

**В.М. ФЁДОРОВ, П.Б. ГРЕБЕННИКОВ, Д.М. ФРОЛОВ**

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119899, Москва,  
Ленинские горы, 1, Россия, Fedorov.msu@mail.ru, grebennikovp@list.ru, denisfrolov@mail.ru

**ИНСОЛЯЦИЯ ЗЕМЛИ И ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДОВЫХ РЕСУРСОВ АЛЬП**

*На основе высокоточных астрономических эфемерид с высоким пространственным и временным разрешением рассчитана инсоляция Земли на верхней границе атмосферы для периода с 3000 г. до н. э. до 2999 г. Отличия от выполненных ранее расчетов инсоляции связаны с исходными астрономическими данными и новыми алгоритмами вычислений. В выполненных нами вычислениях инсоляции детально охватывается временной интервал протяженностью в 5999 лет и учитывается вся поверхность Земли. Земля не отождествляется со сферой, а аппроксимируется эллипсоидом. Ранее расчеты высокочастотных вариаций инсоляции выполнялись для отдельных параллелей (по пространству), а по времени — для четырех или пяти точек года (равноденствий, солнцестояний, иногда — точки с геоцентрической долготой 120°). Нами проведены вычисления инсоляции для поверхности широтных зон в 1° широты и интервалов времени, равных 1/360 продолжительности тропического года (приблизительно суткам). Выполнен корреляционный анализ суммарного баланса массы альпийских ледников (за период с 1948/1949 по 2009/2010 балансовый год) с летней и зимней инсоляцией и летней, зимней и годовой инсоляционной контрастностью Северного полушария, которая обобщенно (по областям источника и стока тепла) отражает многолетние изменения меридионального градиента инсоляции. Определено, что многолетняя изменчивость суммарного баланса массы альпийских ледников в среднем (по ледникам, охваченным балансовыми наблюдениями) на 94,3 % учитывается трендом. Тренд сокращения альпийских ледников в среднем на 90,6 % определяется годовой инсоляционной контрастностью, отражающей усиление меридионального переноса тепла, определяемого усилением меридиональной контрастности лучистой энергии (на поверхности Земли без учета атмосферы). На основе найденных тесных корреляционных связей с использованием регрессионной модели выполнен прогноз суммарного баланса массы ледников до 2050 г., который указывает на катастрофическое развитие деградации современного оледенения Альп.*

**Ключевые слова:** инсоляционная контрастность, суммарный баланс массы, горные ледники, корреляционный анализ, регрессионная модель, прогноз.

**V.M. FEDOROV, P.B. GREBENNIKOV, D.M. FROLOV**

Lomonosov Moscow State University, 119899, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia,  
Fedorov.msu@mail.ru, grebennikovp@list.ru, denisfrolov@mail.ru

**EARTH INSOLATION AND TENDENCIES OF ALPINE ICE RESOURCES VARIATION**

*On the basis of high-precision astronomical ephemeris with a high spatial and temporal resolution, the insolation of the Earth at the upper boundary of the atmosphere was calculated for the period from 3000 BC through 2999 AD. The differences from the earlier calculations of insolation are associated with the initial astronomical data and new calculation algorithms. In our calculations of insolation, the time interval of 5999 years and the entire surface of the Earth are covered in detail. The Earth is not identified with a sphere, but is approximated by an ellipsoid. Previously, calculations of high-frequency variations in insolation were performed for individual parallels (in space), and in time for four or five separate points of the year (equinoxes, solstices and, sometimes, points with a geocentric longitude of 120 degrees). We have calculated insolation for the surface of latitudinal zones at 1° latitude and time intervals equal to 1/360 of the duration of a tropical year (approximately a day). Correlation analysis of the total mass balance of alpine glaciers (for the period from the balance years 1948/1949 to 2009/2010) with summer and winter insolation and summer, winter and annual insolation contrast of the northern hemisphere, which in a summarized forms (by regions of heat source and sink) reflects long-term changes in the meridional insolation gradient. It has been determined that the long-term variability in the total mass balance of alpine glaciers on average (for glaciers covered by balance observations) is accounted for by the trend by 94.3 %. The trend in the reduction of alpine glaciers by an average of 90.6 % is determined by the annual insolation contrast, which reflects an increase in the meridional heat transfer, determined by an increase in the meridional contrast of radiant energy (on the Earth's surface, excluding the atmosphere). Based on the close correlations determined by using a regression model, a forecast of the total mass balance of glaciers up to 2050 AD was made, which indicates a catastrophic development of the degradation of the modern glaciation of the Alps.*

**Keywords:** insolation contrast, total mass balance, mountain glaciers, correlation analysis, regression model, forecast.

## ВВЕДЕНИЕ

Лед — одна из самых распространенных на Земле горных пород, которая формирует такие природные объекты, как горные и покровные ледники, айсберги, снежный покров, морские и подземные льды, а также содержится в атмосфере. В ледниковые эпохи четвертичного периода льды в жизни Земли имели решающее значение.

Альпы — крупнейший (второй по площади после Скандинавии) район современного оледенения в Средней Европе. С исследованием альпийских ледников связано появление ледниковой теории. В связи с этим оценка современного состояния и тенденций развития ледников Альп представляет особый научно-практический интерес.

Развитие и распространение ледников в основном определяется атмосферными осадками и температурой воздуха [1]. Этими двумя климатическими факторами регулируются процессы аккумуляции и абляции, определяющие баланс массы льда. Известно, что основным источником тепла на Земле является приходящая от Солнца радиация. Однако связь приходящей лучистой энергии с тенденциями изменения баланса массы льда в ледниковых районах и на отдельных ледниках изучена недостаточно [2]. Основной целью работы является исследование тенденции изменения ледовых ресурсов Альп в связи с многолетней изменчивостью инсоляции и инсоляционной контрастности Северного полушария для оценки роли инсоляционного фактора в многолетней динамике ледовых ресурсов. За оценку изменения ледовых ресурсов принимаются значения суммарного (кумулятивного) баланса массы льда. Актуальность определения роли инсоляционного фактора в эволюции оледенения Альп обусловлена значением горных ледников в гидрологическом цикле, тем, что они являются источником гидроэлектроэнергии и имеют большое туристическое значение [3–6].

В современную эпоху отмечается сокращение горного оледенения, которое связывается с глобальным потеплением климата. К основным причинам потепления относят парниковый эффект, вызванный главным образом эмиссией парниковых газов, определяемой антропогенным фактором [7]. Именно поэтому прогноз эволюции развития альпийских ледников основывается на создании разных по сложности моделей баланса массы льда [6, 8–10], связанных с ансамблем моделей общей циркуляции атмосферы (General Circulation Models — GCM), рассчитывающих баланс массы с учетом сценариев выбросов CO<sub>2</sub> [8]. Сценарии выбросов (их всего четыре: Representative Concentration Pathways — RCP 2.6, 4.5, 6.0 и 8.5) рекомендованы Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), также рекомендовано использовать в физико-математических моделях климата CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5) радиационный блок [11].

Обычно эволюция ледников в Альпах моделируется на основе расширенной версии Глобальной модели эволюции ледников (GloGEMflow) [12]. Модели баланса массы (RGM) базируются на региональной модели климата высокого разрешения (RCM) из ансамбля моделей EURO-CORDEX (проект Всемирной программы исследований климата (WRCP) по составлению улучшенных региональных прогнозов изменения климата для Европы), ориентированных на четыре сценария выбросов CO<sub>2</sub> [13]. Эти модельные расчеты в целом показывают потерю массы льда ледников приблизительно на 65–80 % с начала XXI в. до 2100 г. и почти полное исчезновение ледников в более теплых условиях RCP8.5 [8, 12]. В принятом подходе к прогнозированию эволюции ледников тем не менее отмечаются неопределенность начальных условий, параметризации отдельных предикторов и заметные расхождения в модельных и наблюдаемых процессах эволюции ледников. Ранее нами были отмечены проблемы, связанные с использованием рекомендованных МГЭИК в проекте CVIP5 значений солнечной радиации в физико-математических моделях климата [2, 14]. Проблема неопределенности прогноза возникает и в связи с тем, что достоверно неизвестно, какой или какие из четырех сценариев будут ускорять процесс эволюции ледников на протяжении столетия. Это обусловлено тем, что сценарии выбросов ориентированы на уровень развития мирового производства. Однако каким будет этот уровень через 10, 20, 50 лет, достоверно неизвестно.

Кроме того, не подвергается сомнению то, что солнечная радиация имеет важнейшее значение в генезисе климата [15–17]. В связи с этим целью нашей работы стало прогнозирование эволюции ледников Альп на основе ансамбля простых регрессионных моделей (линейной и полиномиальной) с использованием ранее рассчитанной нами с большим пространственным и временным разрешением базы инсоляционных данных [2, 14, 18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты приходящей солнечной радиации выполнялись [18] по данным астрономических эфемерид [19, 20] для всей поверхности Земли (без учета атмосферы) в интервале с 3000 г. до н. э. по 2999 г. н. э. 3000 г. н. э. в эфемеридах данными обеспечен не полностью, в связи с чем наши вычисления ограничены 2999 г. Исходными астрономическими данными для расчетов инсоляции были склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего (координатного времени — СТ) и всемирного корректируемого времени (UT). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80 — Geodetic Reference System 1980) с длинами полуосей, равными 6 378 137 м (большие) и 6 356 752 м (малая). Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение полного потока солнечной радиации — Total Solar Irradiance, TSI) принималось равным 1361 Вт/м<sup>2</sup> [22]. Изменение активности Солнца не учитывалось. По результатам расчетов сформирована общедоступная база данных приходящей во все широтные зоны Земли (протяженностью в 5°) солнечной энергии за каждый астрономический месяц каждого года для периода с 3000 г. до н. э. до 2999 г. н. э. [22, 23].

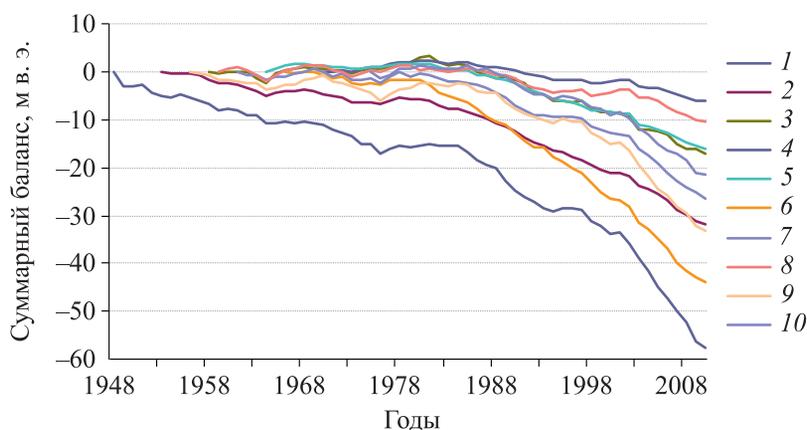
Рассчитанные значения приходящей на поверхность Земли (аппроксимированную эллипсоидом) солнечной радиации (без учета атмосферы) сравнивались с инструментальными значениями суммарного баланса массы 10 альпийских ледников, охваченных балансовыми наблюдениями [24, 25]. Анализировались данные ледников, на которых балансовые наблюдения продолжаются до настоящего времени (рис. 1). Ряды наблюдений охватывают период с 1948/1949 по 2009/2010 балансовый год и выражаются в метрах водного эквивалента (м в. э.). Продолжительность рядов изменяется от 35 (Аржантьер) до 62 (Саренский) лет и в среднем составляет 43 года.

По годовым значениям баланса массы льда рассчитывались отражающие тенденции эволюции ледников кумулятивные (суммарные) величины баланса массы льда. Для всех ледников рассчитывался  $R^2$  — коэффициент детерминации, показывающий вклад тренда в общую дисперсию ряда. Полученные результаты показывают, что в среднем 94,3 % многолетних изменений суммарного баланса массы льда учитывается трендами (полиномы второй степени). Аппроксимация проведена по методу наименьших квадратов (рис. 2).

Найти причины отмеченных тенденций, которые выражаются полиномиальными трендами, — значит объяснить причины более 90 % многолетних изменений массы льда в Альпах. Величины суммарного баланса массы льда альпийских ледников сравнивались с рассчитанными нами соответствующими по времени показателями инсоляции. В качестве таковых мы рассматривали летнюю и зимнюю инсоляцию в Северном полушарии и зимнюю, летнюю и годовую инсоляционную контрастность в Северном полушарии. В этих инсоляционных характеристиках более 95 % многолетней изменчивости также учитывается полиномиальными (полином второй степени) трендами [2]. Из этого следует возможность сравнения выражаемых трендами тенденций в изменении инсоляционных характеристик и кумулятивного баланса массы ледников. Годовая инсоляционная контрастность (ИК) для Северного полушария рассчитывалась как разность годовой инсоляции широтной области 0–45° с. ш. (источник тепла) и области 45–90° с. ш. (стока тепла). Таким образом, ИК обобщенно (по областям источника и стока тепла) отражает изменение меридионального градиента инсоляции, регулирующего меридиональный перенос энергии (тепла) в системе океан–атмосфера [2, 14].

Рис. 1. Суммарный баланс массы ледников Альп по данным инструментальных наблюдений.

Ледники: 1 — Саренский, 2 — Хинтерайсфернер, 3 — Зонблик, 4 — Кессельвандфернер, 5 — Фернагтфернер, 6 — Каресер, 7 — Грис, 8 — Сильверетта, 9 — Сен-Сорлин, 10 — Аржантьер.



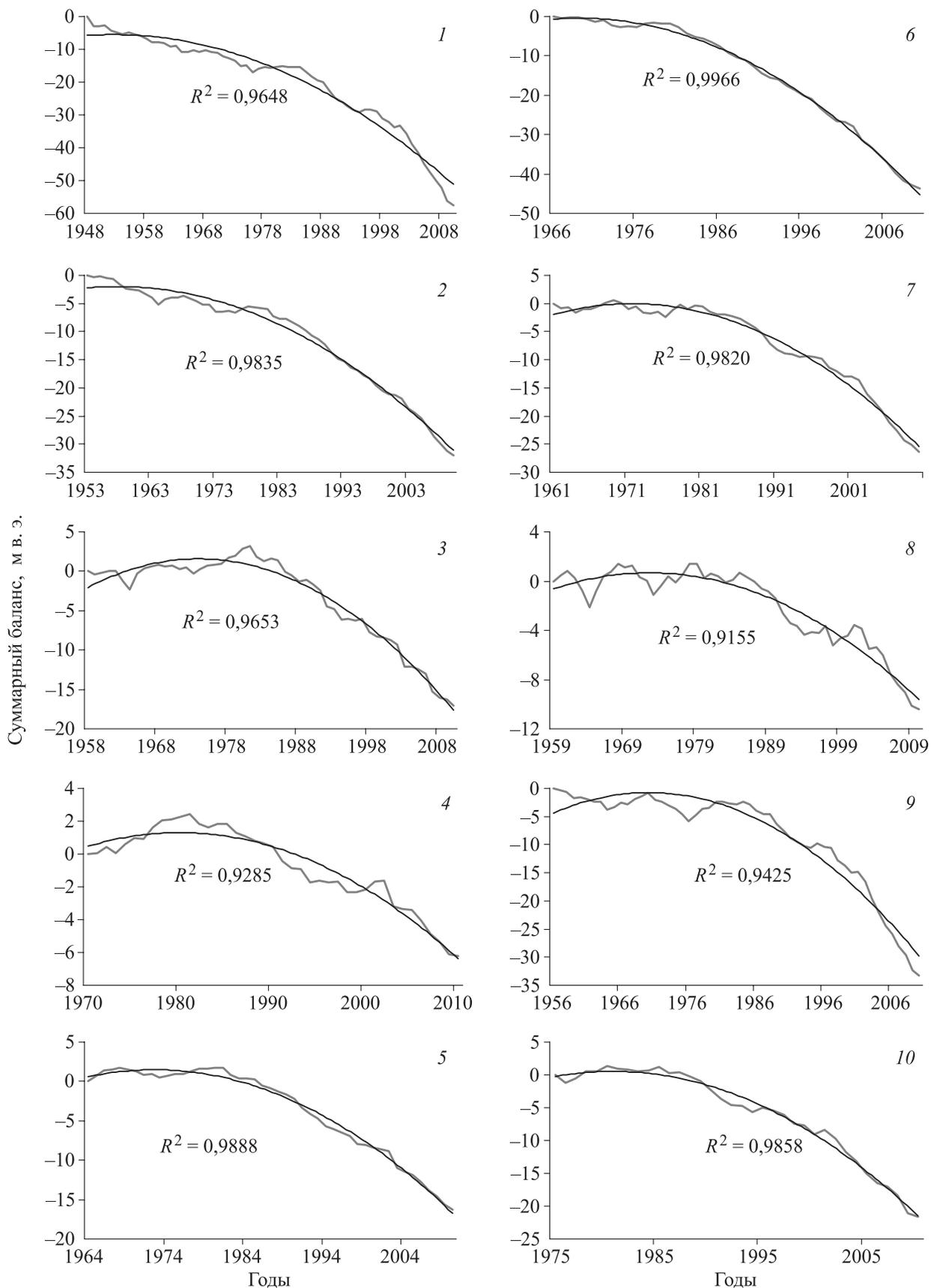


Рис. 2. Тренды (полиномы второй степени) многолетних изменений суммарного баланса массы ледников Альп (аппроксимация — полином 2-й степени).

1–10 — см. рис. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента корреляции суммарного баланса массы льда альпийских ледников с инсоляцией и инсоляционной контрастностью Северного полушария

Номер	Ледник (страна)	Инсоляция		Инсоляционная контрастность		
		зимняя	летняя	зимняя	летняя	годовая
1	Саренский (Франция)	-0,931	0,932	0,937	-0,930	-0,926
2	Хинтерайсфернер (Австрия)	-0,941	0,941	0,947	-0,941	-0,938
3	Зонблик (Австрия)	-0,810	0,812	0,819	-0,812	-0,809
4	Кессельвандфернер (Австрия)	-0,850	0,846	0,864	-0,846	-0,826
5	Фернагтфернер (Австрия)	-0,900	0,905	0,914	-0,902	-0,898
6	Каресер (Италия)	-0,934	0,939	0,947	-0,904	-0,930
7	Грис (Швейцария)	-0,884	0,887	0,899	-0,885	-0,881
8	Сильвретта (Швейцария)	-0,836	0,835	0,845	-0,837	-0,831
9	Сен-Сорлин (Франция)	-0,843	0,844	0,851	-0,843	-0,838
10	Аржантьер (Франция)	-0,926	0,926	0,927	-0,924	-0,914
	Среднее	-0,885	0,887	0,895	-0,885	-0,879

За летнее полугодие в Северном полушарии принимался период с апреля по сентябрь, за зимнее — с октября по март. Для полугодий значения ИК рассчитывались с учетом сезонного смещения областей источника и стока тепла. При вычислениях использовалась следующая схема сезонной локализации областей источника и стока тепла в полушариях. В зимнее полугодие за область источника тепла для Северного полушария принимался широтный диапазон от 10° ю. ш. до 35° с. ш. (вблизи 10° ю. ш. в это время находится термический экватор), за область стока тепла — от 35 до 90° с. ш. В летнее полугодие за область источника тепла в Северном полушарии принимался широтный диапазон от 10 до 55° с. ш., за область стока тепла — от 55 до 90° с. ш. При этом проводилось сглаживание значений инсоляции и ИК (по 21 году методом скользящего среднего) для исключения 19-летней вариации в изменчивости инсоляции и ИК [26], которая в динамике баланса массы льда не проявляется.

Для оценки связей суммарного баланса массы льда с инсоляцией и ИК рассчитывались значения коэффициента корреляции (*R*). Проведенный корреляционный анализ позволил определить высокие корреляционные связи многолетнего изменения суммарного баланса массы альпийских ледников с многолетними изменениями летней и зимней инсоляции, летней, зимней и годовой ИК в Северном полушарии (табл. 1).

Все величины коэффициента корреляции статистически значимы с вероятностью 0,99 [27]. Заметная связь многолетних изменений суммарного баланса массы льда с годовой инсоляцией Северного полушария не обнаружена. Тесные отрицательные связи найдены между многолетними изменениями суммарного баланса массы (в основном определяемого трендами) и многолетними изменениями зимней инсоляции, летней и годовой ИК Северного полушария (рис. 3). Тесные положительные связи многолетних изменений суммарного баланса массы льда отмечаются с многолетними изменениями летней инсоляции и зимней ИК.

На основе найденных связей по уравнениям линейной и полиномиальной (полином второй степени) регрессии рассчитывались значения суммарного баланса массы ледников с 2011 по 2050 г. В качестве показателя инсоляции при этом использовались значения годовой ИК Северного полушария (см. рис. 3).

Проведен корреляционный анализ фактических и рассчитанных по уравнениям регрессии значений суммарного баланса массы ледников. Также при регрессионном анализе рассчитывался *R*<sup>2</sup> — коэффициент детерминации, показывающий долю дисперсии суммарного баланса массы, объясняемую регрессионной моделью (табл. 2).

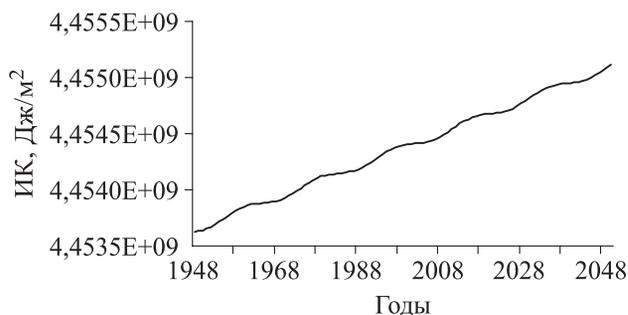


Рис. 3. Многолетние изменения годовой инсоляционной контрастности в Северном полушарии с 1948 по 2050 г.

Значения коэффициентов корреляции и детерминации для фактических и рассчитанных по уравнениям регрессии рядов суммарного баланса массы ледников

Номер	Ледник (страна)	$R_1/R_1^2$	$R_2/R_2^2$	$R_3/R_3^2$
1	Саренский (Франция)	0,926/0,857	0,970/0,941	0,959/0,920
2	Хинтерайсфернер (Австрия)	0,938/0,880	0,984/0,968	0,973/0,947
3	Зонблик (Австрия)	0,809/0,654	0,978/0,956	0,943/0,889
4	Кессельвандфернер (Австрия)	0,826/0,682	0,968/0,937	0,937/0,878
5	Фернагтфернер (Австрия)	0,899/0,806	0,989/0,978	0,969/0,939
6	Каресер (Италия)	0,930/0,865	0,987/0,974	0,974/0,949
7	Грис (Швейцария)	0,881/0,776	0,974/0,949	0,953/0,908
8	Сильвретта (Швейцария)	0,831/0,691	0,953/0,908	0,926/0,857
9	Сен-Сорлин (Франция)	0,838/0,702	0,949/0,901	0,924/0,854
10	Аржантьер (Франция)	0,914/0,837	0,975/0,951	0,961/0,924
	Среднее	0,879/0,775	0,973/0,946	0,952/0,906

Примечание. Значения  $R$  (коэффициента корреляции) и  $R^2$  (коэффициента детерминации) фактического и рассчитанного суммарного баланса массы:  $R_1/R_1^2$  — по линейному уравнению регрессии,  $R_2/R_2^2$  — по полиномиальному уравнению регрессии,  $R_3/R_3^2$  — для среднего по ансамблю линейных и полиномиальных решений.

Расхождения между фактическими значениями, полученными на основе данных инструментальных наблюдений, и показателями, рассчитанными по значениям годовой ИК суммарного баланса массы, — менее 10 % (см. табл. 2). В абсолютных величинах эти расхождения в среднем для года (по модулю) изменяются в пределах от 1,23 м в. э. (Сильвретта) до 3,77 м в. э. (Каресер). В среднем для охваченного балансовыми измерениями ледника среднегодовое расхождение (по модулю) составляет 2,21 м в. э. (рис. 4).

В период инструментальных наблюдений исследуемые ледники характеризуются потерей массы льда. Средние темпы потери массы составляют 530 мм в. э. в год. Наиболее высокие темпы потери массы льда свойственны ледникам Каресер (995 мм в. э. в год) и Саренского (930 мм в. э. в год). Относительно невысокие темпы потери массы отмечаются для ледников Кессельвандфернер и Сильвретта (155 и 204 мм в. э. в год соответственно). В среднем для ледника общая потеря массы льда (за период инструментальных наблюдений) составляет около 27 м в. э. Наиболее заметные потери массы льда характерны для Саренского ледника (57,6 м в. э.), что отчасти объясняется самым продолжительным рядом наблюдений на этом леднике. Относительно небольшие потери льда отмечаются для ледников Кессельвандфернер (6,3 м в. э.) и Сильвретта (10,4 м в. э.). При расчетах площадь ледника принималась постоянной и численно равной среднему значению за период балансовых наблюдений (по данным WGMS — World Glacier Monitoring Service, 2018).

Прогноз изменений суммарного баланса массы льда составлялся с помощью следующего алгоритма. Осреднением линейных и полиномиальных решений для соответствующих лет находилось решение по ансамблю регрессионных моделей. На основе рассчитанных по ансамблю рядов суммарного баланса с 2010 по 2050 г. определялись величины годового баланса массы льда (последовательным вычитанием предшествующих значений временного ряда из последующих). Затем вычислялись суммарные балансы массы льда, при этом начальный год — 2010 — принимался по суммарному балансу массы, рассчитанному на основе данных инструментальных наблюдений. К этому значению суммированием добавлялись найденные величины годового баланса. Таким образом, суммарный баланс массы рассчитывался до 2050 г. (рис. 5).

Для всех ледников отмечается ускоренное сокращение. Темпы потери массы льда с 2011 по 2050 г. более чем в два раза превышают этот показатель относительно временного интервала с 1948 по 2010 г. В среднем ежегодная потеря массы льда в этот период составит 1291 мм в. э. Наиболее высокие темпы сокращения массы льда отмечаются для ледников Каресер (2304 мм в. э.) и Аржантьер (1918 мм в. э.), минимальные — для ледников Кессельвандфернер (566 мм в. э.) и Сильвретта (568 мм в. э.). В среднем для ледника суммарная потеря массы с 2011 по 2050 г. составит 51,6 м в. э. Максимальные потери льда прогнозируются для ледника Каресер (92,2 м в. э.), минимальные — для ледников Кессельвандфернер (22,6 м в. э.) и Сильвретта (22,7 м в. э.). Усреднение значений суммарного баланса

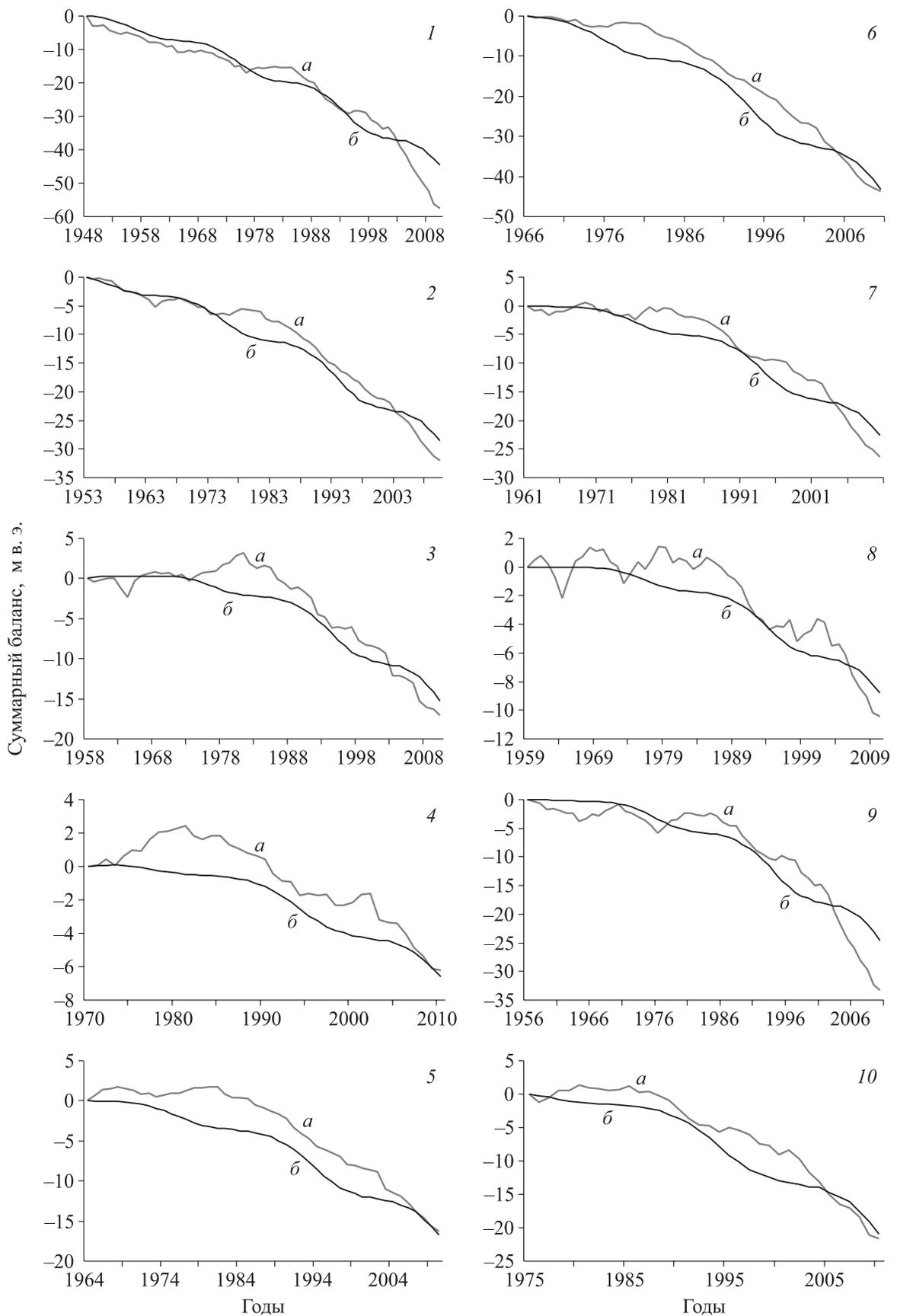


Рис. 4. Суммарный баланс массы альпийских ледников за период инструментальных наблюдений. *a* — рассчитанный по данным инструментальных наблюдений; *б* — рассчитанный по уравнению регрессии. Ледники: 1–10 — см. рис. 1.

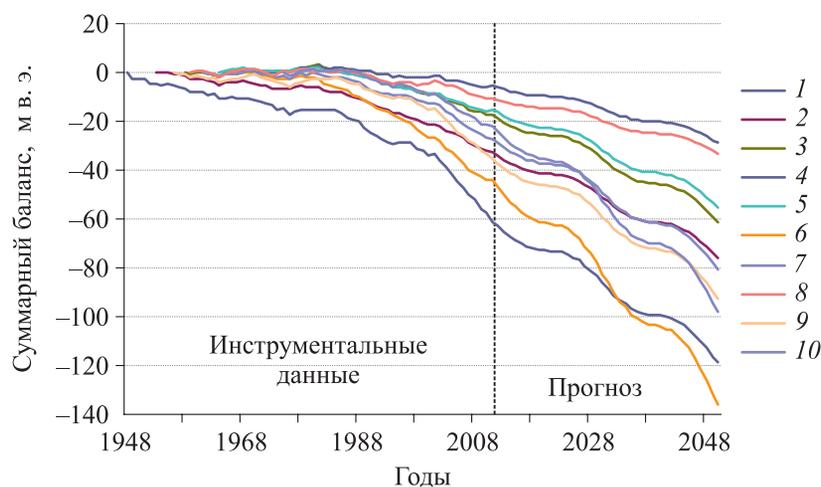


Рис. 5. Суммарный баланс массы альпийских ледников по инструментальным данным до 2010 г. и прогноз с 2011 по 2050 г.

1–10 — см. рис. 1.

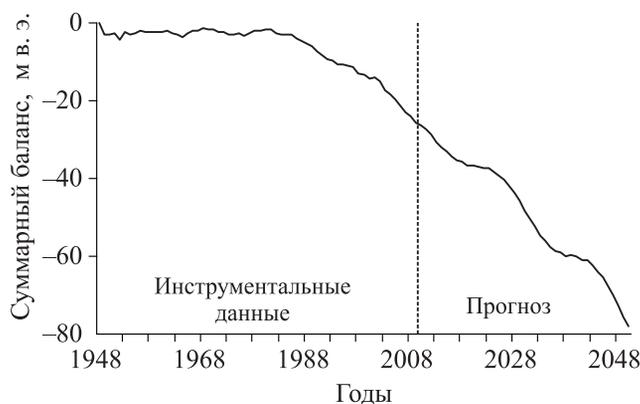


Рис. 6. Средний для альпийского ледника (охваченного балансовыми измерениями) суммарный баланс массы по инструментальным данным до 2010 г. и прогноз с 2011 по 2050 г.

массы по данным ледникам показывает, что их интенсивная деградация в альпийском ледниковом районе в целом началась в середине 1980-х гг. и продолжается в настоящее время (рис. 6). Средняя потеря массы льда для ледника с 1948 по 2050 г. характеризуется величиной 78 м в. э.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе определены тенденции изменения ледовых ресурсов альпийских ледников, охваченных балансовыми наблюдениями. На основе ансамбля простых регрессионных моделей (линейной и полиномиальной) с использованием рассчитанных значений инсоляционной контрастности для Северного полушария получены количественные характеристики деградации альпийских ледников.

Тенденции сокращения массы льда в альпийских ледниках в регрессионных моделях в среднем на 90,6 % определяются годовой ИК Северного полушария. Вероятно, что основной причиной деградации альпийских ледников является связанное с ИК усиление меридионального переноса тепла, обусловленное увеличением меридионального градиента инсоляции [2, 14].

По найденной связи изменения суммарного баланса массы с годовой ИК Северного полушария на основе ансамбля регрессионных моделей выполнен прогноз изменения ледовых ресурсов Альп. Данное прогнозирование указывает на предстоящую катастрофическую деградацию оледенения Альп. В период с 2019 по 2050 г. ожидаемое сокращение ледовых ресурсов для ледника, охваченного балансовыми измерениями, в среднем составляет 41,5 м в. э.

Результаты модельных расчетов также показывают деградацию оледенения. Степень деградации в моделях, однако, определяется выбранным сценарием выбросов  $\text{CO}_2$  и поэтому не является однозначно определенной. Так, например, при принятии сценария выбросов RCP2.6 уменьшение объема льда с 2000 по 2100 г. составит от 65 до 80 %, для RCP4.5 — от 80 до 90 %, для RCP8.5 — от 90 до 98 % [8, 12]. Таким образом, использование простых регрессионных моделей в исследованиях реги-

ональных тенденций изменения массы льда с учетом инсоляционной контрастности полушария представляется оправданным.

*Работа выполнена в рамках тем государственного задания «Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики» (121051100167–1) и «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175–4).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фёдоров В.М.** Динамика баланса массы ледников в связи с макроциркуляционными процессами в атмосфере. — М.: Физматлит, 2011. — 376 с.
2. **Фёдоров В.М.** Солнечная радиация и климат Земли. — М.: Физматлит, 2018. — 232 с.
3. **Fischer A., Olefs M., Abermann J.** Glaciers, snow and ski tourism in Austria's changing climate // *Annals of Glaciology*. — 2011. — Vol. 52, Issue 58. — P. 89–96.
4. **Patro E.R., Michele C. de, Avanzi F.** Future perspectives of run-of-the-river hydropower and the impact of glaciers' shrinkage: The case of Italian Alps // *Applied Energy*. — 2018. — N 231. — P. 699–713.
5. **Stewart E.J., Wilson J., Espiner S., Purdie H., Lemieux C., Dawson J.** Implications of climate change for glacier tourism // *Tourism Geographies*. — 2016. — N 18. — P. 377–398.
6. **Zemp M., Haeberli W., Hoelzle M., Paul F.** Alpine glaciers to disappear within decades? // *Geophysical Research Letters*. — 2006. — N 33. — P. L13504.
7. **Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** — Cambridge: Cambridge University Press, 2014. — 1535 p.
8. **Huss M.** Extrapolating glacier mass balance to the mountain-range scale: the European Alps 1900–2100 // *The Cryosphere*. — 2012. — N 6. — P. 713–727.
9. **Linsbauer A., Paul F., Machguth H., Haeberli W.** Comparing three different methods to model scenarios of future glacier change in the Swiss Alps // *Annals of Glaciology*. — 2013. — N 54. — P. 241–253.
10. **Maussion F., Butenko A., Champollion N., Dusch M., Eis J., Fourteau K., Gregor P., Jarosch A.H., Landmann J., Oesterle F., Recinos B., Rothenpieler T., Vlug A., Wild C.T., Marzeion B.** The Open Global Glacier Model (OGGM) v1.1 // *Geoscientific Model Development*. — 2019. — N 12. — P. 909–931.
11. **Meinshausen M., Raper S.C.B., Wigley T.M.L.** Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6. Part 1: Model Description and Calibration // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2011. — Vol. 11, Issue 4. — P. 1417–1456.
12. **Zekollari H., Huss M., Farinotti D.** Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble // *The Cryosphere*. — 2019. — Vol. 13 (4). — P. 1125–1146.
13. **Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Buessing O., Bouwer L.M., Braun A., Colette A., Georgopoulou E., Gobiet A., Menut L., Nikulin G., Haensler A., Kriegsmann A., Martin E., van Meijgaard E., Moseley C., Pfeifer S., Preuschmann S., Radermacher C., Radtke K., Rechid D., Roundsevelli M., Samuelsson P., Somot S., Soussana J.-F., Teichmann C., Valentini R., Vautard R., Weber B., Yiou P.** EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projection for European impact research // *Regional Environmental Change*. — 2014. — N 14. — P. 563–578.
14. **Фёдоров В.М.** Вариации инсоляции Земли и особенности их учета в физико-математических моделях климата // *Успехи физических наук*. — 2019. — Т. 189, № 1. — С. 33–46.
15. **Будыко М.И.** Климат в прошлом и будущем. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 351 с.
16. **Кондратьев К.Я.** Глобальный климат и его изменения. — Л.: Наука, 1987. — 232 с.
17. **Монин А.С., Шишков Ю.А.** Климат как проблема физики // *Успехи физических наук*. — 2000. — Т. 170, № 4. — С. 419–445.
18. **Фёдоров В.М., Костин А.А.** Вычисление инсоляции Земли для периода от 3000 г. до н. э. до 2999 г. н. э. // *Процессы в геосредах*. — 2019. — № 2. — С. 254–262.
19. **Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B., Chodas P.W., Jacobson R.A., Keesey M.S., Lieske J.H., Ostro S.J., Standish E.M., Wimberly R.N.** JPL's On-Line Solar System Data Service // *Bulletin of the American Astronomical Society*. — 1996. — Vol. 28 (3). — P. 1158.
20. **JPL Solar System Dynamics** [Электронный ресурс]. — <http://ssd.jpl.nasa.gov> (дата обращения 25.06.2020).
21. **Kopp G., Lean J.** A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophysical Research Letters*. — 2011. — Vol. 37. — P. L01706.
22. **Fedorov V.M.** Interannual Variations in the Duration of the Tropical Year // *Doklady Earth Sciences*. — 2013. — Vol. 451, Part 1. — P. 750–753.
23. **Солнечная радиация и климат Земли. Солярная теория климата** [Электронный ресурс]. — <http://www.solar-climate.com> (дата обращения 25.06.2020).
24. **World Glacier Monitoring Service (WGMS).** Fluctuations of Glaciers. Database, Zurich, Switzerland. 2018 [Электронный ресурс]. — <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2018-06> (дата обращения 25.06.2020).

25. **Zemp M., Hoelzle M., Haeberli W.** Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network // *Annals of Glaciology*. — 2009. — Vol. 50. — P. 101–111.
26. **Fedorov V.M.** Spatial and temporal variation in solar climate of the Earth in the present epoch // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2015. — Vol. 51, N 8. — P. 779–791.
27. **Цымбаленко Т.Т., Байдаков А.Н., Цимбаленко О.С., Гладилин А.В.** Методы математической статистики в обработке экономической информации. — М.: Финансы и статистика, 2007. — 200 с.

*Поступила в редакцию 26.06.2020*

*После доработки 15.02.2021*

*Принята к публикации 24.06.2021*

---