

**АТМОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КЛИМАТ**

УДК 55.556

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(55-64)

**ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ БАЛАНСА МАССЫ ЛЬДА  
В ЛЕДНИКОВЫХ РАЙОНАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ****В.М. Федоров***Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; fedorov.msu@mail.ru*

Проведен корреляционный анализ регионально осредненных рядов суммарного баланса массы льда для девяти ледниковых районов Северного полушария с инсоляционной контрастностью. По уравнению регрессии выполнен прогноз изменения регионально осредненного суммарного баланса массы льда для девяти ледниковых районов Северного полушария до 2050 г. Определено, что деградация современного горного оледенения связана с усилением межширотного теплообмена, основной причиной которого являются уменьшение угла наклона оси вращения Земли и, соответственно, усиление меридионального градиента инсоляции (инсоляционной контрастности).

*Баланс массы льда, ледниковые районы, инсоляция, инсоляционная контрастность, межширотный теплообмен, регрессионная модель, прогноз*

**FORECASTING GLACIER MASS BALANCE VARIATIONS  
IN GLACIATED REGIONS OF THE NORTHERN HEMISPHERE****V.M. Fedorov***Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; fedorov.msu@mail.ru*

Correlation analysis revealing a relationship between regionally averaged mass balance series for 9 glacial regions in the Northern hemisphere and insolation contrast has been carried out. According to the regression equation, the forecast of the changes in the regionally averaged total mass balance of ice has been performed for these regions until 2050. It has been determined that the degradation of the contemporary mountain glaciation is associated with the enhancement of the inter-latitude heat transfer caused primarily by a decrease in the inclination angle of the Earth's rotation axis increasing thereby the meridional gradient of insolation (insolation contrast).

*Ice mass balance, glacial regions, insolation, insolation contrast, inter-latitude heat transfer, regression model, forecasting*

**ВВЕДЕНИЕ**

Прогноз изменения баланса массы льда в ледниковых районах важен по двум основным причинам: ледники являются индикаторами региональных климатических изменений; горные ледники – одна из составляющих водных ресурсов, учет которых необходим для определения стратегии социально-экономического развития горных и предгорных регионов.

Многолетние изменения массы льда в ледниковых районах Земли связаны прежде всего с изменением приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) как одного из основных показателей изменяющегося климата. Главным источником тепла на Земле является приходящая от Солнца лучистая энергия. В перераспределении приходящей к Земле энергии участвуют такие важные механизмы теплообмена, как [Шулейкин, 1953]: межширотный теплообмен (“тепловая машина пер-

вого рода”) и теплообмен между океаном и материками (“тепловая машина второго рода”). Перенос тепла в климатической системе Земли связан с циркуляционными процессами в атмосфере и океане. Циркуляционные процессы в атмосфере вносят изменения в суточный, сезонный и годовой ход изменения ПТВ. С циркуляционными процессами в атмосфере связано образование и распространение атмосферных осадков. Таким образом, циркуляционные процессы влияют на ход основных климатических показателей, определяющих условия развития ледников, и поэтому представляются (наряду с приходящей от Солнца энергией) важным фактором распространения ледников в пространстве и их развития во времени. При этом макроциркуляционные процессы в атмосфере тесно связаны с изменением инсоляции [Федоров, Кононова, 2014; Федоров, 2015в].

Несмотря на то что астрономическая теория изменения климата, основу которой составляет расчет инсоляции Земли, создавалась для объяснения причин плейстоценовых материковых оледенений [Миланкович, 1939; Имбри, Имбри, 1988], связь динамики баланса массы ледников с инсоляцией Земли исследована не достаточно.

Одной из проблем изучения динамики ледников в прошлом и прогноза их развития в будущем являются непродолжительные ряды исходных данных по аккумуляции, абляции и балансу массы. Это связано с тем, что глубина прогноза зависит от продолжительности временного ряда с исходными балансовыми данными. Статистически достоверный прогноз возможен на период, не превышающий 1/3 продолжительности исходного ряда. Поэтому одной из первоочередных задач геокриологии и гляциологии является увеличение временных рядов инструментальных наблюдений [Серебрянный и др., 1989]. Эта задача решается созданием гляциологических реконструкций. Реконструкция выполнялась автором на основе найденных связей динамики баланса массы ледников с продолжительностью макроциркуляционных процессов в атмосфере [Федоров, 2006, 2007, 2009а,б, 2011а,б]. Прогнозы рассчитывались на основе найденной связи суммарного (кумулятивного) баланса массы льда в ледниковых районах с инсоляционной контрастностью (ИК).

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В методике исследований для реконструкции суммарного баланса массы льда применялись расчеты весовых коэффициентов элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) с учетом типизации циркуляционных процессов в атмосфере [Федоров, 2006, 2007, 2009а,б, 2011а,б]. Для выполнения прогнозов использовались рассчитанные значения инсоляции Северного полушария Земли [Федоров, 2012, 2015а,б, 2016а,б, 2018].

#### Методика реконструкции баланса массы ледников

Реконструкция суммарного баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария выполнялась на основе макроциркуляционных моделей. При этом использовались типизация циркуляционных процессов в атмосфере, разработанная Б.Л. Дзердзеевским, В.М. Курганской и З.М. Витвицкой [Дзердзеевский и др., 1946], и Календарь последовательной смены ЭЦМ, содержащий данные по циркуляции с 1900 г. по настоящее время [Кононова, 2003, 2009; <http://www.atmospheric-circulation.ru>].

Схемы типизации атмосферных процессов представляют непрерывный процесс общей циркуляции атмосферы в виде чередования устойчивых, многократно повторяющихся фрагментов –

однородных процессов (охватывающих полушарие или значительные по площади регионы). Наибольшую известность в отечественной метеорологии получили типизации макромасштабных атмосферных процессов Г.Я. Вангенгейма – А.А. Гирса [Гирс, 1974] и Б.Л. Дзердзеевского, В.М. Курганской, З.М. Витвицкой [Дзердзеевский и др., 1946]. В связи с четкостью формализации циркуляционных ситуаций, значительными пространственными и временными диапазонами (разработана для всего Северного полушария, охватывает период с 1899 г. по настоящее время), общей доступностью Календаря последовательной смены элементарных циркуляционных механизмов [Кононова, 2003, 2009; <http://www.atmospheric-circulation.ru>], для выполнения реконструкции суммарного баланса льда нами выбрана типизация Б.Л. Дзердзеевского, В.М. Курганской, З.М. Витвицкой.

В качестве профилирующего признака в этой типизации принято соотношение зональной и меридиональной составляющих циркуляции над полушарием. Это соотношение в основном регулируется приходящей к Земле солнечной радиацией [Федоров, Кононова, 2014]. Выделяется 13 основных типов ЭЦМ, а с учетом их разновидностей (выделяемых на основе сезонных или региональных различий) – 41 ЭЦМ. Элементарный циркуляционный механизм представляет собой единый целостный макропроцесс, в течение которого в Северном полушарии сохраняются географическое распределение барического поля определенного типа и направленность основных переносов воздушных масс. По характеру соотношения зонального и меридионального переносов в Северном полушарии ЭЦМ объединены в четыре группы: зональную, нарушения зональности, меридиональную северную и меридиональную южную. Группы “зональная” и “нарушения зональности” отражают зональный перенос в атмосфере, группы “меридиональная южная” и “меридиональная северная” – меридиональный перенос воздушных масс.

Таким образом, в непрерывном циркуляционном процессе в атмосфере выделяются элементарные циркуляционные механизмы, группы циркуляции и циркуляционные сезоны, являющиеся основными структурными элементами рассматриваемой типизации. Время, частота, порядок проявления и продолжительность действия тех или иных ЭЦМ отражают особенности общей циркуляции атмосферы, определяют характер погоды и климата каждого конкретного места. Применение типизации к анализу балансовых показателей ледников позволило разработать методику реконструкции баланса массы и увеличить продолжительность балансовых рядов. Основу методики реконструкции составили представления о расче-

те весовых коэффициентов каждого ЭЦМ в процессах аккумуляции и абляции на леднике, для которого в результате многолетних наблюдений получены балансовые характеристики [Федоров, 2011б].

Связь циркуляционных характеристик климата находилась из предположения о том, что каждому элементарному циркуляционному процессу на полушарии соответствуют определенные погодные условия в конкретном месте (температурный режим и режим атмосферных осадков), которые определяют развитие ледников. Связь циркуляционных характеристик (продолжительность действия ЭЦМ) с балансовыми показателями была найдена в виде пропорции циркуляционного вклада (весовых соотношений) каждого ЭЦМ в формирование знака и величины аномалии балансового показателя [Федоров, 2006, 2007, 2009а,б, 2011а,б].

Пропорция вклада (весов) для рядов инструментальных наблюдений аккумуляции и абляции определялась следующим образом. Из ряда значений балансового показателя вычиталось среднее многолетнее значение. В результате была получена знакопеременная функция – аномалия балансового показателя (аккумуляции, абляции). Далее по данным Календаря последовательной смены ЭЦМ [Федоров, 2006, 2007, 2009а,б, 2011а,б] для лет с положительными и отрицательными аномалиями отдельно находились суммарные значения продолжительности действия ЭЦМ всех типов за некоторый период года (например, зимний – для аккумуляции и летний – для абляции). В предположении о том, что связанные с отдельными типами ЭЦМ погодные условия вносят определенный циркуляционный вклад в формирование как положительных, так и отрицательных аномалий годовых значений балансовых показателей ледника, были рассчитаны (в долях единицы) пропорции циркуляционного вклада (веса) каждого ЭЦМ в формирование знака и величины аномалии аккумуляции и абляции. Полученные пропорции проверялись восстановлением значений исходных инструментальных рядов по данным Календаря последовательной смены ЭЦМ [Федоров, 2011б]. В качестве оценочных характеристик при этом принимались коэффициент корреляции между восстановленным и исходным рядами и расхождение между этими рядами в миллиметрах водного эквивалента и в процентах от среднего модуля аномалии исходного ряда. Статистическая значимость коэффициента корреляции определялась в соответствии с существующими методиками [Цымбаленко и др., 2007]. Изменением даты начала и продолжительности периода (аккумуляции, абляции) путем перебора находилось такое его значение, при котором величина коэффициента корреляции была максимальной, а расхождение

– минимальным. Восстановленный ряд принимался за макроциркуляционную модель балансового показателя.

На основе найденной формы связи были выполнены реконструкции динамики баланса массы 25 репрезентативных и опорных ледников Северного полушария, имеющих продолжительные ряды балансовых наблюдений [Федоров, 2011а,б]. Эти данные по районам были дополнены результатами балансовых наблюдений еще по 100 ледникам Северного полушария. Затем рассчитывались регионально осредненные значения баланса массы для каждого района (по всем ледникам, охваченным балансовыми наблюдениями) и по ним значения суммарного баланса. Эти ряды использовались для прогнозов суммарного баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНСОЛЯЦИИ

Для выполнения прогнозов суммарного баланса массы ледников рассчитывалась инсоляция Земли и полушарий. Расчеты приходившей на ВГА Земли (на верхнюю границу атмосферы или на поверхность Земли без учета атмосферы) солнечной радиации известны, начиная с работ М. Миланковича [1939]. Эти расчеты выполнялись прежде всего для объяснения плейстоценовых ледниковых и межледниковых эпох. Они проводились с учетом трех параметров орбитального движения Земли (эксцентриситет земной орбиты, наклон оси вращения Земли и долготы перигелия) на длительные периоды времени (сотни тысяч лет). Расчеты выполнялись только для отдельных широт. Принималось, что Земля имеет форму сферы. В расчетах, таким образом, принимались во внимание только вековые вариации характеристик орбитального движения Земли и связанные с ними вариации в поступлении к Земле солнечной радиации. Периодические изменения элементов земной орбиты и наклона оси вращения Земли при этом не учитывались. Разрешение по времени в расчетах Миланковича и его последователей [Монин, 1982; Шараф, Будникова, 1968; Vernekar, 1972; Berger, 1978] составляло от 1 до 5 тыс. лет. Выполняемые таким способом расчеты могли быть полезными при анализе палеоклиматических изменений.

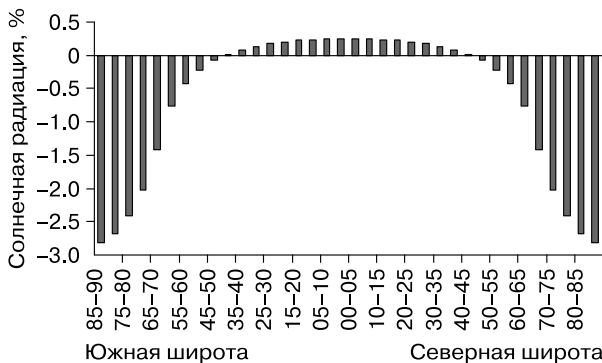
Для анализа современного климата необходимы расчеты инсоляции с более высоким разрешением по времени, учитывающие наряду с вековыми и периодическими вариациями инсоляции. Такие расчеты, учитывающие периодические возмущения элементов земной орбиты и связанные с ними высокочастотные вариации солнечной радиации, были начаты в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, в России (бывшем СССР) [Borisenkov et al., 1983]. Однако дальнейшего развития эти работы не получили. Исследования вы-

сокочастотных вариаций инсоляции также были начаты в бельгийском Институте астрономии и геофизики им. Г. Леметра [Loutre et al., 1992; Bertrand et al., 2002; Berger et al., 2010]. Расчеты инсоляции (на основе решения задачи движения двух тел) в этом диапазоне были выполнены в Институте криосферы Земли (Тюмень) И.И. Смутьским и О.И. Кротовым [2013].

Позднее расчеты инсоляции в диапазоне высокочастотных вариаций были выполнены автором совместно с А.А. Костиным [Федоров, 2015a, 2018; <http://www.solar-climate.com>]. Расчеты приходящей солнечной радиации проводились по данным астрономических эфемерид [Giorgini et al., 1996; <http://ssd.jpl.nasa.gov>] для всей поверхности Земли (без учета атмосферы) в интервале с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. Исходными астрономическими данными для расчетов инсоляции были склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего (среднего солнечного) и всемирного корректируемого времени (истинного солнечного). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80 – Geodetic Reference System, 1980) с длинами полуосей 6 378 137 м (большие) и 6 356 752 м (малая). В общем виде алгоритм расчетов можно представить выражением

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

где  $I$  – приходящая солнечная радиация за элементарный  $n$ -й фрагмент  $m$ -го тропического года, Дж;  $\sigma$  – площадной множитель ( $\text{м}^2$ ), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал  $\sigma(H, \varphi) d\alpha d\varphi$  – площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида;  $\alpha$  – часовой угол,  $\varphi$  – 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



**Рис. 1.** Изменение инсоляции Земли в интервале с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. по широтным зонам (по отношению к средней для соответствующих широтных зон инсоляции).

эллипсоида,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $t$  – время, с. Шаги при интегрировании составляли: по долготе  $1^\circ$ , по широте  $1^\circ$ , по времени  $1/360$  продолжительности тропического года [Федоров, 2013]. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным  $1361 \text{ Вт}/\text{м}^2$  [Kopp, Lean, 2011]. По результатам расчетов сформирована общедоступная база данных приходящей солнечной энергии во все широтные зоны Земли (протяженностью  $5^\circ$ ) за каждый астрономический месяц каждого года для периода от 3000 до н.э. до 2999 г. н.э. [<http://www.solar-climate.com>], которая используется автором в данной работе.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Определено [Федоров, 2015a, 2018], что за время от 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э. приходящая к Земле за год солнечная радиация сократилась всего на  $0.005\%$ . Однако распределение приходящей за год радиации по широтным зонам изменяется более значительно (рис. 1) [Федоров, 2014, 2015a, 2018]. Поступление солнечной радиации в экваториальную область Земли в настоящее время (в диапазоне, по крайней мере, от 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э.) увеличивается, а в полярные области сокращается (см. рис. 1). То есть происходит увеличение меридионального градиента инсоляции. Следствием этого является усиление межширотного теплообмена (между теплыми и холодными областями Земли) как в атмосфере, так и в океане, т. е. усиление работы “тепловой машины первого рода” [Шулейкин, 1953; Федоров, 2014, 2018]. Эффект усиления межширотного теплообмена в атмосфере подтверждается тенденцией увеличения продолжительности меридиональной южной группы циркуляции [Кононова, 2003, 2009; Федорова, Кононова, 2014].

Отмеченные изменения – усиление широтной контрастности и сглаживание сезонных различий в инсоляции Земли – связаны с вековой тенденцией уменьшения угла наклона оси вращения Земли в результате прецессии. При увеличении угла наклона оси вращения возрастает приход солнечной радиации в полярные районы, т. е. происходит сглаживание широтной контрастности в полушариях и усиление сезонных различий. При уменьшении угла наклона происходит увеличение радиации, поступающей в экваториальную область, уменьшение радиации, поступающей в полярные районы, широтные контрасты возрастают, а сезонные различия сглаживаются [Миланкович, 1939; Федоров, 2018].

Для анализа изменения приповерхностной температуры воздуха Земли и полушарий использовалась инсоляционная контрастность. Для полушарий ИК рассчитывалась как разность солнечной радиации приходящей в область  $0-45^\circ$  и приходящей в область  $45-90^\circ$  (рис. 2). Для Земли принималось среднее по полушариям значение ИК.

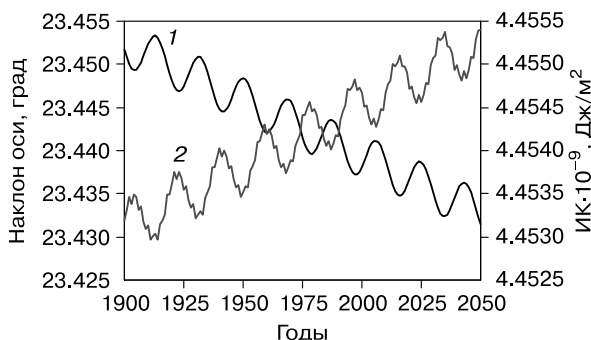


Рис. 2. Изменение угла наклона оси вращения Земли (линия 1) и инсоляционной контрастности (линия 2).

Изменение инсоляционной контрастности линейно связано с изменением угла наклона оси вращения Земли (коэффициент корреляции  $R = -0.997$ ). Изменение угла наклона [Федоров, 2018; <http://ssd.jpl.nasa.gov>] и связанной с ним ИК определяется планетной прецессией (тренд) и нутацией (19-летние вариации).

Так как динамика ледников во многом определяется температурным режимом, проводился корреляционный анализ значений аномалии ПТВ по данным, представленным в архиве Университета Восточной Англии и метеобюро Хэдли, – массив HadCRUT4 [<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>]. Поскольку в исходных рядах ПТВ (и регионально осредненного суммарного баланса массы льда) 19-летние вариации не обнаруживаются, проводилось сглаживание рядов угла наклона оси и ИК по 21-летнему скользящему среднему. Проведенный анализ для достоверных данных (1900–2016 гг.) [Федоров, 2018; Brohan et al., 2006; Jones et al., 2012] показал наличие высокой корреляционной связи между изменением угла наклона оси и инсоляционной контрастности с изменением аномалии ПТВ (табл. 1). При этом отмечаются положительная связь аномалии ПТВ с ИК и отрицательная связь аномалии ПТВ с углом наклона оси вращения Земли. Аномалия ПТВ в массиве данных представлена относительно средней глобальной температуры для периода 1961–1990 гг.

Как показывают расчеты [Федоров, 2018], в исходных временных рядах аномалии ПТВ (Земли и полушарий) изменчивость в основном (от 69 % в Северном полушарии до 85 % в Южном полушарии) выражается трендами. Напомним, что тренд отражает основную тенденцию изменения временного ряда некоторой переменной. Тренды могут быть описаны различными уравнениями – линейными, логарифмическими, степенными, полиномиальными и т. д. Тип тренда устанавливается на основе подбора (статистическими методами)

Таблица 1. Значения коэффициента корреляции ( $R$ ) угла наклона оси вращения Земли и инсоляционной контрастности (ИК) с аномалией приповерхностной температуры воздуха (ПТВ)

Инсоляционный параметр	Аномалия ПТВ		
	Земля	СП	ЮП
Угол наклона оси	-0.888	-0.832	-0.914
ИК	0.888	0.833	0.914

Примечание. СП, ЮП – Северное и Южное полушария.

функции, наиболее точно описывающей тенденцию, или сглаживанием исходных данных временного ряда.

На основе балансовых данных (инструментальных наблюдений и реконструкции) для каждого из 9 ледниковых районов Северного полушария были получены значения регионально осредненных значений суммарного баланса массы льда (рис. 3). Они рассчитывались осреднением годовых значений баланса массы для соответствующих лет по всем охваченным балансовыми наблюдениями ледникам этого района. Всего по 9 ледниковым районам для расчетов использовались данные инструментальных балансовых измерений по 125 ледникам, приведенные в сборниках “Изменения ледников” (Fluctuations of Glaciers, I–IX) [Dyrgerov, 2002], и данные реконструкции по 25 ледникам Северного полушария [Федоров, 2011a,б]. Полученные регионально осредненные ряды (с учетом данных реконструкции) охватывают диапазон с 1900 по 2005 г. (см. рис. 3). Реконструкция на основе макроциркуляционной модели [Федоров, 2006, 2007, 2009a,б, 2011a,б] выполнена на период с 1900 г. до начала инструментальных балансовых наблюдений в регионе. Полу-

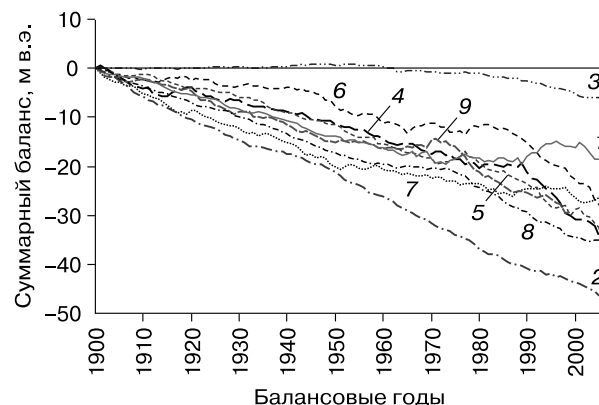


Рис. 3. Динамика регионально осредненного суммарного баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария в XX столетии:

1 – Скандинавия; 2 – Шпицберген; 3 – Канадский арктический архипелаг; 4 – Аляска; 5 – Кордильеры; 6 – Альпы; 7 – Кавказ; 8 – Тянь-Шань; 9 – Памиро-Алай.

Таблица 2. Значения коэффициента корреляции ( $R$ ) суммарного баланса массы льда ледниковых районов с ИК и коэффициента детерминации ( $R^2$ ) тех же исходных рядов

Ледниковые районы	$R$	$R^2$	
		Линейный тренд	Полиномиальный тренд
Скандинавия	-0.787	0.840	0.964
Шпицберген	-0.885	0.997	0.997
Канадский арктический архипелаг	-0.688	0.577	0.940
Аляска	-0.874	0.947	0.975
Кордильеры	-0.883	0.975	0.987
Альпы	-0.841	0.890	0.946
Кавказ	-0.845	0.940	0.992
Тянь-Шань	-0.887	0.985	0.987
Памиро-Алай	-0.875	0.960	0.962
<i>Среднее</i>	<i>-0.841</i>	<i>0.901</i>	<i>0.972</i>

ченные данные реконструкции хорошо согласуются с результатами ранее проведенных реконструкций, модельных экспериментов и историческими свидетельствами по динамике ледников [Федоров, 2011б].

Анализ проводился по временным рядам, включающим инструментальные значения суммарного баланса массы и данные реконструкции. Для всех 9 ледниковых районов обнаружена тесная связь изменения суммарного баланса массы льда с ИК (табл. 2).

В исходных рядах регионально осредненного суммарного баланса массы изменчивость в основном учитывается трендами (см. табл. 2, рис. 4). Приведены значения коэффициента детерминации ( $R^2$ ), показывающего долю изменчивости суммарного баланса массы, учитываемую трендом.

Таким образом, более 90 % изменчивости суммарного баланса массы в исходных для прогноза данных учитывается трендом. В связи с этим корреляционное сопоставление этих трендов с трендами угла наклона оси и ИК (83–85 % дисперсии в этих рядах также учитывается трендами) представляется оправданным для объяснения причин более чем 90 % изменений регионально осредненного суммарного баланса массы льда.

На основе найденной корреляционной связи с ИК были построены уравнения регрессии (линейные и полиномиальные – полином 2-й степени) суммарного баланса массы и ИК (см. табл. 3). Коэффициент детерминации рассматривается в качестве основного показателя, отражающего меру качества регрессионной модели, описывающей связь между зависимой и независимыми переменными модели. Коэффициент детерминации показывает, какая доля вариации объясняемой переменной учитывается в модели, и определяется

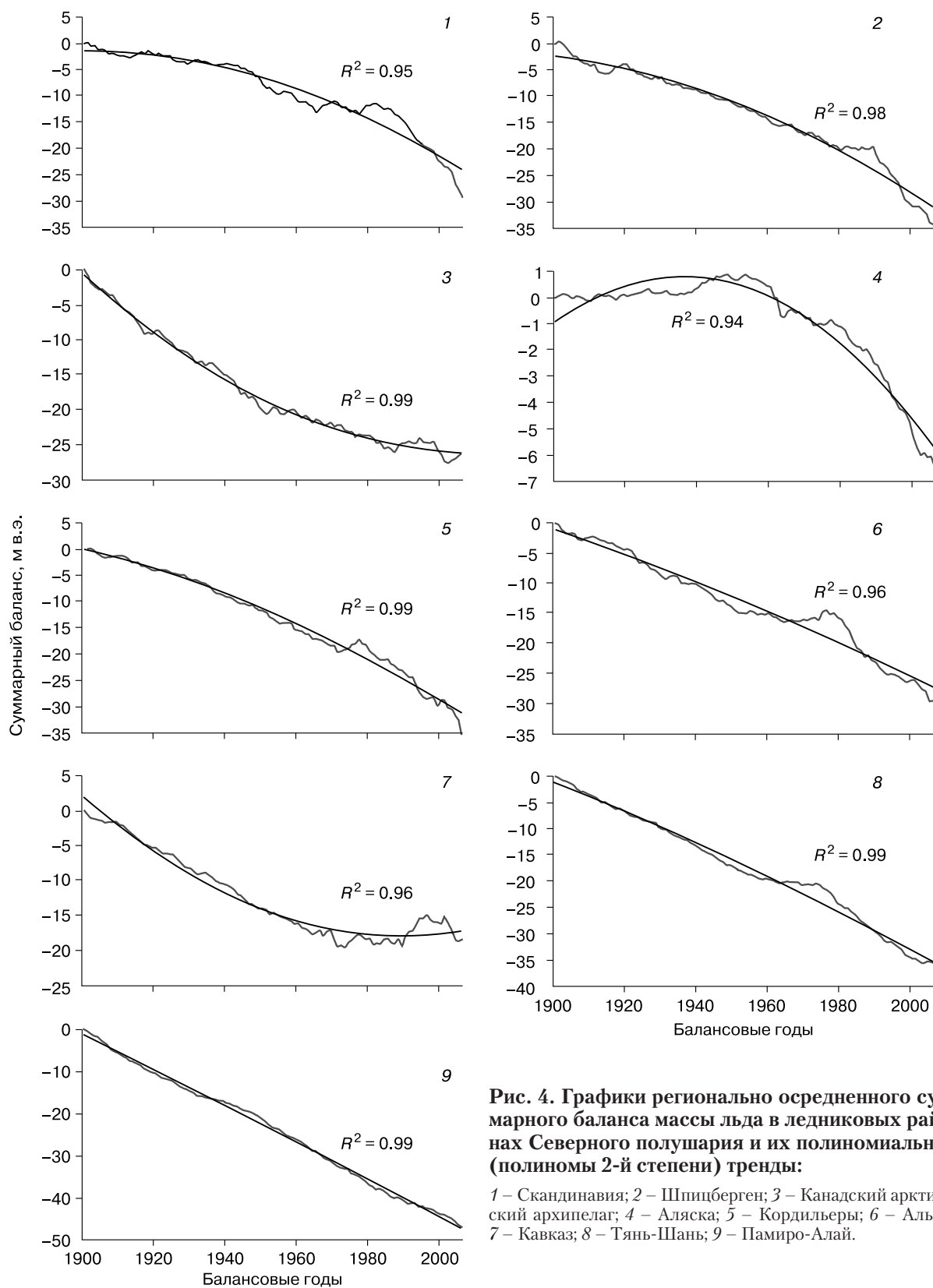
Таблица 3. Значения коэффициента детерминации ( $R^2$ ) в уравнениях регрессии и дисперсии ( $D$ ) для ансамблевых решений по уравнениям регрессии

Ледниковые районы	$R^2$		$D$
	Линейная регрессия	Полиномиальная регрессия	
Скандинавия	0.827	0.963	0.929
Шпицберген	0.992	0.992	0.992
Канадский арктический архипелаг	0.580	0.942	0.942
Аляска	0.946	0.976	0.946
Кордильеры	0.973	0.983	0.980
Альпы	0.887	0.941	0.928
Кавказ	0.932	0.986	0.973
Тянь-Шань	0.983	0.984	0.984
Памиро-Алай	0.960	0.902	0.961
<i>Среднее</i>	<i>0.898</i>	<i>0.963</i>	<i>0.959</i>

влиянием на нее факторов, включенных в модель (чем ближе  $R^2$  к 1, тем выше качество модели).

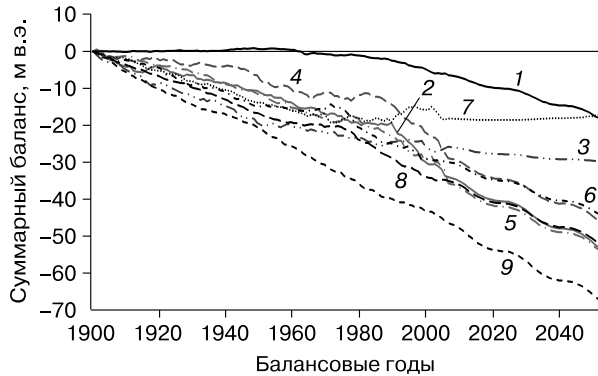
Прогноз выполнялся по ансамблю линейных и полиномиальных решений последовательным алгебраическим сложением рассчитанных годовых значений суммарного баланса массы льда (начиная с конечного в исходных рядах значения 2005 г.) с суммарным балансом массы исходных рядов (рис. 5). Годовые значения вычислялись по рассчитанному на основе регрессионной модели значениям регионально осредненного суммарного баланса массы льда. Характер изменения регионально осредненного суммарного баланса массы льда в 9 ледниковых районах Северного полушария с 1900 по 2050 г. представлен на рис. 5.

Таким образом, для среднего по району леднику (из ледников, охваченных балансовыми наблюдениями) максимальная потеря льда с 1900 по 2050 г. отмечается для Шпицбергена – 67.9 м в.э. (водного эквивалента). Для регионально осредненного баланса массы льда на Шпицбергене получена линейная зависимость суммарного баланса массы льда от инсоляционной контрастности. Значительные потери льда отмечаются на Аляске (53.6 м в.э.), в Кордильерах (54.2 м в.э.) и на Тянь-Шане (52.4 м в.э.). Несколько меньшие за полтора столетия потери массы льда ожидаются в Альпах (46.3 м в.э.) и на Памиро-Алае (44.5 м в.э.). На Кавказе потеря льда за этот период составит около 30 м в.э. Минимальные потери льда с начала прошлого столетия до настоящего времени отмечаются в Скандинавии и Канадском арктическом архипелаге – 17.4 и 18.3 м в.э. соответственно. Скандинавские ледники испытывают сильное влияние Атлантики (Исландского минимума атмосферного давления), которое вызвано циклоническим переносом с запада и юго-запада морских воздуш-



**Рис. 4. Графики регионально осредненного суммарного баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария и их полиномиальные (полиномы 2-й степени) тренды:**

1 – Скандинавия; 2 – Шпицберген; 3 – Канадский арктический архипелаг; 4 – Аляска; 5 – Кордильеры; 6 – Альпы; 7 – Кавказ; 8 – Тянь-Шань; 9 – Памиро-Алай.



**Рис. 5.** Динамика регионально осредненного суммарного баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария в XX в. и первой половине XXI в.

Условные обозн. см. на рис. 3.

ных масс по Исландско-Карской ложбине [Чижов, 1976; Корякин, 1988]. Поэтому здесь потери льда в результате увеличения глобальной ПТВ (абляции) в значительной мере компенсируются увеличением атмосферных осадков (аккумуляцией). Небольшие потери массы льда на Канадском арктическом архипелаге объясняются малыми значениями балансовых показателей (аккумуляции и абляции).

С 2017 по 2050 г. для Скандинавии и Кавказа ожидается стационарное (или близкое к нему) состояние регионально осредненного суммарного баланса массы льда. В Скандинавии потеря массы льда за этот период составит 1.3 м в.э., на Кавказе — около 2.0 м в.э. Минимальные потери льда в этих районах могут объясняться усилением циклонической деятельности и переноса морских воздушных масс в районе Скандинавии с Атлантики, на Кавказе — со Средиземного моря. Таким образом, связанное с усилением межширотного теплообмена воздействие увеличения ПТВ на ледники (абляции) в этих районах в значительной степени компенсируется увеличением атмосферных осадков (аккумуляцией). Увеличение атмосферных осадков также определяется усилением межширотного теплообмена, в частности, продолжительности действия меридиональной южной группы циркуляции [Кононова, 2009].

В других ледниковых районах Северного полушария потери льда за этот период в среднем будут находиться в диапазоне от 9–10 м в.э. (Канадский арктический архипелаг, Памиро-Алай) до 12–14 м в.э. (Альпы, Аляска, Кордильеры, Шпицберген). Таким образом, в генетическом плане развитие скандинавских и кавказских ледников в условиях усиления меридионального переноса тепла и влаги в большей степени связано с атмосферными осадками (аккумуляцией) и в меньшей

степени с переносом тепла (абляцией). В остальных ледниковых районах Северного полушария тенденции изменения суммарного баланса массы в основном определяются переносом тепла (абляцией), связанным с усилением межширотного теплообмена из-за уменьшения наклона оси вращения Земли.

## ВЫВОДЫ

Отмечена высокая корреляция суммарного баланса массы льда, рассчитанного для среднего по ледниковому району леднику, с инсоляционной контрастностью (отрицательная) и изменением угла наклона оси вращения Земли (положительная). Поскольку изменчивость регионально осредненного суммарного баланса массы льда в среднем на 90–95 % учитывается трендом, полученные высокие корреляционные показатели указывают на причинно-следственные связи в тенденциях изменения суммарного баланса массы льда и ИК. Таким образом, тенденции изменения суммарного баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария являются следствием увеличения инсоляционной контрастности, причина которого в уменьшении наклона оси вращения Земли. Увеличение инсоляционной контрастности свидетельствует об усилении работы “тепловой машины первого рода” [Шулейкин, 1953] и усилении переноса тепла и влаги (вихревые и циркуляционные потоки в атмосфере, океанические течения) из низких широт в высокие. Следствием этого являются повышение температуры в областях стока тепла, увеличение испарения и содержания водяного пара в атмосфере, что приводит к усилению парникового эффекта и дополнительному увеличению температуры в области стока тепла. Это вызывает деградацию современного оледенения в Северном полушарии. В отдельных ледниковых районах (Скандинавия, Кавказ) влияние на динамику массы льда усиления переноса тепла (абляции) отчасти компенсируется усилением переноса влаги — атмосферных осадков (аккумуляцией), что приводит к замедлению деградации оледенения.

Таким образом, тенденции в деградации современного оледенения в Северном полушарии определяются естественными причинами, главным образом уменьшением наклона оси вращения Земли. Полученные результаты важны для обобщенной оценки изменения ледовых ресурсов в будущем, вклада в изменение уровня Мирового океана и для мониторинга климатических изменений в Северном полушарии.

*Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой “Геоэкологический анализ и прогноз динамики криолитозоны Российской Арктики” (№ АААА-А16-116032810055-0).*



## Литература

- Гирс А.А.** Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. Л., Гидрометеоздат, 1974, 488 с.
- Gears, A.A., 1974. Microcirculation Method of Long-term Weather Forecast. Gidrometeoizdat, Leningrad, 488 pp. (in Russian)
- Дзердзеевский Б.Л., Курганская В.М., Витвицкая З.М.** Типизация циркуляционных механизмов в Северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // Тр. НИУ ГУГМС. М., Гидрометеоздат, 1946, 80 с.
- Dzrdzeevskii, B.L., Kurganskaya, V.M., Vitvitskaya, Z.M., 1946. Classification of Circulation Mechanisms over the Northern Hemisphere and Characteristics of Synoptic Seasons. Tr. NIU GUGMS, Gidrometeoizdat, Moscow, 80 pp. (in Russian)
- Имбри Дж.** Тайны ледниковых эпох / Дж. Имбри, К.П. Имбри. М., Прогресс, 1988, 264 с.
- Imbrie, J., Imbrie, K.P., 1988. Ice Ages: Solving the Mystery. Progress, Moscow, 264 pp. (in Russian)
- Кононова Н.К.** Исследования многолетних колебаний циркуляции атмосферы Северного полушария и их применение в гляциологии // Материалы гляциол. исслед., 2003, вып. 95, с. 45–65.
- Kononova, N.K., 2003. Results of studies of multi-year fluctuations of atmospheric circulation over the Northern Hemisphere and their application to glaciology. Materialy Glyatsiol. Issled., iss. 95, 45–65.
- Кононова Н.К.** Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. М., Воентехиниздат, 2009, 372 с.
- Kononova, N.K., 2009. Classification of Circulation Mechanisms of the Northern Hemisphere by B.L. Dzrdzeevskii. Voentekhnizdat, Moscow, 372 pp. (in Russian)
- Корякин В.С.** Ледники Арктики. М., Наука, 1988, 160 с.
- Koryakin, V.S., 1988. The Arctic Glaciers. Nauka, Moscow, 160 pp. (in Russian)
- Миланкович М.** Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л., ГОНТИ, 1939, 208 с.
- Milankovitch, M., 1939. Mathematical Climatology and Astronomical Theory of Climate Variability. GONTI, Moscow; Leningrad, 208 pp. (in Russian)
- Монин А.С.** Введение в теорию климата. Л., Гидрометеоздат, 1982, 246 с.
- Monin, A.S., 1982. Introduction to the Climate Theory. Gidrometeoizdat, Leningrad, 246 pp. (in Russian)
- Серебрянный Л.Р., Орлов А.В., Соломина О.Н.** Изучение колебаний ледников Тянь-Шаня как направление гляциологического прогнозирования // Материалы гляциол. исслед., 1989, вып. 67, с. 87–90.
- Serebryanny, L.R., Orlov, A.V., Solomina, O.N., 1989. Results of the study of fluctuations of the Tien Shan glaciers and their applications to forecasting in glaciology. Materialy Glyatsiol. Issled., iss. 67, 87–90.
- Смутьский И.И., Кротов О.И.** Новый алгоритм расчета инсоляции Земли / Институт криосферы Земли СО РАН. Тюмень, 2013, 38 с. Деп. ВИНТИ, 08.04.2013, № 103-B2013.
- Smulskii, I.I., Krotov, O.I., 2013. New computing algorithm of the Earth's insolation. Institute of Earth Cryosphere SB RAS, Tyumen, 38 pp. VNIIGNI Dep., 08.04.2013, No. 103-B2013.
- Федоров В.М.** Макроциркуляционная модель реконструкции динамики баланса массы ледников Норвегии в XX столетии // Материалы гляциол. исслед., 2006, вып. 100, с. 73–79.
- Fedorov, V.M., 2006. Macrocirculation model for reconstruction of Norwegian glaciers' dynamics in the 20th century. Materialy Glyatsiol. Issled., iss. 100, 73–79.
- Федоров В.М.** Макроциркуляционная модель реконструкции и прогноза динамики баланса массы субарктических ледников (на примере ледника Энгабреен) // Изв. РАН. Сер. геогр., 2007, № 3, с. 18–26.
- Fedorov, V.M., 2007. Macrocirculation model for reconstruction and forecasting subarctic glaciers' dynamics (a case study of Engabreen glacier). Izvestia RAN, ser. geogr., No. 3, 18–26.
- Федоров В.М.** Реконструкция динамики баланса массы ледника Джанкуат в XX столетии на основе макроциркуляционной модели // Материалы гляциол. исслед., 2009а, вып. 105, с. 106–110.
- Fedorov, V.M., 2009a. Macrocirculation model-based reconstruction of Dzhankaut glacier dynamics in the 20th century. Materialy Glyatsiol. Issled., iss. 105, 106–110.
- Федоров В.М.** Реконструкция динамики баланса массы арктических ледников в XX столетии на основе макроциркуляционной модели // Криосфера Земли, 2009б, т. XIII, № 3, с. 80–87.
- Fedorov, V.M., 2009b. Macrocirculation model-based reconstruction of mass balance dynamics of Arctic glaciers in the 20th century. Earth's Cryosphere XIII (3), 80–87.
- Федоров В.М.** Причины метахронности в динамике баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария // Криосфера Земли, 2011а, т. XV, № 2, с. 70–80.
- Fedorov, V.M., 2011a. Causes of metachronism in the glacier mass balance dynamics in glacial regions of the Northern Hemisphere. Earth's Cryosphere XV (2), 70–80.
- Федоров В.М.** Динамика баланса массы ледников в связи с макроциркуляционными процессами в атмосфере. М., Физматлит, 2011б, 376 с.
- Fedorov, V.M., 2011b. Glacier mass balance dynamics driven by microcirculation processes in the atmosphere. Fizmatlit, Moscow, 376 pp. (in Russian)
- Федоров В.М.** Теоретический расчет межгодовой изменчивости солнечной постоянной // Астроном. вестн., 2012, т. 46, № 2, с. 184–189.
- Fedorov, V.M., 2012. Interannual variability of the solar constant. Solar System Research 46 (2), 170–176, DOI: 10.1134/S0038094612020049.
- Федоров В.М.** Межгодовые вариации продолжительности тропического года // Докл. РАН, 2013, т. 451, № 1, с. 95–97, DOI: 10.7868/S086956521319016X.
- Fedorov, V.M., 2013. Interannual variations in the duration of the tropical year. Dokl. Earth Sci. 451 (1), 750–753, DOI: 10.1016/S086956521319016X.
- 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.
- Fedorov, V.M., 2014. The enhancement effect of inter-latitudinal heat exchange and variation in sea ice extent in the Northern Hemisphere. Proceedings of all-Russian conference (with international participation) "State of Arctic seas and territories under conditions of climate change". ID SAFU, Arkhangelsk, pp. 35–36. (in Russian)
- Федоров В.М.** Пространственные и временные вариации соляного климата Земли в современную эпоху // Геофиз. процессы и биосфера, 2015а, т. 14, № 1, с. 5–22.
- Fedorov, V.M., 2015a. Spatial and temporal variations in solar climate of the Earth in the present epoch. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics 51 (8), 779–791, DOI: 10.1134/S0001433815080034.

- Федоров В.М.** Широтная изменчивость приходящей солнечной радиации в различных временных циклах // Докл. РАН, 2015б, т. 460, № 3, с. 339–342, DOI: 10.7868/S0869565215030196.  
Fedorov, V.M., 2015b. Latitudinal variability of incoming solar radiation in various time-cycles. Dokl. Earth Sci. 460 (1), 96–99, DOI: 10.1134/S1028334X15010183.
- Федоров В.М.** Широтные соответствия в распределении приходящей солнечной радиации и общей циркуляции атмосферы // Сложные системы, 2015в, № 1 (14), с. 39–55.  
Fedorov, V.M., 2015c. Latitudinal distribution of the incoming solar radiation and general atmospheric circulation. Slozhnye Sistemy 1 (14), 39–55.
- Федоров В.М.** Теоретический расчет межгодовой изменчивости инсоляции Земли с суточным разрешением // Астроном. вестн., 2016а, т. 50, № 3, с. 233–238, DOI: 10.7868/S0320930X16030014.  
Fedorov, V.M., 2016a. Theoretical calculation of the interannual variability of the Earth's insolation with daily resolution. Solar System Research 50 (3), 220–224, DOI: 10.1134/S0038094616030011.
- Федоров В.М.** Корреляционный анализ инсоляции Земли и приповерхностной температуры // Учен. записки РГГМУ, 2016б, № 45, с. 151–168.  
Fedorov, V.M., 2016b. Correlation analysis of the Earth's insolation and anomalies of the near-surface temperature. Uchenye zapiski RGGMU, No. 45, 151–168.
- Федоров В.М.** Инсоляция Земли и современные изменения климата. М., Физматлит, 2018, 232 с.  
Fedorov, V.M., 2018. The Earth's insolation and recent climate changes. Fizmatlit, Moscow, 232 pp. (in Russian)
- Федоров В.М., Кононова Н.К.** Солнечная радиация, приходящая на верхнюю границу атмосферы, и изменчивость циркуляционных процессов в Северном полушарии // Тр. ГГО, 2014, вып. 576, с. 183–200.  
Fedorov, V.M., Kononova, N.K., 2014. Solar radiation at the top of the atmosphere and variability of the circulation processes in the Northern Hemisphere. Trudy GTO, iss. 576, 183–200.
- Цымбаленко Т.Т.** Методы математической статистики в обработке экономической информации / Т.Т. Цымбаленко, А.Н. Байдаков, О.С. Цимбаленко, А.В. Гладилин. М., Финансы и статистика, 2007, 200 с.  
Tsybalyenko, T.T., Baydakov, A.N., Tsybalyenko, O.S., Gladilin, A.V., 2007. Mathematical Statistics Methods in the Processing of Economic Information. Finansy i statistika, Moscow, 200 pp. (in Russian)
- Чижов О.П.** Оледенение северной полярной области. М., Наука, 1976, 240 с.  
Chizhov, O.P., 1976. Glaciation of the North Polar Region. Nauka, Moscow, 240 pp. (in Russian)
- Шараф Ш.Г., Будникова Н.А.** Колебания солнечного облучения Земли, вызванные вековыми изменениями элементов земной орбиты // Докл. АН СССР, 1968, т. 182, № 2, с. 291–293.  
Sharaf, S.H., Budnikova, N.A., 1968. Fluctuations in solar radiation of the Earth caused by secular changes in the Earth's orbit elements. Dokl. AN SSSR 182 (2), 291–293.
- Шулейкин В.В.** Физика моря. М., АН СССР, 1953, 990 с.  
Shuleikin, V.V., 1953. Physics of the Sea. AN SSSR, Moscow, 990 pp. (in Russian)
- Berger, A.** Long-term variations of daily insolation and Quaternary Climatic Changes // J. Atmospheric Science, 1978, vol. 35 (12), p. 2362–2367.
- Berger, A., Loutre, M.F., Yin, Q.** Total irradiation during any time interval of the year using elliptic integrals // Quatern. Sci. Rev., 2010, vol. 29, p. 1968–1982, DOI: 10.1016/j.quascirev.2010.05.07.
- Bertrand, C., Loutre, M.F., Berger, A.** High frequency variations of the Earth's orbital parameters and climate change // Geophys. Res. Lett., 2002, vol. 29, No. 18, p. 40-1–40-3, DOI: 10.1029/2002GL015622.
- Borisenkov, E.P., Tsvetkov, A.V., Agaponov, S.V.** On some characteristics of insolation changes in the past and the future // Climatic Change, 1983, No. 5, p. 237–244.
- Brohan, P., Kennedy, J.J., Harris, I., et al.** Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850 // J. Geophys. Res., 2006, vol. 111, D12106, DOI: 10.1029/2005JD006548.
- Dyurgerov, M.B.** Glaciers mass balance and regime: data of measurements and analysis. Occasional Paper. Boulder, Univ. of Colorado, Inst. of Arctic and Alpine Res., 2002, No. 2, 273 p.
- Giorgini, J.D., Yeomans, D.K., Chamberlin, A.B., et al.** JPL's On-Line Solar System Data Service // Bull. Amer. Astron. Soc., 1996, vol. 28 (3), p. 1158.
- Jones, P.D., Lister, D.H., Osborn, T.J., et al.** Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010 // J. Geophys. Res., 2012, vol. 117, D05127, DOI: 10.1029/2011JD017139.
- Kopp, G., Lean, J.** A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // Geophys. Res. Lett., 2011, vol. 37, L01706, DOI: 10.1029/2010GL045777.
- Loutre, M.F., Berger, A., Bretagnon, E., Blanc, P.-L.** Astronomical frequencies for climate research at the decadal to century time scale // Climate Dynamics, 1992, vol. 7, p. 181–194.
- Vernekar, A.** Long-period global variations of incoming solar radiation // Series: Meteorol. Monographs. Amer. Meteorol. Soc., 1972, vol. 12, No. 34, 128 p.  
URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov> – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Электронный ресурс Нац. аэрокосм. агентства США (дата обращения: 14.01.2017).  
URL: <http://www.atmospheric-circulation.ru> – Электронный ресурс “Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–начале XXI вв.” (дата обращения: 17.04.2018).  
URL: <http://www.solar-climate.com> – Электронный ресурс “Солнечная радиация и климат Земли” (дата обращения: 17.04.2018).  
URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/> – Электронный ресурс Университета Восточной Англии и метеобюро Хедли (дата обращения: 17.04.2018).

Поступила в редакцию  
1 марта 2017 г.