

Федоров В.М., Гребенников П.Б., Залиханов А.М.

Тенденции изменения суммарного баланса массы ледников Центрального Кавказа и их причины

По данным астрономических эфемерид (DE-406) проведены расчеты приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации. На основе корреляционного анализа проведено сравнение значений суммарного баланса массы репрезентативного для Центрального Кавказа ледника Джанкуат с вариациями приходящей солнечной радиации и продолжительностью действия циркуляционных процессов в атмосфере. На основе уравнений регрессии рассчитаны значения суммарного баланса массы ледника Джанкуат на период с 1850 по 2050 гг. и определены, связанные с приходящей солнечной радиацией, тенденции изменения суммарного баланса массы ледника. Определено, что на непродолжительных временных рядах тенденция изменения суммарного баланса массы льда, связанная с приходящей солнечной радиацией, заметно нарушается влиянием циркуляционного фактора.

We calculated values of coming to the upper limit of the atmosphere solar radiation (<http://www.solar-climate.com>) on the initial data of astronomical ephemerides (<http://ssd.jpl.nasa.gov>). Were compared the values of the total mass balance of the Djankuat glacier with the calculated values of incoming to the upper limit of the atmosphere solar radiation for the year in the Northern hemisphere. Also the total mass balance is compared with the difference between incoming solar radiation in the Equatorial and polar region of the Northern hemisphere. Based on the calculated values of incoming solar radiation we calculated the total mass balance for the Djankuat glacier by the obtained regression equations for the period from 1850 to 2050.

Comparison based on the correlation analysis showed that the decline in the ice mass of the Djankuat glacier is determined by the amplification effect of inter-latitude heat transfer. First, it confirmed the close negative correlation of the total mass balance and the difference between incoming to the Equatorial and polar region solar radiation in the Northern hemisphere. Secondly, there is a high negative correlation between the total mass balance and change in the duration of the longitudinal southern circulation.

It is determined that the declining trend of the total mass balance of the Djankuat glacier is closely related to the accumulated incoming solar radiation. It is proof of the enhanced greenhouse effect in the atmosphere due to the accumulation of solar radiation heat. Consequently, the trend of Djankuat glacier mass on long time intervals (tens - the first hundred years) is determined mainly by the radiation factor. For shorter time periods (years - a few tens of years) long-term trend is experiencing a significant effect of the circulation factor.

Климатические условия Кавказа определяются его положением на границе двух широтных поясов – умеренного и субтропического, с чем связаны особенности радиационного режима и циркуляции атмосферы. Ледник Джанкуат расположен на северном макросклоне Главного Кавказского хребта в верховьях долины Адылсу, правого притока реки Баксан. Детальные исследования на леднике начаты в 1965 году. С 1968 года на леднике Джанкуат, считающемся репрезентативным для Центрального Кавказа, ведутся непрерывные балансовые наблюдения (Ледник Джанкуат, 1978; Голубев и др.,

1980; Мартышев, 1983; Баланс массы..., 1988; Золотарев, Поповнин, 2003; Золотарев и др., 1997; Войтковский и др., 2000; Поповнин, Петраков, 2005; Рототаева и др., 2006).

Исследования тенденции изменения суммарного баланса массы ледников Центрального Кавказа проводятся на примере ледника Джанкуат.

Методика расчетов

По исходным данным астрономических эфемерид (JPL Planetary and Lunar Ephemerides) DE-405/406 (<http://ssd.jpl.nasa.gov>) рассчитывались значения приходящей солнечной радиации (без учета атмосферы или на верхнюю границу атмосферы) в различные широтные зоны 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 (Вт/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; 2013, 2014, 2015). По результатам расчетов сформирована база данных приходящей (без учета 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>).

Результаты и их обсуждение

Проводилось сравнение значений суммарного баланса массы ледника Джанкуат с рассчитанными значениями солнечной радиации приходящей на верхнюю границу атмосферы за год в северное полушарие, а также с разностью солнечной радиации поступающей в экваториальную и полярную область северного полушария (рис. 1).

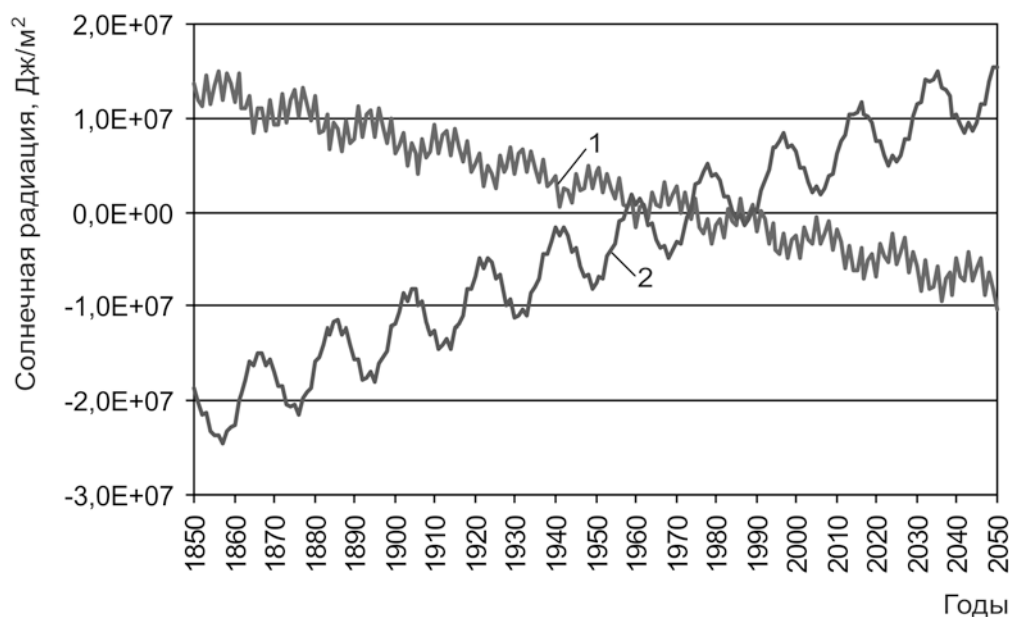


Рис. 1. Изменение приходящей на эллипсоид Земли (в отсутствии атмосферы) солнечной радиации (1) и разности радиации (2) приходящей в экваториальную и полярные области Земли (относительно средних для периода 1961 – 1990 гг. значений), Дж/м².

Также проводилось сравнение значений суммарного баланса массы с продолжительностью действия групп циркуляции – меридиональной южной и нарушение зональности (сайт Кононовой, Кононова, 2009). Ранее было доказано участие продолжительности этих типов циркуляции в динамике баланса массы ледников северного полушария (Федоров, 2009, 2011). Исходными данными по суммарному балансу массы были ряды инструментальных наблюдений (с 1968 по 2007 гг.) и реконструированные значения (с 1900 по 1967 гг.). Корреляционный анализ проводился по вековым интервалам, начиная с 1900 – 1999 гг. с последовательным смещением векового «окна» на один год (1901 – 2000 и т. д. до 1908 – 2007 гг., всего 9 вековых интервалов). Рассчитывались значения коэффициента корреляции (R) суммарного баланса массы с приходящей за год в северное полушарие (в отсутствии атмосферы) солнечной радиации и с разностью солнечной радиации приходящей в экваториальную и полярную область северного полушария. Также рассчитывались значения R между суммарным балансом массы и продолжительностью групп циркуляции: нарушения зональности (НЗ) и меридиональной южной (МЮ) (<http://www.atmospheric-circulation.ru>). Значения коэффициента корреляции представлены в табл. 1.

Табл. 1. Значения коэффициента корреляции суммарного баланса массы с солнечной радиацией и с продолжительностью групп циркуляции.

Вековой интервал	Солнечная радиация		Группы циркуляции	
	Приходящая	Разность	НЗ	МЮ
1900 – 1999	0,851	-0,831	0,557	-0,702
1901 – 2000	0,855	-0,893	0,550	-0,709
1902 – 2001	0,855	-0,835	0,554	-0,718
1903 – 2002	0,853	-0,841	0,580	-0,723
1904 – 2003	0,860	-0,844	0,596	-0,728

1905 – 2004	0,859	-0,850	0,599	-0,731
1906 – 2005	0,859	-0,857	0,593	-0,737
1907 – 2006	0,870	-0,859	0,607	-0,738
1908 – 2007	0,868	-0,861	0,639	-0,737
Среднее	0,859	-0,852	0,586	-0,725
1900 – 2007	0,866	-0,849	0,618	-0,730

Отклонения значений R от среднего для интервала по модулю составляют для приходящей радиации $-0,57\%$, для разности $-1,57\%$. Отклонения значений R составляют для группы нарушения зональности $-3,91\%$, для группы меридиональной южной циркуляции $-1,43\%$.

Отмечается тесная и устойчивая (по вековым интервалам) связь суммарного баланса массы с приходящей солнечной радиацией и с разностью солнечной радиации приходящей в экваториальную и полярные области северного полушария. Также отмечается заметная связь динамики суммарно баланса массы с продолжительностью групп циркуляции МЮ и НЗ. Отклик на вариации приходящей солнечной радиации и продолжительности НЗ для ледника Джанкуат положительный. Отклик на изменчивость разности солнечной радиации приходящей в экваториальную и полярную область и на продолжительность меридиональной южной циркуляции отрицательный. Таким образом, вековые тенденции сокращения суммарного баланса массы ледника Джанкуат являются следствием эффекта усиления межширотного теплообмена (Федоров, 2014) и, в значительной мере, увеличения продолжительности группы меридиональной южной циркуляции (Федоров, 2014; Кононова, 2009; Федоров, Кононова, 2015). Ранее было найдено, что одной из тенденции в поступлении солнечной радиации является усиление межширотного градиента приходящей солнечной радиации (Федоров, 2014, 2015). Эффект усиления межширотного градиента приходящей солнечной радиации проявляется в усилении широтной контрастности в приповерхностной температуре и увеличении продолжительности МЮ группы циркуляции.

С учетом более высоких значений коэффициента корреляции приходящей (без учета атмосферы) за тропический год в северное полушарие солнечной радиации с суммарным балансом массы, были получены уравнения линейной и полиномиальной (полином второй степени) регрессии для расчета суммарного баланса массы (рис. 2, 3).

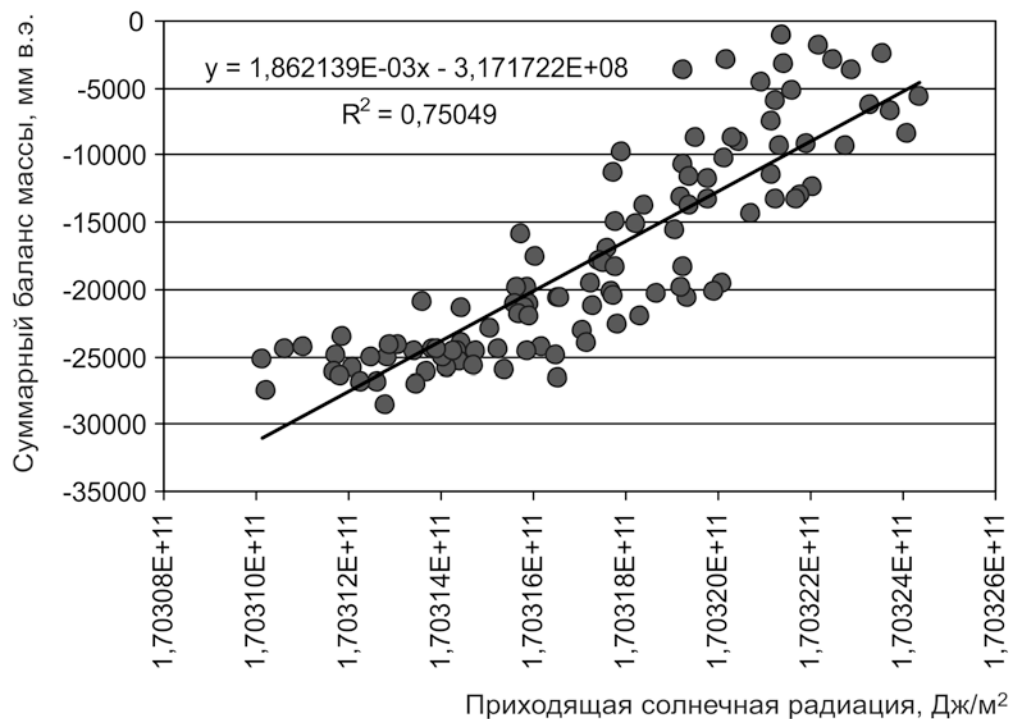


Рис. 2. Связь суммарного баланса массы ледника Джанкуат с приходящей солнечной радиацией и уравнение линейной регрессии

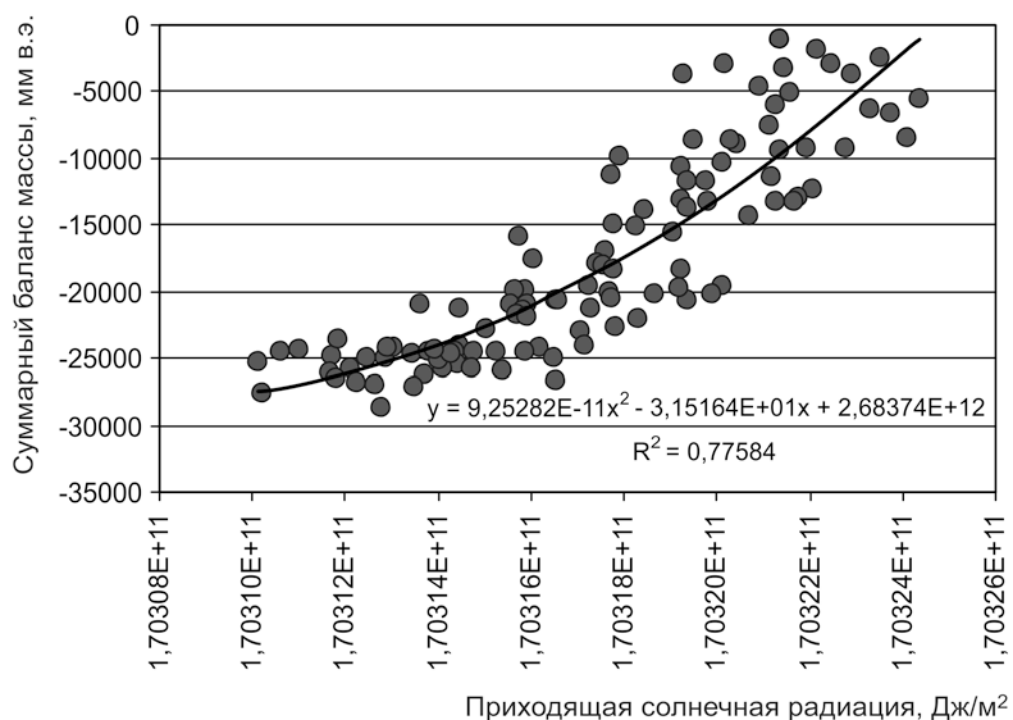


Рис. 3. Связь суммарного баланса массы ледника Джанкуат с приходящей солнечной радиацией и уравнение регрессии – полином второй степени.

Полученные связи характеризуются достаточно высокими показателями аппроксимации – 0,751 и 0,778.

На основе рассчитанных значений приходящей солнечной радиации по полученным уравнениям регрессии были рассчитаны значения суммарного баланса массы для ледника Джанкуат на период с 1850 по 2050 гг. (рис. 4).

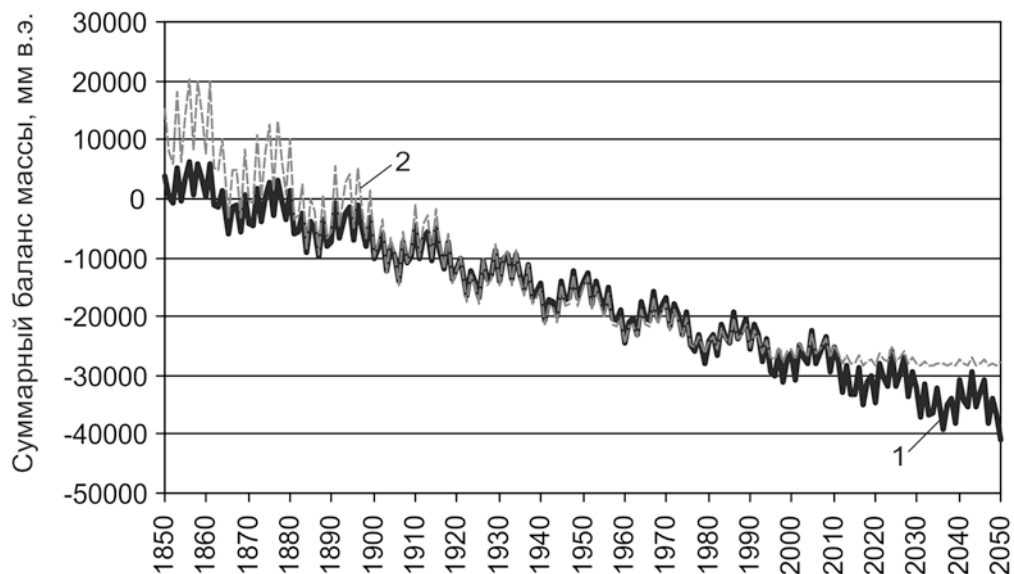


Рис. 4. Тенденция изменения суммарного баланса массы ледника Джанкуат рассчитанная по уравнению линейной регрессии (1) и по полиномиальному уравнению регрессии (2)

Среднегодовое расхождение исходных значений суммарного баланса массы и рассчитанных по уравнению линейной регрессии характеризуются значениями 3027 мм в.э., по полиномиальному уравнению – 2786 мм в.э. Это составляет 17,2% и 15,8% от средней по модулю величины суммарного баланса массы для периода с 1900 по 2007 гг. Коэффициент корреляции рассчитанных и фактических значений суммарного баланса характеризуется значением 0,866 для рассчитанных по уравнению линейной регрессии и 0,881 – рассчитанных по полиномиальному уравнению.

Исследовалась связь суммарного баланса массы ледника Джанкуат с накопленной солнечной радиацией, приходящей за год в северное полушарие и с накопленной разностью солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярные области северного полушария. Накопление рассчитывалось с первого года охваченного балансовыми данными (1900 г.) 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. Коэффициент корреляции суммарного баланса с накопленной приходящей солнечной радиацией и накопленной разностью характеризуется равными и одинаковыми по знаку значениями (-0,965). То есть, отмечается более тесная связь суммарного баланса массы с накопленной солнечной радиацией (и с разностью), чем с приходящей радиацией (и с разностью) без учета накопления (рис. 5).

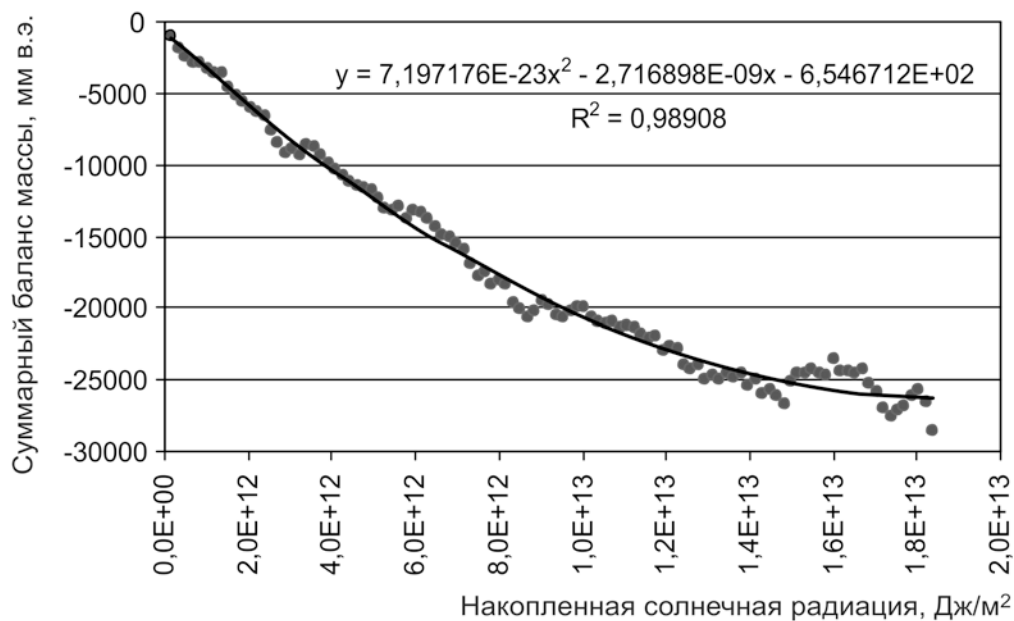


Рис. 5. Связь суммарного баланса ледника Джанкуат с накопленной приходящей солнечной радиацией за тропический год в северное полушарие (аппроксимация – полином второй степени).

Значение коэффициента корреляции между исходными и рассчитанными по уравнению линейной регрессии значениями суммарного баланса массы составляет 0,965. Для значений суммарного баланса массы рассчитанных по полиномиальному уравнению R составляет 0,995. Значения расхождения в случае учета накопления солнечной радиации существенно сокращаются. Они характеризуется средней величиной 1686 мм в.э. (9,56% от модуля среднегодового значения суммарного баланса массы) для значений, рассчитанных по уравнению линейной регрессии и 630 мм в.э. (3,57%) для значений, рассчитанных по полиномиальному уравнению регрессии. Характер изменения исходных значений суммарного баланса массы с рассчитанными по уравнению линейной регрессии и по полиномиальному уравнению регрессии представлены на рис. 6, 7. Тенденции изменения суммарного баланса массы ледника Джанкуат представлены на рис. 8.

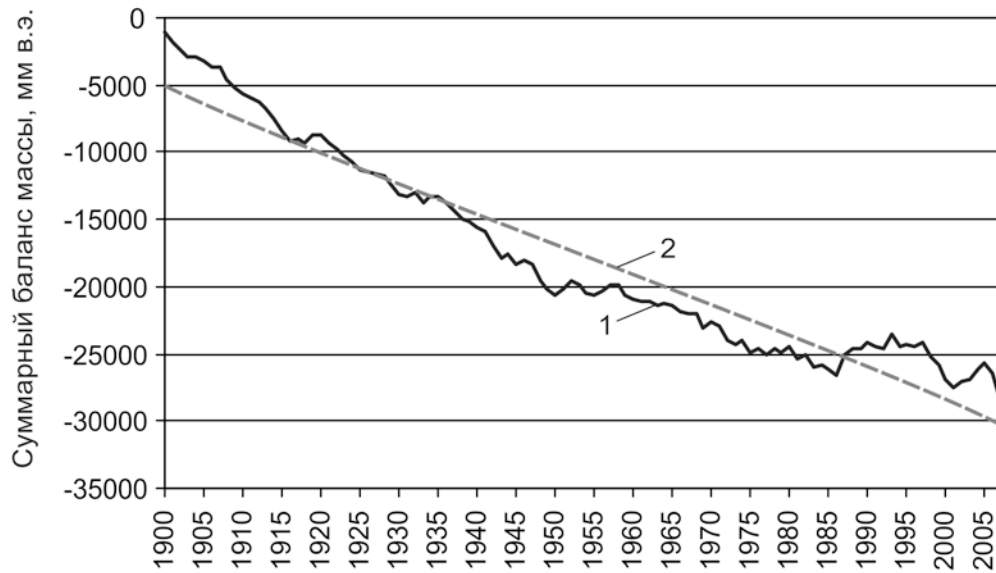


Рис. 6. Исходные (1) и рассчитанные по уравнению линейной регрессии (2) значения суммарного баланса массы ледника Джанкуат за период 1900 – 2007 гг.



Рис. 7. Рассчитанные по уравнению регрессии (полином второй степени) и исходные значения суммарного баланса массы ледника Джанкуат за период 1900 – 2007 гг. (1 – исходные значения, 2 – рассчитанные значения).

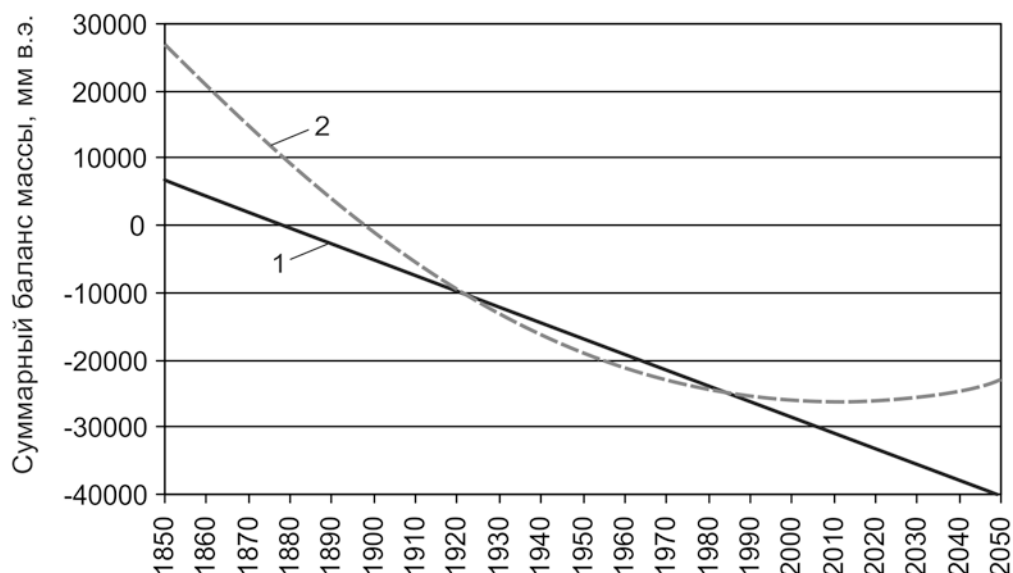


Рис. 8. Тенденции изменения суммарного баланса массы ледника Джанкуат с 1850 по 2050 гг. рассчитанного по уравнению регрессии (1 – линейному. 2 – полиномиальному).

Расчеты показывают, что общее сокращение массы льда составляет с 1850 по 2050 гг. 50,0 м в.э., а среднегодовое сокращением массы льда составляет около 249 мм в.э.

На относительно коротких рядах инструментальных наблюдений (без реконструированных значений) связь заметно нарушается влиянием других факторов (положение по отношению к преобладающим воздушным потокам), однако тенденция при этом сохраняется. Значение коэффициента корреляции между суммарным балансом массы ледника и накопленной приходящей солнечной радиацией в этом случае составляет -0,694. Циркуляционные процессы в атмосфере вносят существенные изменения в годовой, сезонный и суточный ход изменения температуры воздуха, который, в основном, определяется поступающей от Солнца радиацией. Циркуляционными процессами в атмосфере, вероятно, определяются отклонения фактических значений суммарного баланса массы от рассчитанных значений, что подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции (табл. 1). Таким образом, тенденция изменения суммарного баланса массы репрезентативного ледника Джанкуат (и, следовательно, ледников Центрального Кавказа) связана с совместным влиянием радиационного и циркуляционного фактора. При этом, основным фактором тенденций в изменении баланса в этом ледниковом районе является радиационный.

Выводы:

Тенденция сокращения массы льда ледника Джанкуат определяется эффектом усиления межширотного теплообмена, что подтверждается, во-первых, тесной отрицательной связью суммарного баланса массы с разностью солнечной радиации приходящей в экваториальную и полярную область северного полушария. Во-вторых, высокой отрицательной связью суммарного баланса массы с изменением продолжительности меридиональной южной циркуляции.

Тенденция сокращения суммарного баланса массы ледника Джанкуат тесно связана с накопленной приходящей солнечной радиацией, что является доказательством усиления парникового эффекта в атмосфере за счет накопления тепла солнечной радиации.

Следовательно, тенденция изменения массы ледника Джанкуат на длительных временных интервалах (десятки – первые сотни лет) определяется, главным образом, радиационным фактором. На менее продолжительных интервалах времени (годы – первые десятки лет) многолетняя тенденция существенно нарушается влиянием циркуляционного фактора.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 15-05-07590.

Литература

1. Баланс массы и колебания ледников Советского Союза за 1958 – 1985 гг. Материалы наблюдений // МГИ. – 1988. – Вып. 62. – С. 224 – 240.
2. Войтковский К.Ф., Алейников А.А., Володичева Н.А., Золотарев Е.А., Поповнин В.В., Харьковец Е.Г. Комплексный мониторинг горного ледника // МГИ. – 2000. – Вып. 89. – С. 51 – 57.
3. Голубев Г.Н., Дюргеров М.Б., Заславская М.Б., Поповнин В.В., Пылев И.В., Чеканская Е.К., Шалагинов В.М. Динамика и режим составляющих водно-ледового баланса ледника и горно-ледникового бассейна Джанкуат на Центральном Кавказе // МГИ. – 1980. – Вып. 38. – С. 147 – 152.
4. Золотарев Е.А., Поповнин В.В., Горецкий А.С., Харьковец Е.Г. Ледник Джанкуат за последние 25 лет // Вестник МГУ. – 1997. – Серия география. – № 1. – С. 24 – 30.
5. Золотарев Е.А., Поповнин В.В. О реакции ледника Джанкуат на изменение климата // МГИ. – 2003. – Вып. 95. – С. 107 – 110.
6. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л.Дзержевскому. – М.: Воентехиниздат, 2009. – 372 с.
7. Ледник Джанкуат (Центральный Кавказ) / Под. ред. И.Я.Боярского. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 184 с.
8. Мартышев А.П. Современные изменения ледников в верховьях р. Баксан в Приэльбрусье // МГИ. – 1983. – Вып. 47. – С. 209 – 211.
9. Поповнин В.В., Петраков Д.А. Ледник Джанкуат за минувшие 34 года (1967/68 – 2000/2001) // МГИ. – 2005. – Вып. 98. – С. 167 – 174.
10. Ротогаева О.В., Носенко Г.А., Тарасова Л.Н., Хмелевской И.Ф. Кавказ / Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. – М.: Наука, 2006. – С. 141 – 162.
11. Федоров В.М. Реконструкция динамики баланса массы ледника Джанкуат в XX столетии на основе макроциркуляционной модели // МГИ. – 2009. – № 105. – С. 106 – 110.
12. Федоров В.М. Динамика баланса массы ледников в связи с макроциркуляционными процессами в атмосфере. – М.: Физматлит, 2011. – 368 с.

13. Федоров В.М. Теоретический расчет межгодовой изменчивости солнечной постоянной // *Астрономический вестник*, 2012. – т. 46. – № 2. – с. 184 – 189.
14. Федоров В.М. Межгодовая изменчивость продолжительности тропического года // *Доклады РАН*, 2013. – т. 451. – № 1. – с. 95 – 97.
15. 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.
16. Федоров В.М. Широтная изменчивость приходящей солнечной радиации в различных временных циклах // *Доклады РАН*, 2015. – т. 460. – № 3. – С. 339 – 342.
17. <http://www.solar-climate.com> – Федоров В.М. Солнечная радиация и климат Земли [Электронный ресурс] / В.М.Федоров. – URL: <http://www.solar-climate.com>. Проверено 17.02.2015.
18. <http://www.atmospheric-circulation.ru> – Кононова Н.К. Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в XX – начале XXI вв. [Электронный ресурс] / Н.К. Кононова – URL: <http://www.atmospheric-circulation.ru>. Проверено 17.02.2015.
19. <http://ssd.jpl.nasa.gov>. – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Электронный ресурс национального аэрокосмического агентства США.