реконструкции приемлемыми для использования их в качестве исходных данных для дальнейших исследований.

Корреляционный анализ выполнялся по вековым интервалам с 1900–1999 гг. с последовательным смещением на один год (1901–2000 и т.д. до 1911–2010 гг.) – всего 12 вековых интервалов. В дальнейшем рассчитывался коэффициент корреляции (R) суммарного баланса массы каждого ледника с солнечной радиацией, приходящей за год в северное полушарие (без учета атмосферы), и с разностью солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную область северного полушария. Также рассчитывались значения R суммарного баланса массы ледников с продолжительностью действия циркуляции НЗ и МЮ (таблица).

Результаты расчетов показали, что значения R от одного векового интервала к другому меняются незначительно. Так, для ледника Брёггер Восточный отклонения R (от среднего для векового интервала значения) между суммарным балансом массы ледника и приходящей радиацией – 0.26%; между суммарным балансом массы ледника и разностью приходящей солнечной радиации в экваториальные и полярные районы северного полушария – 0.41%; между суммарным балансом массы ледника и продолжительностью действия циркуляции НЗ – 4.27%; между суммарным ба-

лансом массы ледника и продолжительностью действия циркуляции МЮ – 1.07%. Для ледника Ловен Средний связи характеризуются величинами отклонения 0.36, 0.47, 5.37 и 0.93 соответственно.

Как видим, отмечается тесная и устойчивая связь суммарного баланса массы ледников с величиной солнечной радиации и продолжительностью действия циркуляции МЮ и НЗ (по вековым интервалам). При этом для обоих ледников отмечаются в среднем равные величины отклика их суммарного баланса массы на вариации солнечной радиации. Отклик на продолжительность циркуляции НЗ и МЮ ледника Брёггер Восточный несколько превышает отклик ледника Ловен Средний. Большая чувствительность ледника Брёггер Восточный к циркуляционным процессам в атмосфере может объясняться его более западным (относительно ледника Ловен Средний) географическим положением, т.е. более близким к приходящим с юго-запада воздушным потокам, приносящим атмосферные осадки. Отклик на вариации приходящей солнечной радиации и продолжительность НЗ у обоих ледников положительный. Отклик на разность солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную области, и на продолжительность циркуляции МЮ – отрицательный. Таким образом, вековые тенденции сокращения суммарного баланса массы ледников Брёггер Восточный и Ловен Средний – следствие эффекта усиления межширотного теплообмена и увеличения продолжительности циркуляции МЮ [5, 14, 18].

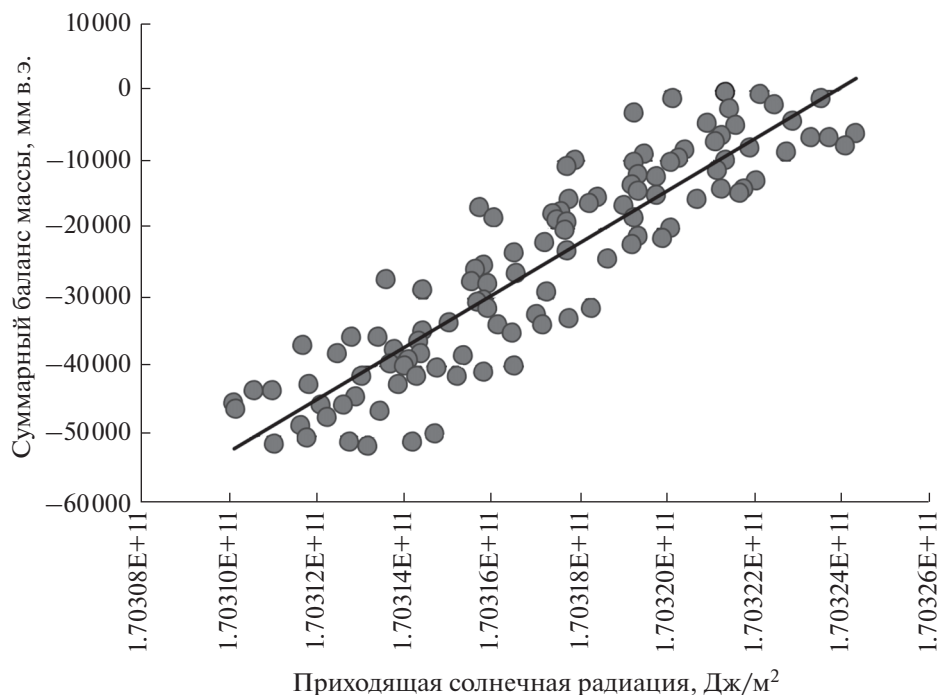


Рис. 1. Связь суммарного баланса массы ледника Брёггер Восточный с приходящей солнечной радиацией.

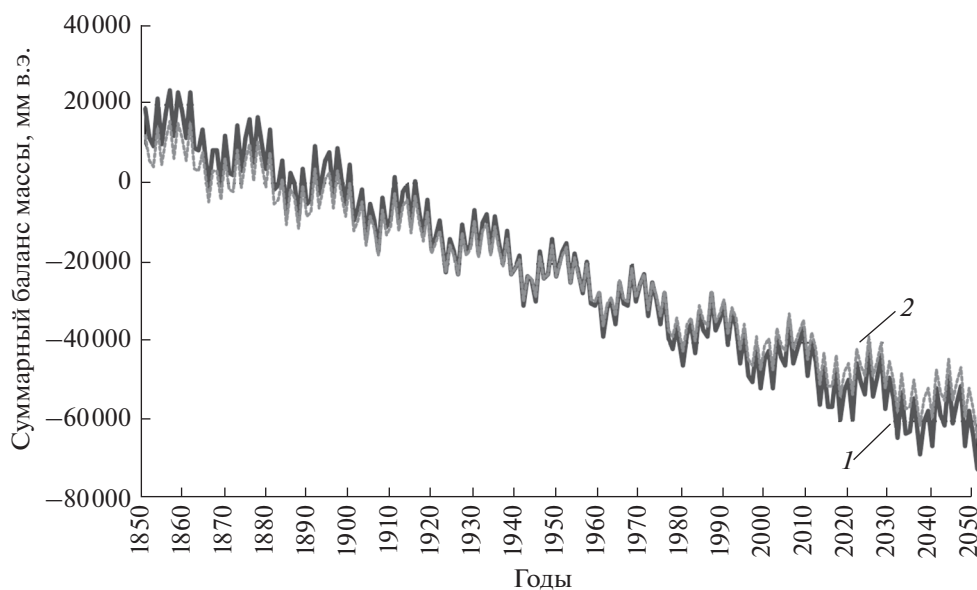


Рис. 2. Тенденции изменения суммарного баланса массы ледников Брёггер Восточный (1) и Ловен Средний (2).

С учетом больших значений R между приходящей (без учета атмосферы) в северное полушарие за тропический год солнечной радиацией и суммарным балансом массы получены уравнения линейной регрессии (рис. 1).

Полученные связи характеризуются достаточно высоким показателем аппроксимации: 0.819 (Брёггер Восточный) и 0.815 (Ловен Средний). С использованием значений приходящей солнеч-

ной радиации, рассчитанных по полученным уравнениям линейной регрессии, рассчитаны значения суммарного баланса массы для ледников Брёггер Восточный и Ловен Средний на период с 1850 по 2050 г. (рис. 2).

Величина среднегодового расхождения исходных и рассчитанных значений суммарного баланса массы характеризуются значениями 5259 мм в.э. — для ледника Брёггер Восточный и

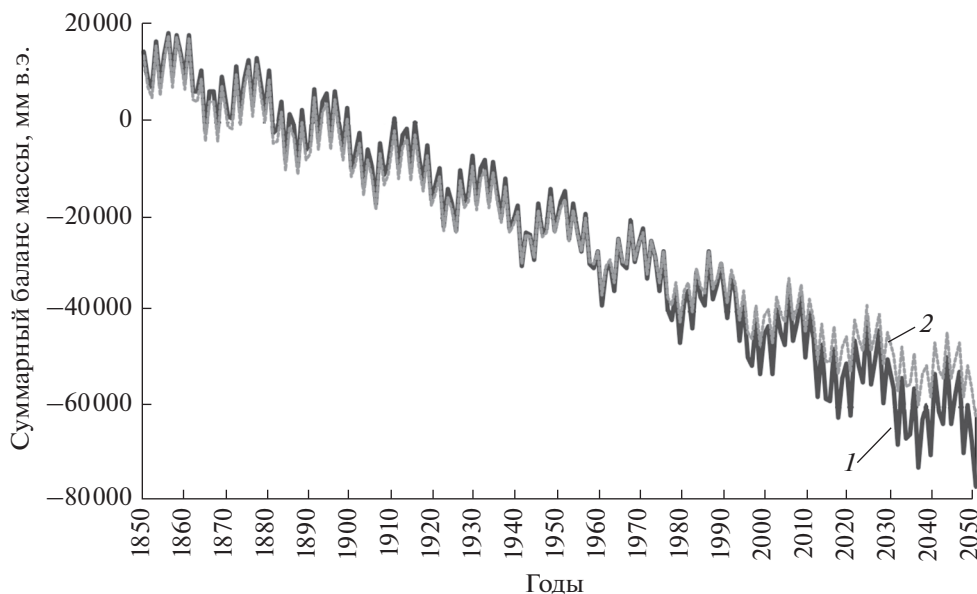


Рис. 3. Тенденции изменения суммарного баланса массы ледников Брёггер Восточный (1) и Ловен Средний (2), рассчитанного по уравнению регрессии (полином второй степени).

4422 мм в.э. — для ледника Ловен Средний, что составляет 20.9 и 17.8% от средней по модулю величины суммарного баланса массы для периода с 1900 по 2010 г. В то же время эти расхождения существенно превышают средние по модулю значения межгодовой изменчивости суммарного баланса массы (476 мм в.э. — Брёггер Восточный и 422 мм в.э. — Ловен Средний). В связи с этим рассчитанные значения суммарного баланса массы следует рассматривать как оценочные характеристики вековой тенденции изменения суммарного баланса, определяемой тенденцией приходящей солнечной радиации. Вариации годового баланса массы ледников, вероятно, — результат совместно действующих факторов: приходящей солнечной радиации и циркуляции в атмосфере. Величина R рассчитанных и фактических значений суммарного баланса — 0.905 для ледника Брёггер Восточный и 0.903 — для ледника Ловен Средний.

В дальнейшем была также исследована полиномиальная (полином второй степени) форма связи приходящей солнечной радиации и суммарного баланса массы этих ледников (рис. 3).

Значения R исходного и рассчитанного баланса массы ледников не меняются и составляют 0.905 — для Брёггера Восточного и 0.903 — для Ловена Среднего. Расхождение значений в исходных и фактических рядах — 5224 и 4436 мм в.э. для ледника Брёггер Восточный и Ловен Средний соответственно.

Кроме этого, исследовалась связь суммарного баланса массы этих ледников с накопленной солнечной радиацией, приходящей за год в северное полушарие, и с накопленной разностью солнеч-

ной радиации, приходящей в экваториальную и полярные области северного полушария. Накопление рассчитывалось с первого года, обеспеченного балансовыми данными (1900 г.), с последовательным суммированием годовых значений приходящей радиации — в будущее и последовательным вычитанием — в прошлое. В качестве оценочных характеристик связи также использовались значения R и среднегодовое расхождение исходных и рассчитанных значений суммарного баланса массы ледников с накопленной приходящей солнечной радиацией и накопленной разностью имеет равные и одинаковые по знаку значения. Для ледника Брёггер Восточный он составляет -0.998 , для ледника Ловен Средний -0.997 , т.е. отмечается связь, очень близкая к линейной (рис. 4).

R между исходными и рассчитанными (по уравнению линейной регрессии) величинами баланса массы по знаку становятся отрицательными, но по значению не изменяются. Расхождения существенно сокращаются: 835 мм в.э. (3.32% от модуля среднегодового значения суммарного баланса массы) для ледника Брёггер Восточный и 725 мм в.э. (2.91%) для ледника Ловен Средний. Характер изменения исходных и рассчитанных (по уравнению линейной регрессии) значений суммарного баланса массы представлен на рис. 5. Тенденции изменения суммарного баланса массы ледников Брёггер Восточный и Ловен Средний представлены на рис. 6.

Расчеты показывают, что общее сокращение ледовых ресурсов с 1850 по 2050 г. составляют 92.8 м в.э. — для ледника Брёггер Восточный и

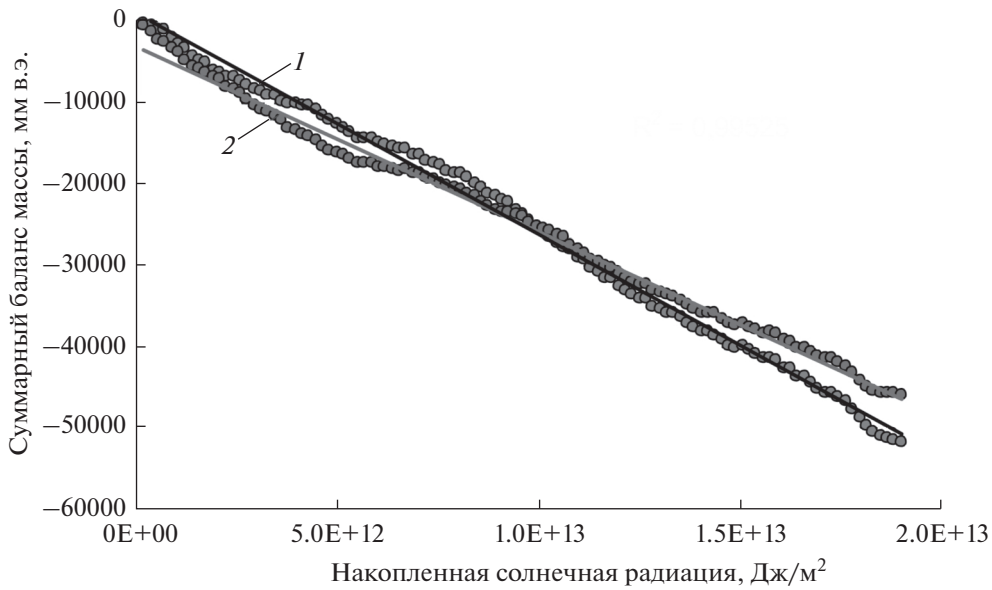


Рис. 4. Связь между суммарным балансом массы ледников Брёггер Восточный (1), Ловен Средний (2) и накопленной солнечной радиацией, приходящей в северное полушарие за тропический год.

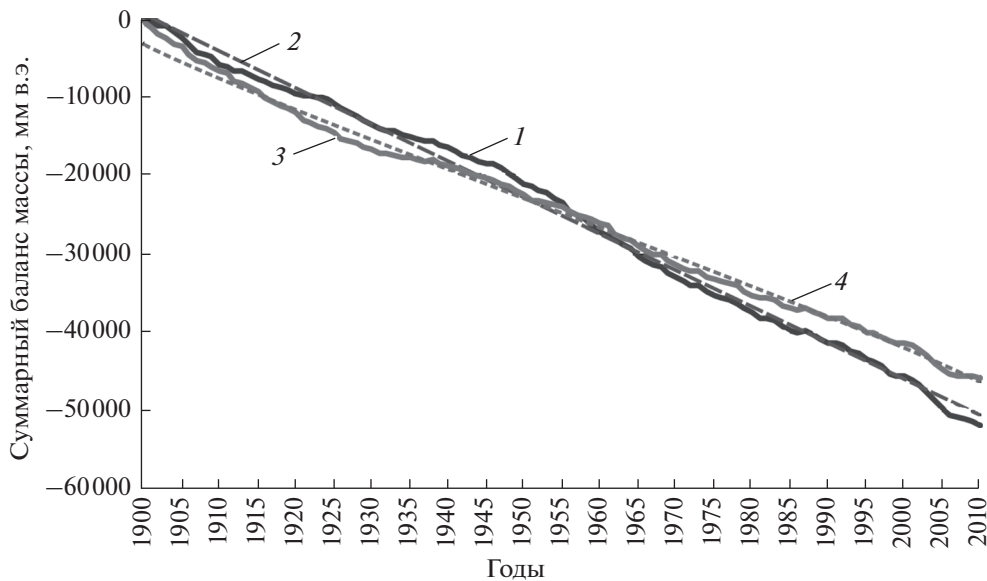


Рис. 5. Исходные (1, 3) и рассчитанные (2, 4) значения суммарного баланса массы льда за период 1900–2010 гг. (1, 2 – ледник Брёггер Восточный, 3, 4 – ледник Ловен Средний).

77.9 мм в.э. — для ледника Ловен Средний. Для ледника Брёггер Восточный среднегодовое сокращение массы льда характеризуется величиной 462 мм в.э., для ледника Ловен Средний — 387 мм в.э. Темпы сокращения массы льда на протяжении всего периода меняются незначительно.

Отдельно суммарный баланс массы рассчитывался на основе связи накопленной солнечной радиации и суммарного баланса массы, получен-

ного по результатам инструментальных наблюдений (т.е. данные реконструкции не учитывались). Значения R суммарного баланса массы ледников Брёггер Восточный и Ловен Средний с накопленной приходящей солнечной радиацией в этом случае составляют -0.994 и -0.995 соответственно. Как видно из рис. 6, тенденции изменения суммарного баланса массы льда, полученные по данным реконструкции и данным инструментальных наблюдений баланса массы, тождествен-

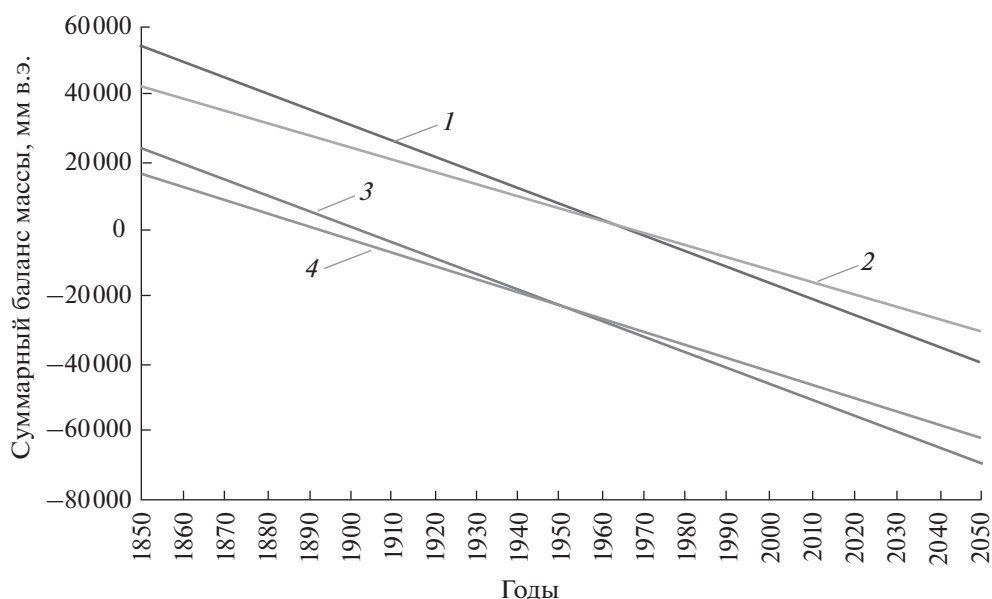


Рис. 6. Вековые тенденции изменения суммарного баланса массы ледников Брёггер Восточный (1 – по данным реконструкции, 3 – по данным инструментальных наблюдений) и Ловен Средний (2 – по данным реконструкции, 4 – по данным инструментальных наблюдений) с 1850 по 2050 г.

ны ($R = 1$). Сдвиг по вертикальной оси (на ~ 32 м в.э.) прямой суммарного баланса массы, рассчитанного на основе инструментальных наблюдений, от носителем прямой значений, полученных в результате реконструкции, объясняется различными точками отсчета баланса массы. В случае реконструированных данных за ноль принимаются значения 1899 г., в случае инструментальных – 1966 г. (Брёггер Восточный) и 1967 г. (Ловен Средний). Общее сокращение ледовых ресурсов с 1850 по 2050 г. в случае расчетов с использованием данных инструментальных наблюдений составляет 91.8 м в.э. – для ледника Брёггер Восточный и 72.3 м в.э. – для ледника Ловен Средний. Таким образом, общее расхождение суммарных балансов массы, рассчитанных на основе реконструкции и по данным инструментальных наблюдений, для интервала с 1850 по 2050 г. составляет 1.0 м в.э. для ледника Брёггер Восточный и 5.6 м в.э. для ледника Ловен Средний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вековые изменения ледовых ресурсов Шпицбергена определяются тенденцией усиления межширотного теплообмена, что подтверждается, во-первых, тесной отрицательной связью суммарного баланса массы ледников с разностью солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную область северного полушария, во-вторых, тесной отрицательной связью суммарного баланса массы ледников с изменением продол-

жительности меридиональной южной циркуляции.

Вековая тенденция изменения массы ледников Шпицбергена связана почти линейно с накопленной приходящей солнечной радиацией. Это – доказательство усиления естественного парникового эффекта в атмосфере за счет накопления тепла от солнечной радиации. Зависимость суммарного баланса массы ледников от величины накопленной приходящей радиации объясняется тем, что естественное усиление парникового эффекта – следствие усиления межширотного теплообмена и образования обратных связей в области стока тепла в пределах всей планеты (за счет повышения испарения и конденсации). Усиление межширотного теплообмена связано с вековым изменением наклона оси вращения Земли [18]. Таким образом, можно констатировать, что связь суммарного баланса массы ледников Шпицбергена с накопленной солнечной радиацией отражает механизм изменения глобального климата в современную эпоху [18], а вековые тенденции сокращения ледовых ресурсов Шпицбергена – следствие этого механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Альман Г.В.* Изменение ледников и колебания климата // МГИ. 1961. Вып. 2. С. 74–98.
2. *Гляциология Шпицбергена* / Под. ред. Котлякова В.М. М.: Наука, 1985. 200 с.
3. *Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б.* Ледники. М.: Мысль, 1989. 447 с.

4. *Зингер Е.М., Захаров В.Г., Жидков В.А.* Наблюдения за подвижкой ледника Фритъоф на Шпицбергене в 1997 году // МГИ. 1997. Вып. 83. С. 231–233.
5. *Кононова Н.К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.
6. *Корякин В.С.* Ледники Арктики. М.: Наука, 1988. 160 с.
7. *Котляков В.М.* Снежный покров и ледники Земли. М.: Наука, 2004. 448 с.
8. *Кренке А.Н., Корякин В.С., Тареева А.М.* Аккумуляция снега на высоте границы питания ледников Шпицбергена // МГИ. 1986. Вып. 56. С. 90–93.
9. *Мавлюдов Б.Р.* Состояние оледенения Шпицбергена в конце XX века // МГИ. 2006. Вып. 101. С. 146–152.
10. *Мавлюдов Б.Р., Саватюгин Л.М., Соловьянова И.Ю.* Реакция ледников Земли Норденшельда (арх. Шпицберген) на изменение климата // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. Вып.1(91). С. 67–77.
11. Оледенение Шпицбергена (Свальбарда). М.: Наука, 1975. 307 с.
12. Режим и эволюция полярных ледниковых покровов. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 232 с.
13. *Троицкий Л.С.* О балансе массы ледников разных типов на Шпицбергене // МГИ. 1988. Вып. 63. С. 117–121.
14. *Федоров В.М.* Динамика баланса массы ледников в связи с макроциркуляционными процессами в атмосфере. М.: Физматлит, 2011. 368 с.
15. *Федоров В.М.* Реконструкция динамики баланса массы арктических ледников в XX столетии на основе макроциркуляционной модели // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 3. С. 80–87.
16. *Федоров В.М.* Солнечная радиация и климат Земли. <http://www.solar-climate.com>. Дата обращения 09.06.2016.
17. *Федоров В.М.* Теоретический расчет межгодовой изменчивости солнечной постоянной // Астроном. вестн. 2012. Т. 46. № 2. С. 184–189.
18. *Федоров В.М.* Эффект усиления межширотного теплообмена и изменение площади морских льдов в Северном полушарии // Сб. тез. всерос. конф. с междунар. участием “Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата”. Архангельск: ИД САФУ, 2014. С. 35–36.
19. *Чишков О.П.* Оледенение северной полярной области. М.: Наука, 1976. 240 с.
20. *Шумский П.А.* Современное оледенение Советской Арктики // Тр. АНИИ. 1949. Т. 11. 262 с.
21. *Bevan S., Luckman A., Murray T., Sykes H., Kohler J.* Positive mass balance during the late 20th century on Austfonna Svalbard, revealed using satellite radar interferometry // Annals of Glaciol. 2007. V. 46. P. 117–122.
22. *Etzelmuller B., Sollid J.L.* Long-term mass balance of selected polythermal glaciers on Spitsbergen, Svalbard // Norsk geografisk Tidsskrift. 1996. V. 50. P. 55–66. doi 10.1080/00291959608552352
23. *Fedorov V.M.* Interannual Variability of the Solar Constant // Solar System Research. 2012. V. 46. № 2. P. 170–176. doi 10.1134/S0038094612020049
24. *Fedorov V.M.* Interannual Variations in the Duration of the Tropical Year // Dok. Earth Sciences. 2013. V. 451. Pt 1. P. 750–753. doi 10.1134/S1028334X13070015
25. *Fedorov V.M.* Periodic Perturbations and Small Variations of the Solar Climate of the Earth // Dokl. Earth Sciences. 2014. V. 457. Pt 1. P. 868–871. doi 10.1134/S1028334X14070137
26. *Hagen J.O., Kohler J., Melwold K., Winther J.-C.* Glaciers in Svalbard: mass balance, runoff and freshwater // Polar research. 2003. V. 22(2). P. 145–159.
27. *Hagen J.O., Liestol O.* Long term glacier mass balance investigations in Svalbard 1950–1988 // Annals of Glaciol. 1990. № 14. P. 102–106.
28. *Hagen J.O., Liestol O., Roland E., Jorgensen T.* Glacier Atlas of Svalbard and Jan Mayen. Oslo: Norsk Polarinstitutt. Meddelelser, 1994. № 129. 141 p.
29. <http://www.geo.unizh.ch/wgms/> World Glacier Monitoring Service Department of Geography Univ. Zurich.
30. <http://ssd.jpl.nasa.gov> – NASA. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics).
31. http://www.wmo.int/pages/index_ru.htm.
32. *Lefauconnier B.G., Hagen J.O.* Glaciers and climate in Svalbard: statistical analysis and reconstruction of the Broggenbreen mass balance for the last 77 years // Annals of Glaciol. 1990. V. 14. P. 148–152.
33. *Liestol O.* Glaciers of Europe – Glaciers of Svalbard, Norway Satellite image atlas of glaciers of the world // United State Geol. Survey Professional Paper. 1993. V. 1386E. P. 127–151.
34. *Nuth C., Moholdt G., Kohler J., Hagen J.O., Kaab A.* Svalbard glaciers elevation changes and contribution to sea level rise // J. Geoph. Res. 2010. V. 115. F01008. doi 10.1029/2008JF001223
35. *Rasmussen L.A., Kohler J.* Mass balance of three Svalbard glaciers reconstructed back to 1948 // Polar Res. 2007. V. 26. P. 168–174.
36. *Solovyanova I.Yu., Mavlyudov B.R.* Mass balance observations on some glaciers in 2004/2005 and 2005/2006 balance years, Nordenskiöld Land, Spitsbergen // The Dynamics and Mass Budget of Arctic Glaciers. Extended abstracts. Workshop and GLACIODYN (IPY) meeting. IASC Working group on Arctic Glaciology. Pontresina, Switzerland: Inst. Marine and Atmos. Res. Utrecht, Utrecht Univ., 2007. P. 115–120.