

УДК 551.52

РАСЧЕТ КЛИМАТИЧЕСКОЙ НОРМЫ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ИНСОЛЯЦИИ

© 2017 г. В.М. Федоров, П.Б. Гребенников

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

На основе астрономических эфемерид для интервала от 3000 г. до н.э. до 3000 г. н.э. рассчитана приходящая на эллипсоид Земли (без учета атмосферы) солнечная радиация. На основе уравнений регрессии инсоляции Земли и приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) рассчитывались инсоляционные климатические нормы ПТВ (годовой и полугодовых) для 30-летних диапазонов за период от 2930 лет до н.э. по 2930 г. н.э. с интервалами в 100 и 900–1000 лет для Земли в целом и полушарий. Результаты анализа показали, что годовые инсоляционные нормы ПТВ Земли и полушарий на всех интервалах сокращаются. Полугодовые инсоляционные нормы ПТВ в зимние для полушарий полугодия увеличиваются, а в летние сокращаются (сезонные различия сглаживаются). Годовые и полугодовые нормы инсоляционной ПТВ Земли увеличиваются в экваториальной области и сокращаются в полярных районах (широтная контрастность возрастает). Межширотный градиент имеет в Южном полушарии более высокие значения, чем в Северном полушарии. В зимние для полушарий полугодия значения межширотного градиента практически не изменяются. В летние для полушарий полугодия они возрастают, наиболее сильно в Южном полушарии.

Ключевые слова: изменение климата, инсоляция, приповерхностная температура воздуха, небесно-механические процессы, межширотный градиент.

PACS 92.60.Vb, 92.70.Qr, 92.60.Ry

Введение

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. В регулировании по-

ступления солнечной радиации к Земле (без учета атмосферы) и распределении ее по земной поверхности (солярный климат Земли) выделяются два механизма, имеющие различную физическую природу [Bertrand, Van Ypersele, 1999]. Один механизм связан с изменением активности Солнца (в настоящей работе не учитывается). Другой механизм определяется небесно-механическими процессами, изменяющими элементы земной орбиты (расстояние Земля–Солнце, продолжительность тропического года и др.) и наклон оси вращения и определяющими изменения в инсоляции Земли. Этот механизм и рассматривается в данной работе.

В распределении и регулировании тепловой энергии в климатической системе Земли участвуют механизмы меридионального или межширотного теплообмена в системе океан–атмосфера, океан–материк и др. Важный фактор в регулировании термического режима Земли – состав атмосферы (прежде всего, содержание H_2O и CO_2), определяющий степень парникового эффекта.

Основная задача работы – определить влияние инсоляции и ее изменения, определяемого небесно-механическими процессами, на формирование и изменение климатической нормы ПТВ. Таким образом, из общей совокупности влияющих на термическое состояние климатической системы Земли факторов выделяется и исследуется инсоляционный фактор, определяется его роль в формировании и изменении нормы ПТВ, отражающей состояние и динамику термического режима климатической системы Земли.

Методика расчетов

Ранее совместно с А.А. Костиным нами была рассчитана приходящая на эллипсоид Земли (без учета атмосферы) лучистая энергия (сайт в Интернете: <http://www.solar-climate.com/sc/mtd.htm>; [Федоров, 2014, 2015]). Расчеты инсоляции выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид ([Giorgini et al., 1996]; <http://ssd.jpl.nasa.gov>) для всех широтных зон (протяженностью в 5° широты) земного эллипсоида в интервале с 3000 г. до н.э. по 3000 г. н.э. Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80 – Geodetic Reference System, 1980 г.) с длинами полуосей равными 6 378 137 м (большая) и 6 356 752 м (малая). В общем виде алгоритм расчетов можно представить выражением

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

где I – приходящая солнечная радиация за элементарный n -й фрагмент m -го тропического года (Дж); σ – площадной множитель (m^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); $\Lambda(H, t, \varphi, \alpha)$ – инсоляция в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида ($Вт/м^2$), t – время (с). Шаги при интегрировании составляли: по долготе – 1° , по широте – 1° , по времени – $1/360$ часть продолжительности тропического года. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным 1361 Вт/м^2 [Kopp, Lean, 2011]. По результатам расчетов сформирована общедоступная база данных приходящей солнечной энергии во все широтные зоны Земли (протяженностью 5°) за каждый астрономический месяц каждого года для периода от 3000 г. до н.э. до 3000 г. н.э. (сайт в Интернете: <http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm>).

Основные отличия нашего подхода (по времени, пространству и исходным данным) от известных из астрономической теории климата расчетов низкочастотных вариаций инсоляции заключаются в следующем.

1. М. Миланкович и его последователи рассчитывали инсоляцию Земли (без учета атмосферы) на длительные периоды времени (от нескольких сотен до миллионов лет) с учетом только ее вековых (низкочастотных) вариаций, связанных с изменением эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси вращения Земли (с периодами в несколько десятков тысяч лет). Разрешение по времени в расчетах составляло приблизительно от 5000 лет в расчетах М. Миланковича [1939], Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой [1969], А.С. Молина [1982] до 1000 лет в работах А. Вернекара [*Vernekar*, 1972], А. Берже ([*Berger*, 1978a, b; *Berger, Loutre*, 1991]; e-mail сообщение М.Ф. Лутр, 2016). М. Миланкович и его последователи рассчитывали суточную и годовую инсоляцию на некоторый начальный год (например, 1850 или 1950 г.). Затем совершался шаг (от 1000 до 5000 лет) в прошлое (или в будущее) и процедура расчетов (с учетом изменения эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси) повторялась. Периодические (высокочастотные) вариации инсоляции не учитывались (продолжительность тропического года принималась постоянной). В наших расчетах учитывались вековые и периодические вариации расстояния Земля – Солнце, продолжительности тропического года, наклона оси вращения и т.д. Разрешение по времени при интегрировании составляло 1/360 часть продолжительности тропического года (приблизительно сутки) с учетом вариаций этой продолжительности.

2. М. Миланковичем и его последователями расчеты выполнялись для отдельных географических широт (параллелей); принималось, что Земля имеет форму сферы. В наших расчетах инсоляция рассчитывалась для всей земной поверхности, аппроксимируемой эллипсоидом. Разрешение по пространству при интегрировании составляло по долготе – 1° , по широте – 1° .

3. Для выполнения расчетов М. Миланковичем (точнее, В. Мишковичем) на длительный период были рассчитаны астрономические эфемериды для эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси вращения Земли, которые в дальнейшем уточнялись его последователями [*Brouwer, Van Woerkom*, 1950; *Шараф, Будникова*, 1969; *Vernekar*, 1972; *Berge*, 1978a, b; *Bretagnon*, 1982]. Нами для расчетов инсоляции использовались приведенные в формуле (1) параметры, учитывающие вековые и периодические вариации элементов орбиты Земли и оси ее вращения. В качестве исходных данных для расчетов использовались высокоточные астрономические эфемериды, рассчитанные в лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института (период от 3000 лет до н.э. до 3000 лет н.э.) и размещенные на электронном ресурсе NASA (<http://ssd.jpl.nasa.gov>).

Расчеты, учитывающие периодические возмущения элементов земной орбиты и связанных с ними высокочастотных вариаций солнечной радиации, были начаты в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, Россия [*Borisenkov et al.*, 1983, 1985]. Однако дальнейшего развития эти исследования не получили. Исследования высокочастотных вариаций инсоляции также были начаты в Институте астрономии и геофизики им. Г. Леметра, Бельгия [*Loutre et al.*, 1992; *Bertrand et al.*, 2002a, b]. Наши расчеты являются продолжением направления изучения инсоляции Земли, учитывающего как ее вековые (низкочастотные), так и периодические (высокочастотные) вариации.

Отличия нашего подхода к анализу высокочастотных вариаций инсоляции от методов Е.П. Борисенкова, М.Ф. Лутр, С. Бертрана и их коллег связаны, во-первых, с выбором исходных астрономических данных, используемых в расчетах; во-вторых, с различным

решением расчетов инсоляции относительно поверхности Земли; в-третьих, с продолжительностью временного интервала, охваченного расчетами. В качестве исходных данных Е.П. Борисенковым с коллегами использовались эфемериды, рассчитанные в Институте теоретической астрономии АН СССР (e-mail сообщение А.В. Цветкова, 2015). Исходными данными для расчетов, выполненных бельгийскими исследователями [Loutre et al., 1992; Bertrand et al., 2002a, b], были эфемериды VSOP82 [Bretagnon, 1982]. В наших расчетах использовались высокоточные JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE-405/406 [Standish, 1982], разработанные в лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института (<http://ssd.jpl.nasa.gov>).

Поверхность Земли при расчетах инсоляции отождествлялась нашими предшественниками со сферой, а расчеты выполнялись только для отдельных широт этой сферы. Е.П. Борисенковым с коллегами [Borisenkov et al., 1983, 1985] получены значения только для 20°, 40°, 60° и 80° с.ш. В исследованиях бельгийских ученых [Loutre et al., 1992] расчеты выполнялись (на середину июля, точнее, для точки с геоцентрической долготой равной 120°) только для 65° с.ш., для точек равноденствия и солнцестояния – для экватора и широт 30°, 60° и 90° в каждом полушарии. В работе С. Бертрана с коллегами [Bertrang et al., 2002a] расчеты инсоляции охватывают предшествующее тысячелетие и также относятся к июлю; они рассчитаны для широтной зоны 65°–70° с.ш. При этом значения для широтной зоны рассчитывались осреднением значений, полученных для ограничивающих широтную зону параллелей 65° и 70°. В наших расчетах поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом и приходящая радиация рассчитывалась не на отдельные параллели (широты), а на всю поверхность Земли и поверхности отдельных широтных зон.

Разрешение по времени при расчетах высокочастотных вариаций инсоляции в работе Е.П. Борисенкова с коллегами приблизительно соответствуют суткам [Borisenkov et al., 1983]. Однако выполненные ими расчеты представлены только для зимнего и летнего полугодий (и только для Северного полушария) в интервале с 1800 по 2100 г. В работе [Loutre et al., 1992] расчеты проводились на интервале в 5000 лет (в прошлое) с годовым разрешением и только для июля (точнее, для отдельной точки с геоцентрической долготой 120°) точек равноденствия и солнцестояния. В работе С. Бертрана с коллегами [Bertrang et al., 2002a] расчеты инсоляции охватывают предшествующее тысячелетие, но они относятся только к одному месяцу – июлю (выполнены с годовым разрешением). Кроме этого, значение солнечной постоянной в наших расчетах принималось равным 1361 Вт/м^2 [Koop, Lean, 2011]; в работах наших предшественников: 1368 Вт/м^2 – в работе [Bertrand, Van Ypersele, 1999], 1367 Вт/м^2 – в работах Е.П. Борисенкова с коллегами (e-mail сообщение А.В. Цветкова, 2015) и [Loutre et al., 1992], 1366 Вт/м^2 – в работе [Berger et al., 2010].

Таким образом, в общем наши расчеты основаны на высокоточных эфемеридах, в них используется новое значение солнечной постоянной (1361 Вт/м^2), более детально охватывается временной интервал протяженностью в 6000 лет и вся поверхность Земли (рассчитанные данные приводятся в доступном архиве с разрешением в 5° широты для всей земной поверхности и в 1 астрономический месяц для каждого из 6000 лет по времени), земная поверхность в наших расчетах не отождествляется со сферой, а аппроксимируется эллипсоидом.

В качестве исходных климатических данных при расчетах климатической нормы принимались средние для широтных зон значения ПТВ за период 1961–1990 гг., приведенные в трехмерном массиве «Абсолютных температур за базовый период 1961–1990 гг.» Университета Восточной Англии и метеобюро Хедли (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/absolute.nc>; [Jones et al., 1999, 2012]).

Рассчитанные для 5-градусных широтных зон земного эллипсоида (без учета атмосферы) значения инсоляции (<http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm>) (средние за период с 1961 по 1990 г.) сопоставлялись с климатической нормой ПТВ за период 1961–1990 гг. (рис. 1, 2, табл. 1), отражающей и свойственные ей характеристики парникового эффекта, солнечной активности и механизмов теплообмена, участвующих в формировании среднемесячной и среднегодовой температуры, и ее распределение по широтам и сезонам. При расчетах климатических норм учитывались только изменения инсоляции. Изменения парникового эффекта, солнечной активности и механизмов теплообмена не учитывались.

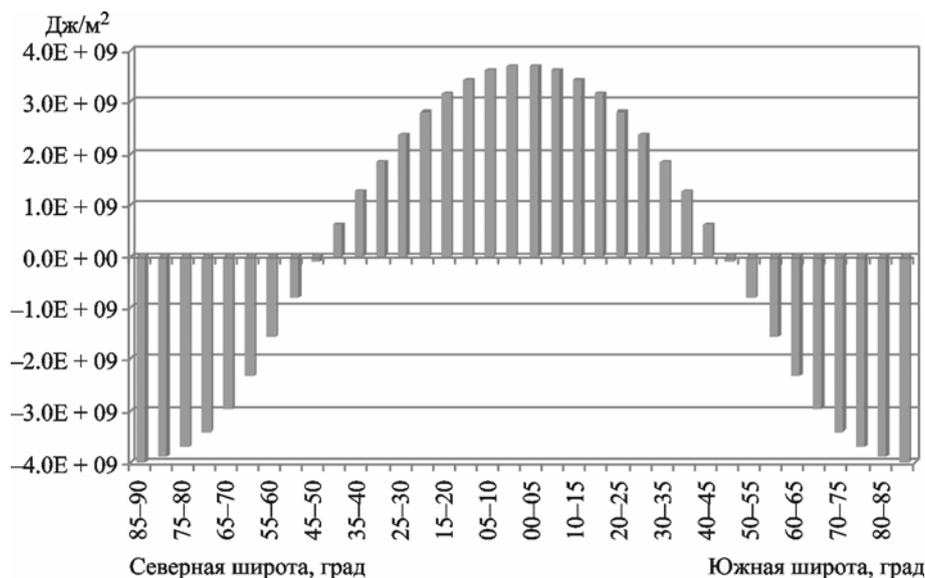


Рис. 1. Распределение инсоляции ($\text{Дж}/\text{м}^2$) по широтным зонам относительно среднего для 5-градусной широтной зоны значения (среднее за период 1961–1990 гг.) (по данным интернет-сайта: <http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm>)

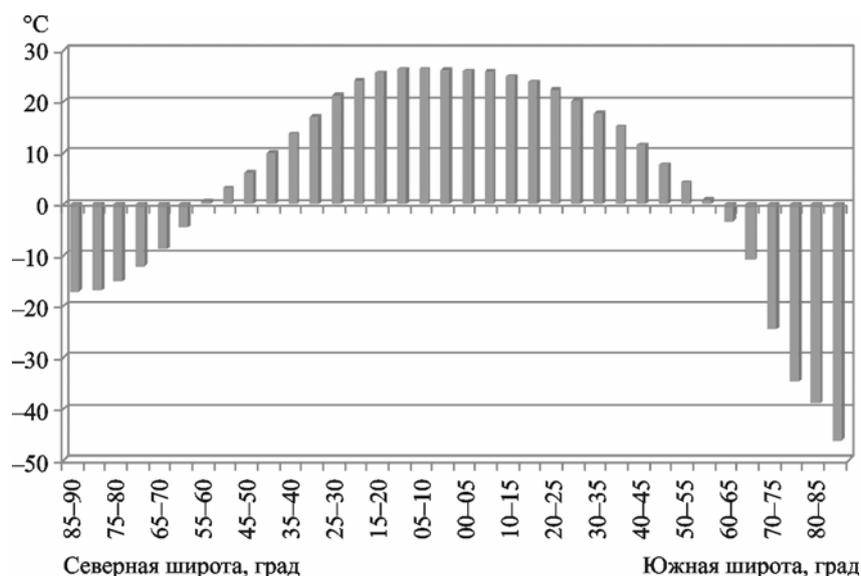


Рис. 2. Распределение ПТВ ($^{\circ}\text{C}$) по широтным зонам (среднее за период 1961–1990 гг.) (по данным интернет-сайта: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/absolute.nc>)

Таблица 1. Распределение годовых ПТВ* и инсоляции** по широтным зонам (среднее за период 1961–1990 гг.)

Географическая широта, град.	Северное полушарие		Южное полушарие	
	ПТВ, °С	Инсоляция, Дж/м ²	ПТВ, °С	Инсоляция, Дж/м ²
0–5	26.15	1.3157702E+10	25.97	1.3157702E+10
5–10	26.35	1.3066533E+10	25.77	1.3066536E+10
10–15	26.42	1.2885110E+10	24.91	1.2885115E+10
15–20	25.66	1.2615274E+10	23.77	1.2615280E+10
20–25	24.03	1.2259823E+10	22.25	1.2259831E+10
25–30	21.27	1.1822573E+10	20.25	1.1822582E+10
30–35	17.09	1.1308453E+10	17.79	1.1308462E+10
35–40	13.62	1.0723690E+10	15.02	1.0723701E+10
40–45	10.07	1.0076137E+10	11.55	1.0076147E+10
45–50	6.16	9.3758823E+09	7.85	9.3758925E+09
50–55	3.12	8.6365123E+09	4.31	8.6365216E+09
55–60	0.48	7.8779475E+09	0.92	7.8779553E+09
60–65	-4.60	7.1344409E+09	-3.35	7.1344409E+09
65–70	-8.83	6.4931658E+09	-10.76	6.4931667E+09
70–75	-12.09	6.0573083E+09	-24.68	6.0573052E+09
75–80	-15.14	5.7629607E+09	-34.66	5.7629552E+09
80–85	-16.73	5.5762980E+09	-38.96	5.5762911E+09
85–90	-17.07	5.4853121E+09	-46.18	5.4853044E+09

* По данным интернет-сайта: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/absolute.nc>

** По данным интернет-сайта: <http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm>

Широтное распределение ПТВ характеризуется тесной корреляционной связью с широтным распределением приходящей на земной эллипсоид солнечной радиации. Коэффициент корреляции (R) климатической нормы ПТВ (1961–1990 гг.) и приходящей солнечной радиации (за тот же период) по всему широтному диапазону характеризуется значением 0.942, для Северного полушария – 0.997, для Южного полушария – 0.942. Уравнения регрессии определялись на основе раздельной аппроксимации трех широтных диапазонов Земли (так достигалась оптимальная аппроксимация). Для аппроксимации годовых значений ПТВ в диапазоне от 85°–90° до 10°–15° с.ш. использовался полином 6-й степени, в диапазоне от 5°–10° с.ш. до 55°–60° ю.ш. и в диапазоне от 60°–65° до 85°–90° ю.ш. – полиномы 3-й степени. Показатели аппроксимации (R^2) составили для трех широтных диапазонов 0.9997, 0.9996 и 0.9939 соответственно. Также была проведена аппроксимация широтного распределения ПТВ летнего и зимнего полугодий. Широтные диапазоны отражают неоднородную по характеру связи приповерхностной температуры воздуха с инсоляцией структуру подстилающей поверхности Земли в полушариях (преимущественно континентальная, преимущественно океаническая, ледовый континент Антарктида).

По полученным полиномиальным уравнениям регрессии для 5-градусных широтных зон и данным инсоляции (сайт в Интернете: <http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm>) были рассчитаны (учитывающие только изменение инсоляции) нормы ПТВ с разрешением в 100 и 900–1000 лет для всей Земли и для отдельных полушарий по пространству и для года и полугодий – по времени. Рассчитанные, таким образом, с учетом изменения только инсоляционного фактора (изменений инсоляции,

определяемых небесно-механическими процессами) нормы названы нами инсоляционными нормами ПТВ. Таким образом, инсоляционная ПТВ – это приповерхностная температура воздуха при стационарной и неизменной по составу атмосфере. Эти нормы отражают роль только инсоляционного фактора, учитывают парниковый эффект, солнечную активность и механизмы теплообмена, характерные для нормы 1961–1990 гг., и не учитывают предшествующие и дальнейшие изменения солнечной активности, связанные с составом атмосферы. Что касается парникового эффекта и механизмов теплообмена, то в связи с тем, что основным источником энергии гидрометеорологических процессов является приходящая от Солнца радиация, теоретическая оценка этого фактора формирования и изменения ПТВ, отражающего базовое состояние термического режима, для современного глобального климата представляется важной.

Результаты расчетов. Годовые инсоляционные нормы ПТВ

Рассчитанная с использованием уравнений регрессии годовая норма ПТВ для периода с 1961 по 1990 г. составляет 13.97 °С для Земли, 14.54 °С – для Северного и 13.40 °С – для Южного полушарий. По данным архива абсолютных температур нормы ПТВ (фактические нормы) с 1961 по 1990 г. составляли для Земли – 13.97 °С, для Северного полушария – 14.59 °С, для Южного полушария – 13.36 °С (табл. 1, 2).

То есть для Земли в целом фактическая и инсоляционная нормы ПТВ совпадают. В Северном полушарии фактическая норма на 0.04 °С превосходит рассчитанную, а в Южном полушарии на такую же величину уступает ей.

Таблица 2. Фактические и рассчитанные инсоляционные нормы ПТВ для интервала 1961–1990 гг., °С

Объект	За год		Летнее полугодие		Зимнее полугодие	
	факт.	рас.	факт.	рас.	факт.	рас.
Земля в целом	13.97	13.97	15.16	15.16	12.78	12.78
Северное полушарие	14.59	14.54	18.54	18.57	10.63	10.65
Южное полушарие	13.36	13.40	11.79	11.76	14.93	14.91

Среднее для широтной зоны (по модулю) по всему широтному диапазону (от 90° с.ш. до 90° ю.ш.) значение расхождения рассчитанных и фактических значений ПТВ составляет 0.29 °С. Рассчитанные на продолжительные периоды времени инсоляционные нормы ПТВ изменяются в соответствии с полученным ранее изменением инсоляции [Федоров, 2015]. Для Земли инсоляционная норма ПТВ за 1000 лет (табл. 3) сокращается на 0.03 °С, для Северного полушария – на 0.01 °С, для Южного – на 0.05 °С. За более длительный период (5800 лет) эти значения составляют соответственно 0.17, 0.05 и 0.29 °С (рис. 3, табл. 4).

При этом в распределении инсоляционной нормы ПТВ по широтам отмечается некоторое увеличение ее в экваториальной области и заметное сокращение в полярных районах (рис. 4). На основе моделирования С. Бернардом с коллегами для широтной зоны

Таблица 3. Рассчитанные значения инсоляционных норм ПТВ для 1000-летнего интервала, °С

Годы	За год			Летнее полугодие*			Зимнее полугодие*		
	Земля в целом	Северное полушарие	Южное полушарие	Земля в целом	Северное полушарие	Южное полушарие	Земля в целом	Северное полушарие	Южное полушарие
1021–1050	14.00	14.55	13.45	15.21	18.71	11.71	12.91	10.60	15.21
1121–1150	14.00	14.55	13.45	15.21	18.70	11.72	12.89	10.61	15.18
1221–1250	14.00	14.55	13.44	15.20	18.68	11.72	12.88	10.61	15.15
1321–1350	13.99	14.55	13.44	15.20	18.67	11.73	12.87	10.62	15.12
1421–1450	13.99	14.55	13.43	15.19	18.65	11.73	12.86	10.62	15.09
1521–1550	13.99	14.55	13.42	15.19	18.64	11.74	12.84	10.63	15.05
1621–1650	13.98	14.55	13.42	15.18	18.62	11.74	12.83	10.63	15.02
1721–1750	13.98	14.54	13.41	15.18	18.61	11.74	12.82	10.64	14.99
1821–1850	13.98	14.54	13.41	15.17	18.59	11.75	12.80	10.65	14.96
1921–1950	13.97	14.54	13.40	15.17	18.58	11.75	12.79	10.65	14.92
2021–2050	13.97	14.54	13.40	15.16	18.56	11.76	12.77	10.66	14.89

* Здесь и в табл. 4–6 полугодия указаны по отношению к Северному полушарию.

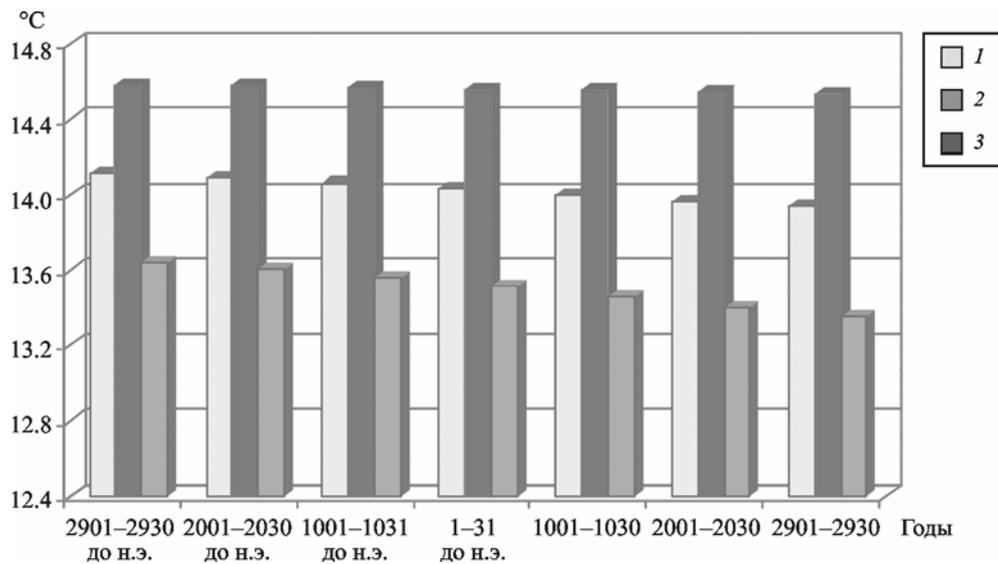


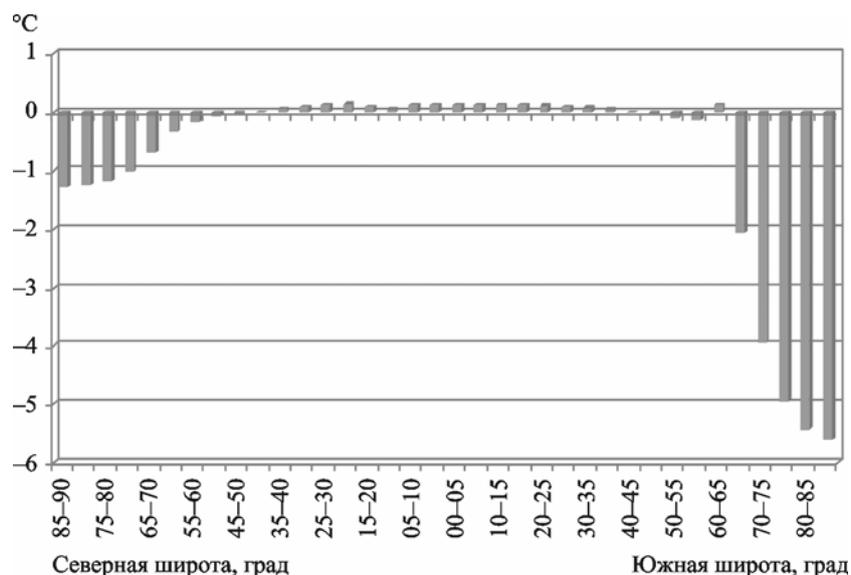
Рис. 3. Изменение годовых инсоляционных норм ПТВ для Земли в целом (1), Северного (2) и Южного (3) полушарий за 5800 лет

35°–40° с.ш. за прошедшее тысячелетие увеличение ПТВ составило 0.02 °С [Bernard *et al.*, 2002a]. По нашим данным (по разности норм 2021–2050 гг. и 1021–1050 гг.) это увеличение составило 0.01 °С. Для широтной зоны 65°–70° с.ш. сокращение по результатам модельных расчетов составило 0.04 °С, по нашим расчетам – 0.13 °С.

Таким образом, в распределении инсоляционных норм ПТВ проявляется тенденция к увеличению широтной контрастности. Разность инсоляционной нормы ПТВ для широтных зон 0°–5° с.ш. и 85°–90° с.ш. за 1000 лет увеличивается на 0.26 °С (от 43.22 до 43.48 °С), или на 0.003 °С на 1° широты (°φ). Разность инсоляционной нормы ПТВ для соответствующих зон Южного полушария (0°–5° ю.ш. и 85°–90° ю.ш.) за тот же

Таблица 4. Рассчитанные значения инсоляционных норм ПТВ для 5800-летнего интервала, °С

Годы	За год			Летнее полугодие			Зимнее полугодие		
	Земля в целом	Северное полушарие	Южное полушарие	Земля в целом	Северное полушарие	Южное полушарие	Земля в целом	Северное полушарие	Южное полушарие
2901–2930 до н.э.	14.11	14.58	13.64	15.39	19.23	11.55	13.31	10.42	16.20
2001–2030 до н.э.	14.09	14.58	13.60	15.36	19.13	11.58	13.24	10.46	16.02
1001–1031 до н.э.	14.06	14.57	13.56	15.31	19.01	11.62	13.14	10.50	15.79
1–31 н.э.	14.03	14.56	13.51	15.27	18.87	11.66	13.04	10.55	15.52
1001–1030 н.э.	14.00	14.55	13.45	15.21	18.72	11.71	12.91	10.60	15.22
2001–2030 н.э.	13.97	14.54	13.40	15.16	18.56	11.76	12.78	10.65	14.90
2901–2930 н.э.	13.94	14.53	13.35	15.11	18.42	11.80	12.65	10.70	14.59

**Рис. 4.** Распределение годовых инсоляционных норм ПТВ (°С) по широтам за 5800 лет

период увеличивается на $1.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ (от 69.80 до $70.87\text{ }^{\circ}\text{C}$) или $0.013\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{ф}$. За 5800 лет эти значения в Северном полушарии увеличиваются на $1.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.016\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{ф}$), в Южном – на $5.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.068\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{ф}$) (рис. 5). Соответствующие для полушарий фактические значения межширотного градиента для климатической нормы 1961–1990 гг. (см. табл. 1) составляют 0.509 ($43.22\text{ }^{\circ}\text{C}$) и $0.849\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{ф}$ ($72.14\text{ }^{\circ}\text{C}$). Значение межширотного градиента для инсоляционных ПТВ определялось как частное от деления разности температуры в широтных зонах 0° – 5° и 85° – 90° каждого полушария на 85° широты разделяющих середины этих зон – 2.5° и 87.5° .

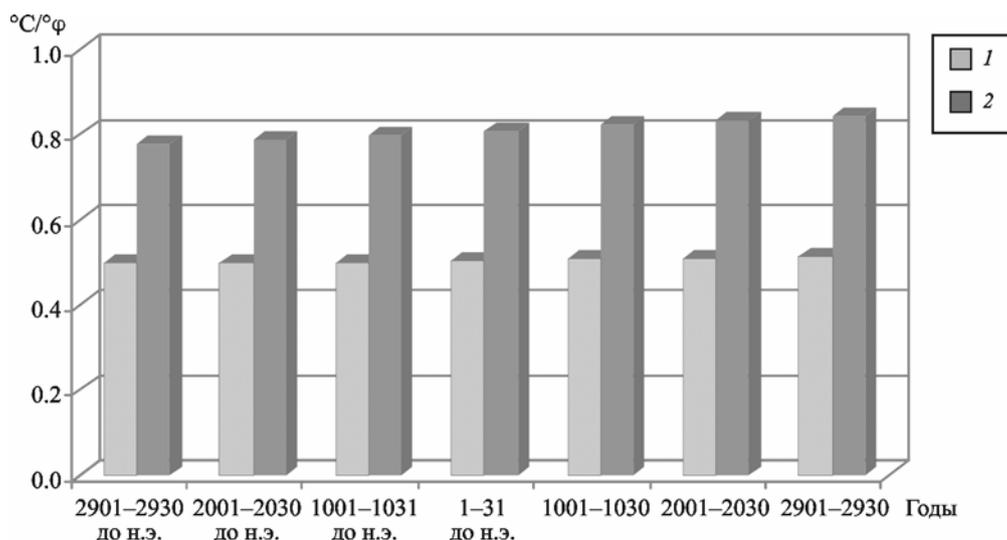


Рис. 5. Изменение межширотного градиента ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\varphi$) за 5800 лет в Северном (1) и Южном (2) полушариях

Полугодовые инсоляционные нормы ПТВ

В летнее (для Северного полушария – с апреля по сентябрь) полугодие корреляция распределения фактической нормы (1961–1990 гг.) по широтам с распределением приходящей на эллипсоид Земли солнечной радиации по всему широтному диапазону (табл. 5) характеризуется значением R равным 0.810. В Северном полушарии R равно 0.956, в Южном – 0.909. В зимнее (для Северного полушария включает значения с октября по март) полугодие значения R составляют соответственно 0.646, 0.993 и 0.947.

Таблица 5. Распределение ПТВ* и инсоляции** по широтным зонам (среднее за период 1961–1990 гг. для летнего полугодия)

Географическая широта, град.	Северное полушарие		Южное полушарие	
	ПТВ, $^{\circ}\text{C}$	Инсоляция, $\text{Дж}/\text{м}^2$	ПТВ, $^{\circ}\text{C}$	Инсоляция, $\text{Дж}/\text{м}^2$
0–5	26.13	6.6979053E+09	25.86	6.4597848E+09
5–10	26.52	6.8895353E+09	25.55	6.1769872E+09
10–15	27.04	7.0333252E+09	24.36	5.8517758E+09
15–20	26.98	7.1284097E+09	22.73	5.4868567E+09
20–25	26.19	7.1744367E+09	20.68	5.0853808E+09
25–30	24.40	7.1716094E+09	18.40	4.6509589E+09
30–35	20.96	7.1207500E+09	16.10	4.1876997E+09
35–40	18.29	7.0234022E+09	13.74	3.7002867E+09
40–45	15.55	6.8820060E+09	10.48	3.1941305E+09
45–50	12.57	6.7002182E+09	7.08	2.6756652E+09
50–55	10.20	6.4835489E+09	3.46	2.1529655E+09
55–60	8.04	6.2407919E+09	-0.42	1.6371584E+09
60–65	5.09	5.9880267E+09	-5.96	1.1464116E+09
65–70	1.40	5.7679218E+09	-15.13	7.2524590E+08
70–75	-2.88	5.6313372E+09	-31.14	4.2597196E+08
75–80	-6.08	5.5457174E+09	-42.70	2.1724364E+08
80–85	-6.98	5.4936723E+09	-47.71	8.2625721E+07
85–90	-7.00	5.4688851E+09	-55.51	1.6426966E+07

*По данным интернет-сайта: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/absolute.nc>

**По данным интернет-сайта: <http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm>

Для расчетов инсоляционных норм ПТВ летнего (в Северном полушарии) полугодия использовались полиномиальные уравнения регрессии (полиномы 3-й степени), полученные для трех широтных диапазонов (90° – 85° – 30° – 25° с.ш.; 20° – 25° с.ш. – 55° – 60° ю.ш. и 60° – 65° – 85° – 90° ю.ш., показатель аппроксимации R^2 имеет соответствующие значения 0.9972, 0.9988 и 0.9949), и данные инсоляции (см. сайт в Интернете: <http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm>).

Инсоляционная норма ПТВ Земли в летнее (в Северном полушарии) полугодие за 1000 лет сокращается на 0.05°C (с 15.21 до 15.16°C), норма ПТВ Северного полушария – на 0.15°C (с 18.71 до 18.56°C). Инсоляционная норма ПТВ Южного полушария увеличивается на 0.05°C (от 11.71 до 11.76°C). За 5800 лет инсоляционная норма ПТВ для Земли сокращается на 0.28°C (от 15.39 до 15.11°C), Северного полушария – на 0.41°C (с 19.23 до 18.42°C). Инсоляционная норма ПТВ Южного полушария возрастает на 0.25°C (от 11.55 до 11.80°C).

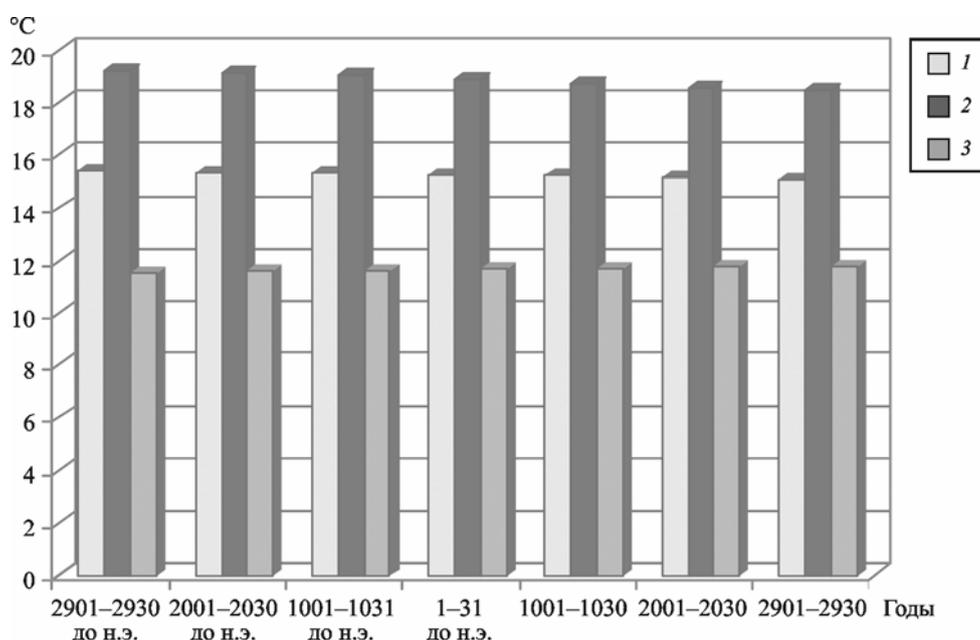


Рис. 6. Изменение инсоляционной нормы ПТВ ($^{\circ}\text{C}$) в летнее (для Северного полушария) полугодие для Земли в целом (1), Северного (2) и Южного (3) полушарий за 5800 лет

Межширотный градиент в Северном полушарии в это полугодие за 1000 лет увеличивается на 1.10°C , или на 3.26% . На 1° географической широты ($^{\circ}\text{ф}$) увеличение на этом интервале составляет 0.013°C (разность ПТВ в экваториальной и полярной зонах изменяется от 33.19 до 34.29°C). В Южном полушарии разность остается постоянной (79.67°C). Значения разности ПТВ в экваториальных и полярных зонах по фактической норме 1961–1990 гг. составляют 33.13°C ($0.390^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{ф}$) в Северном полушарии и 81.37°C ($0.957^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{ф}$) – в Южном. За 5800 лет разность инсоляционной ПТВ в экваториальной и полярной зонах Северного полушария увеличивается на 5.55°C , или на 17.2% . Это увеличение составляет $0.065^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{ф}$ (рис. 7). В распределении по широтам отмечается сокращение инсоляционной нормы ПТВ в широтном диапазоне от 90° до 10° с.ш. Для всех широтных зон, расположенных южнее, в это полугодие отмечается увеличение широтной нормы ПТВ.

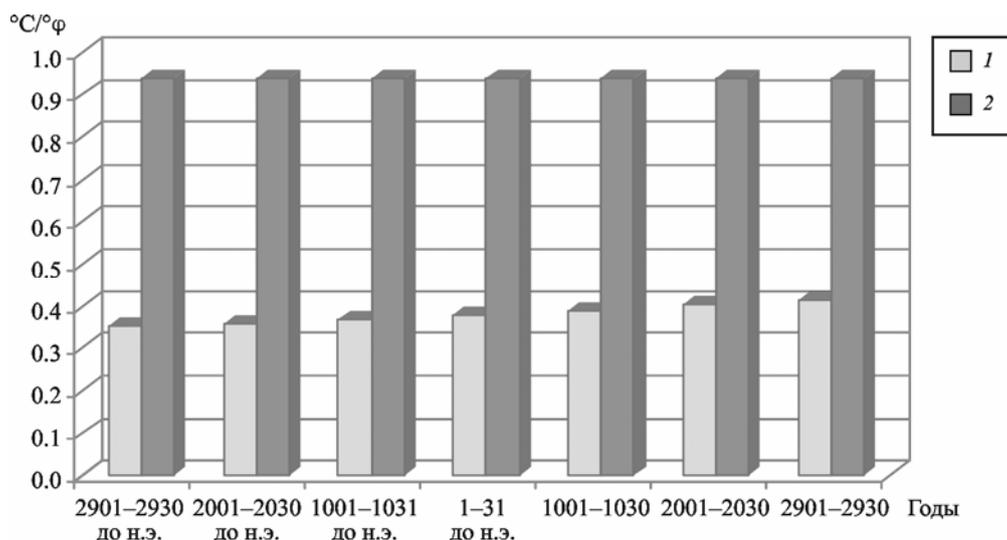


Рис. 7. Изменение межширотного градиента ($^{\circ}\text{C}/\varphi$) в Северном (1) и Южном (2) полушариях за 5800 лет в летнее (для Северного полушария) полугодие

Таблица 6. Распределение ПТВ* и инсоляции** по широтным зонам (среднее за период 1961–1990 гг. для зимнего полугодия)

Географическая широта, град.	Северное полушарие		Южное полушарие	
	ПТВ, $^{\circ}\text{C}$	Инсоляция, Дж/м ²	ПТВ, $^{\circ}\text{C}$	Инсоляция, Дж/м ²
0–5	26.17	6.4597962E+09	26.08	6.6979177E+09
5–10	26.17	6.1769974E+09	25.98	6.8895485E+09
10–15	25.80	5.8517847E+09	25.46	7.0333389E+09
15–20	24.34	5.4868641E+09	24.81	7.1284236E+09
20–25	21.88	5.0853867E+09	23.82	7.1744505E+09
25–30	18.13	4.6509633E+09	22.10	7.1716229E+09
30–35	13.22	4.1877025E+09	19.47	7.1207628E+09
35–40	8.95	3.7002881E+09	16.29	7.0234140E+09
40–45	4.59	3.1941305E+09	12.61	6.8820166E+09
45–50	-0.24	2.6756641E+09	8.63	6.7002273E+09
50–55	-3.96	2.1529634E+09	5.17	6.4835561E+09
55–60	-7.08	1.6371557E+09	2.27	6.2407970E+09
60–65	-14.30	1.1464088E+09	-0.73	5.9880293E+09
65–70	-19.06	7.2524403E+08	-6.39	5.7679208E+09
70–75	-21.30	4.2597109E+08	-18.21	5.6313333E+09
75–80	-24.21	2.1724329E+08	-26.62	5.5457116E+09
80–85	-26.48	8.2625691E+07	-30.22	5.4936654E+09
85–90	-27.15	1.6426973E+07	-36.85	5.4688775E+09

* По данным интернет-сайта: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/absolute.nc>

** По данным интернет-сайта: <http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm>

Для зимнего (в Северном полушарии) полугодия расчеты инсоляционной ПТВ (табл. 6) также проводились по трем широтным диапазонам (90° – 85° с.ш. – 15° – 20° ю.ш. – полином 4-й степени; 20° – 25° – 55° – 60° ю.ш. – полином 3-й степени; 60° – 65° – 85° – 90° ю.ш. – полином 2-й степени) и данным инсоляции (сайт в Интернете: <http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm>). Значения показателя аппроксимации R^2 составили соответственно 0.9991, 0.9947 и 0.9921.

Сокращение инсоляционной нормы ПТВ для этого полугодия за 1000 лет для Земли в целом составляет $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ (от 12.91 до $12.77\text{ }^{\circ}\text{C}$), для Южного полушария – $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ (от 15.21 до $14.89\text{ }^{\circ}\text{C}$). В Северном полушарии для этого полугодия отмечается увеличение инсоляционной нормы ПТВ на $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ (от 10.60 до $10.66\text{ }^{\circ}\text{C}$). На интервале продолжительностью в 5800 лет соответствующие значения составляют -0.66 , -1.21 и $+0.28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 8). В широтном диапазоне от 90° с.ш. до 20° ю.ш. отмечается слабое увеличение инсоляционной нормы, южнее – сокращение.

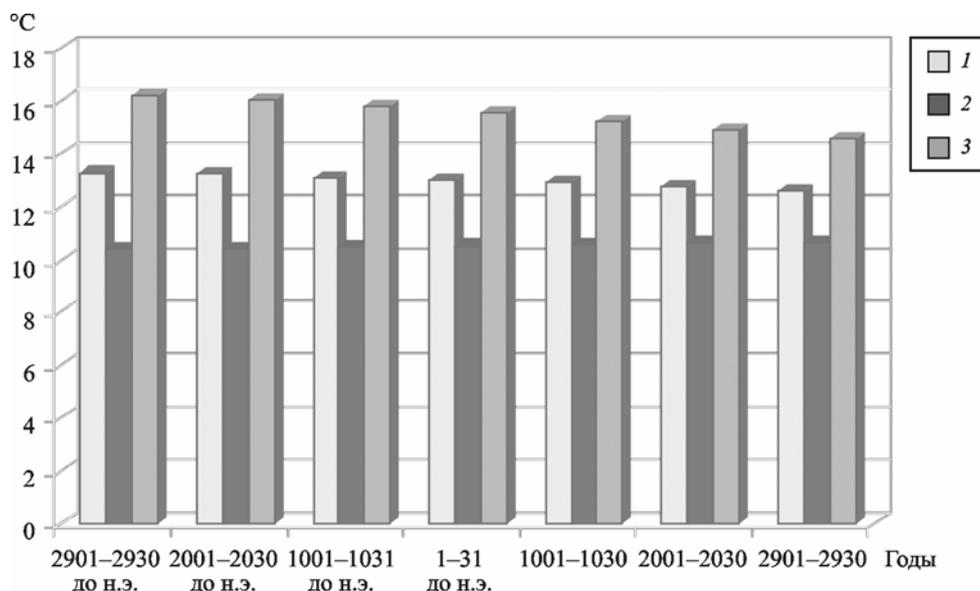


Рис. 8. Изменение инсоляционной нормы ПТВ ($^{\circ}\text{C}$) для Земли в целом (1), Северного (2) и Южного (3) полушарий в зимнее (для Северного полушария) полугодие на интервале в 5800 лет

В летние для полушарий полугодия, таким образом, отмечается сокращение значений инсоляционных норм ПТВ, а в зимние – увеличение. Сезонные различия при этом сглаживаются. В широтном диапазоне от 90° с.ш. до 20° ю.ш. отмечается слабое увеличение инсоляционной нормы, южнее – ее сокращение.

В Северном полушарии на интервале в 1000 лет разность инсоляционных ПТВ экваториальной (0° – 5°) и полярной (85° – 90°) зон остается постоянной, равной $54.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при значении по фактической норме за 1961–1990 гг. равном $53.32\text{ }^{\circ}\text{C}$). В Южном полушарии эта разность увеличивается на $3.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с 58.71 до $62.37\text{ }^{\circ}\text{C}$), т.е. на 6.05% . Таким образом, это увеличение составляет $0.043\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{ф}$ при фактическом значении для нормы 1961–1990 гг. равном $62.83\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.739\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{ф}$). За 5800 лет в зимнее полугодие разность инсоляционной ПТВ в экваториальной и полярной зонах Северного полушария изменяется всего на $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$, Южного – на $18.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ (т.е. на 32.77%). Эта величина соответствует увеличению градиента в Южном полушарии на $0.215\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{ф}$ (рис. 9).

Характеристики термического режима в полушариях заметно отличаются (см. табл. 2–4). Лето в Северном полушарии теплее ($18.54\text{ }^{\circ}\text{C}$), чем лето в Южном полушарии ($14.93\text{ }^{\circ}\text{C}$), а зима холоднее ($10.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ против $11.79\text{ }^{\circ}\text{C}$). Летние различия инсоляционных норм ПТВ в полушариях увеличиваются за 1000 лет на $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$, за 5800 лет – на $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. табл. 3, 4). Различия в зимних инсоляционных нормах ПТВ между полушариями практически не меняются; они незначительно сокращаются: за 1000 лет – на $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$, за 5800 лет – на $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$. Значения межширотного градиента в Южном полушарии

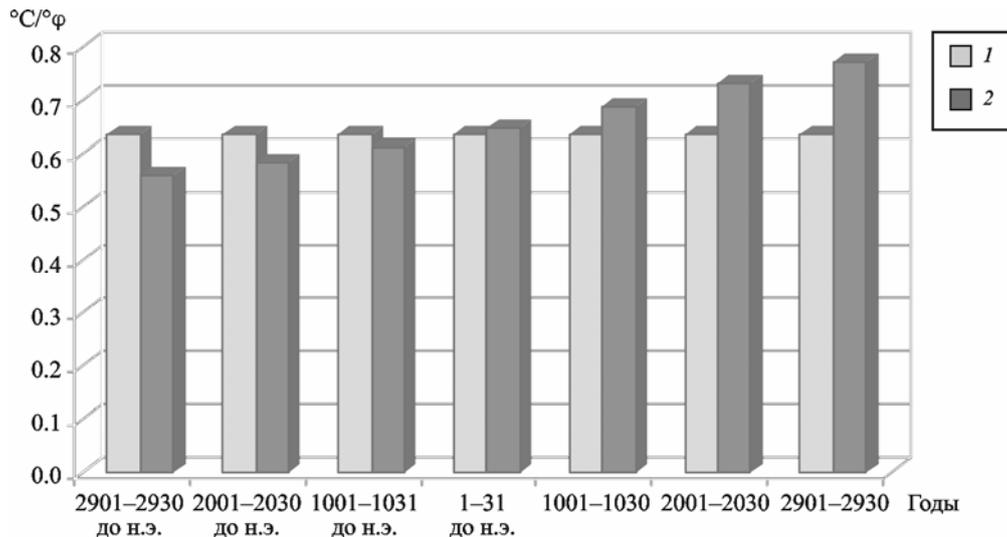


Рис. 9. Изменение межширотного градиента ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\varphi$) в Северном (1) и Южном (2) полушариях за 5800 лет в зимнее (для Северного полушария) полугодие

в настоящее время превышают значения градиента в Северном полушарии в соответствующие полугодия. Зимний градиент в Южном полушарии ($0.937^{\circ}\text{C}/^{\circ}\varphi$) в 1.47 превышает зимний градиент в Северном полушарии ($0.637^{\circ}\text{C}/^{\circ}\varphi$). Летний градиент в Южном полушарии (средний на интервале 1000 лет – $0.714^{\circ}\text{C}/^{\circ}\varphi$) в 1.8 раза больше летнего градиента в Северном полушарии ($0.397^{\circ}\text{C}/^{\circ}\varphi$). Различия между зимними и летними градиентами в Южном полушарии меньше ($0.223^{\circ}\text{C}/^{\circ}\varphi$), в Северном полушарии – больше ($0.240^{\circ}\text{C}/^{\circ}\varphi$). Годовые значения аномалии за 2015 г. по данным архива HadCRUT4 (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature>) в Южном полушарии (0.492°C) в 2.03 раза меньше, чем в Северном полушарии (1.001°C), а годовой градиент (по норме 1961–1990 гг.), напротив, в 1.63 раза больше.

Заключение

По архивам данных годовая аномалия приповерхностной температуры (HadCRUT4-массив содержит объединенные данные аномалий приповерхностной температуры над сушей и аномалий температуры поверхностного слоя океана) составляет на 2015 г. 0.745°C для Земли в целом, 1.001°C – для Северного полушария и 0.492°C – для Южного полушария (см. сайт в Интернете: <http://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature>). Поскольку окружающее Землю пространство имеет температуру абсолютного нуля по Кельвину, или -273°C , то изменение аномалии приповерхностной температуры относительно абсолютного значения ее нормы (отражающей базовое состояние термического режима) за 1961–1990 гг. составляет всего 0.26 % для Земли в целом, 0.35 % – для Северного полушария и 0.17 % – для Южного полушария (рис. 10).

Отсюда следует, что базовое состояние термического режима (характеристикой которого является инсоляционная норма ПТВ) глобального климата определяется инсоляцией и парниковым эффектом планеты. Это составляет 99.74 % для Земли в целом, 99.65 % – для Северного полушария и 99.83 % – для Южного полушария. Текущие изменения (аномалия ПТВ) слабо связаны с непосредственным поступлением радиации (ее приход к Земле мало меняется на исследуемых интервалах), но они могут быть связаны с ее распределением – межширотным градиентом, который изменяется весьма заметно. Текущие

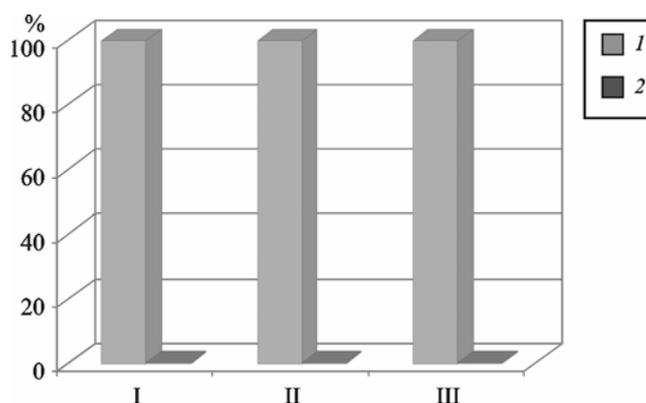


Рис. 10. Соотношение нормы ПТВ (1) и годовой аномалии приповерхностной температуры в температурном режиме Земли (2) для планеты в целом (I), Северного (II) и Южного (III) полушарий

изменения ПТВ в Северном полушарии значительно превосходят текущие изменения в Южном полушарии, где термический режим более устойчив (<http://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature>). В Южном полушарии переносимое из экваториальной области тепло, вероятно, в основном поглощается океаном. В Северном полушарии адвекция тепла в результате межширотного теплообмена приводит к усилению парникового эффекта за счет увеличения содержания H_2O и других парниковых газов [Монин, Шишков, 2000; Bertrand et al., 2002b; Алексеев, 2015]. Происходит положительная компенсация («перекомпенсация» по принципу обратной положительной связи) сокращающегося со временем прихода к Земле лучистой энергии (и связанного с ней тепла) за счет механизма ее распределения по пространству (усиление межширотного теплообмена), увеличения парникового эффекта¹ (H_2O , CO_2 и т.д.) и работы «океанического конвейера» (Гольфстрим и другие течения). Возможно некоторое увеличение аномалии ПТВ (в обоих полушариях) и за счет увеличения солнечной активности [Lean et al., 1995; Koop, Lean, 2011]. Климатическая система Земли оказывается восприимчивой к этим малым вариациям (см. рис. 10) термического режима (<http://public.wmo.int/en>; <http://www.ipcc.ch>).

Расчет инсоляционных годовых значений ПТВ на период, охваченный инструментальными метеонаблюдениями (1850–2015 гг.), и сравнение величин фактической и инсоляционной аномалии может способствовать определению точного вклада инсоляции в текущие изменения климата (а также суммарного вклада солнечной активности, парникового эффекта, механизмов теплообмена, прямых и обратных связей в климатической системе).

Основные выводы

1. Годовые инсоляционные нормы ПТВ Земли в целом и полушарий на всех временных интервалах сокращаются. Полугодовые инсоляционные нормы ПТВ в зимние для полушарий полугодия увеличиваются, а в летние сокращаются (сезонные различия

¹ Под парниковым эффектом Земли понимается разность между фактической температурой поверхности T и эффективной температурой T_e Земли [Монин, Шишков, 2000]. Эффективная температура T_e соответствует потоку L инфракрасного излучения Земли в расчете на единицу поверхности и оценивается 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 $\Delta T = (T - T_e)$. $T_e = 249$ К (или -24 °С), $T = 288$ К (или $+15$ °С), следовательно, $\Delta T = 39$ °. Таким образом, соотношение факторов инсоляции и парникового эффекта в формировании термического режима Земли составляет 86.46 % (249°) и 13.54 % (39°) соответственно.

сглаживаются). Годовые и полугодовые нормы инсоляционной ПТВ увеличиваются в экваториальной области и сокращаются в полярных районах (широтная контрастность возрастает).

2. Межширотный градиент в инсоляционной норме ПТВ имеет в Южном полушарии более высокие значения, чем в Северном полушарии. В зимние для полушарий полугодия значения межширотного градиента практически не изменяются, оставаясь весьма высокими. В летние полугодия на всем интервале и в обоих полушариях они возрастают, наиболее сильно в Южном полушарии. Следствием увеличения значений межширотного градиента может быть увеличение неустойчивости в атмосфере (турбулентность), увеличение межширотного теплообмена (прежде всего, в форме переноса тепла вихревыми образованиями – тропическими и фронтальными циклонами, а также океаническими течениями).

3. Доля текущих изменений температурных характеристик в термическом режиме Земли составляет от 0.17 % в Южном полушарии до 0.35 % в Северном полушарии. Климатическая система Земли оказывается восприимчивой к малым текущим изменениям термического режима. Основные причины этих изменений, вероятно, определяются текущим изменением активности Солнца, парникового эффекта, механизмов теплообмена, прямых и обратных связей в климатической системе. Основная часть тепловой энергии (базовая часть термического режима) климатической системы Земли (от 99.65 % в Северном полушарии до 99.83 % в Южном полушарии) определяется инсоляцией и парниковым эффектом планеты. Характеристикой базовой составляющей термического режима является инсоляционная норма ПТВ. Таким образом, инсоляционные нормы ПТВ представляются реперами термического режима и индикаторами устойчивости глобального климата на интервале от 3000 до н.э. до 3000 лет н.э., охваченном точными расчетами инсоляции. Текущие изменения ПТВ (аномалия) в интервале, охваченном метеорологическими измерениями, мало отличаются от климатической нормы ПТВ (<http://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature>). Тем не менее причины малых значений аномалии ПТВ нуждаются в изучении в связи с высокой чувствительностью к ним климатической системы Земли.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-05-07590).

Литература

- Алексеев Г.В.* Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 1. С. 11–26.
- Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л.: ГОНТИ, 1939. 208 с.
- Монин А.С.* Введение в климатологию Л.: Гидрометеиздат, 1982. 246 с.
- Монин А.С., Шишков Ю.А.* Климат как проблема физики // *Успехи физ. наук*. 2000. Т. 170, № 4. С. 419–445.
- Федоров В.М.* Периодические возмущения и малые вариации солнечного климата Земли // *Докл. РАН*. 2014. Т. 457, № 2. С. 222–225. DOI 10.7868/S0869565214200213.

- Федоров В.М. Пространственные и временные вариации солярного климата Земли в современную эпоху // Геофизические процессы и биосфера. 2015. Т. 14, № 1. С. 5–22.
- Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. Вековые изменения орбиты Земли и астрономическая теория колебаний климата // Тр. Ин-та теор. астрономии АН СССР. 1969. Вып. 14. С. 48–84.
- Berger A.L. Long-term variations of daily insolation and quaternary climatic changes // J. of the Atmosph. Sci. 1978a. V. 35, N 9. P. 2362–2367.
- Berger A.L. Long-term variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements // Quatern. Res. 1978b. V. 9. P. 139–167.
- Berger A.L., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quatern. Sci. Rev. 1991. V. 10. P. 297–317.
- Berger A., Loutre M.F., Yin Q. Total irradiation during any time interval of the year using elliptic integrals // Quatern. Sci. Rev. 2010. V. 29. P. 1968–1982. DOI 10.1016/j.quascirev.2010.05.07.
- Bertrand C., Van Ypersele J.P. Potencial role solar variability as an agent for climate change // Climatic Change. 1999. V. 43. P. 387–411.
- Bertrand C., Loutre M.F., Berger A. High frequency variations of the Earth's orbital parameters and climate change // Geophys. Res. Let. 2002a. V. 29, N 18. P. 1893. DOI 10.1029/2002GL015622.
- Bertrand C., Van Ypersele J.B., Berger A. Are natural climate forcings able to counteract the projected antropogenic global // Climatic Change. 2002b. V. 55. P. 413–427.
- Borisenkov E.P., Tsvetkov A.V., Agaponov S.V. On some characteristics of insolation changes in the past and the future // Climatic Change. 1983. N 5. P. 237–244.
- Borisenkov E.P., Tsvetkov A.V., J.A. Eddy. Combined effects of Earth orbit perturbations and solar activity on terrestrial insolation. Pt. I: Sample days and annual mean values // J. of the Atmosph. Sci. 1985. V. 42, N 9. P. 933–940.
- Bretagnon P. Theorie du mouvement de l'ensemble des planetes. Solution VSOP82 // Astron. and Asrtroph. 1982. V. 114. P. 278–288.
- Brouwer D., Van Woerkom A.J.J. The secular variation of the orbital elements of the principal planets // Astron. Papers. 1950. V. 13. P. 81–107.
- 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 // Bull. Amer. Astron. Soc. 1996. V. 28(3). P. 1158.
- Jones P.D., New M., Parker D.E., Martin S., Rigor I.G. Surface air temperature and its variations over the last 150 years // Rev. of Geoph. 1999. V. 37. P. 173–199. DOI 10.1029/1999RG900002.
- Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J., Harpham C., Salmon M., Morice C.P. Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010 // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, DO5127. DOI 10.1029/2011JD017139.
- Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // Geophys. Res. Let. 2011. V. 37, L01706. DOI 10.1029/2010GL045777.
- Lean J., Beer J., Bradley R. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change // Geophys. Res. Let. 1995. V. 22, N 23. P. 3195–3198.
- 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. V. 7. P. 181–194.
- Standish E.M. Orientation of the JPL ephemerides, DE200/LE200, to the dynamical equinox of J2000 // Astron. and Asrtroph. 1982. V. 114. P. 297–302.
- Vernekar A.D. Long-period global variations of incoming solar radiation // Meteorol. Monographs. Boston: Publ. by Amer. Meteorol. Soc., 1972. V. 12, N 34. P. 121.

Сведения об авторах

ФЕДОРОВ Валерий Михайлович – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, географический ф-т Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7 (916) 243-57-00. E-mail: fedorovmsu@mail.ru

ГРЕБЕННИКОВ Павел Борисович – ведущий инженер, географический ф-т Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7 (917) 554-67-41. E-mail: grebennikovp@list.ru

CALCULATION OF LONG TERM AVERAGES OF SURFACE AIR TEMPERATURE BASED ON INSOLATION DATA

V.M. Fedorov, P.B. Grebennikov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. The solar radiation coming to the Earth's ellipsoid is considered without taking into account the atmosphere on the basis of the astronomical ephemerides for the time interval from 3000 BC to 3000 AD. Using the regression equations between the Earth's insolation and near-surface air temperature, the insolation annual and semi-annual climatic norms of near-surface air temperature for the Earth as a whole and the hemispheres are calculated in the intervals of 30 years for the period from 2930 BC to 2930 AD with 100 and 900–1000 years time steps. The analysis results show that the annual insolation rates of the near-surface air temperature of the Earth and the hemispheres decrease at all the intervals. The semi-annual insolation rates of the near-surface air temperature increase in winter and decrease in summer. It means that the seasonal difference decreases. The annual and semi-annual rates of insolation near-surface air temperature of the Earth increase in the equatorial and decrease in the polar regions, the latitudinal contrast increases. The interlatitudinal gradient is higher in the Southern Hemisphere. It practically does not change in winter and increases in summer, most strongly in the Southern Hemisphere.

Keywords: climate change, insolation, surface air temperature, celestial-mechanical processes, interlatitudinal gradient.