

УДК 551.581.1

ШИРОТНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРИХОДЯЩЕЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ ЦИКЛАХ

© 2015 г. В. М. Федоров

Представлено академиком РАН М.Ч. Залихановым 16.09.2013 г.

Поступило 16.09.2013 г.

DOI: 10.7868/S0869565215030196

Солнечная радиация – это фактор, определяющий основные характеристики глобального климата Земли. Приходящая к Земле радиация испытывает изменения как в пространстве (по широтам), так и во времени. Исследование причин и особенностей пространственно-временной изменчивости приходящей от Солнца радиации может представлять интерес при изучении причин изменения глобального климата Земли [6].

По данным астрономических эфемерид DE-406 [12] были рассчитаны значения приходящей солнечной радиации (при отсутствии атмосферы) для широтных зон (протяженностью в 5° широты) земного эллипсоида за тропические годы в интервале с 3000 г. до н.э. по 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-Geodetic Reference System, 1980) с длинами полуосей 6378137 м (большие) и 6356752 м (малая). В качестве основной формулы при расчетах использовано выражение

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

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 прямоугольной 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).

В расчетах учтено изменение расстояния между Землей и Солнцем и продолжительности периода обращения Земли (продолжительности тропического года) в связи с периодическими возмущениями орбитального движения Земли [7, 8, 11]. Ранее приходящая радиация рассчитывалась с учетом вековых возмущений наклона оси вращения Земли и орбитальных элементов – эксцентриситета и долготы перигелия [3–5, 9, 10]. Периодические вариации таких орбитальных элементов, как расстояние между Землей и Солнцем и продолжительность периода обращения Земли, не учитывались [7, 8].

Полученные на основе расчетов результаты позволили определить проявляющиеся на фоне общего сокращения приходящей радиации (рис. 1) эффекты, связанные, прежде всего, с проявлением вековой и 19-летней изменчивости в приходе радиации.

Вековая изменчивость оценивалась разностью значений приходящей радиации ($\text{Дж}/\text{м}^2$) в последний (2999 г. н.э.) и первый (3000 г. до н.э.) го-



Рис. 1. Многолетняя изменчивость приходящей к Земле солнечной радиации в интервале с 1850 по 2019 г.



Рис. 2. Распределение приходящей радиации по широтным зонам (в процентах от среднего для широтной зоны значения).

ды временного интервала для соответствующих широтных зон. Результаты показывают, что на фоне общей тенденции 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 на исследуемом временном интервале возрастают. Следствием этого эффекта может быть постепенное 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, в районах ниже 45° широты каждого полушария проявляет тенденцию к увеличению, а выше 45° — к сокращению. Сокращение приходящей в полярные области радиации за весь период достигает $1.58 \cdot 10^8$ Дж/м², что составляет 2.8% относительно среднего (для всего интервала) значения приходящей радиации для широтных зон 85° – 90° географической широты. Увеличение в экваториальной области значительно меньше — в районе экватора составляет $3.32 \cdot 10^7$ Дж/м² (0.25%).

Отмеченный эффект пространственной изменчивости приходящей солнечной 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 [3–5].

На фоне отмеченной особенности в вековой изменчивости приходящей радиации отмечаются

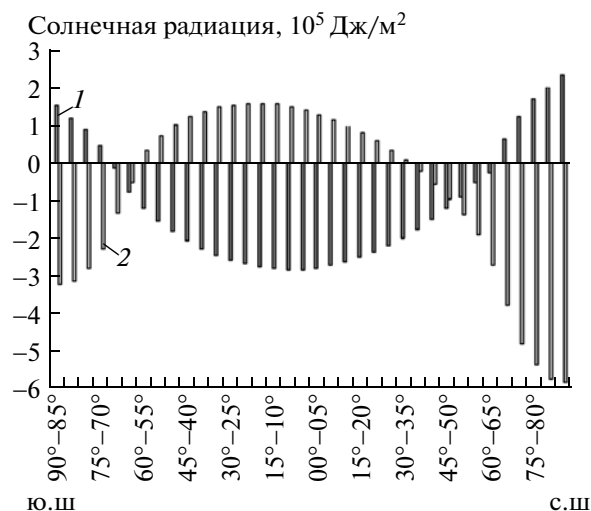


Рис. 3. Широтная изменчивость приходящей радиации в 19-летнем цикле (1 — в фазу 2000–2009 гг., 2 — в фазу 2010–2019 гг.).

осложняющие ее 19-летние вариации. 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 нами исследования, характеризуются продолжительностью 8 и 11 лет [7, 8, 11]. Результаты показывают закономерные изменения в пространственной структуре приходящей радиации в различных фазах 19-летнего цикла. Для одной половины цикла характерно 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 фаза ослабляет ее.

Представленное на рис. 3 чередование в приходе радиации в полярные районы и область, расположенную между полярными кругами, характерно для всего исследуемого временного интервала (3000 г. до н.э.—2999 г. н.э.). Смена знака в 19-летней изменчивости связана с широтным диапазоном от 35° до 65° в каждом полушарии. При этом в различные фазы цикла протяженность широтных зон сокращения и увеличения приходящей радиации в полушариях может существенно различаться (рис. 3). Анализ массива рассчитанных величин показывает, что знаки изменения радиации, приходящей в полярные районы и экваториальную область, как правило, противоположные. Однако имеются редкие случаи, для

которых сокращение проходящей радиации отмечается для всех широтных зон Земли (например, 1880–1889 гг. и 1910–1919 гг.). На период с 2000 по 2009 г. приходится фаза 19-летнего цикла, для которой характерно увеличение проходящей радиации в полярных районах и сокращение в обширной области, охватывающей широтный диапазон от 70° ю.ш. до 65° с. ш. (рис. 3).

С текущим десятилетием связана фаза, в течение которой происходит сокращение проходящей радиации в полярных областях и увеличение в приэкваториальной области. При этом полярная область, для которой в этой фазе характерно сокращение проходящей радиации, в северном полушарии более обширная, чем в южном. 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% ($2.06936 \cdot 10^5$ Дж/м²), в северной полярной области (85° – 90° с.ш.) – 0.00369% ($2.04554 \cdot 10^5$ Дж/м²) от средней величины радиации, проходящей в соответствующие широтные зоны.

Таким образом, определен широтный эффект 19-летней вариации в проходящей радиации, проявляющийся в последовательной смене знака в проходящей радиации от одной фазы цикла к другой в полярных районах и экваториальной области (рис. 3). Этот эффект связан с нутационным изменением наклона оси вращения с периодом около 19 лет, а его физическая природа аналогична отмеченному для вековой изменчивости эффекту, связанному с прецессией, – при меньшем угле наклона в экваториальной области происходит увеличение проходящей радиации, а в полярных районах сокращение. При увеличении угла наклона наблюдается обратная картина.

С меньшими значениями средней амплитуды в проходящей радиации проявляется межгодовая изменчивость. При этом в полярных районах знак межгодовой изменчивости определяется фазой 19-летнего цикла, т.е. межгодовая изменчивость в полярных областях имеет один и тот же знак (положительный или отрицательный) в течение 8- или 11-летней фазы 19-летнего цикла. Между полярными кругами знак меняется от года к году (как правило, во всей широтной полосе между полярными кругами) с периодичностью 2 или 3 года (образующими 8- и 11-летние сочетания). 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%

($1.16413 \cdot 10^5$ Дж/м²) в северной и до 0.00211% ($1.16966 \cdot 10^5$ Дж/м²) в южной полярной области. Средняя амплитуда двух- и трехлетней изменчивости, связанной с соизмеримостью в орбитальных движениях Земли, Марса и Венеры [8], составляет 0.00147% ($3.91016 \cdot 10^6$ Дж/м²) от величины проходящей за год к Земле радиации и возрастает в экваториальной области (5° с.ш.– 5° ю.ш.) до 0.00156% ($2.05302 \cdot 10^5$ Дж/м²).

Таким образом, межгодовая изменчивость, связанная с периодом орбитального движения Земли вокруг Солнца, проявляется во всех широтных зонах. Изменчивость с периодом около 19 лет характерна для полярных областей (здесь знак межгодовой изменчивости определяется фазой 19-летнего цикла). В широтном диапазоне, расположенном между северным и южным полярными кругами, двух- и трехлетняя периодичность образует 8- ($2+3+3$) и 11-летние ($2+3+3+3$) сочетания, синхронизированные с 8- и 11-летними фазами 19-летнего цикла [1]. Средние значения амплитуды 8- и 11-летних вариаций, являющихся результатом синхронизации наложения (суперпозиции) 19-летней и двух- и трехлетней периодичностей, составляют 0.00184% ($6.27115 \cdot 10^6$ Дж/м²) от проходящей радиации. В экваториальной области (5° с.ш.– 5° ю.ш.) средняя амплитуда 8- и 11-летней периодичности увеличивается до 0.00200% ($2.64490 \cdot 10^5$ Дж/м²). Отмеченными циклами, проявляющимися на фоне вековой изменчивости (цикла прецессии земной оси), описываются широтные вариации проходящей солнечной радиации.

Полученная картина временных и пространственных изменений в проходящей к Земле солнечной радиации может находить отражение в радиационном и тепловом режиме планеты [2], а также и изменчивости циркуляционных процессов в атмосфере. Так, отмеченный эффект противофазного изменения проходящей в полярные районы и экваториальную область солнечной радиации в исследуемых циклах может проявляться в циркуляционных процессах в атмосфере, например, в качестве механизма, участвующего в регулировании интенсивности меридионального переноса воздушных масс и перераспределения тепла.

Автор благодарен А.А. Костину за помощь в разработке методики расчетов проходящей радиации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блехман И.И.* Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. 896 с.
2. *Владимирова Д.О., Екайкин А.А.* В сб.: Материалы Междун. науч. конф. “Природные риски: анализ, оценка, картографирование”. М.: Изд-во МГУ, 2013. С. 64–65.

3. *Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.: ГОНТИ, 1939. 208 с.
4. *Монин А.С.* Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 246 с.
5. *Монин А.С., Шишков Ю.А.* История климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 408 с.
6. *Монин А.С., Шишков Ю.А.* // Успехи физ. наук. 2000. Т. 170. № 4. С. 419–445.
7. *Федоров В.М.* // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 2. С. 184–189.
8. *Федоров В.М.* // ДАН. 2013. Т. 451. № 1. С. 95–97.
9. *Шараф Ш.Г., Будникова Н.А.* // Тр. Ин-та теорет. астрономии АН СССР. 1969. В. 14. С. 48–84.
10. *Berger A., Loutre M.F.* // Earth and Planet. Sci. Lett. 1992. V. 111. P. 369–382.
11. *Fedorov V.M.* // Solar Syst. Res. 2012. V. 46. № 2. P. 170–176. DOI: 10.1134/S0038094612020049
12. <http://ssd.jpl.nasa.gov>. NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Электронный ресурс национального аэрокосмического агентства США.