

В. М. Федоров

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ИНСОЛЯЦИИ ЗЕМЛИ И АНОМАЛИИ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

V. M. Fedorov

THE CORRELATION ANALYSIS INSOLATION OF THE EARTH AND ANOMALIES OF SURFACE TEMPERATURE

На основе корреляционного анализа выявлены связи в меридиональном распределении среднесуточной аномалии приповерхностной температуры воздуха и аномалии инсоляции. Найдены различия в характере связи аномалии приповерхностной температуры и инсоляции, определяемые типом подстилающей поверхности. Выявлены связи временных рядов аномалии приповерхностной температуры и инсоляции в отдельных широтных зонах Земли. Определено, что меридиональное распределение характера выявленной связи регулируется межширотным изменением инсоляции.

Ключевые слова: изменение климата, инсоляция Земли, приповерхностная температура воздуха, аномалия температуры.

The relationship between meridional distribution of the average annual anomalies of surface air temperature and meridional distribution of insolation anomalies were identified on the basis of correlation analysis. The differences in the nature of the relationship between anomalies of surface air temperature and insolation determined by the type of the underlying surface was found. The relations between time series of surface air temperature anomalies and insolation in the individual latitudinal zones of the Earth were identified. It was determined that the meridional distribution of the character of identified relation is regulated by the meridional gradient of insolation.

Keywords: climate change, insolation of the Earth, near-surface air temperature, air temperature anomaly.

Введение

Проблема изменения современного глобального климата, и прежде всего его температурных характеристик, представляется актуальной для современной науки и практики [30]. Эта проблема определяется необходимостью прогнозирования последствий климатических изменений для природной среды и общества. Наиболее важным в проблеме исследования и прогнозирования изменений климата является вопрос о причинах, вызывающих эти изменения [6, 7].

Важнейшей характеристикой климатических условий является температурный режим, определяющий многие особенности жизни населения и окружающей природной среды. Приповерхностная температура воздуха (ПТВ) характеризует термическое состояние климатической системы Земли, которое определяется в основном, приходящей от Солнца лучистой энергией и парниковым эффектом планеты. С широтными особенностями распределения солнечной радиации связано расположение

климатических поясов (широтная зональность). В регулировании поступления солнечной радиации к Земле (без учета атмосферы) и распределении ее по земной поверхности (солярный климат Земли) выделяют два механизма, имеющие различную физическую природу. Один механизм связан с изменением активности Солнца. Другой механизм определяется небесно-механическими процессами, изменяющими элементы земной орбиты (расстояние Земля – Солнце, продолжительность тропического года и др.), наклон оси вращения и связанные с ними изменения в инсоляции Земли.

Основная задача работы — определение влияния инсоляции и ее изменений, связанных с небесно-механическими процессами на формирование и изменение аномалии ПТВ, отражающей современное состояние и динамику термического режима климатической системы Земли.

Методика расчетов

Ранее нами была рассчитана приходящая на эллипсоид Земли (без учета атмосферы) лучистая энергия [12–14]. Расчеты инсоляции выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид [29, 32] для всей земной поверхности в интервале с 3000 г. до н.э. по 3000 г. н.э. Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80 — Geodetic Reference System, 1980) с длинами полуосей, равными 6 378 137 м (большие) и 6 356 752 м (малая). В общем виде алгоритм расчетов можно представить выражением:

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

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 трапеции — ячейки эллипсоида; α — часовой угол, φ — географическая широта, выраженные в радианах; H — высота поверхности эллипсоида относительно поверхности Земли (м); $\Lambda(H, \varphi, t, \alpha)$ — инсоляция в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида ($\text{Вт}/\text{м}^2$); t — время (с). Шаги при интегрировании составляли: по долготе — 1° , по широте — 1° , по времени — $1/360$ часть продолжительности тропического года. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным $1361 \text{ Вт}/\text{м}^2$ [35]. По результатам расчетов сформирована общедоступная база данных приходящей солнечной энергии во все широтные зоны Земли (протяженностью в 5 градусов) за каждый астрономический месяц каждого года для периода от 3000 г. до н.э. до 3000 г. н.э. [31].

Выполненные нами расчеты отличаются от известных расчетов низкочастотных вариаций инсоляции [5, 6, 16, 18–20, 38] разрешением по времени и пространству, а также исходным астрономическим данным [11–14, 31]. Разрешение по времени, например в работах [5, 6, 16], составляет 5000 лет, в работах [18–20, 38] — 1000 лет. Земля принимается за сферу и расчеты в этих работах выполняются только для отдельных широт (параллелей).

Отличия нашего подхода в расчетах высокочастотных вариаций инсоляции от методов расчетов высокочастотных вариаций в основном сводятся к следующему. Во-первых, они связаны с исходными астрономическими данными, используемыми в расчетах (в том числе, различными значениями солнечной постоянной). Во-вторых, с различным алгоритмом расчетов по пространству. В работах [9, 21–26, 36] Земля также принимается за сферу, и расчеты выполняются для отдельных широт (параллелей). В-третьих, по временному интервалу, охваченному расчетами. В работах [9, 21–26, 36] расчеты относятся только к отдельным точкам года. Например, в работах [22–24, 36] расчеты выполняются только для точек равноденствия и солнцестояния и июля (точнее, точки с геоцентрической долготой 120°). Таким образом, выполненные нами расчеты основаны на высокоточных эфемеридах, в них используется новое значение солнечной постоянной [35], более детально охватывается временной интервал протяженностью в 6000 лет и вся поверхность (площадь) Земли (заполняются пространственные и временные «бреши» в расчетах инсоляции в данном интервале). Земная поверхность в наших расчетах не отождествляется со сферой, а аппроксимируется эллипсоидом.

1. Корреляционный анализ инсоляции и значений ПТВ

Проведено сравнение рассчитанных значений инсоляции с данными приповерхностной температуры воздуха (ПТВ). В качестве исходных климатических данных принимались среднегодовое для широтных зон годовые значения ПТВ за период 1961–1990 гг. (климатическая норма ПТВ). Эти значения рассчитывались для пятиградусных широтных зон по месячным данным, приведенным в трехмерном массиве ПТВ за базовый период 1961–1990 гг. университета Восточной Англии и метеобюро Хедли [33, 34].

Рассчитанные для пятиградусных широтных зон земного эллипсоида (без учета атмосферы) значения инсоляции [31] (среднегодовое за период с 1961 по 1990 г.) сопоставлялись с годовой климатической нормой ПТВ за период 1961–1990 гг. (рис. 1), то есть с нормой ПТВ, отражающей и свойственные ей характеристики парникового эффекта, солнечной активности и механизмов теплообмена, участвующих в формировании среднемесячной и среднегодовой температуры и ее распределению по широтам и сезонам.

Распределение ПТВ по широтным зонам характеризуется тесной корреляционной связью с распределением приходящей на земной эллипсоид солнечной радиации. Коэффициент корреляции (R) климатической нормы ПТВ (1961–1990 гг.) и инсоляции (за тот же период) по меридиану Земли (по всем пятиградусным широтным зонам) характеризуется значением 0,94, для Северного полушария — 0,99, для Южного полушария — 0,94. Из анализа массива ПТВ [33] следует, что температурная норма для Земли (1961–1990 гг.) равна $13,97^\circ\text{C}$, для Северного полушария — $14,59^\circ\text{C}$, для Южного — $13,36^\circ\text{C}$. По данным архива HadCRUT4 [33] годовая аномалия ПТВ для Земли составляет на 2015 г. $0,745^\circ\text{C}$, для Северного полушария — $1,001^\circ\text{C}$, для Южного полушария — $0,492^\circ\text{C}$. С учетом того, что окружающее Землю пространство характеризуется температурой равной -273°C , изменения аномалии ПТВ относительно абсолютного значения ее нормы ($287,719^\circ\text{C}$, $288,587^\circ\text{C}$, $286,853^\circ\text{C}$ для Земли, Северного и Южного полушарий соответственно) составляют всего 0,26, 0,35 и 0,17 %

соответственно (рис. 2). Тем не менее климатическая система Земли откликается на эти малые вариации ПТВ сокращением площади морских льдов в Арктике, горных ледников, повышением уровня Мирового океана и т.д. [4, 10, 15].

Из известного факта того, что более 99 % тепла на поверхности Земли определяется поступлением лучистой энергии, возникает вопрос относительно роли инсоляции в величине и распределении аномалии этого тепла (ПТВ). Именно с увеличением аномалии ПТВ связаны многие современные озабоченности относительно причин и последствий изменения глобального климата Земли [30].

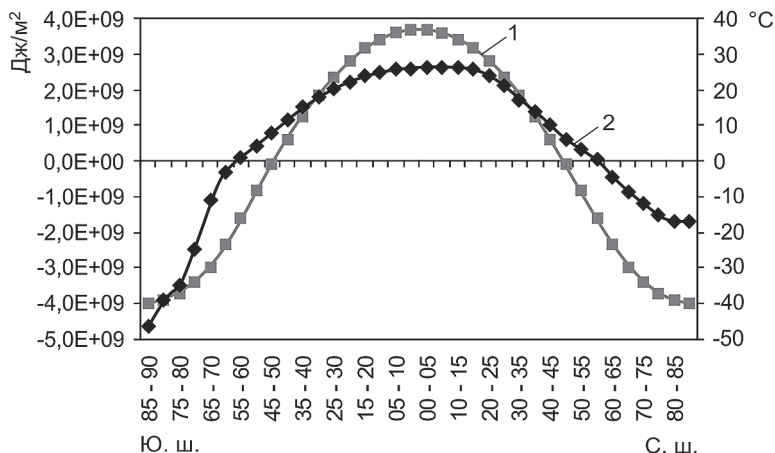


Рис. 1. Распределение инсоляции относительно среднего для пятиградусной широтной зоны значения (1) и значений ПТВ (2) по широтным зонам (среднегодовое за период с 1961 по 1990 г.) [31, 33]

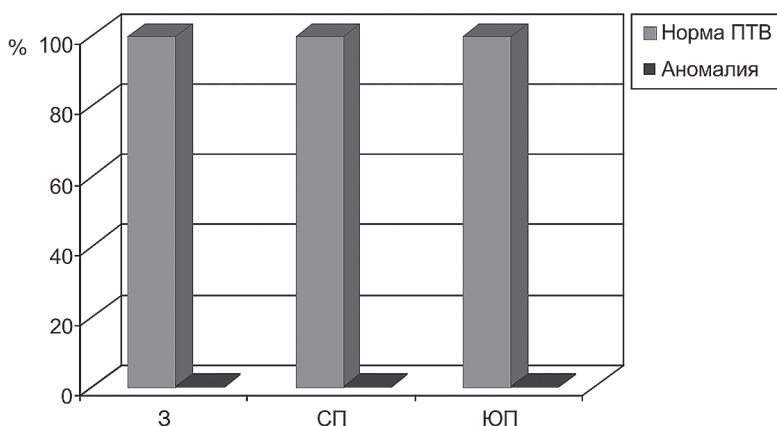


Рис. 2. Соотношение нормы и аномалии ПТВ в температурном режиме Земли и полушарий (З — Земля, СП — Северное полушарие, ЮП — Южное полушарие)

Парниковым эффектом планеты приходящее от Солнца тепло удерживается. Под парниковым эффектом Земли понимается разность между фактической температурой поверхности и эффективной температурой T_e Земли [7]. Эффективная температура T_e соответствует потоку L инфракрасного излучения от Земли, уходящему в космос, в расчете на единицу поверхности. T_e Земли оценивается (в градусах К) в соответствии с законом Стефана–Больцмана $L = \sigma T_e^4$, т.е. в предположении, что Земля является черным телом. Таким образом, парниковый эффект Земли $\Delta T = (T - T_e)$. Эффективная температура Земли равна 249 К (или 24 °С), температура земной поверхности — 288 К (+15 °С), следовательно, парниковый эффект равен 39 градусам. Таким образом, соотношение факторов инсоляции и парникового эффекта в термическом режиме Земли составляет 86,46 % (249°) и 13,54 % (39°) соответственно. Изменение парникового эффекта связывается, прежде всего, с изменением состава атмосферы (содержания водяного пара, CO₂ и других парниковых газов, аэрозолей и т.д.). В настоящее время широко исследуются изменения аномалии ПТВ в связи с изменением парникового эффекта Земли и солнечной активности [28, 30, 35, 37]. В то же время вопросы изменения аномалии ПТВ в связи с пространственными и временными вариациями инсоляции, связанными с небесно-механическими процессами, исследованы недостаточно [27]. Однако в связи с тем, что основным источником энергии гидрометеорологических процессов является приходящая от Солнца радиация, теоретическая оценка этого фактора формирования и изменения ПТВ, отражающего термический режим современного глобального климата, представляется важной.

2. Корреляционный анализ аномалии ПТВ и инсоляции

Корреляционный анализ пространственной и временной изменчивости аномалии ПТВ состоял из двух частей. В первой части проводился корреляционный анализ меридионального распределения средних для широтных зон (среднепогодных за период с 1900 по 2014 г.) значений аномалии ПТВ с меридиональным распределением трех показателей инсоляции:

- среднепогодной (за период с 1900 по 2014 г.) для широтных зон аномалией инсоляции — R_1 ; аномалия инсоляции рассчитывалась относительно базового для ПТВ периода 1961–1990 гг.;
- разности инсоляции 2014 и 1900 г. (для соответствующих широтных зон) — R_2 ;
- среднепогодной (за период с 1900 по 2014 г.) для соответствующих широтных зон инсоляцией — R_3 .

Анализ проводился для годовых и полугодовых значений аномалии ПТВ и инсоляции.

Во второй части проводился корреляционный анализ временных рядов (годовых и полугодовых значений) аномалии ПТВ и соответствующих значений аномалии инсоляции внутри отдельных широтных зон. Полученное во второй части распределение коэффициента корреляции по широтным зонам сравнивалось с распределением трех отмеченных выше для первой части параметров инсоляции.

В качестве исходных температурных данных в обоих случаях (см. ниже) использовался массив HadCRUT 4.4, полученный по ансамблю 100 модельных расчетов

месячных значений аномалии ПТВ [33]. Разрешение массива по пространству составляет 5° по широте и долготе. Осреднением по всем месяцам были рассчитаны годовые среднемноголетние значения аномалии за период с 1900 по 2014 г. Осреднением по месяцам с апреля по сентябрь рассчитывались значения для летнего полугодия, по месяцам с октября по март — для зимнего полугодия. Зимнее и летнее полугодия в работе указаны относительно Северного полушария. Отмеченное осреднение по месяцам связано с необходимостью минимизации полугодовых различий, связанных со сдвигом по фазе начала календарных полугодий относительно астрономических полугодий, для которых рассчитывалась инсоляция [31].

Корреляционный анализ распределения средних значений аномалии ПТВ и показателей инсоляции по широтным зонам. Исследовалась связь распределения среднемноголетних для пяти градусных широтных зон (за период с 1900 по 2014 г.) годовых и полугодовых значений аномалии ПТВ и среднемноголетних значений аномалии инсоляции (за тот же период для соответствующих широтных зон). Распределение среднегодовых значений аномалии ПТВ по широтным зонам представлено на рис. 3. Сходный с годовым характер распределения среднемноголетней аномалии ПТВ получен для летнего и зимнего полугодий.

R^2 — коэффициент детерминации, отражающий вклад тренда в общую дисперсию ряда. Из данных массива аномалии ПТВ следует, что за период с 1900 по 2014 г. приповерхностная температура в Северном полушарии повышалась более интенсивно, чем в Южном полушарии. Малые средние значения (около нуля) аномалии ПТВ отмечаются в экваториальной области и в Антарктиде. В распределении аномалии инсоляции по широтным зонам за тот же период отмечается увеличение в полярных районах и уменьшение в экваториальной области (рис. 4). Разность инсоляции в 2014 и в 1900 г. для соответствующих широтных зон имеет обратный характер распределения.

Таким образом, во-первых, в полушариях отмечается различный по интенсивности температурный отклик на входящий в климатическую систему Земли энергетический сигнал (симметричный для полушарий) — лучистую энергию. Во-вторых, связь распределения среднегодовой аномалии ПТВ с межширотным распределением среднегодовой аномалии инсоляции (R_1) и разности инсоляции в 2014 и 1900 г. (R_2) по широтным зонам характеризуется разными знаками (положительным и отрицательным значениями соответственно). Корреляция среднемноголетних за период с 1900 по 2014 г. годовых значений аномалии ПТВ и среднемноголетних значений годовой аномалии инсоляции по соответствующим 18-ти широтным зонам для Северного полушария характеризуется значением R_1 , равным 0,76. Корреляция среднемноголетних для широтных зон значений аномалии ПТВ и значений разности приходящей в 2014 и в 1900 г. в соответствующие широтные зоны лучистой энергии R_2 составляет $-0,76$. В Южном полушарии эти значения, соответственно, равны $-0,11$ и $0,12$, т.е. имеют обратные по отношению к значениям, полученным для Северного полушария, знаки. Малые значения коэффициента корреляции указывают на слабые связи между меридиональным распределением среднегодовой аномалии ПТВ и среднегодовой аномалии инсоляции в Южном полушарии.

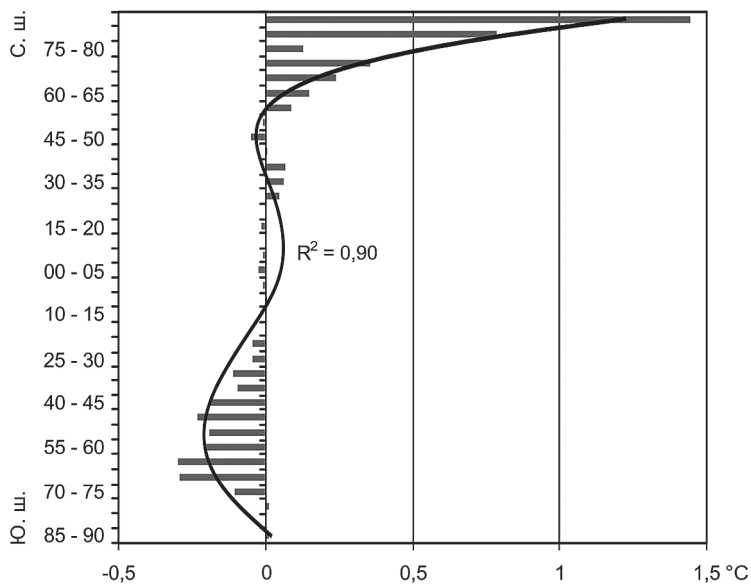


Рис. 3. Среднегодовые для широтных зон значения аномалии ПТВ (за период с 1900 по 2014 г.) [33]. Аппроксимация — полином 5-й степени

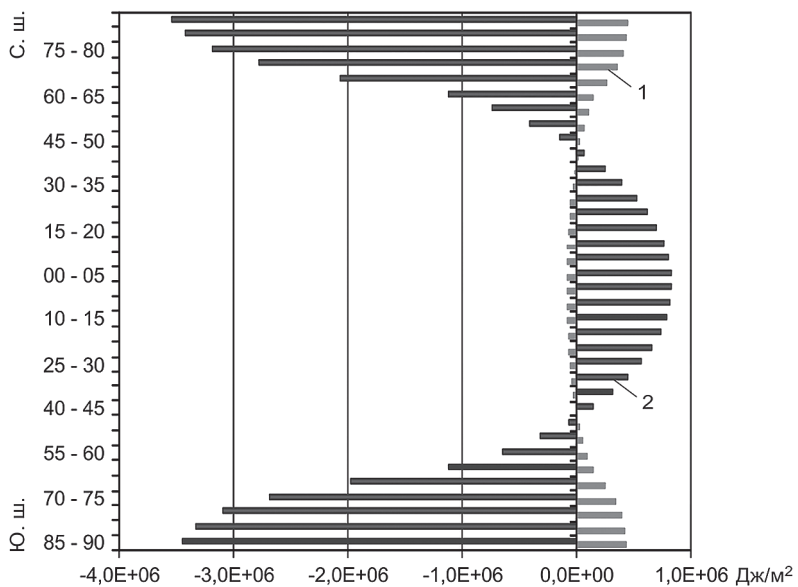


Рис. 4. Распределение среднегодовых значений аномалии инсоляции за период с 1900 по 2014 г. (1) и разности значений инсоляции для широтных зон в 2014 и в 1900 г. (2)

Увеличением рядов при исследовании корреляции за счет последовательного добавления среднегодовых значений аномалии ПТВ и инсоляции для пятиградусных широтных зон от экватора в Южное (океаническое) полушарие было получено распределение значений R_1 и R_2 для широтных диапазонов различной протяженности (19-ти, 20-ти и т. д. до 36-ти пятиградусных зон). Отсчет значений R для диапазонов (их 18 в каждом полушарии) проводился от северной полярной зоны 85–90° (табл. 1).

Таблица 1

Распределение коэффициента корреляции между среднегодовыми значениями аномалии ПТВ и соответствующими среднегодовыми значениями аномалии инсоляции — R_1
(годовыми и полугодовыми) для широтных зон (за период с 1900 по 2014 г.)

Меридиональные диапазоны, град.	Год	Летнее полугодие	Зимнее полугодие
85–90° с.ш. — 0–5° с.ш.	0,76	0,67	0,73
85–90° с.ш. — 0–5° ю.ш.	0,76	0,67	0,66
85–90° с.ш. — 5–10° ю.ш.	0,76	0,66	0,59
85–90° с.ш. — 10–15° ю.ш.	0,77	0,65	0,50
85–90° с.ш. — 15–20° ю.ш.	0,77	0,65	0,42
85–90° с.ш. — 20–25° ю.ш.	0,77	0,65	0,32
85–90° с.ш. — 25–30° ю.ш.	0,77	0,66	0,24
85–90° с.ш. — 30–35° ю.ш.	0,78	0,66	0,15
85–90° с.ш. — 35–40° ю.ш.	0,78	0,67	0,08
85–90° с.ш. — 45–50° ю.ш.	0,78	0,68	-0,01
85–90° с.ш. — 50–55° ю.ш.	0,77	0,70	-0,09
85–90° с.ш. — 55–60° ю.ш.	0,76	0,70	-0,15
85–90° с.ш. — 60–65° ю.ш.	0,74	0,71	-0,20
85–90° с.ш. — 65–70° ю.ш.	0,69	0,72	-0,27
85–90° с.ш. — 70–75° ю.ш.	0,62	0,72	-0,32
85–90° с.ш. — 75–80° ю.ш.	0,57	0,71	-0,32
85–90° с.ш. — 80–85° ю.ш.	0,53	0,70	-0,29
85–90° с.ш. — 85–90° ю.ш.	0,50	0,70	-0,28

Примечание: летнее и зимнее полугодие в Северном полушарии.

Для среднегодовых годовых значений характерно увеличение (по модулю) значений R_1 и R_2 в пределах диапазона от 85...90° с.ш. до 45...50° ю.ш. Максимальные значения ($R_1 = 0,78$ и $R_2 = -0,78$) характерны для широтного диапазона от 85...90° с.ш. до 45...50° ю.ш. С широтной зоны 50–55° ю.ш. отмечается уменьшение (по модулю) значений R . Значения R_1 и R_2 для всей Земли составляют 0,5 и -0,5 соответственно (табл. 1, 2). Отмеченные широтные диапазоны соответствуют особенностям пространственной структуры подстилающей поверхности (и климатической системы Земли). Северное полушарие — преимущественно континентальное, Южное — преимущественно

океаническое. Самый юг Южного полушария занимает ледовый континент Антарктида. С этими особенностями подстилающей поверхности может быть связан различный по интенсивности характер отклика аномалии ПТВ на инсоляцию Земли. Распределение R_2 имеет сходный с распределением R_1 (см. табл. 1) характер, отличия определяются только знаком.

Распределение среднееголетних значений аномалии ПТВ для летнего и зимнего полугодий по широтным зонам сходно с распределением, полученным для среднееголетних значений аномалии ПТВ (см. рис. 3). Коэффициент детерминации (полином 5-й степени) для летнего полугодия составляет 0,83, для зимнего полугодия — 0,88. Распределение средних для полугодий значений аномалии инсоляции и разности инсоляции для соответствующих широтных зон в 2014 и 1900 г. приведены на рис. 5 и 6.

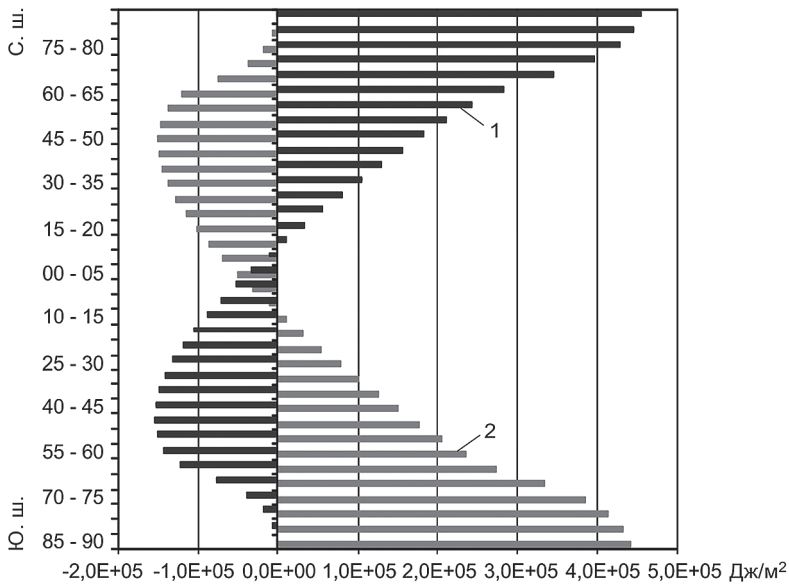


Рис. 5. Распределение среднееголетних для полугодий значений аномалии инсоляции: 1 — летнее полугодие; 2 — зимнее полугодие

Значения R_1 и R_2 для Южного полушария в летнее полугодие составляют 0,58 и $-0,56$, для Северного полушария — 0,67 и $-0,67$, для Земли — 0,7 и $-0,71$ соответственно (знаки соответствующих коэффициентов корреляции, полученные для Земли, Северного и Южного полушарий, одинаковые). Продолжая для летнего полугодия, как и в случае среднегодовых значений аномалии, увеличение ряда от Северного (континентального) полушария в Южное (океаническое), получаем распределение R_1 (см. табл. 1) для широтных диапазонов различной протяженности (отсчет ведется от северной полярной зоны 85...90°). Распределение R_2 имеет сходный характер, отличия определяются только знаком.

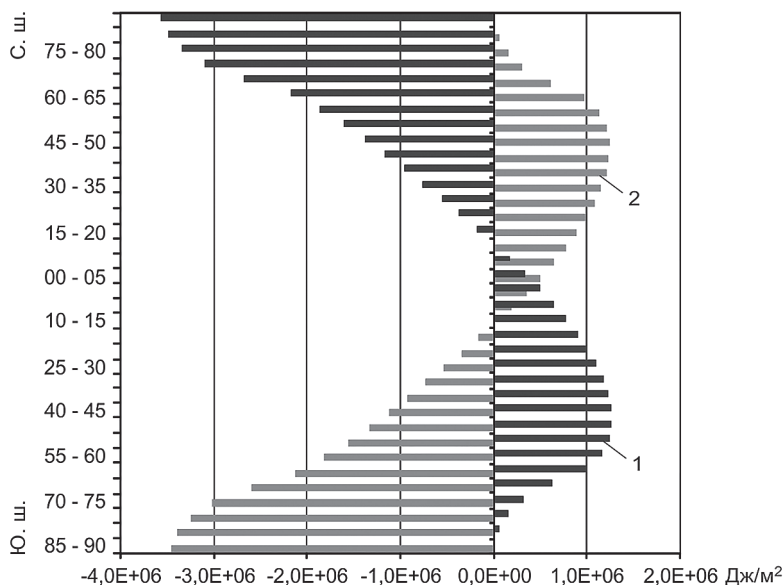


Рис. 6. Распределение разности инсоляции в 2014 и в 1900 г. (в соответствующих широтных зонах): 1 — летнее полугодие; 2 — зимнее полугодие

При этом отмечается разный уровень связи в диапазонах 85...90° с.ш. — 15...20° ю.ш. (преимущественно континентальная область), 20...25° ю.ш. — 65...70° ю.ш. (преимущественно океаническая область) и 70...75° ю.ш. — 85...90° ю.ш. (ледовый континент Антарктида). В первом и третьем меридиональных диапазонах отмечается сокращение значений (по модулю) R_1 и R_2 в южном направлении, во втором увеличение.

В зимнее полугодие значения R_1 и R_2 для Южного полушария составляют $-0,29$ и $0,29$, для Северного полушария — $0,73$ и $-0,75$ (однако в Южном полушарии они сокращаются и затем меняют знак на обратный), для Земли — $-0,28$ и $0,27$ соответственно (см. табл. 1). В Южном полушарии в летнее (для этого полушария) полугодие наиболее отчетливо проявляется океанический и ледовый (антарктический) характер подстилающей поверхности. В меридиональном распределении он изменяет положительный знак корреляционной связи среднегодулетней аномалии ПТВ и среднегодулетней аномалии инсоляции на отрицательный (табл. 1)

Тесные положительные связи среднегодулетней аномалии ПТВ и среднегодулетней инсоляции (R_1) отмечаются в Северном полушарии для годовых и полугодовых (зимних и летних) значений. Для Земли тесная положительная связь среднегодулетней аномалии ПТВ и аномалии инсоляции (R_1) отмечается для летнего (в Северном полушарии) полугодия. В Южном полушарии слабые положительные связи среднегодулетней аномалии ПТВ с показателями инсоляции отмечаются только в летнее (для Северного полушария) полугодие (табл. 2). Полученные положительные связи указывают на то, что межширотная изменчивость годовых и полугодовых значений средней аномалии ПТВ Северного полушария в интервале

Таблица 2

**Значения коэффициента корреляции в распределении по широтным зонам
среднегодулетних значений аномалии ПТВ и показателей инсоляции
(шрифтом выделены значения с вероятностью 0,99)**

	Земля			Северное полушарие			Южное полушарие		
	R_1	R_2	R_3	R_1	R_2	R_3	R_1	R_2	R_3
Год	0,5	-0,5	-0,34	0,76	-0,76	-0,63	-0,11	0,12	0,42
Летнее полугодие	0,7	-0,71	0,23	0,66	-0,67	-0,64	0,58	-0,56	0,13
Зимнее полугодие	-0,28	0,27	-0,68	0,73	-0,75	-0,62	-0,29	0,29	0,21

Примечания: R_1 — коэффициент корреляции распределения по широтным зонам среднегодулетней для широтных зон аномалии ПТВ и аномалии инсоляции (за период с 1900 по 2014 г.); R_2 — коэффициент корреляции распределения по широтным зонам среднегодулетней аномалии ПТВ (за период с 1900 по 2014 г.) и разности инсоляции в 2014 и в 1900 г.; R_3 — коэффициент корреляции распределения по широтным зонам среднегодулетней аномалии ПТВ (за период с 1900 по 2014 г.) и инсоляции (среднегодулетней за период с 1900 по 2014 г.).

с 1900 по 2014 г. определяется межширотной изменчивостью аномалии инсоляции. Изменчивость среднегодулетней аномалии ПТВ Земли определяется межширотной (меридиональной) изменчивостью инсоляции в летнее (для Северного полушария) полугодие. Изменчивость среднегодулетней аномалии инсоляции относительно слабо участвует в меридиональном распределении среднегодулетней аномалии ПТВ в Южном полушарии только в зимнее в этом полушарии полугодие. В летнее в этом полушарии полугодие ведущим фактором, определяющим изменчивость аномалии ПТВ, является характер подстилающей поверхности.

Корреляционный анализ многолетней изменчивости инсоляции и аномалии ПТВ. Исходными данными для анализа также были значения аномалии ПТВ, представленные в массиве HadCRUT 4.4 [33] и рассчитанные нами значения инсоляции [31]. По временным рядам (за период с 1900 по 2014 г.) для отдельных широтных зон рассчитывались значения коэффициента корреляции между аномалией ПТВ и аномалией инсоляции (для годовых и полугодичных значений). Полученное распределение коэффициента корреляции по широтным зонам сравнивалось с распределением среднегодулетней (за период с 1900 по 2014 г.) аномалией инсоляции, разности инсоляции в 2014 и в 1900 г., а также с распределением по широтным зонам среднегодулетней инсоляции (за период с 1900 по 2014 г.).

Распределение коэффициента корреляции по широтным зонам между годовыми значениями аномалии ПТВ и аномалии инсоляции показано на рис. 7.

Полученный характер распределения связи (значений R по широтным зонам) аномалии ПТВ и аномалии инсоляции определяется среднегодовым распределением инсоляции (см. рис. 1). Коэффициент корреляции распределения среднегодовой инсоляции (за период с 1900 по 2014 г.) с полученным распределением R (см. рис. 7) составляет 0,84. Меридиональное распределение R аномалии ПТВ и аномалии инсоляции также связано с распределением разности инсоляции в 2014 и в 1900 г. для соответствующих широтных зон ($R = 0,68$) (см. рис. 4). Таким образом, характер распределения связи временных рядов аномалии ПТВ и временных рядов аномалии инсоляции (R) по

широтным зонам определяется распределением годовой инсоляции Земли, а также, в меньшей степени, меридиональным распределением разности инсоляции в 2014 и в 1900 г. (и приблизительно описывается графиком и уравнением аппроксимации).

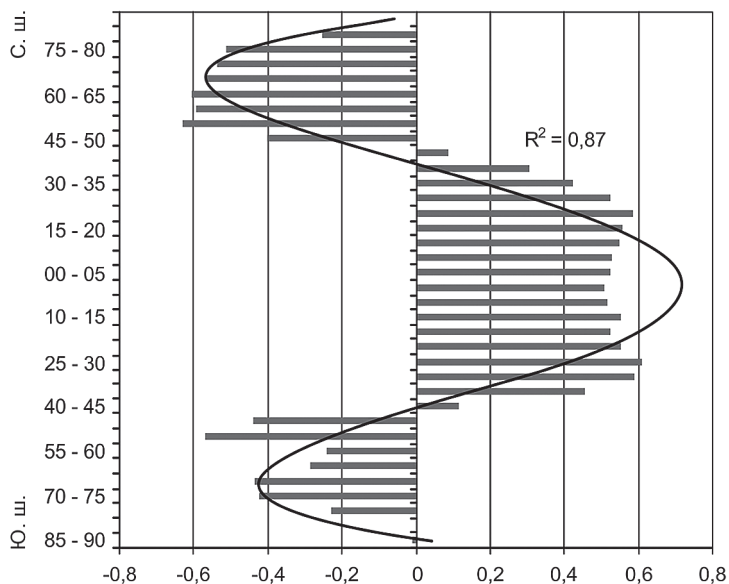


Рис. 7. Распределение коэффициента корреляции между годовыми значениями аномалии ПТВ и аномалии инсоляции за период с 1900 по 2014 г. по широтным зонам (аппроксимация — полином 4-й степени)

Распределение значений R между аномалией ПТВ и аномалией инсоляции, рассчитанных по временным рядам (с 1900 по 2014 г.) для каждой широтной зоны в летнее (в Северном полушарии) полугодие, представлено на рис. 8.

Распределение R аномалии ПТВ и аномалии инсоляции по широтным зонам характеризуется значением коэффициента корреляции с межширотным распределением инсоляции за летнее полугодие, равным $-0,47$. Связь распределения коэффициента корреляции с распределением разности инсоляции в 2014 и в 1900 г., полученной для каждой соответствующей широтной зоны, составляет $0,77$. Следовательно, меридиональное распределение связи аномалии ПТВ с аномалией инсоляции в летнее полугодие определяется распределением разности инсоляции, полученной для соответствующих широтных зон за период между 2014 и 1900 г. (см. рис. 6). Распределение значений коэффициента корреляции, полученных для зимнего полугодия, представлено на рис. 9.

Распределение связи аномалии ПТВ с аномалией инсоляции характеризуется коэффициентом корреляции с распределением средних за зимнее полугодие значений инсоляции, равным $-0,54$. Коэффициент корреляции с распределением разности инсоляции для соответствующих широтных зон в 2014 и 1900 г. составляет $0,71$.

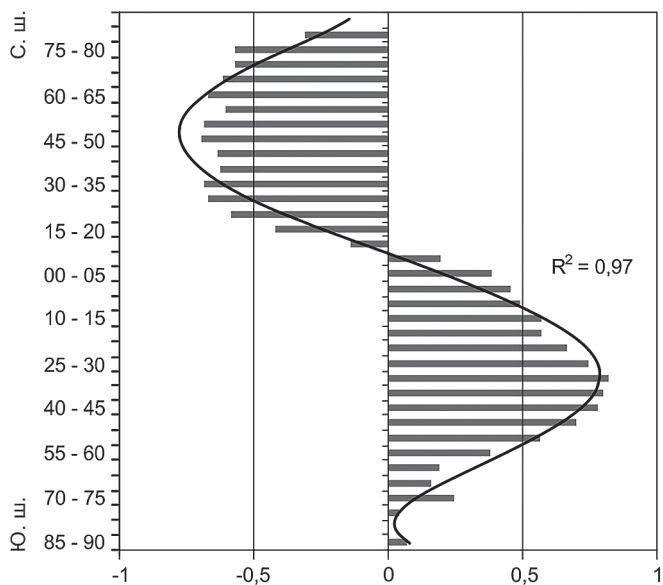


Рис. 8. Распределение коэффициента корреляции между значениями аномалии ПТВ и аномалии инсоляции в летнее (для Северного полушария) полугодие за период с 1900 по 2014 г. по широтным зонам (аппроксимация — полином 5-й степени)

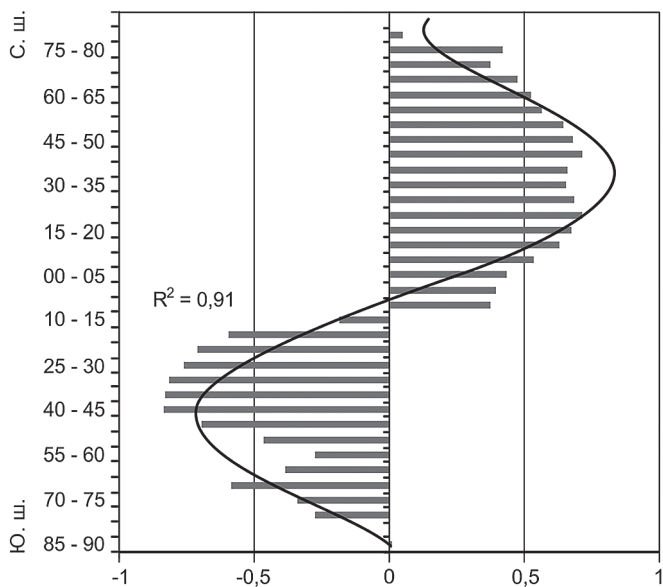


Рис. 9. Распределение коэффициента корреляции между значениями аномалии ПТВ и аномалии инсоляции в зимнее (для Северного полушария) полугодие за период с 1900 по 2014 г. по широтным зонам (аппроксимация — полином 5-й степени)

Таким образом, меридиональное распределение показателя связи (R) годовых значений аномалии ПТВ и инсоляции Земли определяется (положительные связи) как распределением по широтным зонам среднегодовой инсоляции (0,84), так и распределением разности инсоляции в 2014 и 1900 г. в соответствующих широтных зонах (0,68) (см. рис. 4). Распределение показателя связи (R) полугодовых значений аномалии ПТВ и инсоляции Земли определяется в основном распределением разности инсоляции в 2014 и 1900 г. в соответствующих широтных зонах и полугодиях (0,77 — летнее, 0,71 — зимнее) (см. рис. 6). Следует отметить, что распределение разности инсоляции в 2014 и 1900 г. отражает тенденцию изменения распределения межширотного градиента инсоляции за этот период. Тесные, но отрицательные значения R распределения связи аномалии ПТВ с аномалией инсоляции по широтным зонам отмечаются с меридиональным распределением среднегодовой аномалией инсоляции. Для годовой аномалии эта связь характеризуется значением коэффициента корреляции, равным $-0,67$, для летнего полугодия $-0,77$, для зимнего полугодия $-0,72$ (см. рис. 4, 5). Все значения коэффициента корреляции значимы с вероятностью 0,99.

Полученная (в первой части) картина связей аномалии ПТВ с инсоляцией и различный по интенсивности температурный отклик климатической системы Земли (см. рис. 3) на в общем сходную за год инсоляцию полушарий (см. рис. 1, 5), вероятно, связана с различной пространственной структурой подстилающей поверхности. Широтные диапазоны с различным характером подстилающей поверхности соответствуют преимущественно континентальной области (Северное полушарие и приэкваториальная часть Южного полушария), преимущественно океанической области (Южное полушарие) и ледовой поверхности материка Антарктида. Влияние пространственной структуры земной поверхности на характер связи аномалии ПТВ с инсоляцией проявляется в меридиональной изменчивости величины и знака коэффициента корреляции между этими показателями (см. табл. 1).

В общем виде механизм образования отмеченных связей аномалии ПТВ и инсоляции Земли можно представить следующим образом. Полученные ранее результаты показывают, что инсоляция Земли увеличивается в экваториальной области и уменьшается в полярных районах [13, 14]. Это отмечается и для исследуемого в настоящей работе периода 1900–2014 гг. (см. рис. 4). Следствием этого является увеличение межширотного градиента инсоляции и соответствующего межширотного градиента ПТВ. С увеличением межширотного градиента ПТВ связано усиление переноса тепла из экваториальной области к полярным районам [3, 8, 17]. Также с увеличением межширотного градиента связано усиление турбулентности в атмосфере. Переносимое (прежде всего вихревыми образованиями — тропическими и фронтальными циклонами) воздушными массами от экватора к полюсам тепло приходит на различную по характеру в полушариях подстилающую поверхность.

В Северном полушарии адвекция теплых воздушных масс приводит к повышению ПТВ (явное тепло). Увеличение ПТВ в области стока тепла в Северном полушарии приводит к изменению состава атмосферы прежде всего из-за увеличения содержания водяного пара, особенно в Арктических районах [1]. Это способствует усилению парникового эффекта и дополнительному повышению ПТВ. Увеличение тепла в северной области его стока происходит и вследствие конденсации при адвекции теплых

воздушных масс и их взаимодействия с холодной подстилающей (преимущественно континентальной) поверхностью (скрытое тепло). При этом площадь области источника тепла приблизительно в 2,7 раза больше площади области стока тепла. Кроме того, межширотный перенос осуществляется как в атмосфере, так и в океане.

Таким образом, увеличение ПТВ в Северном полушарии связано с положительной компенсацией сокращения тепла, определяемого сокращением инсоляции (отмечаемого для полярных районов), переносом тепла, связанного с усилением межширотного теплообмена (и положительными обратными связями, например снижением альбедо из-за сокращения площади морских льдов в летний период). Этим определяется положительный знак средней аномалии ПТВ в полушарии для периода с 1900 по 2014 г. Этот механизм подтверждается тем, что меридиональное изменение связи аномалии ПТВ и инсоляции характеризуется положительной корреляцией с изменением разности инсоляции по широтным зонам (0,68 — годовые, 0,77 — летнее полугодие, 0,71 — зимнее полугодие). Разность инсоляции отражает тенденцию изменения в распределении межширотного градиента инсоляции за период с 1900 по 2014 г.

В Южном полушарии приходящие теплые воздушные массы отдают тепло океану, обладающему низкой температурой и большой теплоемкостью, и охлаждаются. Кроме того сильное охлаждающее воздействие в этом полушарии связано с ледовым континентом — Антарктидой (этим определяется более высокое значение межширотного градиента температуры, чем в северном полушарии). Также из-за неоднородной подстилающей поверхности в Северном полушарии вихревой межширотный перенос тепла (циклонами), вероятно, происходит более интенсивно, чем в Южном полушарии. В Южном полушарии из-за однородного характера поверхности и существенно большего значения межширотного градиента температуры более интенсивно, чем в Северном полушарии, проявляется циркуляционный (преимущественно западный и восточный, определяемый действием силы Кориолиса — «ревущие сороковые») перенос тепла [8]. Вследствие этого в Южном полушарии межширотный теплообмен отчасти «блокируется». Положительная компенсация потери атмосферой тепла, связанной с сокращением инсоляции, наступает в Южном полушарии позднее, чем в Северном полушарии (растягивается во времени из-за большой инертности и слабой интенсивности отклика климатической системы в этом полушарии). Этим объясняется отрицательный знак средней аномалии ПТВ в полушарии за период с 1900 по 2014 г. (см. рис. 3).

Знаки средней аномалии также связаны и с выбором временного интервала климатической нормы (1961–1990 гг.). При смещении интервала в прошлое величины средней аномалии в обоих полушариях будут стремиться к положительным значениям. При смещении в будущее — к отрицательным, в связи с тенденцией увеличения аномалии проявляющейся на всем, обеспеченном метеоданными, интервале. Процессы, как потепления, так и похолодания в Южном полушарии, следовательно, проявляются с меньшей интенсивностью, чем в Северном полушарии. Отсюда следует запаздывание во времени климатических событий (откликов) в Южном полушарии относительно Северного полушария. Таким образом, различия в интенсивности температурных откликов в полушариях на сходный (симметричный) для полушарий входящий энергетический сигнал определяются:

- 1) балансом приходящего в области стока тепла в результате усиления межширотного теплообмена и сокращения тепла из-за сокращения приходящей в эти области лучистой энергии;
- 2) характеромстилающей поверхности, определяющим различия в балансе тепла в областях его стока в полушариях.

То, «...что климат определяется солнечной радиацией, приходящей на внешнюю границу атмосферы, составом атмосферы и строением земной поверхности» [2, с. 37], широко и давно известно. Как показывают полученные результаты, изменения аномалии ПТВ также определяются сочетанием всех этих факторов.

Заключение

Основным фактором, определяющим величину и распределение среднесуточной (за период с 1900 по 2014 г.) аномалии ПТВ (годовой и полугодий) по широтным зонам для Северного полушария, является инсоляционный фактор (меридиональное распределение инсоляции). Им же определяется величина и распределение среднесуточной аномалии ПТВ Земли по широтным зонам и, слабее, среднесуточной аномалии ПТВ Южного полушария в летнее (для Северного полушария) полугодие. В зимнее (для Северного полушария) полугодие для Земли и Южного полушария основной причиной изменения величины и распределения среднесуточной аномалии ПТВ по широтным зонам является характерстилающей поверхности (влияние океана и Антарктиды).

Изменчивость значений аномалии ПТВ внутри широтных зон во времени также характеризуются тесными корреляционными связями с изменением значений аномалии инсоляции. Распределение коэффициента корреляции годовых значений аномалии ПТВ и инсоляции Земли по широтным зонам определяется (положительные связи) как распределением среднегодовой инсоляции (0,84), так и распределением разности инсоляции в 2014 и 1900 г. в соответствующих широтных зонах (0,68). Распределение связи полугодических значений аномалии ПТВ и инсоляции Земли (R) по широтным зонам определяется в основном распределением разности инсоляции в 2014 и 1900 г. (0,77 — в летнее, 0,71 — в зимнее полугодие). Распределение разности инсоляции в 2014 и 1900 г. отражает тенденцию изменения распределения межширотного градиента инсоляции за этот период.

Литература

1. *Алексеев Г.В.* Появление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фунд-ая и прикл. климатология*. 2015. № 1. — С. 11–26.
2. *Будыко М.И.* Изменение климата. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 280 с.
3. *Лоренц Э.Н.* Природа и теория общей циркуляции атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1970. — 260 с.
4. *Малинин В.Н.* Изменения уровня Мирового океана и климата // *Учен. зап. РГГМУ*. 2015. № 41. — С. 100–115.
5. *Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. — М.-Л.: ГОНТИ, 1939.— 208 с.

6. Монин А.С. Введение в климатологию. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 246 с.
7. Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // Успехи физ. наук. 2000. Т. 170. № 4. — С. 419–445.
8. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 616 с.
9. Смутьский И.И., Кротов О.И. Новый алгоритм расчета инсоляции Земли // Институт криосферы Земли СО РАН. — Тюмень, 2013. — 38 с. Депонирована в ВИНТИ 08.04.2013 № 103-B2013.
10. Федоров В.М. Динамика баланса массы ледников в связи с макроциркуляционными процессами в атмосфере. — М.: Физматлит, 2011. — 376 с.
11. Федоров В.М. Межгодовые вариации продолжительности тропического года // Докл. РАН. 2013. Т. 451. № 1. — С. 95–97.
12. Федоров В.М. Периодические возмущения и малые вариации солярного климата Земли // Докл. РАН. 2014. Т. 457. № 2. — С. 222–225. — DOI:10.7868/S0869565214200213.
13. Федоров В.М. Пространственные и временные вариации солярного климата Земли в современную эпоху // Геофиз. процессы и биосфера. 2015а. Т. 14. № 1. — С. 5–22.
14. Федоров В.М. Широтная изменчивость приходящей солнечной радиации в различных временных циклах // Докл. РАН. 2015б. Т. 46. №3. — С. 339–342. — DOI:10.7868/S0869565215030196.
15. Федоров В.М. Тенденции изменения площади морских льдов в Северном полушарии и их причины // Криосфера Земли. 2015 в. Т. XIX. № 3. — С. 52–64.
16. Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. Вековые изменения орбиты Земли и астрономическая теория колебаний климата // Тр. Ин-та теорет. астрономии АН СССР. 1969. Вып. 14. — С. 48–84.
17. Шулейкин В.В. Физика моря. — М.: АН СССР, 1953. — 989 с.
18. Berger A.L. Long-term variations of daily insolation and quaternary Climatic Changes // Journal of the atmospheric sciences. 1978a. Vol. 35. No. 9. — P. 2362–2367.
19. Berger A.L. Long-term variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements // Quaternary research. 1978b. Vol. 9. — P. 139–167.
20. Berger A.L., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years? // Quatern. Sci. Rev. 1991. Vol. 10. — P. 297–317.
21. Berger A., Loutre M.F., Yin Q. Total irradiation during any time interval of the year using elliptic integrals // Quaternary science reviews. 2010. Vol. 29. — P. 1968–1982. — DOI:10.1016/j.quascirev.2010.05.07.
22. Bertrand C., Van Ypersele J.P. Potential role solar variability as an agent for climate change // Climatic Change. 1999. Vol. 43. — P. 387–411.
23. Bertrand C., Van Ypersele J.B., Berger A. Are natural climate forcings able to counteract the projected antropogenic global // Climatic Change. 2002a. Vol. 55. — P. 413–427.
24. Bertrand C., Loutre M.F., Berger A. High frequency variations of the Earth's orbital parameters and climate change // Geophysical research letters. 2002b. Vol. 29, No. 18. — P. 1893. — DOI:10.1029/2002GL015622.
25. Borisenkov E.P., Tsvetkov A.V., Agaponov S.V. On some characteristics of insolation changes in the past and the future // Climatic Change. 1983. № 5. — P. 237–244.
26. Borisenkov E.P., Tsvetkov A.V., Eddy J.A. Combined effects of Earth orbit perturbations and solar activity on terrestrial insolation. Part I: Sample days and annual mean values // Journal of the atmospheric sciences. 1985. Vol. 42. No. 9. — P. 933–940.
27. Fedorov V.M. Spatial and temporal variations in solar climate of the Earth in the present epoch // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. Vol. 51, 8. — P. 779–791. — DOI:10.1134/S000143815080034.
28. Foukal P., Fröhlich C., Spruit H., Wigley T.M.L. Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate // Nature. 2006. Vol. 443. — P. 161–166. — DOI:10.1038/nature05072.
29. 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.
30. Электронный ресурс МГЭИК. — URL: <http://www.ipcc.ch/>
31. Электронный ресурс «Солнечная радиация и климат Земли». — URL: <http://www.solar-climate.com/>
32. NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Электронный ресурс национального аэрокосмического агентства США. — URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov/>

33. Электронный ресурс Университета Восточной Англии и Метеобюро Хедли. — URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/>
34. *Jones P.D., New M., Parker D.E., Martin S., Rigor I.G.* Surface air temperature and its variations over the last 150 years // *Reviews of Geophysics*. 1999. Vol. 37. — P. 173–199. — DOI:10.1029/1999RG900002.
35. *Kopp G., Lean J.* A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 37, L01706. — DOI:10.1029/2010GL045777.
36. *Louie 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.
37. *Mackey R.* The Sun's role in regulating the Earth's climate dynamics // *Energy & Environment*. 2009. Vol. 20. № 1&2. — P. 25–73.
38. *Vernear A.D.* Long-period global variations of incoming solar radiation (Meteorological monographs). — Published by American Meteorological Society. Boston. 1972. Vol. 12. No. 34. — P. 121.