

УДК 551.551.1+551.581

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ СОЛЯРНОГО КЛИМАТА ЗЕМЛИ В СОВРЕМЕННУЮ ЭПОХУ

© 2015 г. В.М. Федоров

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

Приводятся результаты исследований пространственно-временной изменчивости солярного климата Земли в современную эпоху с учетом периодических возмущений ее орбитального движения и наклона оси вращения в результате прецессии и нутации. На основе выполненных расчетов определены особенности временной изменчивости поступления солнечной радиации (в отсутствие атмосферы) к Земле и особенности ее пространственного распределения на поверхности земного эллипсоида.

Ключевые слова: солнечная радиация, солярный климат, современная эпоха, возмущенное движение, пространственно-временная изменчивость, периодичность, прецессия, нутация.

PACS 92.60.Vb, 92.70.Qr

Введение

Под солярным (радиационным) климатом понимается рассчитываемое теоретически поступление и распределение солнечной радиации на верхней границе атмосферы или на поверхности Земли в отсутствие атмосферы [Миланкович, 1939; Монин, Шишков, 1979; Хромов, Петросяну, 2006]. Вариации поступающей к Земле солнечной радиации определяются двумя основными причинами, имеющими различную физическую природу. Исследования вариаций солнечной радиации, связанной с изменением физической активности Солнца, имеют давнюю историю (например, история изучения пятнообразования и циклов Швабе–Вольфа, Хейла, Глейсберга). Вопрос о существовании связи между изменением солнечной активности, климатом и биосферой уже в течение продолжительного времени остается дискуссионным [Эйгенсон, 1948, 1963; Abbot, 1957; Витинский и др., 1976; Кондратьев, Никольский, 1978; Шнейдер, 1980; Витинский, 1983; Абдусаматов, 2009; Dudok de Wit, Watermann, 2010]. В настоящей работе представлены результаты исследований вариаций солярного климата, связанных с небесно-механическими процессами. Изменение активности Солнца при этом не учитывалось.

Солнечная радиация, поставляющая на Землю свет и тепло, играет важную роль не только в генезисе климата, но и вообще в развитии жизни на Земле [Шулейкин, 1953; Лоренц, 1970; Будыко, 1980; Хргиан, 1986; Кондратьев, 1987; Монин, Шишков, 2000]. «Солнце – единственный источник тепла, достаточно сильный для того, чтобы оказывать значительное влияние на температуру поверхности Земли и воздуха» [Воейков, 1948. С. 166]. Солнечная радиация является основным источником энергии, определяющим тепловой баланс и термический режим биосферы [Войткевич, Вронский, 1989]. Приходящая к Земле солнечная радиация превращается в тепло отчасти в атмосфере и гидросфере, но главным образом на земной поверхности. Здесь она идет на нагревание верхних слоев почвы и воды, а от них и воздуха. Нагретая земная и водная поверхности и атмосфера, в свою очередь, сами излучают невидимую инфракрасную радиацию. Отдавая эту радиацию в мировое пространство, земная поверхность, океан и атмосфера охлаждаются. Приход радиации и ее уход составляют радиационный баланс Земли. Исследование пространственно-временных особенностей приходной составляющей радиационного баланса может способствовать определению причин и тенденций изменения глобального климата Земли, радиационного и теплового баланса ее биосферы [Берлянд, 1956; Будыко, 1974, 1980; Нерпин, Чудновский, 1975; Монин, Шишков, 1979; Хргиан, 1986; Кондратьев, 1987].

Связанные с небесно-механическими процессами вариации солнечного потока традиционно исследуются в весьма продолжительных масштабах времени. При этом учитываются подверженные вековым возмущениям орбитальные элементы – долготы перигелия и эксцентриситет, а также наклон оси вращения Земли. Эти возмущения имеют значительные по продолжительности периоды вариаций [Миланкович, 1939; Brouwer, van Woerkom, 1950; Шафарф, Будникова, 1967, 1968, 1969; Vernekar, 1972; Berger, 1978, 1988; Монин, 1982; Laskar, 1988; Berger, Loutre, 1991; Монин, Шишков, 2000]. Расчеты приходящей солнечной радиации и исследование ее пространственно-временной изменчивости в связи с небесно-механическими процессами в диапазоне периодических возмущений элементов земной орбиты и наклона оси вращения до настоящего времени детально не проводились.

Методика расчетов

По исходным данным астрономических эфемерид (JPL Planetary and Lunar Ephemerides) DE-405/406 [http://ssd.jpl.nasa.gov] рассчитывались значения приходящей солнечной радиации (при отсутствии атмосферы) за тропические годы, полугодия и сезоны года в различные широтные зоны (протяженностью в 5° широты) земного эллипсоида в интервале от 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э. Точность эфемерид по расстоянию между Землей и Солнцем составляет 10^{-9} а.е. (или 0.1496 км), по времени – 1 с (или 0.0000115 сут). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80) с длинами полуосей равными 6 378 137 м (большие) и 6 356 752 м (малая). Расчеты производились с использованием ряда формул, среди которых основным было выражение:

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

где I_{nm} – приходящая солнечная радиация за элементарный n -й фрагмент m -го тропического года (Дж); σ – площадной множитель (м^2), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал $\sigma(H, \varphi)d\alpha d\varphi$ – площадь бесконечно малой прямоугольной ячейки эллипсоида; α – часовой угол (радиан); φ – географическая широта (радиан);

H – высота поверхности эллипсоида относительно поверхности Земли (м); $\Lambda(H, t, \varphi, \alpha)$ – 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. При расчетах учитывались изменения расстояния между Землей и Солнцем и продолжительности периода обращения Земли (продолжительности тропического года) в связи с периодическими возмущениями орбитального движения Земли [Федоров, 2012; Fedorov, 2012, 2013, 2014]. По результатам расчетов для периода с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. была в матричной форме сформирована база данных приходящей (в отсутствие атмосферы) солнечной радиации в широтные зоны Земли (протяженностью в 5°) с шагом по времени в $1/12$ часть тропического года.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные результаты расчетов солнечной радиации (см. табл. 3) сравнивались с данными, приведенными в работах М. Миланковича [1939] (табл. 1) и А.С. Монины [1982] (табл. 2), а также со значениями измеренной солнечной радиации, приводимыми для широтных зон в работах по климатологии [Дроздов и др., 1989; Хромов, Петросянци, 2006].

Из представленных в табл. 1–3 результатов расчетов следует, что в целом рассчитанные разными авторами средние для полугодий и года величины приходящей солнечной радиации характеризуются сходными значениями. Сходством обладают также и средние значения приходящей к Земле за сутки солнечной радиации. По данным,

Таблица 1. Количество солнечной радиации, поступающей на верхнюю границу атмосферы Земли, $\text{МДж}/\text{м}^2$ [Миланкович, 1939]

Географическая широта, град.	Летнее полугодие	Зимнее полугодие	В целом за год
0	6728.30	6728.30	13 456.60
5	6949.53	6462.66	13 412.19
10	7120.91	6150.92	13 271.83
15	7242.83	5797.28	13 040.12
20	7314.48	5404.26	12 718.75
25	7337.95	4976.88	12 314.83
30	7309.46	4516.82	11 826.28
35	7234.04	4030.36	11 264.40
40	7110.85	3520.86	10 631.71
45	6945.34	2995.85	9941.19
50	6740.03	2461.21	9201.24
55	6507.07	1931.59	8438.66
60	6246.45	1408.68	7655.13
65	5991.70	929.34	6921.04
70	5811.53	563.14	6374.67
75	5704.69	309.22	6013.91
80	5636.39	135.76	5772.14
85	5597.42	31.01	5628.43
90	5585.27	0.00	5585.27
Среднее	6584.96	3071.27	9656.23

Таблица 2. Средние значения инсоляции земной поверхности, МДж/м² [Монин, 1982]

Географическая широта, град.	Северное полушарие (летнее полугодие)	Южное полушарие (зимнее полугодие)	Северное полушарие (зимнее полугодие)	Южное полушарие (летнее полугодие)	Северное полушарие (за год)	Южное полушарие (за год)
90	5434	0	0	5434	5434	5434
80	5432	75	159	5508	5591	5583
70	5542	443	608	5708	6150	6151
60	5962	1253	1480	6201	7442	7454
50	6419	2254	2538	6731	8957	8985
40	6754	3264	3634	7127	10 388	10 391
30	6930	4211	4634	7353	11 564	11 564
20	6922	5066	5522	7379	12 444	12 445
10	6729	5782	6260	7207	12 989	12 989
0	6344	6344	6834	6834	13 178	13 178
Среднее	6246.8	2869.2	3166.9	6548.2	9413.7	9417.4

Таблица 3. Солнечная радиация поступающая на поверхность земного эллипсоида в отсутствие атмосферы, МДж/м² (по данным В.М. Федорова)

Географическая широта, град.	Северное полушарие (летнее полугодие)	Южное полушарие (зимнее полугодие)	Северное полушарие (зимнее полугодие)	Южное полушарие (летнее полугодие)	Северное полушарие (за год)	Южное полушарие (за год)
0–5	6693.49	6453.05	6453.05	6693.49	13 146.54	13 146.54
5–10	6887.57	6168.07	6168.08	6887.57	13 055.64	13 055.64
10–15	7033.92	5840.85	5840.85	7033.92	12 874.77	12 874.77
15–20	7131.66	5474.10	5474.10	7131.66	12 605.76	12 605.76
20–25	7180.42	5071.00	5071.00	7180.42	12 251.43	12 251.43
25–30	7180.41	4635.19	4635.19	7180.41	11 815.60	11 815.60
30–35	7132.44	4170.79	4170.79	7132.44	11 303.23	11 303.23
35–40	7038.05	3682.54	3682.54	7038.05	10 720.60	10 720.59
40–45	6899.72	3175.89	3175.89	6899.71	10 075.60	10 075.60
45–50	6721.12	2657.33	2657.33	6721.12	9378.45	9378.45
50–55	6507.86	2135.06	2135.06	6507.85	8642.92	8642.91
55–60	6268.91	1620.40	1620.40	6268.90	7889.31	7889.30
60–65	6020.85	1132.03	1132.03	6020.84	7152.88	7152.87
65–70	5808.16	716.33	716.32	5808.14	6524.49	6524.47
70–75	5677.58	421.46	421.46	5677.56	6099.05	6099.03
75–80	5595.50	215.07	215.07	5595.47	5810.57	5810.54
80–85	5545.63	81.82	81.82	5545.61	5627.45	5627.43
85–90	5521.89	16.27	16.27	5521.87	5538.16	5538.14
Среднее	6491.40	2981.51	2981.51	6491.39	9472.91	9472.90

приведенным М. Миланковичем, это значение равно 26.455 МДж/м², по данным А.С. Монины – 25.801 МДж/м², по нашим данным – 25.953 МДж/м². Близкими оказываются и отношения средних суммарных величин поступающей солнечной радиации в зимнее и летнее полугодия. По результатам расчетов М. Миланковича это отношение составило 0.466 (поскольку в этом случае принимается энергетическая эквивалентность полушарий, то значение относится к каждому из них). Результаты расчетов А.С. Монины [1982] и автора настоящей статьи приведены в табл. 4.

Таблица 4. Средние значения солнечной радиации (МДж/м²), поступающей в Северное и Южное полушария Земли за полугодия и их отношение

Полугодие (для полушария)	По данным А.С. Монины [1982]		По данным автора	
	Южное полушарие	Северное полушарие	Южное полушарие	Северное полушарие
Зимнее	2869.2	3166.9	2981.513	2981.514
Летнее	6548.2	6246.8	6491.391	6491.399
Зимнее / летнее	0.438	0.507	0.459	0.459

Таким образом, отмечается достаточно хорошая согласованность между рассчитанными М. Миланковичем, А.С. Мониным и автором настоящей статьи средними значениями приходящей солнечной радиации. Расчеты, выполненные А.С. Мониным [1982], охватывают более длительный период (1 млн лет в прошлое и в будущее), чем у нас; вероятно, поэтому данные, приведенные в табл. 4, несколько различаются. Кроме того, шаг при интегрировании в расчетах, выполненных А.С. Мониным, составлял 5000 лет, в нашем случае – 1 сут.

Полученные нами значения радиации для различных широтных зон и разных астрономических сезонов также хорошо согласуются с данными, приводимыми в работах по климатологии [Дроздов и др., 1989; Хромов, Петросянци, 2006]. Отмеченная согласованность средних значений приходящей радиации позволяет считать полученные в результате наших расчетов данные вполне корректными для последующего анализа.

Многолетние вариации солнечной радиации

В представленной на графике (рис. 1) многолетней изменчивости приходящей радиации на фоне общего сокращения проявляются межгодовые, 2-, 3-, 8-, 11- и 19-летние вариации [Fedorov, 2012, 2013, 2014]. Уменьшение радиации характерно для всего рассматриваемого нами периода. Межгодовая изменчивость связана с периодическими возмущениями орбитального движения Земли Луной, планетами Солнечной системы и изменением наклона оси ее вращения. Изменчивость с периодом 2 и 3 года объясняется возмущением орбитального движения Земли Марсом и Венерой. Известно, что в параметрах движений планет и их спутников выдерживается ряд особых соотношений вследствие наличия соизмеримостей и резонансов [Гребеников, Рябов, 1978]. Условия резонанса определяются равенством частот вынужденных (под действием внешней силы) и собственных колебаний. Так, сидерический период Венеры составляет 224.701 сут (0.61521 тропических лет), Марса – 686.980 сут (1.88089 тропических лет), Земли (звездный год) – 365.256 сут (1.00004 тропических лет). Частоты обращения планет ($\omega = 2\pi/T$) составляют: для Венеры – $0.0279624 \text{ сут}^{-1}$, для Марса – $0.0091460 \text{ сут}^{-1}$, для Земли – $0.0171894 \text{ сут}^{-1}$. Отсюда следует $2\omega_{\text{Марса}} (0.0182920 \text{ сут}^{-1}) - \omega_{\text{Земли}} (0.0171894 \text{ сут}^{-1}) = 0.0011026 \text{ сут}^{-1}$ и $3\omega_{\text{Венеры}} (0.0838872 \text{ сут}^{-1}) - 5\omega_{\text{Земли}} (0.085947 \text{ сут}^{-1}) = -0.0020598$. Это свидетельствует о том, что в орбитальных движениях Земли с ближайшими планетами Марсом и Венерой существует соизмеримость, при этом резонанс Земли с Марсом равен 2/1, Земли с Венерой – 3/5 [Белецкий, 1972; Гребеников, Рябов, 1978]. Таким образом, каждые два года взаимные положения Земли с Марсом, а каждые три года Земли с Венерой повторяются, определяя периодические резонансные возмущения орбитального движения Земли и, следовательно, вариации продолжительности тропического года и поступающей к Земле за тропический год солнечной радиации. Период, близкий к 19 годам, связан с колебаниями наклона оси вращения в связи с нутацией (или периодом обращения узлов лунной орбиты).

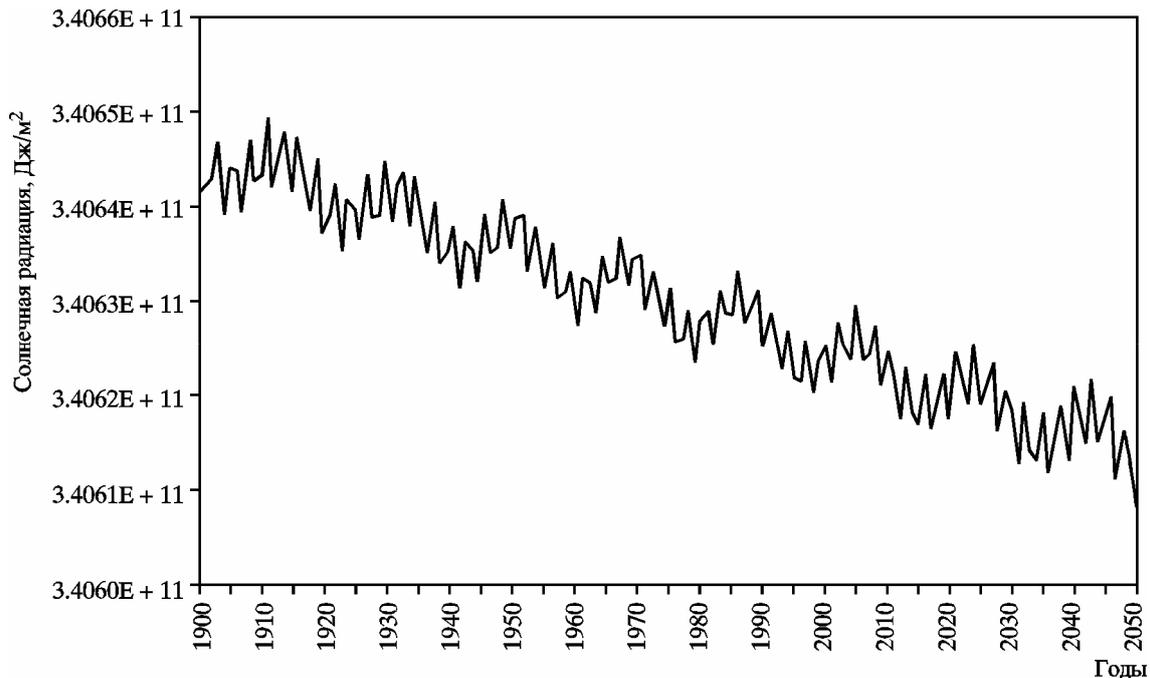


Рис. 1. Изменчивость приходящей к Земле солнечной радиации за тропические годы с 1900 по 2050 г. (календарный год соответствует началу тропического года)

Результаты расчетов позволили определить проявляющиеся на фоне общего сокращения приходящей радиации особенности, связанные с проявлением вековой и 19-летней изменчивости в приходе радиации. Вековая изменчивость оценивалась разностью значений приходящей радиации (Дж/м²) в последний (2999 г. н.э.) и первый (3000 до н.э.) год временного интервала для соответствующих широтных зон. Результаты расчетов показывают, что на фоне общего сокращения поступающей к Земле радиации в полярных областях Земли отмечается тенденция к сокращению, а в экваториальной области – к увеличению поступающей радиации (рис. 2).

Таким образом, широтные контрасты в современную эпоху возрастают. Следствием этого эффекта может быть усиление меридионального переноса тепла от экваториальной области к полярным районам в глобальном климате Земли. Сокращающийся поток солнечной радиации, приходящей к земному эллипсоиду за тропический год, проявляет тенденцию к увеличению в районах ниже 45° географической широты каждого полушария и к сокращению выше 45° широты на всем исследуемом временном интервале. Сокращение приходящей в полярные области радиации за весь период достигает $1.58E+08$ Дж/м², что составляет 2.8 % относительно среднего для всего интервала (5999 лет) значения приходящей радиации для широтных зон (85°–90° географической широты). Увеличение в экваториальной области значительно меньше – в районе экватора оно составляет $3.32E+07$ Дж/м² (0.25 %).

Отмеченный эффект пространственной изменчивости приходящей за тропические годы радиации связан с вековой тенденцией к уменьшению наклона оси вращения Земли (относительно перпендикуляра к плоскости эклиптики) в результате прецессии. Известно, что при увеличении угла наклона увеличивается приход 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 приэкваториальные районы, и широтные контрасты возрастают, а сезонные сглаживаются [Миланкович, 1939; Монин, Шишков, 1979; Монин, 1982].

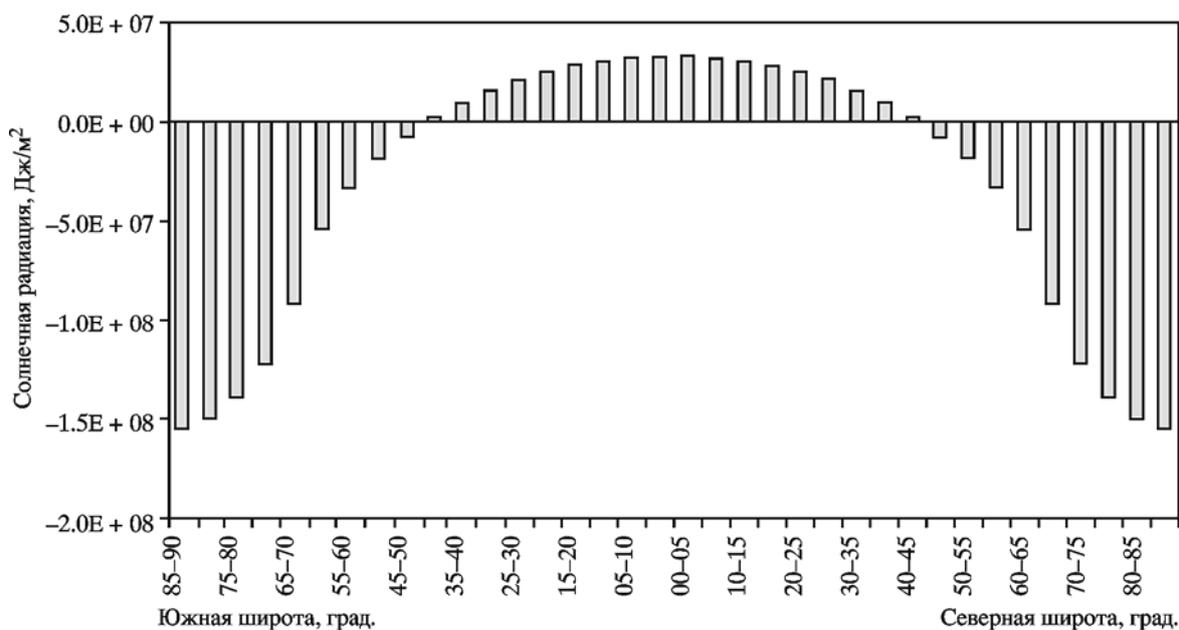


Рис. 2. Распределение разности поступающей в соответствующие широтные зоны Земли в отсутствие атмосферы солнечной радиации в 2999 г. н.э. и в 3000 г. до н.э.

На фоне отмеченной особенности в вековой изменчивости приходящей радиации проявляются осложняющие ее 19-летние вариации [Borisenkov et al., 1983, 1985; Федоров, 2012, 2013; Fedorov, 2012]. При определении пространственной структуры 19-летней вариации для упрощения расчетов исследовались разности в поступающей радиации 10-го и 1-го годов десятилетий в интервале с 1850 по 2019 г. Реальные фазы 19-летнего цикла, как показали ранее проведенные исследования, характеризуются продолжительностью 8 и 11 лет [Fedorov, 2013, 2014]. Полученные результаты показывают закономерные изменения в пространственной структуре приходящей радиации в различных фазах 19-летнего цикла. В первую половину цикла происходит сокращение поступающей радиации в полярные районы и увеличение ее в экваториальной области. В другую половину цикла отмечается противоположная ситуация – сокращение приходящей радиации в экваториальной области и ее увеличение в полярных районах (рис. 3). При этом одна фаза 19-летнего цикла усиливает отмеченную для вековой изменчивости тенденцию, другая – ослабляет ее.

Представленное на рис. 3 чередование в приходе радиации в полярные районы и в область, расположенную между Северным и Южным полярными кругами, характерно для всего исследуемого временного интервала (3000 г. до н.э. – 2999 г. н.э.). Смена знака в 19-летней изменчивости локализуется в широтном диапазоне от 35° до 65° широты каждого полушария. При этом в полушариях в различные фазы цикла протяженность широтных зон сокращения и увеличения приходящей радиации может существенно отличаться. Анализ всего массива рассчитанных нами данных показывает, что изменения радиации, приходящей в полярные районы и в экваториальную область, как правило, противофазны (если в полярных областях радиация увеличивается, то в экваториальных – уменьшается, и наоборот). Однако иногда для десятилетия сокращение приходящей радиации отмечается для всех широтных зон Земли (например, 1880–1889 гг. и 1910–1919 гг.). На период 2000–2009 гг. приходится фаза 19-летнего цикла, для которой характерно увеличение приходящей радиации в полярных районах и сокращение ее в обширной области, охватывающей широтный диапазон от 70° ю.ш. до 65° с.ш.

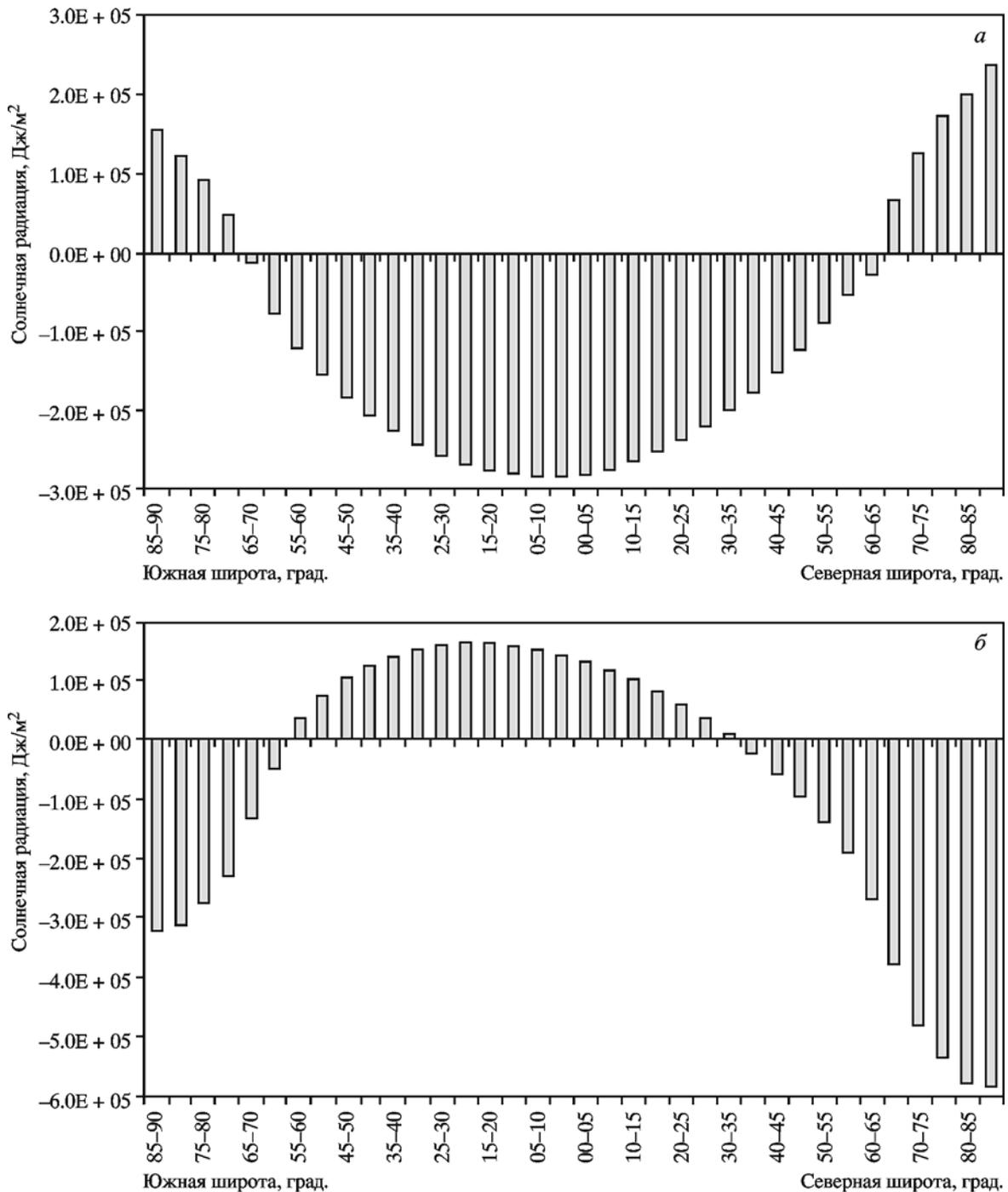


Рис. 3. Пространственная изменчивость проходящей солнечной радиации в 19-летнем цикле в фазы 2000–2009 гг. (а) и 2010–2019 гг. (б)

(см. рис. 3, а). С текущим десятилетием связана фаза, в течение которой происходит сокращение проходящей радиации в полярных областях и увеличение в приэкваториальной области. При этом (см. рис. 3, б) полярная область, для которой в этой фазе характерно сокращение проходящей радиации, в Северном полушарии более обширна, чем в Южном полушарии. Максимум увеличения проходящей радиации также смещен от экватора в Южное полушарие. Таким образом, в текущей фазе цикла отмечается пространственная асимметричность в поступающей на земной эллипсоид солнечной радиации. Средняя амплитуда 19-летней изменчивости в Южной полярной области

(85°–90° ю.ш.) составляет 0.00374 % ($2.06936E + 05$ Дж/м²), в Северной полярной области (85°–90° с.ш.) – 0.00369 % ($2.04554E + 05$ Дж/м²) от средней величины радиации, приходящей в соответствующие широтные зоны.

Таким образом, в пространственной структуре 19-летней вариации отмечается эффект, проявляющийся в последовательной смене знака приходящей радиации от одной фазы цикла к другой в полярных районах и экваториальной области. Этот эффект связан с нутационным изменением наклона оси вращения Земли с периодом ~19 лет. Его физическая природа аналогична отмеченному для вековой изменчивости эффекту, связанному с прецессией, – при меньшем угле наклона в экваториальной области происходит увеличение приходящей радиации, а в полярных районах – сокращение. При увеличении угла наклона наблюдается обратная картина.

С меньшими значениями средней амплитуды в приходе радиации проявляются межгодовая, 2-, 3-, 8- и 11-летняя периодичности [Fedorov, 2013, 2014]; однако пространственный характер этих изменений подобен отмеченной 19-летней периодичности. В годовом поступлении солнечной радиации к Земле средняя величина межгодовой изменчивости составляет 0.00115 % от величины поступающей радиации, при этом в полярных районах ее значение увеличивается до 0.00210 % ($1.16413E + 05$ Дж/м²) в Северной полярной области и до 0.00211 % ($1.16966E + 05$ Дж/м²) в Южной полярной области (рис. 4).

Средняя амплитуда 2- и 3-летней изменчивости, связанной с соизмеримостью в орбитальных движениях Земли, Марса и Венеры [Fedorov, 2013], составляет 0.00147 % ($3.91016E + 06$ Дж/м²) величины приходящей за год к Земле радиации и возрастает в экваториальной области (5° с.ш. – 5° ю.ш.) до 0.00156 % ($2.05302E + 05$ Дж/м²). При этом межгодовая изменчивость, связанная с периодом орбитального движения Земли вокруг Солнца, проявляется во всех широтных зонах. Изменчивость с периодом ~19 лет характерна для полярных областей. Изменчивость с периодичностью 2 и 3 года локализуется в широтном диапазоне, расположенном между Северным и Южным полярными

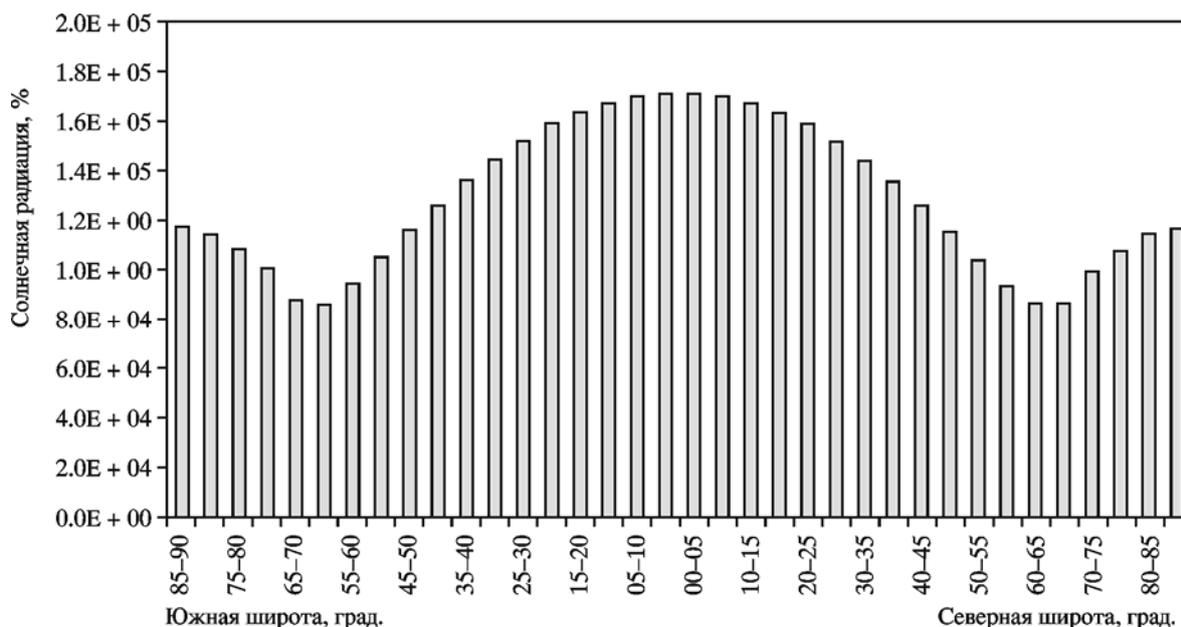


Рис. 4. Широтное распределение средней амплитуды межгодовой изменчивости приходящей к Земле за тропический год солнечной радиации за период с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э.

кругами. В этой же области со средними значениями амплитуды, составляющими 0.00184% ($6.27115E + 06$ Дж/м²) проходящей радиации, проявляются 8- и 11-летняя периодичности, которые являются результатом наложения (суперпозиции) 19-, 2- и 3-летней периодичностей. При этом 2- и 3-летние периодичности образуют 8 ($2 + 3 + 3$)- и 11 ($2 + 3 + 3 + 3$)-летние сочетания, синхронизированные с 8- и 11-летними фазами 19-летнего цикла. Таким образом, 8- и 11-летние циклы представляют собой результат синхронизации и суперпозиции 19-, 2- и 3-летних колебаний. В экваториальной области (5° с.ш. – 5° ю.ш.) средняя амплитуда 8- и 11-летней периодичности увеличивается до 0.002% ($2.64490E + 05$ Дж/м²).

Полученная картина временных и пространственных изменений в проходящей к Земле солнечной радиации может находить отражение в радиационном и тепловом режиме планеты. Так, например, при спектральном анализе результатов исследования изотопно-кислородного состава ледяного керна в Антарктиде обнаружен преобладающий пик в диапазоне 19 лет [Владимирова, Екайкин, 2014]. Отмеченный выше эффект противофазного изменения проходящей в полярные районы и в экваториальную область солнечной радиации в 19-летнем цикле может проявляться и в циркуляционных процессах в атмосфере; например, в качестве механизма, участвующего в регулировании интенсивности меридионального переноса воздушных масс. Отмеченная ритмичность с периодами 2, 3 года и 8, 11, 19 лет может проявляться и в биосферных процессах.

Вековые вариации солнечной радиации

Вековая изменчивость проходящей солнечной радиации рассчитывалась вычитанием значений проходящей солнечной радиации в 3000 г. до н.э. из соответствующих (по времени и пространству) прогнозируемых значений солнечной радиации в 2999 г. н.э. (рис. 5).

Полученные результаты (см. рис. 5) демонстрируют следующие особенности внутривековой тенденции изменения проходящей солнечной радиации.

1. В зимние для полушарий полугодия поступление солнечной радиации увеличивается, а в летние – сокращается (сезонные различия сглаживаются). Анализ изменения проходящей радиации на рассматриваемом интервале к Земле по полушариям и полугодиям показывает, что в летние для полушарий полугодия сокращение составляет $1.19E + 09$ Дж/м², а в зимние – увеличение составляет $6.10E + 08$ Дж/м².

2. В зимнее для полушарий полугодие наиболее существенное увеличение проходящей радиации отмечается в 3-й месяц (точнее, 1/3 астрономического сезона) осеннего сезона и 1-й месяц зимнего сезона в каждом полушарии. Максимальное увеличение проходящей радиации отмечается в широтном диапазоне, расположенном между 35° и 50° широты соответствующего полушария.

3. В летнее для полушарий полугодие наиболее существенное сокращение проходящей к Земле радиации характерно для 2-го и 3-го месяцев (точнее, 1/3 астрономического сезона) весеннего сезона и 1-го и 2-го месяцев летнего сезона в каждом полушарии. Сокращение в отмеченные сезоны последовательно увеличивается с увеличением широты.

4. Выделяются «мертвые» зоны – полярные области, не получающие на протяжении всего рассматриваемого нами интервала (5999 лет) солнечной радиации в отдельные сезоны. В течение 2-го и 3-го месяцев осени и двух первых зимних месяцев (первые 2/3 сезона) широтные зоны от 80° до 90° широты в каждом полушарии солнечной радиации не получают вовсе. В последнюю треть осени и первую треть зимы приход солнечной радиации также равен нулю в зонах от 70° до 80° широты в каждом полушарии.

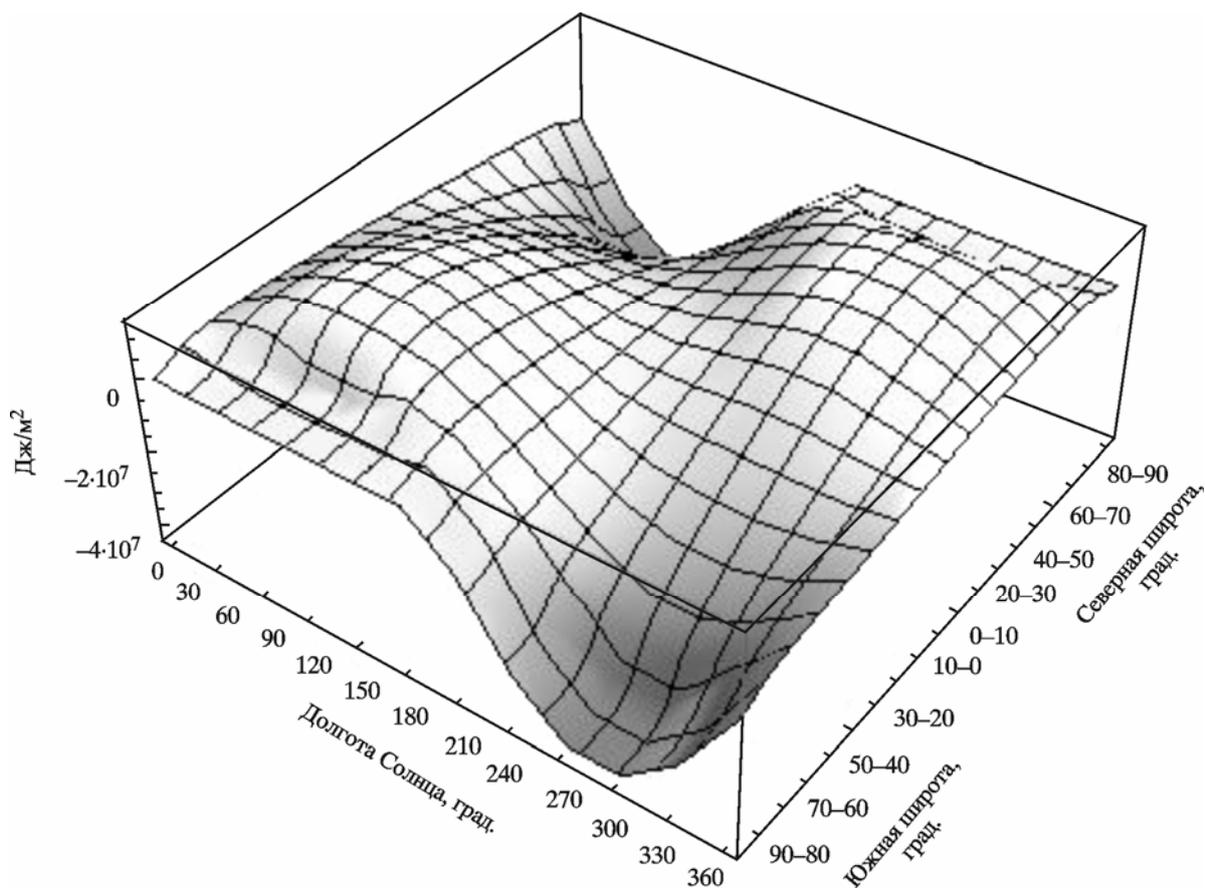


Рис. 5. Пространственно-временная изменчивость приходящей к Земле солнечной радиации в отсутствие атмосферы в интервале 3000 г. до н.э. – 2999 г. н.э.

5. Выделяется приэкваториальная зона (5° ю.ш. – 5° с.ш.), для которой характерно увеличение приходящей радиации на исследуемом интервале в течение всего года. Эта область расширяется до широты 10° во 2-й и 3-й месяцы весны и первые две трети лета каждого полушария, и до широты 15° – в последнюю треть весеннего сезона и первую треть летнего сезона в каждом полушарии.

Вековая тенденция в поступлении солнечной радиации характеризуется максимальным сокращением в периоды года, близкие к солнцестояниям, и минимальным сокращением в периоды, близкие к равноденствиям (рис. 6). Годовое поступление солнечной радиации имеет обратную направленность по отношению к годовому ходу вековой изменчивости сокращения солнечной радиации (рис. 7), т.е. на исследуемом интервале (3000 г. до н.э. – 2999 г. н.э.) вековая изменчивость приходящей радиации и приходящая за год радиация находятся в противофазе. Отмеченное противофазное распределение проявляется, во-первых, в том, что в летних полушариях приходящая радиация сокращается, а в зимних – увеличивается. В годовом же приходе максимальные значения приходятся на летние полушария, а минимальные – на зимние. Во-вторых, максимальные сокращения в вековой изменчивости приходятся на равноденствия, а минимальные – на солнцестояния. В годовом приходе радиации, наоборот, для равноденствий отмечается максимальное поступление радиации, а для солнцестояний – минимальное. Это свидетельствует о сглаживании различий между полугодиями в обеспеченности солнечной радиацией. Этот вывод подтверждается сравнением данных, приведенных на рис. 5 и рис. 8.

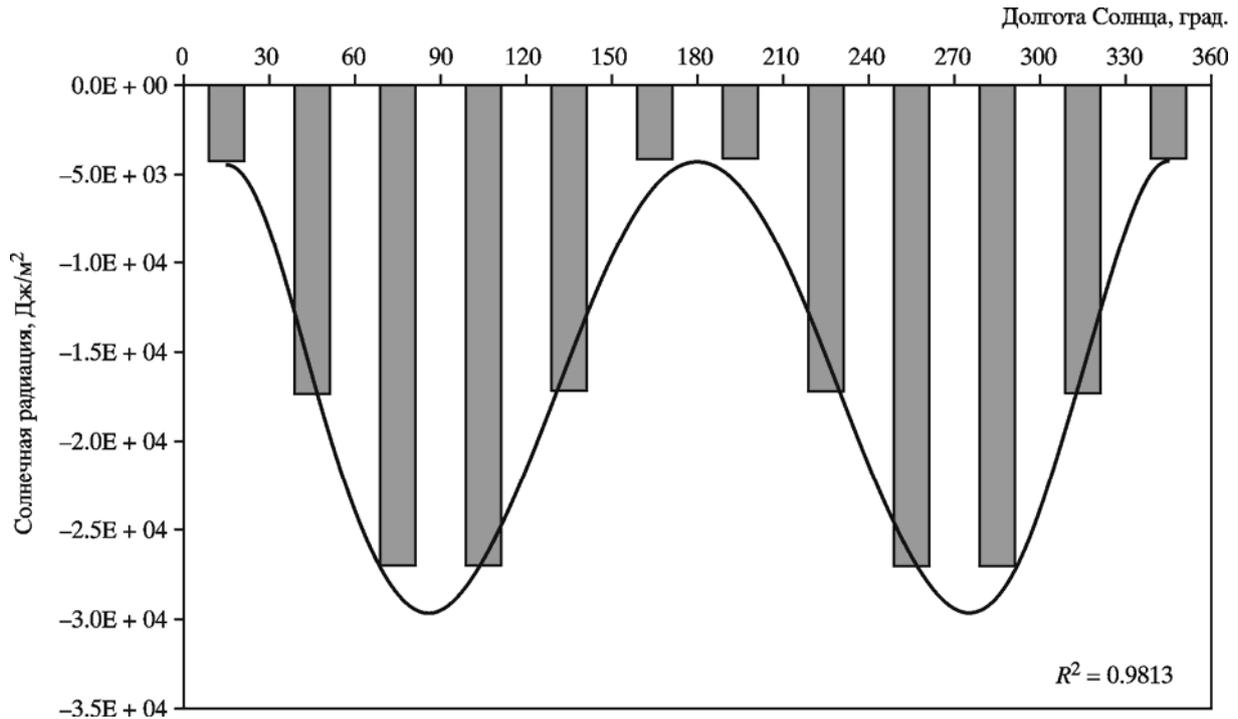


Рис. 6. Вековые тенденции в годовом ходе приходящей к Земле солнечной радиации за период с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. с шагом в 1/12 часть тропического года

Начало графика соответствует точке весеннего равноденствия. График аппроксимирован полиномом 6-й степени

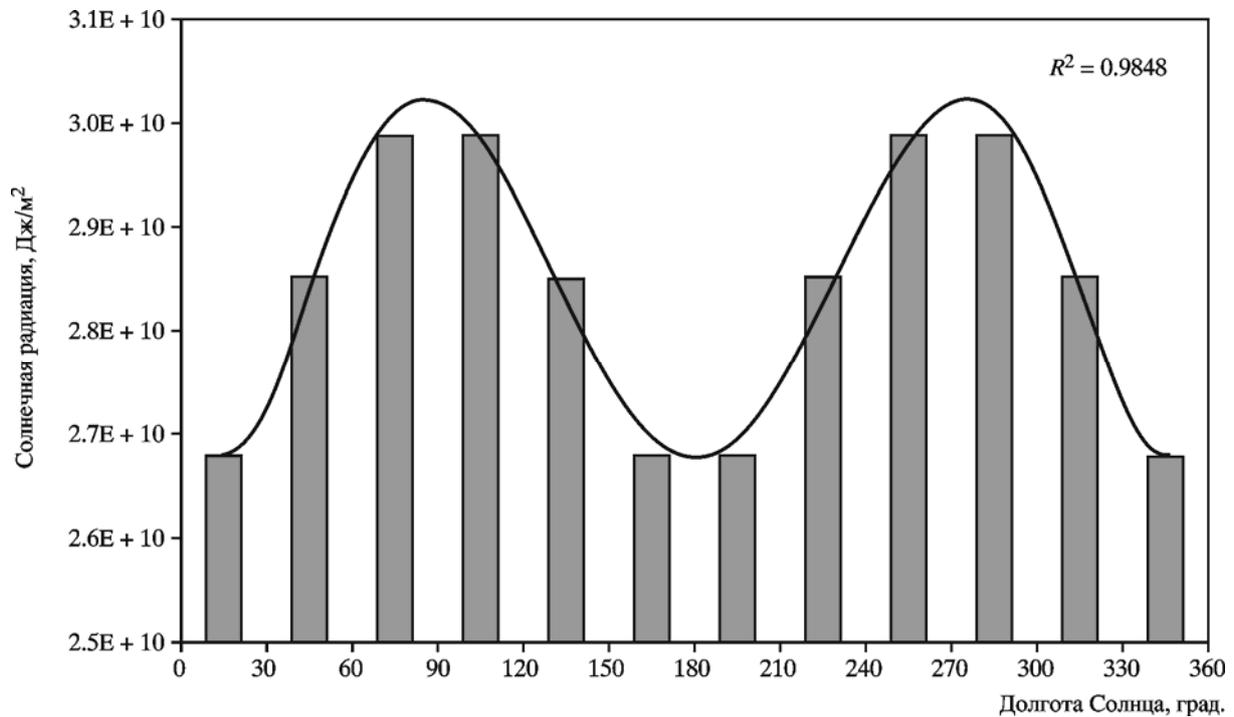


Рис. 7. Годовой ход приходящей к Земле солнечной радиации (в отсутствие атмосферы) с шагом в 1/12 часть тропического года в 2014 г.

Календарному году соответствует начало тропического года (весеннее равноденствие). График аппроксимирован полиномом 6-й степени

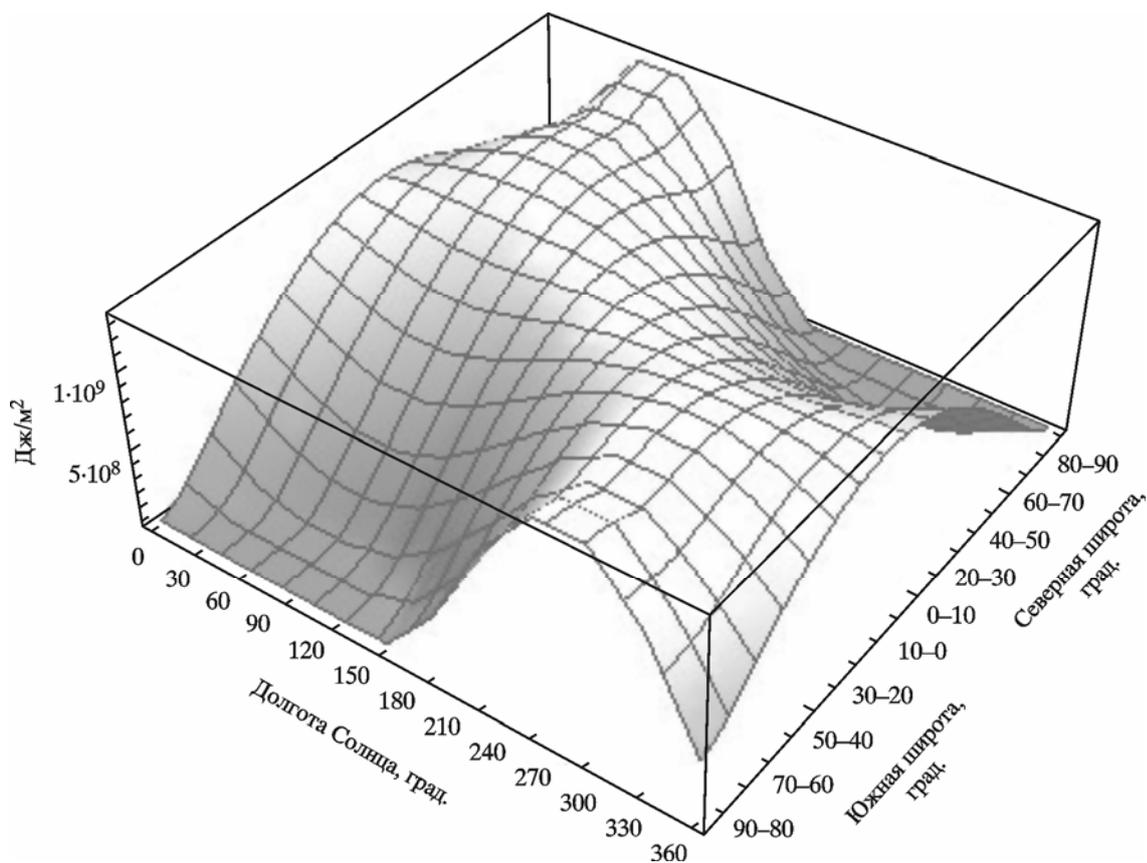


Рис. 8. Пространственно-временное распределение поступающей на поверхность эллипсоида Земли солнечной радиации (в отсутствие атмосферы) в 2014 тропическом году

Межгодовая изменчивость солнечной радиации

Отдельно за рассматриваемый период исследовались особенности межгодовой изменчивости поступающей к Земле за год (см. рис. 4) и в течение полугодий (рис. 9, 10) солнечной радиации. В летнее (для Северного полушария) полугодие средняя амплитуда межгодовой изменчивости в Южном полушарии составляет 0.00342 % по отношению к суммарной за полугодие (абсолютные значения амплитуды межгодовой изменчивости приведены на графиках); в Северном полушарии это значение составляет 0.00155 %. В 2- и 3-летних циклах амплитуда межгодовой изменчивости приходящей солнечной радиации возрастает до 0.00399 % в Южном полушарии и до 0.00198 % – в Северном полушарии. В 8-, 11- и 19-летних циклах амплитуда межгодовой изменчивости достигает максимальных величин: 0.00486 % – в Южном полушарии и 0.0024 % – в Северном полушарии. В Южной полярной области (85°–90° ю.ш.) в это время средняя величина межгодовой изменчивости составляет 0.04338 %. В 2- и 3-летних циклах она увеличивается до 0.05381 %, в 8- и 11-летних – до 0.06779 %. В Северной полярной области (85°–90° с.ш.) в летнее полугодие среднее значение межгодовой изменчивости составляет 0.00211 %. В ее изменчивости проявляется только 19-летний цикл, средняя амплитуда которого равняется 0.0037 %.

В зимнее (для Северного полушария) полугодие межгодовая изменчивость существенно меньше, чем в летнее полугодие. В Южном полушарии среднее значение межгодовой изменчивости составляет 0.0008 % (в 19-летнем цикле – 0.00169 %). В Северном

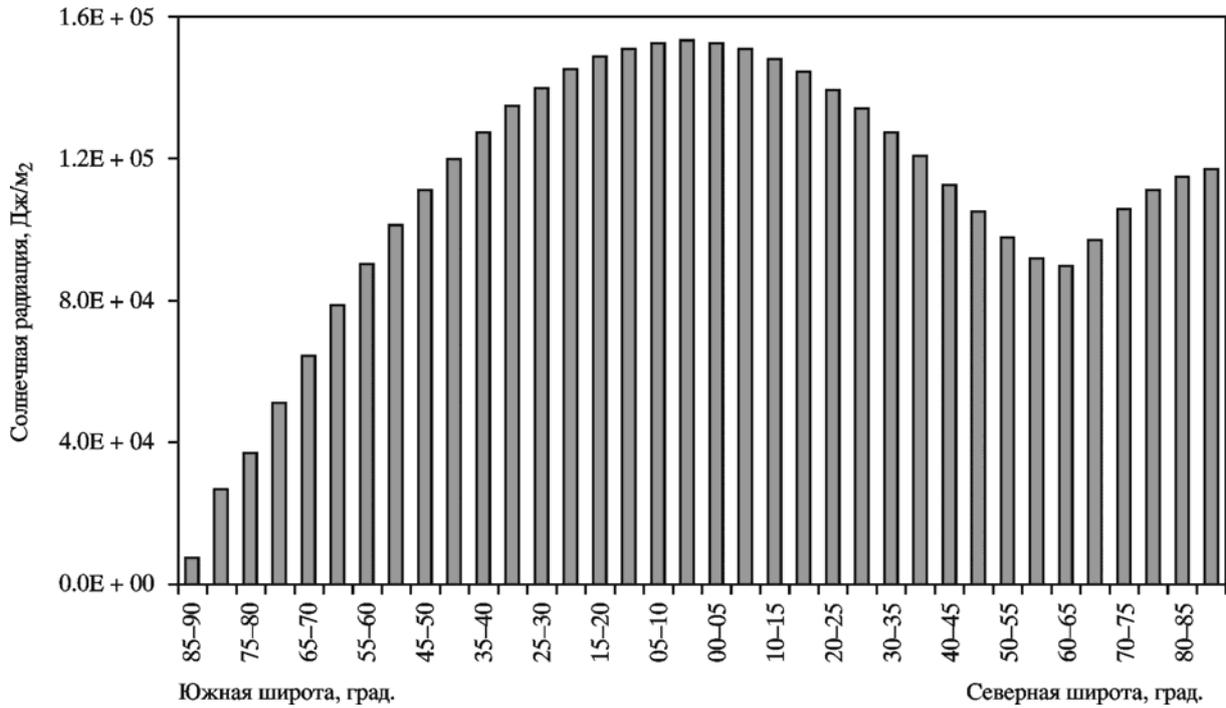


Рис. 9. Широтное распределение средней амплитуды межгодовой изменчивости солнечной радиации, поступающей в летнее (для Северного полушария) полугодие на поверхность земного эллипсоида (в отсутствие атмосферы)

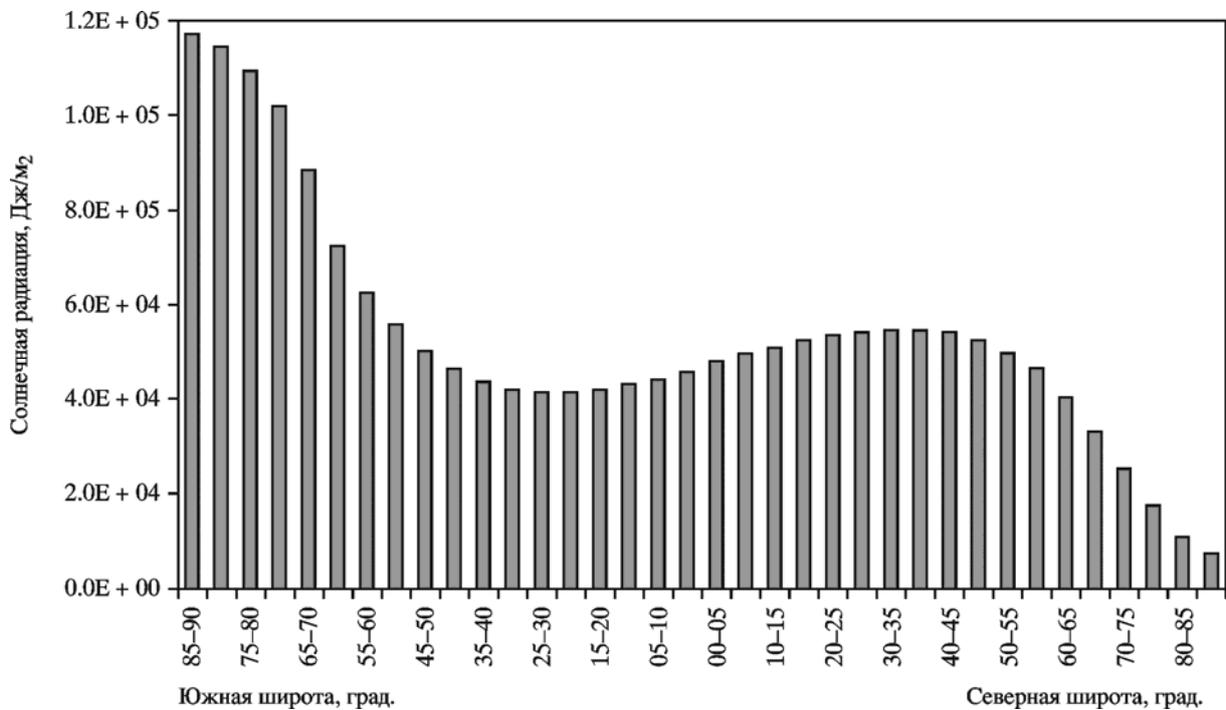


Рис. 10. Широтное распределение средней амплитуды межгодовой изменчивости солнечной радиации, поступающей в зимнее (для Северного полушария) полугодие на поверхность земного эллипсоида (в отсутствие атмосферы)

полушарии средняя амплитуда межгодовой изменчивости несколько больше – 0.00134 %. Межгодовая изменчивость в Южной полярной области в это время характеризуется средней амплитудой равной 0.00213 % (в 19-летнем цикле – 0.00376 %). Средняя величина межгодовой изменчивости в Северной полярной области составляет 0.04286 %, в 2- и 3-летних циклах – 0.05359 %, в 8- и 11-летних циклах – 0.06781 %.

Таким образом, максимальные амплитуды межгодовой изменчивости в летнее (для Северного полушария) полугодие характерны для Южной полярной области (где для нее отмечаются 2-, 3-, 8- и 11-летние колебания). В Северной полярной области в это время межгодовая изменчивость характеризуется 19-летней периодичностью. В зимнее (для Северного полушария) полугодие максимальные значения характерны для Северной полярной области, где они характеризуются колебаниями с периодами 2, 3, 8 и 11 лет. В Южной полярной области в это время межгодовая изменчивость регулируется 19-летним циклом. В зимнее для полушарий полугодие амплитуды межгодовой изменчивости по средним значениям уступают летним.

Заключение

Анализ результатов расчетов приходящей солнечной радиации к земному эллипсоиду в отсутствие атмосферы позволяет сделать следующие выводы.

1. В современную эпоху (от 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э.) происходит сокращение приходящей к Земле солнечной радиации. Сокращение радиации связано с вековым изменением наклона оси вращения Земли. В приходящей к Земле солнечной радиации проявляется межгодовая изменчивость и периодичность равная 2, 3, 8, 11 и 19 годам. В полярных районах преобладает 19-летняя периодичность. В экваториальных районах максимальные амплитуды отмечаются для 2- и 3-летней периодичности. 2- и 3-летняя периодичность образует 8- и 11-летние циклы (2 + 3 + 3 и 2 + 3 + 3 + 3), которые в сумме составляют 19-летний цикл. Полученная периодичность определяется суперпозицией и синхронизацией нутационного цикла и возмущением, связанным с соизмеримостью в орбитальных движениях Земли, Марса и Венеры.

2. Поступление солнечной радиации в экваториальные районы Земли в современную эпоху несколько увеличивается, а в полярные районы существенно сокращается. Таким образом, происходит увеличение межширотного градиента в поступающей на земной эллипсоид в отсутствие атмосферы солнечной радиации (широтные контрасты увеличиваются).

3. Для нутационного 19-летнего цикла отмечается смена сокращения и увеличения поступающей солнечной радиации в экваториальных и полярных районах по фазам цикла, приблизительно равным половине периода. Этот эффект связан с наклоном оси вращения Земли в результате нутации.

4. В вековой тенденции в летних полушариях приходящая радиация сокращается, а в зимних – увеличивается (сезонные различия сглаживаются). Максимальные сокращения в вековой изменчивости приходятся на дни равноденствия, а минимальные – на дни солнцестояния. В годовом поступлении радиации, наоборот, для равноденствий отмечается максимальное поступление радиации, а для солнцестояний – минимальное.

5. Максимальные абсолютные значения амплитуды межгодовой изменчивости солнечной радиации отмечаются в экваториальной и полярной областях. Минимальные значения характерны для широтных зон 60°–65° в каждом полушарии.

6. В летнее для Северного полушария полугодие максимальные (по абсолютным значениям) амплитуды межгодовой изменчивости характерны для экваториальной области, минимальные – для широтной зоны 60°–65° с.ш. В зимнее для Северного полушария полугодие максимальные значения амплитуды межгодовой изменчивости отмечаются в Южной полярной области, минимальные – в Северной полярной области и широтной зоне 25°–30° с.ш.

Отмеченные особенности поступления солнечной радиации и ее распределения по поверхности земного эллипсоида могут иметь значение при исследовании состояния и динамики биосферы.

Литература

- Абдусаматов Х.И.* Солнце диктует климат Земли. СПб.: Логос, 2009. 197 с.
- Белецкий В.В.* Очерки о движении космических тел. М.: Наука, 1972. 360 с.
- Берлянд Т.Г.* Тепловой баланс атмосферы Северного полушария // А.И. Воейков и современные проблемы климатологии. Л.: Гидрометеиздат, 1956. С. 226–252.
- Будыко М.И.* Изменение климата. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 280 с.
- Будыко М.И.* Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 351 с.
- Витинский Ю.И.* Солнечная активность. М.: Наука, 1983. 192 с.
- Витинский Ю.И., Оль Ю.А., Сазонов Б.И.* Солнце и атмосфера Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 351 с.
- Владимирова Д.О., Екайкин А.А.* Климатическая изменчивость в секторе моря Дейвиса (Восточная Антарктида) за последние 250 лет по данным геохимических исследований ледяного керна из скважины 105-й км // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 1 (99). С. 102–113.
- Воейков А.И.* Климаты земного шара, в особенности России // Собр. соч. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. Т. 1. С. 163–671.
- Войткевич Г.В., Вронский В.А.* Основы учения о биосфере. М.: Просвещение, 1989. 160 с.
- Гребеников Е.А., Рябов Ю.А.* Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. М.: Наука, 1978. 128 с.
- Дроздов О.А., Васильев Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный В.П.* Климатология. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 568 с.
- Кондратьев К.Я.* Глобальный климат и его изменения. Л.: Наука, 1987. 232 с.
- Кондратьев К.Я., Никольский Г.А.* Солнечная активность и климат // Докл. АН СССР. 1978. Т. 243, № 3. С. 607–610.
- Лоренц Э.Н.* Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 260 с.
- Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л.: ГОНТИ, 1939. 208 с.
- Монин А.С.* Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 246 с.
- Монин А.С., Шишков Ю.А.* История климата. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 408 с.
- Монин А.С., Шишков Ю.А.* Климат как проблема физики // Успехи физ. наук. 2000. Т. 170, № 4. С. 419–445.
- Нертин С.В., Чудновский А.Ф.* Энерго- и массообмен в системе растение–почва–воздух. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 358 с.
- Федоров В.М.* Теоретический расчет межгодовой изменчивости солнечной постоянной // Астрон. вестн. 2012. Т. 46, № 2. С. 184–189.
- Федоров В.М.* Межгодовые вариации продолжительности тропического года // Докл. РАН. 2013. Т. 451, № 1. С. 95–97.

- Хргиан А.Х. Физика атмосферы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 328 с.
- Хромов С.П., Петросянци М.А. Метеорология и климатология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. 582 с.
- Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. О вековых изменениях элементов орбиты Земли, влияющих на климаты геологического прошлого // Бюл. Ин-та теорет. астрономии АН СССР. 1967. Т. 11, № 4 (127). С. 231–261.
- 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.
- 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.
- Шнейдер С. Значение изменений потока солнечного излучения для Земли. Тропосфера // Поток энергии Солнца и его изменения / Ред. О. Уайт. М.: Мир, 1980. С. 26–29.
- Шулейкин В.В. Физика моря. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 990 с.
- Эйгенсон М.С. Солнце, погода и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 276 с.
- Эйгенсон М.С., Гневыхин М.Н., Оль А.И., Рубашев Б.М. Солнечная активность и ее земные проявления. М.; Л.: Гостехиздат, 1948. 286 с.
- Abbot C.G. Weather and solar variation // J. Solar Energy Sci. and Eng. 1957. V. 1. P. 3–5.
- Berger A. Long-term variation insolation and quaternary climatic change // J. Atmos. Sci. 1978. V. 35. P. 2362–2367.
- Berger A. Milankovitch theory and climate // Rev. of Geoph. 1988. V. 26. P. 624–657.
- Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years? // Quatern. Sci. Rev. 1991. V. 10. P. 297–317.
- 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., Eddy J.A. Combined effects of Earth orbit perturbations and Solar activity on terrestrial insolation. Pt. 1. Sample days and annual mean values // J. Atmosph. Sci. 1985. V. 42, N 9. P. 933–940.
- 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.
- Dudok de Wit T., Watermann J. Solar forcing of the terrestrial atmosphere // Geosci. 2010. V. 342. P. 259–272.
- Fedorov V.M. Interannual variability of the Solar constant // Solar System Res. 2012. V. 46, N 2. P. 170–176.
- Fedorov V.M. Interannual variations in the duration of the tropical year // Dokl. Earth Sci. 2013. V. 451. Pt. 1. P. 750–753.
- Fedorov V.M. Periodic perturbations and small variations of the Solar climate of the Earth // Docl. Earth Sci. 2014. V. 457. Pt. 1. P. 868–871.
- <http://ssd.jpl.nasa.gov>. NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Электронный ресурс Национального аэрокосмического агентства США.
- Laskar J. Secular evolution of the Solar system over 10 million years // Astron. Astrophys. 1988. V. 198. P. 341–362.
- Vernekar A. Long-period global variations of incoming solar radiation. 1972. 128 p. (Ser. «Meteorol. Monographs. Amer. Meteorol. Soc.». V. 12, N 34).

Сведения об авторе

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

THE SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF SOLAR CLIMATE OF THE EARTH AT PRESENT EPOCH

V.M. Fedorov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. The results of the study of the spatial-temporal variability of the solar climate of the Earth at present epoch with the periodic perturbations of the orbital motion and of the axial inclination due to precession and nutation accounted for. The specific of the temporal variability of the incoming solar radiation (without atmosphere) and the specific of the spatial distribution of the incoming solar radiation over the surface of the Earth's ellipsoid were determined based on the completed calculations. It was found that the incoming solar radiation is decreasing in the present epoch (from 3000 B.C. to 2999 A.C.) because of the secular change in the axial inclination of the Earth. The periodicity in the incoming solar radiation is equal to 2, 3, 8, 11 and 19 years. The radiation incoming to the equatorial regions is slightly increasing, while those incoming to the polar regions is considerably decreasing. Thus, the inter-latitudinal gradient in the incoming solar radiation (without atmosphere) is growing. The solar radiation is decreasing in summer hemispheres and increasing in the winter hemispheres in its secular tendencies. The annual variation in the incoming solar radiation has the opposite tendency relative to the secular variation.

Keywords: solar radiation, solar climate, present epoch, perturbed motion, spatial-temporal variability, periodicity, precession, nutation.