

Вековые тенденции изменения ледовых ресурсов Шпицбергена

В.М. Федоров¹, Б.Р. Мавлюдов², Л.М. Савадюгин³

¹ – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

² – Институт географии Российской Академии Наук

³ – Арктический и Антарктический научно – исследовательский институт

Ледники являются компонентами природной среды и индикаторами климатических условий. Многолетние тенденции изменения массы ледников отражают направленность климатических изменений. В современную эпоху отмечается тенденция потепления глобального климата Земли (http://www.wmo.int/pages/index_ru.html; <http://www.solar-climate.com/geo/pregeo.htm>). 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.

Одним из классических районов развития разнообразных форм оледенения в Арктике является архипелаг Шпицберген. Ледниками покрыто около 60% его поверхности (Шумский 1949; Оледенение Шпицбергена, 1975; Гляциология Шпицбергена, 1985; Режим и эволюция..., 1992; Listol, 1993; Hagen et al., 1990, 1994; Зингер и др., 1997; Мавлюдов, 2006). Вековые тенденции изменения суммарного баланса массы ледников Шпицбергена исследуются нами 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 острове Западный Шпицберген на южном берегу Конгс-фиорда (Земля Джеймса) в северо-западной части острова Западный Шпицберген и считаются репрезентативными для этого района (Оледенение Шпицбергена, 1975; Гляциология Шпицбергена, 1985; Режим и эволюция..., 1992; Solovyanova, Mavlyudov, 2007; Мавлюдов и др., 2012). Считается, что ведущим фактором межгодовой и многолетней изменчивости баланса массы ледников западной части Шпицбергена, являются колебания интенсивности юго-западных потоков тепла и влаги (Кренке и др., 1986). Однако сравнение динамики баланса массы ледников в связи с многолетней изменчивостью солнечной радиации не проводилось. Тем не менее, известно, что годовой, сезонный и суточный ход изменения температуры воздуха, в основном, определяется поступающей от Солнца энергией. Изменение же температурных условий является одним 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 на вековом отрезке 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 (Чижов, 1976; Котляков, 2004; Solovyanova, Mavlyudov, 2007; Мавлюдов и др., 2012; Федоров, 2011). Динамика

массы льда является характеристикой изменения ледовых ресурсов, и отражает степень их участия в процессах глобального водообмена.

Методика расчетов

По данным астрономических эфемерид (JPL Planetary and Lunar Ephemerides) DE-405/406 (<http://ssd.jpl.nasa.gov>) рассчитывались значения приходящей солнечной радиации (при отсутствии атмосферы) за тропические годы, полугодия и сезоны года в различные широтные зоны (протяженностью в 5° широты) земного эллипсоида в интервале от 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э. Точность эфемерид 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 (большие) и 6356752 м (малая). Расчеты производились с использованием ряда формул, среди которых основным было выражение:

$$I_{nm}(\varphi_1, \varphi_2) = \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma(H, \varphi) \left(\int_{-\pi}^{\pi} \Lambda(H, t, \varphi, \alpha) d\alpha \right) d\varphi \right) dt, \quad (1)$$

где I – приходящая солнечная радиация за элементарный n -й фрагмент m -го тропического года (Дж); σ – площадной множитель (м^2), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал $\sigma(H, \varphi) d\alpha d\varphi$ – площадь бесконечно малой прямоугольной ячейки эллипсоида; α – часовой угол, φ – географическая широта, выраженные в радианах; H – высота поверхности эллипсоида относительно поверхности Земли (м); $\Lambda(H, \varphi, t, \alpha)$ – инсоляция в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида ($\text{Вт}/\text{м}^2$), t – время (с). Шаги при интегрировании составляли: по долготе 1°, по широте 1°, по времени 1/360 часть 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 (Федоров, 2012; Fedorov, 2012, 2013, 2014). По результатам расчетов для периода с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. была в матричной форме сформирована база данных приходящей (в отсутствии атмосферы) солнечной радиации в широтные зоны Земли (протяженностью в 5 градусов) с шагом по времени в 1/12 часть тропического года (<http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm>).

Результаты и их обсуждение

Для выявления возможных закономерностей проводилось 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 и полярную область северного полушария. Ранее нами были найдены тесные связи между динамикой баланса массы ледников и циркуляционными процессами в атмосфере (Федоров, 2009, 2011). В связи с этим, в работе проведено сравнение значений суммарного баланса массы ледников с продолжительностью действия групп циркуляции – меридиональной южной и нарушение зональности для вековых интервалов времени (Кононова, 2009; <http://www.atmospheric-circulation.ru>). В качестве исходных

данных по суммарному балансу массы использовались ряды инструментальных наблюдений (для ледника Брёггер Восточный – с 1967 по 2010 гг. и для ледника Ловен Средний – с 1968 по 2010 гг.), опубликованные в сборниках *Fluctuations of Glaciers* (<http://www.geo.unizh.ch/wgms/>) и реконструированные значения с 1900 года до года начала инструментальных наблюдений за балансом массы ледников (Федоров, 2009, 2011). Корреляционный анализ выполнялся по вековым интервалам, начиная 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 рассчитывались значения коэффициента корреляции (R) суммарного баланса массы каждого ледника с солнечной радиацией, приходящей за год в северное полушарие (в отсутствии атмосферы), и с разностью солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную область северного полушария. Также рассчитывались значения R в качестве оценки связи между суммарным балансом массы ледников и продолжительностью групп циркуляции: нарушения зональности (НЗ) и меридиональной южной (МЮ). Полученные значения коэффициента корреляции представлены в табл. 1.

Табл. 1. Значения коэффициента корреляции (R) суммарного баланса массы ледников с солнечной радиацией и с продолжительностью групп циркуляции (в числителе – для ледника Брёггер Восточный, в знаменателе – для ледника Ловен Средний).

Вековой интервал	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

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 R) 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 группы нарушения зональности – 4,27%; между суммарным балансом массы ледника и продолжительностью меридиональной южной циркуляции – 1,07%. Для ледника Ловен Средний связи характеризуются значениями отклонения составляющими: 0,36%, 0,47%, 5,37% и 0,93%, соответственно.

Как видим, отмечается тесная и устойчивая связь суммарного баланса массы ледников с солнечной радиацией и продолжительностью групп 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 групп 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 несколько более западным (относительно ледника Ловен Средний) положением (то есть, более близким к приходящим с юго-запада воздушным потокам, приносящим атмосферные осадки). Отклик на вариации приходящей солнечной радиации и продолжительность НЗ для обоих ледников положительный. Отклик на разность солнечной радиации приходящей в экваториальную и полярную область и на продолжительность меридиональной южной циркуляции – отрицательный. Таким образом, вековые тенденции сокращения суммарного баланса массы ледников Брёггер Восточный и Ловен Средний являются следствием эффекта усиления межширотного теплообмена (Федоров, 2014) и увеличения продолжительности группы меридиональной южной циркуляции (Кононова, 2009; Федоров, 2011; <http://www.atmospheric-circulation.ru>).

С учетом более высоких значений R между приходящей (в отсутствии атмосферы) за тропический год солнечной радиацией в северное полушарие и суммарным балансом массы были получены уравнения линейной регрессии (рис. 1, 2).

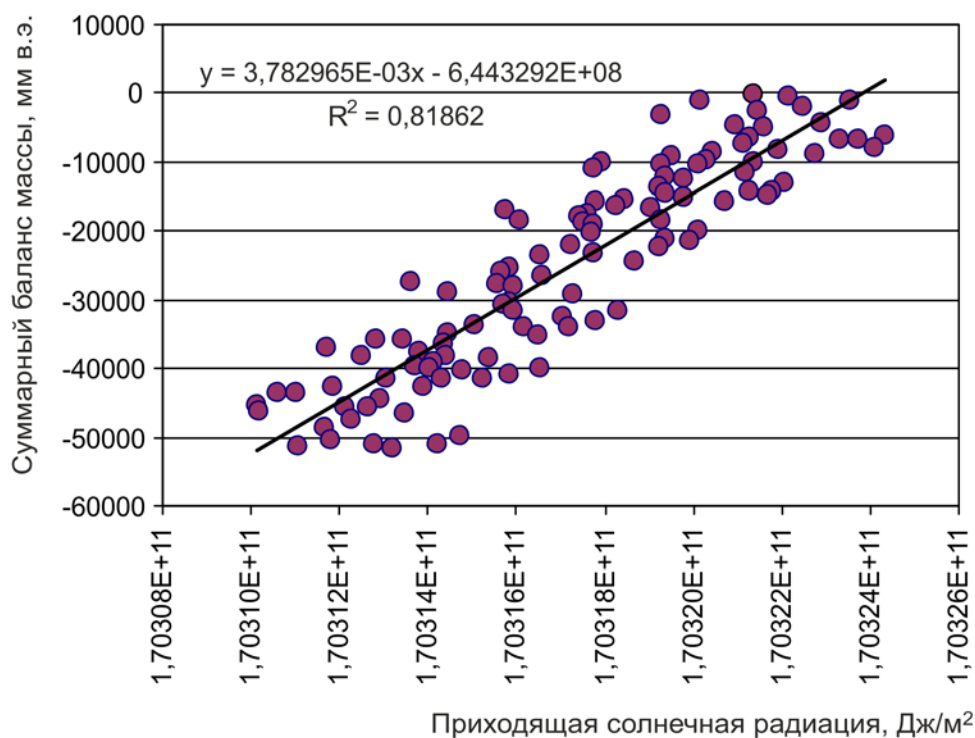


Рис. 1. Связь суммарного баланса массы ледника Брёггер Восточный с приходящей солнечной радиацией

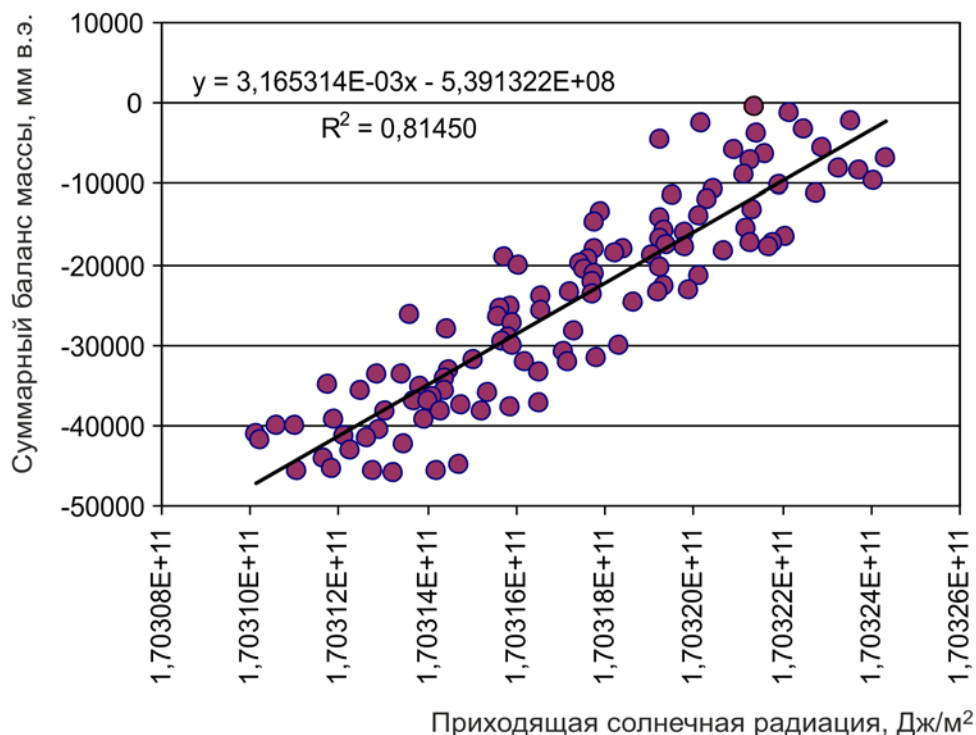


Рис. 2. Связь суммарного баланса массы ледника Ловен Средний с приходящей солнечной радиацией

Полученные связи характеризуются достаточно высоким показателем аппроксимации (0,819 и 0,815). С использованием рассчитанных значений приходящей солнечной радиации по полученным уравнениям линейной регрессии были рассчитаны значения суммарного баланса массы для ледников Брёггер Восточный и Ловен Средний на период с 1850 по 2050 гг. (рис. 3).

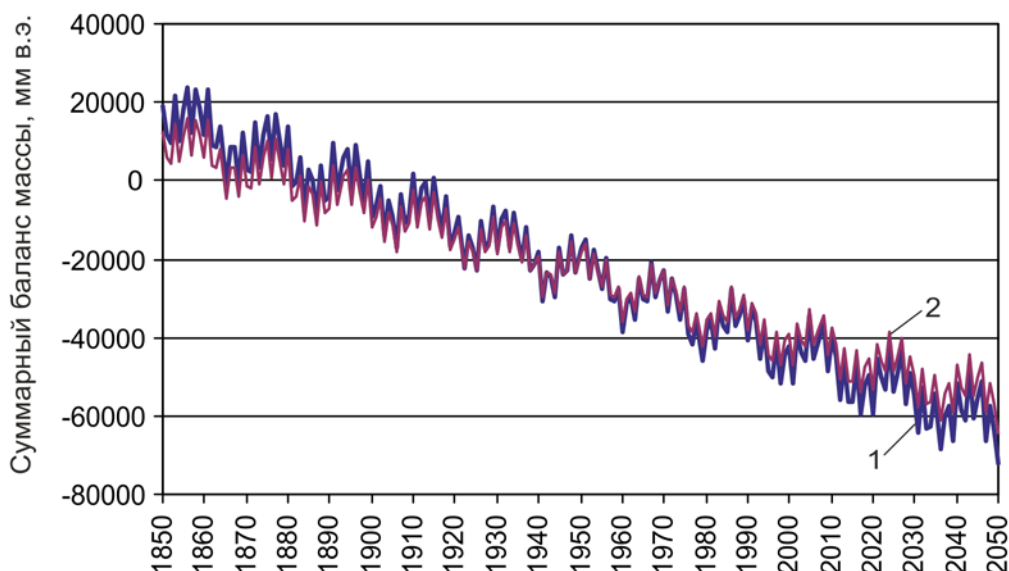


Рис. 3. Тенденции изменения суммарного баланса массы ледников Брёггер Восточный (1) и Ловен Средний (2), рассчитанного по уравнению линейной регрессии.

Среднегодовое расхождение исходных значений суммарного баланса массы и рассчитанных значений характеризуются величинами 5259 мм в.э. – для ледника Брёггер Восточный и 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 гг. В тоже 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 эти 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, являются результатом совместно действующих факторов: приходящей солнечной радиации и циркуляционных процессов в атмосфере. Коэффициент корреляции рассчитанных и фактических значений суммарного баланса характеризуется значением 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. 4).

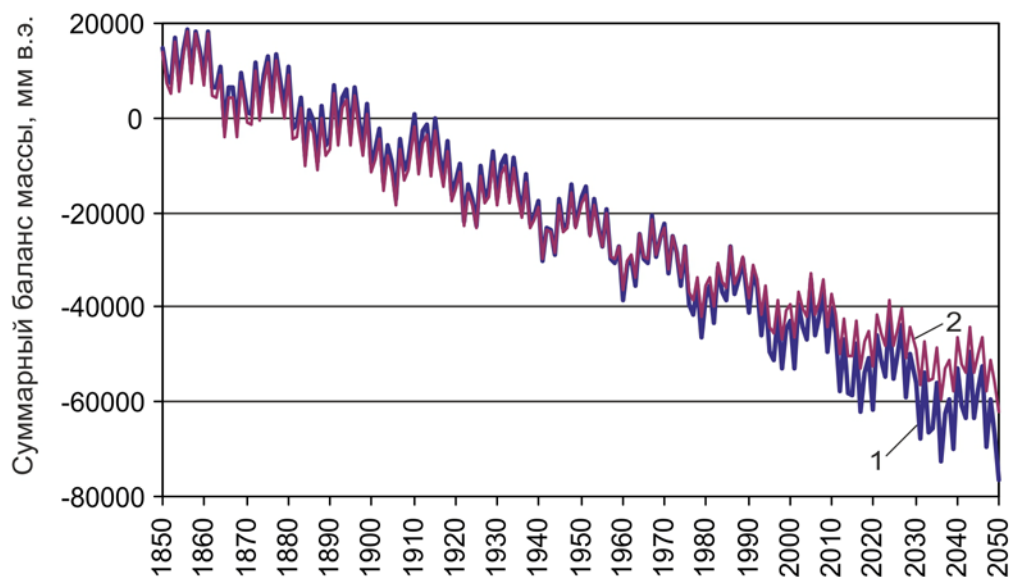


Рис. 4. Тенденции изменения суммарного баланса массы ледников Брёггер Восточный (1) и Ловен Средний (2), рассчитанного по уравнению регрессии (полином второй степени).

Значения коэффициента корреляции исходных и рассчитанных значений баланса массы ледников не меняются и составляют 0,905 – для Брёггера Восточного и 0,903 – для Ловена Среднего. Расхождение исходных рядов с фактическими характеризуются значениями 5224 мм в.э. 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 накопленной разностью солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярные области северного полушария. Накопление рассчитывалось с первого года, охваченного балансовыми данными (1900), последовательным суммированием годовых значений приходящей радиации – в будущее и последовательным вычитанием – в прошлое. В качестве оценочных характеристик связи также использовались значения коэффициента корреляции и среднегодовое расхождение исходных и рассчитанных значений

суммарного баланса массы ледников. Коэффициент корреляции суммарного баланса ледников с накопленной приходящей солнечной радиацией и накопленной разностью характеризуется равными и одинаковыми по знаку значениями. Для ледника Брёггер Восточный оно составляет -0,998, для ледника Ловен Средний -0,997. То есть, отмечается связь очень близкая к линейной (рис. 5).

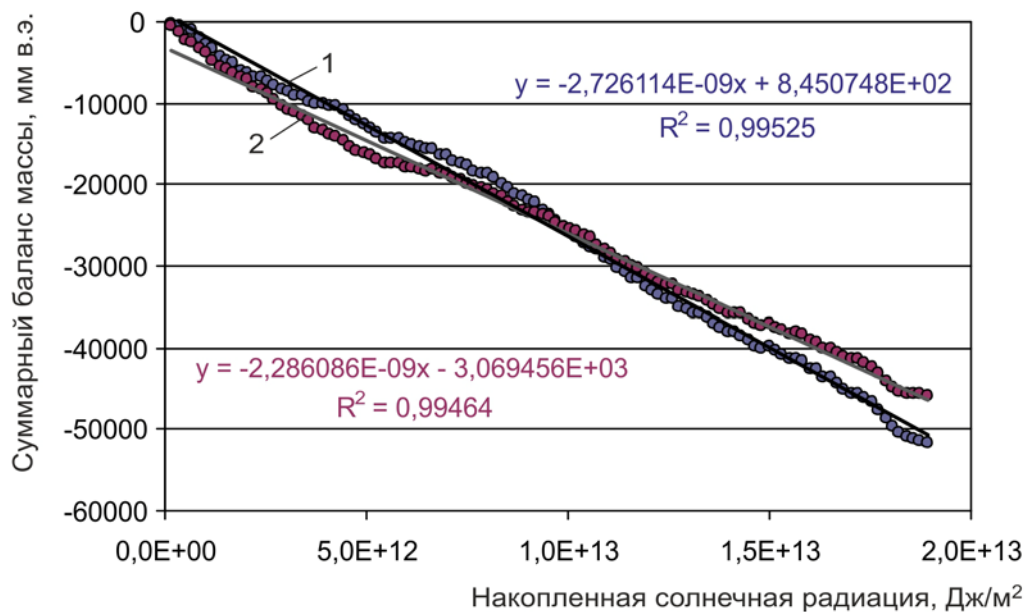


Рис. 5. Связь суммарного баланса массы ледников (1 – Брёггер Восточный, 2 – Ловен Средний) с накопленной солнечной радиацией, приходящей в северное полушарие за тропический год.

Значения коэффициента корреляции между исходными и рассчитанными (по уравнению линейной регрессии) значениями баланса массы по знаку становятся отрицательными, но по значению не изменяются. Значения расхождения существенно сокращаются. Они характеризуются величинами 835 мм в.э. (3,32% от модуля среднегодового значения суммарного баланса массы) для ледника Брёггер Восточный и 725 мм в.э. (2,91%). Характер изменения исходных значений суммарного баланса массы с рассчитанными (по уравнению линейной регрессии) представлен на рис. 6. Тенденции изменения суммарного баланса массы ледников Брёггер Восточный и Ловен Средний представлены на рис. 7.

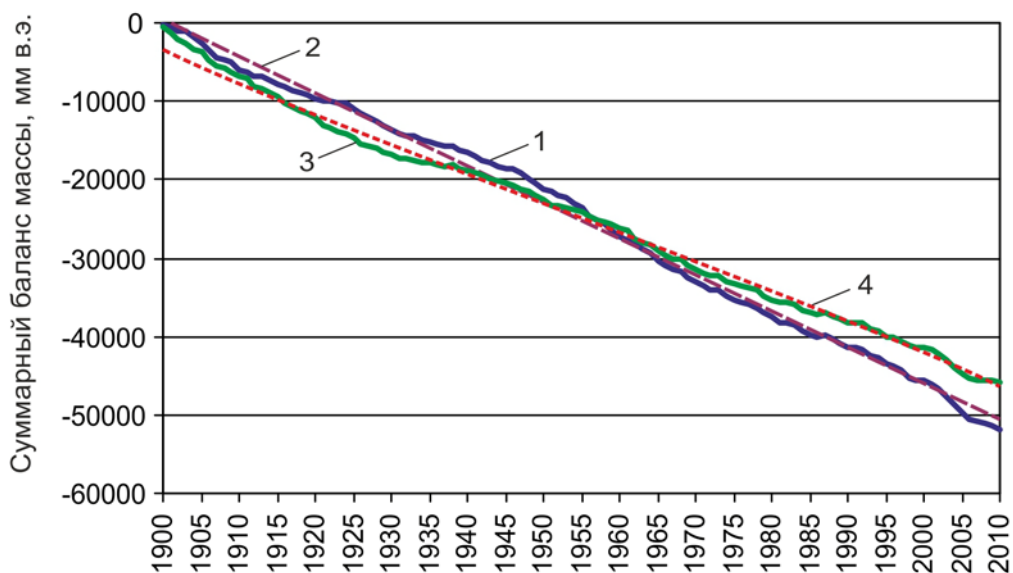


Рис. 6. Исходные (1, 3) и рассчитанные (2, 4) значения суммарного баланса массы льда за период 1900 – 2010 гг. (1,2 – ледник Брёггер Восточный, 3,4 – ледник Ловен Средний)

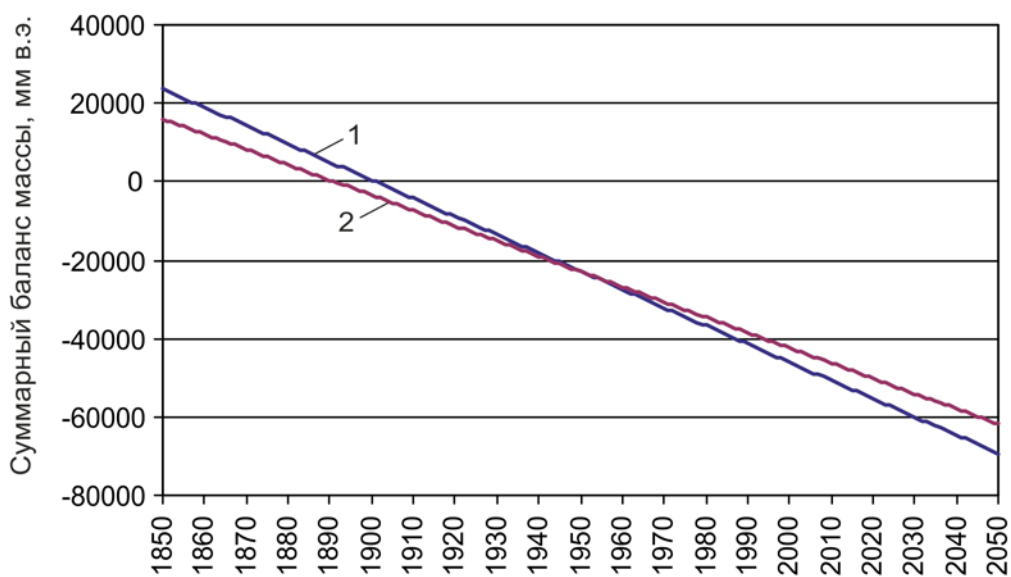


Рис. 7. Тенденции изменения суммарного баланса массы ледников Брёггер Восточный (1) и Ловен Средний (2) с 1850 по 2050 гг.

Расчеты показывают, что общее сокращение ледовых ресурсов составляет с 1850 по 2050 гг. 92,8 м в.э. – для ледника Брёггер Восточный и 77,9 м 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.

На более коротких рядах инструментальных наблюдений (без реконструированных значений) связь несколько нарушается влиянием других факторов (положение по отношению к преобладающим воздушным потокам, гипсометрическая высота, экспозиция и т.д.). Однако тенденция все же сохраняется. Значения коэффициента корреляции суммарного баланса массы ледников Брёггер Восточный и Ловен Средний с накопленной

приходящей солнечной радиацией в этом случае составляют $-0,994$ и $-0,995$ соответственно. Связь суммарного баланса массы с накопленной разностью солнечной радиации приходящей в экваториальную и полярную область северного полушария характеризуется такими же значениями коэффициента корреляции.

Заключение

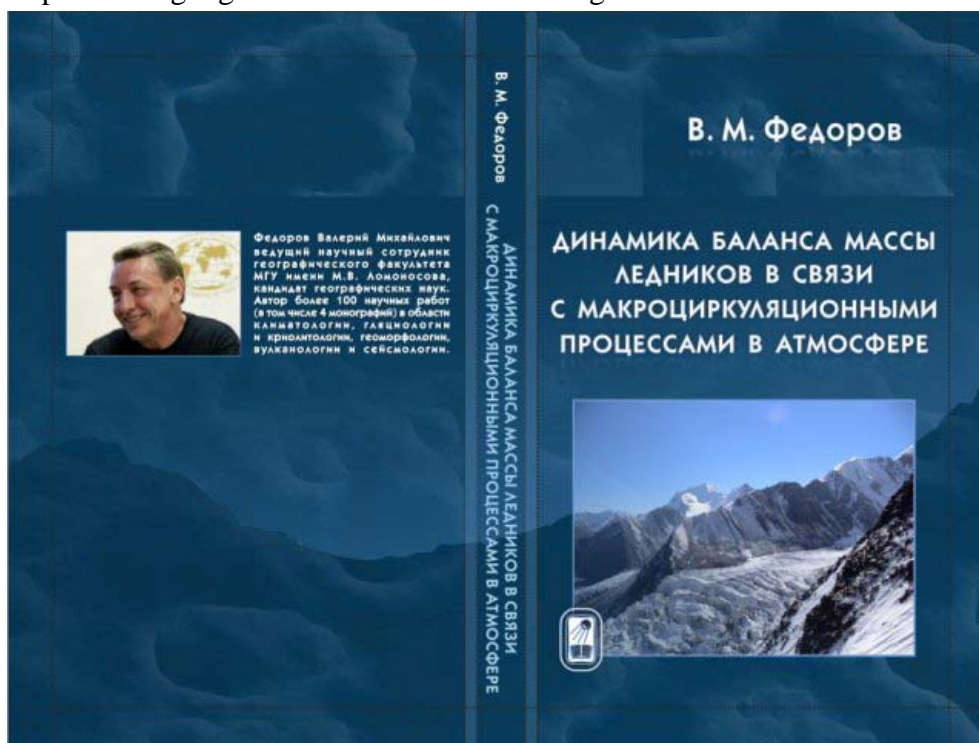
Вековая тенденция изменения ледовых ресурсов Шпицбергена определяется тенденцией усиления межширотного теплообмена, что подтверждается, во-первых, тесной отрицательной связью суммарного баланса массы ледников с разностью солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную область северного полушария. Во-вторых, тесной отрицательной связью суммарного баланса массы ледников с изменением продолжительности меридиональной южной циркуляции.

Вековая тенденция изменения ледников связана почти линейно с накопленной приходящей солнечной радиацией. Это является доказательством усиления естественного парникового эффекта в атмосфере за счет накопления тепла солнечной радиации. Зависимость суммарного баланса массы от величины накопленной приходящей радиации объясняется тем, что естественное усиление парникового эффекта является следствием 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 (Федоров, 2014). Таким образом, можно констатировать, что связь с накопленной солнечной радиацией отражает механизм изменения глобального климата в современную эпоху (<http://www.solar-climate.com/pb/ov.htm>), а вековые тенденции сокращения ледовых ресурсов Шпицбергена являются следствием этого механизма. Следовательно, вековая тенденция изменения массы льда исследуемых ледников Шпицбергена, определяется, главным образом, радиационным фактором, а исследуемые ледники являются индикаторами изменения глобального климата Земли.

Литература

1. Гляциология Шпицбергена / Под. Ред. В.М. Котлякова. – М.: Наука, 1985. – 200 с.
2. Зингер Е.М., Захаров В.Г., Жидков В.А. Наблюдения за подвижкой ледника Фритьюф на Шпицбергене в 1997 году // МГИ, 1997. – Вып. 83. – С. 231 – 233.
3. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л.Дзердзеевскому. – М.: Воентехиниздат, 2009. – 372 с.
4. Кононова Н.К. Колебания циркуляции атмосферы в северном полушарии в XX – начале XXI века [Электронный ресурс] / Н. К. Кононова. – URL : <http://www.atmospheric-circulation.ru>. Проверено 09.10.2014.
5. Котляков В.М. Снежный покров и ледники Земли. – М.: Наука, 2004. – 448 с.
6. Кренке А.Н., Корякин В.С., Тареева А.М. Аккумуляция снега на высоте границы питания ледников Шпицбергена // МГИ, 1986. – Вып. 56. – С. 90 – 93.
7. Мавлюдов Б.Р. Состояние оледенения Шпицбергена в конце XX века // МГИ, 2006. – Вып. 101. – С. 146 – 152.
8. 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.

9. Оледенение Шпицбергена (Свальбарда). – М.: Наука, 1975. – 307 с.
10. Режим и эволюция полярных ледниковых покровов. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 232 с.
11. Федоров В.М. Теоретический расчет межгодовой изменчивости солнечной постоянной // *Астрономический вестник*, 2012. – Т. 46. – № 2. – С. 184 – 189.
12. 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.
13. Федоров В.М. Динамика баланса массы ледников в связи с макроциркуляционными процессами в атмосфере. – М.: Физматлит, 2011. – 368 с.
<https://drive.google.com/file/d/0BxDu9b2Juagad1I4T3RxYVBAekU/view?usp=sharing>



14. Федоров В.М. Эффект усиления межширотного теплообмена и изменение площади морских льдов в Северном полушарии / Сборник тезисов всероссийской конференции с международным участием «Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата» – Архангельск. – ИД САФУ, 2014. – С. 35 – 36.
15. Федоров В.М. Солнечная радиация и климат Земли [Электронный ресурс] / В. М. Федоров. – URL : <http://www.solar-climate.com>. Проверено 09.10.2014.
16. Чижов О.П. Оледенение северной полярной области. – М.: Наука, 1976. – 240 с.
17. Шумский П.А. Современное оледенение Советской Арктики // *Труды АНИИ*, 1949. – Т. 11. – 262 с.
18. Fedorov V.M. Interannual Variability of the Solar Constant // *Solar System Research*, 2012. – Vol. 46. – № 2. – pp. 170 – 176 . DOI: 10.1134/S0038094612020049.
19. Fedorov V.M. Interannual Variations in the Duration of the Tropical Year // *Doklady Earth Sciences*, 2013. – Vol. 451. – Part 1. – pp. 750 – 753. DOI: 10.1134/S1028334X13070015.

20. Fedorov V.M. Periodic Perturbations and Small Variations of the Solar Climate of the Earth // *Doclady Earth Sciences*, 2014. – Vol. 457. – Part 1. – pp. 868 – 871. DOI: 10.1134/S1028334X14070137.
21. Liestol O. *Glaciers of Europe – Glaciers of Svalbard, Norway Satellite image atlas of glaciers of the world*. United State Geological Survey Professional Paper, 1993. – V. 1386E. – pp. 127 –151.
22. Hagen J.O., Liestol O., Roland E., Jorgensen T. *Glacier Atlas of Svalbard and Jan Mayen*. – Oslo. Norsk Polarinstitut. Meddelelser, 1994. – № 129. – 141 p.
23. Hagen J.O., Liestol O. Long term glacier mass balance investigations in Svalbard 1950 – 1988 // *Annals of Glaciology*. – 1990. – № 14. – pp. 102 – 106.
24. <http://ssd.jpl.nasa.gov> – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics) – Электронный ресурс национального аэрокосмического агентства США (NASA).
25. <http://www.geo.unizh.ch/wgms/> – Электронный ресурс World Glacier Monitoring Service Department of Geography University of Zurich.
26. http://www.wmo.int/pages/index_ru.html – Электронный ресурс Всемирной метеорологической организации.
27. Solovyanova I.Yu., Mavlyudov B.R. Mass balance observations on some glaciers in 2004/2005 and 2005/2006 balance years, Nordenskiold Land, Spitsbergen // *The Dynamics and Mass Budget of Arctic Glaciers. Extended abstracts. Workshop and GLACIODYN (IPY) meeting, 15 – 18 January 2007, Pontresina (Switzerland). IASC Working group on Arctic Glaciology*. Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht, Utrecht University, The Netherlands. 2007, pp. 115 – 120.