

УДК 523.9-7

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРИХОДЯЩЕЙ НА ВЕРХНЮЮ ГРАНИЦУ АТМОСФЕРЫ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

© 2019 г. В. М. Федоров¹, Д. М. Фролов¹, *

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

*denisfrolov@mail.ru

Поступила в редакцию 20.11.2017 г.

После доработки 16.08.2018 г.

Принята к публикации 20.09.2018 г.

На основе рассчитанной ранее инсоляции Земли определены вариации в приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации, связанные в основном с изменением угла наклона оси вращения Земли в результате прецессии и нутации. Рассчитаны полугодовые и полушарные амплитуды вариаций приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации. Полученные результаты могут использоваться при точных расчетах радиационного баланса Земли, ее поверхности и атмосферы.

DOI: 10.1134/S002342061903004X

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная радиация является основным источником энергии, определяющим радиационный, тепловой баланс Земли. Годовой приход солнечной радиации на верхнюю границу атмосферы Земли (ВГА) в среднем в интервале от 1900 до 2100 гг. составляет $5.49 \cdot 10^{24}$ Дж [3, 8] или $1.0777 \cdot 10^{10}$ Дж/м². Этот приход во времени не является постоянным, он изменяется как во времени, так и в пространстве. Вариации приходящей к Земле лучистой энергии в основном определяются двумя причинами, имеющими различную физическую природу. Одной из причин является изменение активности в излучении Солнца. Другой причиной, определяющей изменение приходящей к Земле энергии, являются небесно-механические процессы, вызывающие изменения элементов земной орбиты [4–6] и наклона оси вращения. В работе рассматриваются пространственные и временные вариации, связанные с небесно-механическими процессами. Изменение активности Солнца не учитывается.

ВГА представляет собой условную поверхность, которая является началом отсчета энергетического (радиационного и теплового) баланса Земли, ее поверхности и атмосферы [2, 16, 17, 25–27]. При расчетах баланса принимаются различные (от 340 до 342 Вт/м²), но всегда стационарные значения энергетической характеристики ВГА

(обычно интенсивности солнечной радиации) [23, 24, 27].

Выполненные нами расчеты показывают, что приходящая на ВГА солнечная радиация испытывает изменения как во времени, так и в пространстве [7, 9–14]. При этом, выделяются многолетние тенденции и малые периодические вариации. Целью работы является оценка изменений начальных условий расчета радиационного баланса в связи с вариациями приходящей на ВГА солнечной радиации, определяемыми возмущениями орбитального движения Земли и наклона оси ее вращения. В качестве характеристики начальных условий расчета энергетического баланса нами использовалось значение приходящей на ВГА за тропический год солнечной радиации (Дж/м²), а не ее интенсивность (Вт/м²). Анализ и оценка вариаций приходящей на ВГА солнечной радиации проводится на интервале с 1900 по 2100 гг.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Расчеты приходящей солнечной радиации выполнялись нами по данным высокоточных астрономических эфемерид [15, 18] для всей поверхности Земли (без учета атмосферы) в интервале с 3000 г. до н. э. по 2999 г. н. э. Исходными астрономическими данными для расчетов инсоляции были склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода

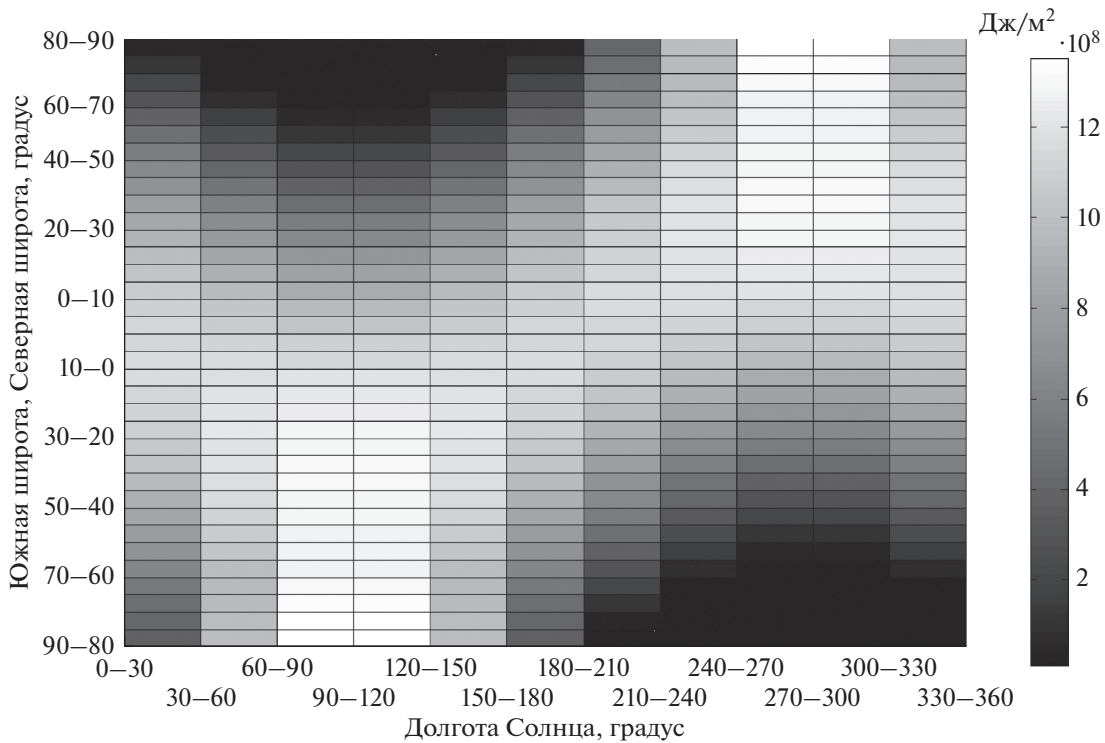


Рис. 1. Распределение приходящей солнечной радиации на ВГА в 2017 тропическом году (начало 2017-го тропического года приходится на 21.III 2017-го календарного года).

равномерно текущего (среднего солнечного) и всемирного корректируемого времени (истинного солнечного). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80 – Geodetic Reference System, 1980) с длинами полуосей равными 6378137 м (большие) и 6356752 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 (м^2), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал $\sigma(H, \varphi) d\alpha d\varphi$ – площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида; α – часовой угол, φ – географическая широта, выраженные в радианах; H – высота поверхности эллипсоида относительно поверхности Земли (м); $\Lambda(H, \varphi, t, \alpha)$ – инсоляция в заданный момент в заданном месте 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 [10]. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным $1361 \text{ Вт}/\text{м}^2$ [21]. По результатам расчетов для периода от 3000 г. до н. э. до 2999 г. н.э. была сформирована база данных приходящей на ВГА солнечной радиации в широтные зоны Земли (протяженностью в 5°) с шагом по времени в $1/12$ часть тропического года [19]. Изменение активности Солнца при расчетах не учитывалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами рассчитывались годовые значения с учетом изменения параметров орбитального движения Земли (расстояние Земля–Солнце, продолжительность тропического года, наклон оси вращения). Распределение суммарной солнечной радиации приходящей на ВГА в 2017 тропическом году представлено на рис. 1.

В действительности эта поверхность находится в постоянном изменении, отражающем вариации приходящей на ВГА солнечной радиации определяемые возмущениями орбитального движения Земли и, связанные с этими возмущениями, условия ее инсоляции. Эти вариации и анализируются в данной работе.

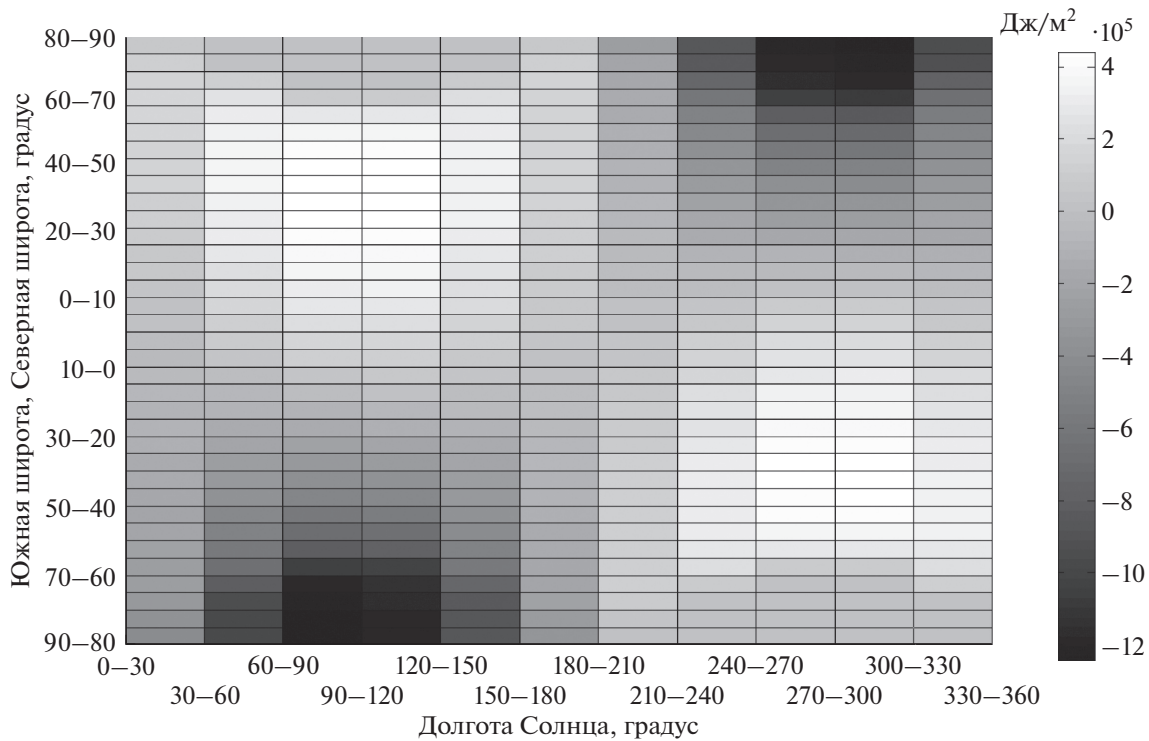


Рис. 3. Пространственные и временные изменения приходящей на ВГА за астрономический месяц солнечной радиации за период с 1900 по 2100 гг. (Дж/м²).

Таким образом, в полярных районах приходящая радиация сокращается. В целом, для интервала с 1900 по 2100 гг. отмечается увеличение широтной контрастности в приходящей на ВГА солнечной радиации и сглаживание сезонных различий. Эта тенденция определяется уменьшением угла наклона земной оси в результате прецессии [4, 7, 13]. Также отмечаются большие величины сокращения приходящей на ВГА солнечной радиации в летние полугодия, чем увеличения в зимние полугодия (рис. 4).

Суммарное за период с 1900 по 2100 гг. сокращение приходящей на ВГА в северное полушарие за летнее полугодие радиации характеризуется величиной $-3.6551 \cdot 10^7$ Дж/м². Это составляет 0.541% от среднего за период от 1900 до 2100 гг. значения приходящей в летнее полугодие в северное полушарие солнечной радиации. В зимнее полугодие поступление на ВГА в северное полушарие солнечной радиации увеличилось на $1.9878 \cdot 10^7$ Дж/м² (0.495%). Поступление в зимнее полугодие в южное полушарие солнечной радиации увеличилось на $2.1565 \cdot 10^7$ Дж/м² (0.554%), а в летнее полугодие сократилось на $-3.7401 \cdot 10^7$ Дж/м² (0.546%). Таким образом, отмечаются вековые пространственные и временные вариации приходящей на ВГА солнечной радиации, которые приводят к

изменениям начальных условий расчета энергетического баланса. Следует отметить, что рассчитанные для периода с 1900 по 2100 гг. изменения в полугодовой и полушарной инсоляции превышают известные вариации TSI (интенсивности приходящей солнечной радиации) в 11-ти летнем цикле солнечной активности (0.07%) [20].

На фоне отмеченной особенности в вековой изменчивости приходящей солнечной радиации (рис. 1) наиболее отчетливо проявляются осложняющие ее 19-ти летние вариации. При определении пространственной структуры 19-ти летней вариации с годовым разрешением для упрощения расчетов исследовались разности в поступающей радиации 10-го и 1-го годов десятилетий в интервале с 1900 по 2100 гг. Реальные фазы 19-ти летнего цикла, как показали ранее проведенные нами исследования, характеризуются продолжительностью 8 и 11 лет [7, 10, 11, 13]. Эти фазы образованы закономерными сочетаниями 2-х и 3-х летних циклов (2 + 3 + 3) и (2 + 3 + 3 + 3), которые связаны с соизмеримостью в средних движениях Земли с Марсом (2/1) и Венерой (3/5). Таким образом, через каждые 2 года взаимные положения Земли с Марсом и через 3 года Земли с Венерой относительно Солнца повторяются. Чередующиеся в рассчитанных рядах инсоляции 11-ти летние и 8-ми летние циклы в сумме составляют 19-ти

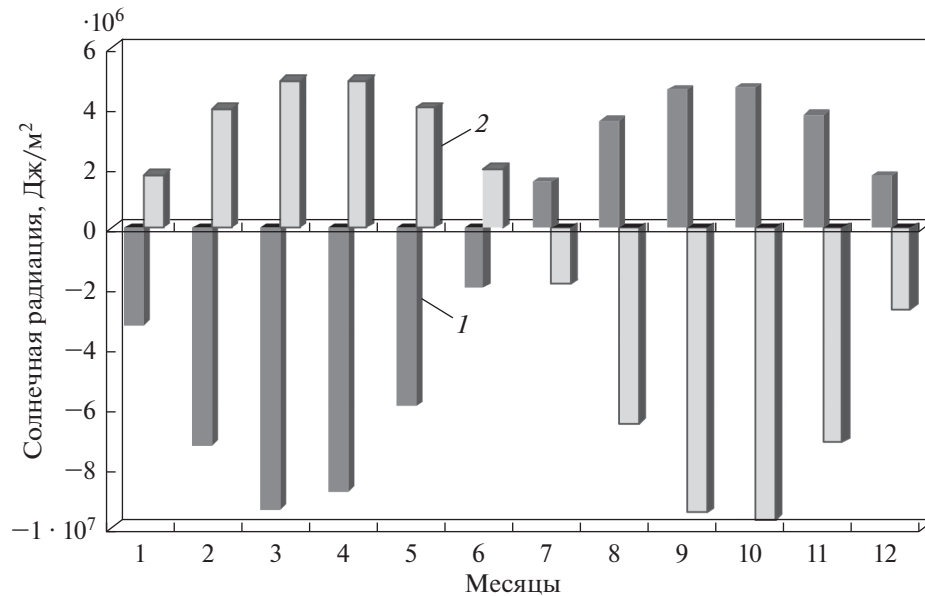


Рис. 4. Суммарное изменение приходящей на ВГА солнечной радиации в северном (1) и южном (2) полушариях на интервале с 1900 по 2100 гг.

летний цикл, влияющий на траекторию, скорость орбитального движения Земли и наклон оси ее вращения. Следовательно, отмечается синхронизация вариаций, определяемых возмущением ближайших планет (Венерой и Марсом) с 19-ти летним нутационным циклом, связанным со спутником Земли. С этими повторениями связаны периодические резонансные возмущения орбитального движения Земли и, следовательно, вариации солнечной постоянной, продолжительности тропического года и поступающей к Земле за тропический год энергии.

Результаты показывают закономерные изменения в пространственной и временной структуре приходящей солнечной радиации в различных фазах 19-ти летнего цикла. Для одной фазы цикла характерно сокращение поступающей на ВГА солнечной радиации в летние для полушарий полугодия и увеличение в зимние полугодия (рис. 5).

В другую фазу цикла отмечается противоположная ситуация – сокращение приходящей солнечной радиации в зимние полугодия и увеличение в летние (рис. 6).

Таким образом, одна фаза 19-ти летнего цикла усиливает отмеченную для вековой изменчивости тенденцию, другая фаза ослабляет ее. Однако, области сокращения и увеличения на интервале с 1900 по 2100 гг. существенно изменяются в пространстве (полушария) и во времени (полугодии) в фазах различных 19-ти летних циклов. Например, в фазе цикла 2021–2012 гг. сокращение характерно, главным образом, для зимнего в север-

ном полушарии полугодия (рис. 5). Оно отмечается почти на всей территории полушария и суммарно составляет $-1.6534 \cdot 10^6$ Дж/м² (0.041%) для всего зимнего полугодия. В зимнее в южном полушарии полугодие сокращение приходящей радиации имеет локальный характер. Оно отмечается в узком пространственном и временном диапазоне – с 3-го по 5-й астрономические месяцы в областях от 40° до 70° ю.ш. В летнее полугодие для этой фазы в северном полушарии отмечается увеличение приходящей радиации (исключение составляет 1-й астрономический месяц в широтном диапазоне от 40° до 90° с.ш. где отмечается сокращение). Суммарное увеличение приходящей в северное полушарие за летнее полугодие солнечной радиации составляет 4.2448 Дж/м² (0.063%). В летнее для южного полушария полугодие суммарное увеличение в эту фазу цикла приходящей радиации составляет 2.5143 Дж/м² (0.037%).

Другая фаза 19-ти летнего цикла 2030–2021 гг. выражена более четко (рис. 6). В течение всего летнего полугодия в северном полушарии в эту фазу отмечается сокращение приходящей на ВГА солнечной радиации. Исключение составляет 1-й астрономический месяц (во всем широтном диапазоне в это время отмечается увеличение). Общее сокращение приходящей радиации в летнее полугодие в северном полушарии в эту фазу цикла составляет $-5.2707 \cdot 10^6$ Дж/м² (0.078%). В зимнее полугодие в северном полушарии отмечается увеличение (кроме “мертвых зон”). Общее увеличение составляет $2.9869 \cdot 10^6$ Дж/м²

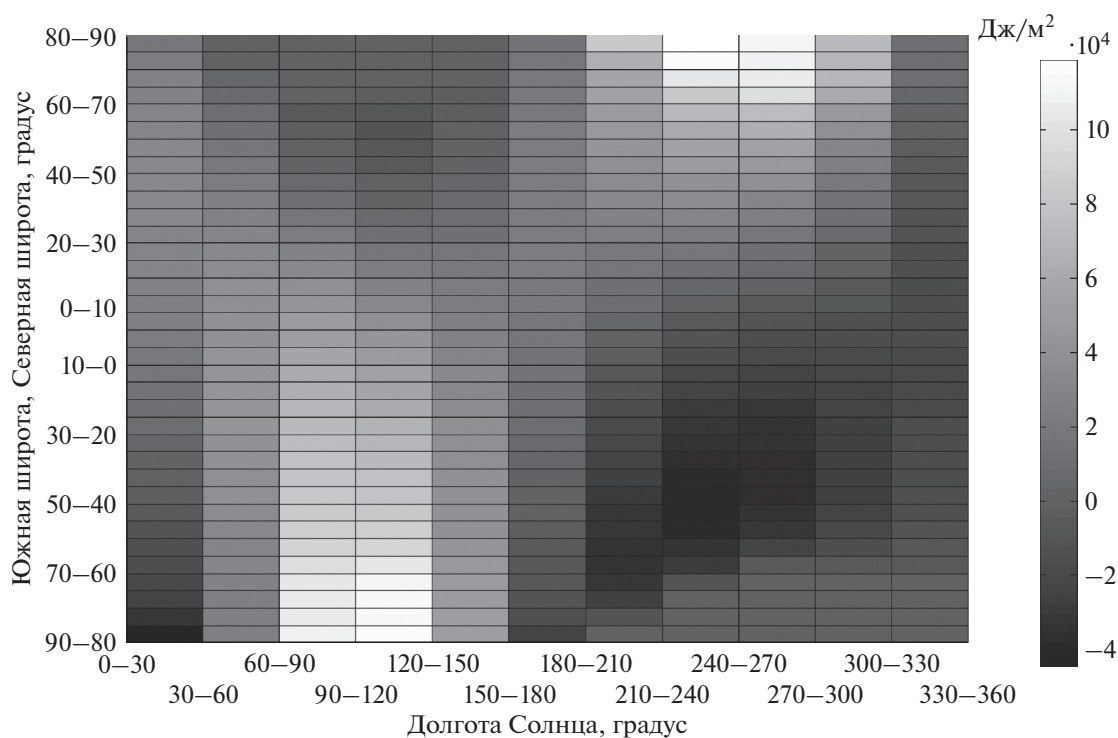


Рис. 5. Пространственная и временная изменчивость приходящей на ВГА солнечной радиации в фазе 19-ти летнего цикла 2021–2012 гг.

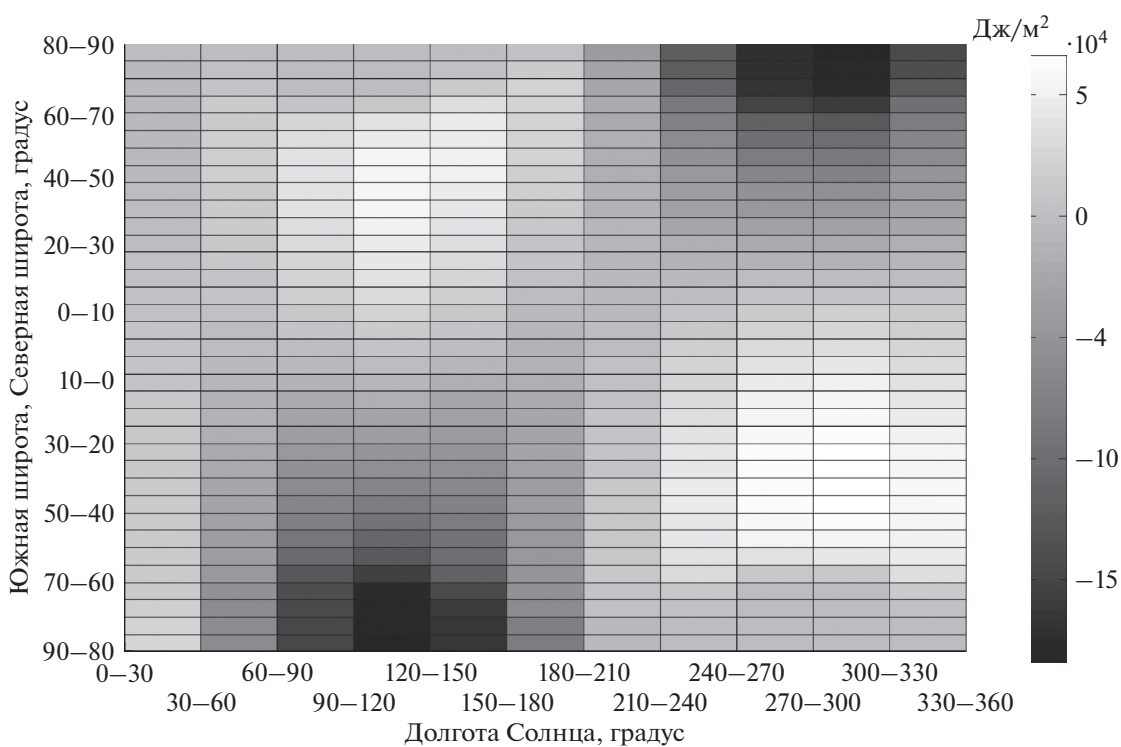


Рис. 6. Пространственная и временная изменчивость приходящей на ВГА солнечной радиации в фазе 19-ти летнего цикла 2030–2021 гг.

(0.074%). В южном полушарии в зимнее для него полугодие отмечается увеличение приходящей на ВГА солнечной радиации (кроме области 30° – 85° в 1-й астрономический месяц). Суммарное за полугодие увеличение приходящей радиации в эту фазу цикла составляет $1.7719 \cdot 10^6$ Дж/м² (0.044%). Для летнего в южном полушарии полугодия характерно сокращение (кроме диапазона 0° – 15° в период с 8-го по 12-й астрономический месяц). Суммарное сокращение приходящей в южное полушарие за летнее полугодие солнечной радиации в эту фазу цикла составляет $5.3149 \cdot 10^6$ Дж/м² (0.079%).

Отмеченные вариации инсоляции на ВГА в фазах 19-ти летнего цикла приблизительно одного порядка с вариациями в 11-ти летнем цикле TSI [20]. С меньшими амплитудами в пространственной и временной изменчивости приходящей на ВГА солнечной радиации проявляется 2, 3, 8 и 11-ти летняя периодичность [7, 11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе астрономических эфемерид рассчитаны характеристики, и определены особенности пространственных и временных изменений приходящей на ВГА солнечной радиации в интервале с 1900 по 2100 гг. Определено, что в изменении приходящей на ВГА солнечной радиации проявляется вековая тенденция и 19-ти летнее нутационное колебание. Вековая тенденция отражает увеличение приходящей солнечной радиации в зимние для полушарий полугодия и ее сокращение в летние для полушарий полугодия. При этом одна фаза 19-ти летнего нутационного цикла усиливает вековую тенденцию, а другая фаза цикла ее ослабляет.

Учет вариаций приходящей на ВГА солнечной радиации (т.е. изменений начальных условий) при расчете радиационного и теплового баланса Земли, ее поверхности и атмосферы может способствовать, как повышению точности расчетов, так и увеличению пространственно-временной детализации прогнозов и их глубины. Последнее связано с тем, что малые различия в начальных условиях, в случаях нелинейных зависимостей, могут приводить к нарастающему со временем расхождению в результатах расчетов. Полученные характеристики вариаций приходящей на ВГА солнечной радиации, могут способствовать уточнению расчетов и результатов анализа планетарного энергетического дисбаланса [16, 22]. Также представляется возможным использование рассчитанных значений приходящей на ВГА солнечной радиации [19] в физико-математических моделях климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. М.: Наука, 1983.
2. Будыко М.И. Изменение климата. Л.: Гидрометеоздат, 1974.
3. Дроздов О.А., Васильев Н.В., Раевский А.Н. и др. Климатология. Л.: Гидрометеоздат, 1989.
4. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.—Л.: ГОНТИ, 1939.
5. Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоздат, 1982.
6. Монин А.С., Шишков Ю.А. История климата. Л.: Гидрометеоздат, 1979.
7. Федоров В.М. Инсоляция Земли и современные изменения климата. М.: Физматлит, 2017.
8. Хромов С.П., Петросяни М.А. Метеорология и климатология. М.: МГУ, 2006.
9. Fedorov V.M. Interannual Variability of the Solar Constant // Solar System Research, 2012. V. 46. № 2. P. 170–176. doi 10.1134/S0038094612020049
10. Fedorov V.M. Interannual Variations in the Duration of the Tropical Year // Doklady Earth Sciences. 2013. V. 451. Part 1. P. 750–753. doi 10.1134/S1028334X13070015
11. Fedorov V.M. Latitudinal variability of incoming solar radiation in various time cycles // Doklady Earth Sciences. 2015. V. 460. Part 1. P. 96–99. doi 10.1134/S1028334X15010183
12. Fedorov V.M. Periodic perturbations and small variations of the solar climate of the Earth // Doklady Earth Sciences. 2014. V. 457. Part 1. P. 869–872. doi 10.1134/S1028334X14070137
13. Fedorov V.M. Spatial and temporal variation in solar climate of the Earth in the present epoch // Izvestiya, Atmospheric and oceanic physics. 2015. V. 51. № 8. P. 779–791. doi 10.1134/S0001433815080034
14. Fedorov V.M. Theoretical calculation of the interannual variability of the Earth's insolation with daily resolution // Solar System Research. 2016. V. 50. № 3. P. 220–224. doi 10.1134/S0038094616030011
15. Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B. et al. JPL's On-Line Solar System Data Service // Bulletin of the American Astronomical Society. 1996. V. 28. № 3. P. 1158.
16. Hansen J., Sato M., Kharecha P., von Schuckmann K. Earth's energy imbalance and implications // Atmos. Chem. Phys. 2011. № 11. P. 13421–13449. doi 10.5194/acp-11-13421-2011
17. <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EnergyBalance/page6.php>.
18. <http://ssd.jpl.nasa.gov>.
19. <http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm>.
20. <http://www.pmodwrc.ch/>.
21. Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // Geophysical Research Letters, 2011. V. 37. L01706. doi 10.1029/2010GL045777

22. *Loeb N.G., Lyman J.M., Johnson G.C. et al.* Observed changes in top-of-the-atmosphere radiation and upper-ocean heating consistent within uncertainty // *Nature Geoscience*. 2012. № 5. P. 110–113. doi 10.1038/ngeo1375
23. Raschke E., Ohmura A. Radiation budget of the climate system. Chapter 4 Hantel M. (ed.) // *Climatology*. V. V/6, in: Martienssen, W. (ed.): *Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional Relationships*, Berlin and others: Springer Verlag, 2005.
24. *Stephens G.L., Li J., Wild M. et al.* An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations // *Nature Geoscience*. 2012. V. 5. P. 691–696. doi 10.1038/NGE01580
25. *Trenberth K.E., Fasullo J.T.* Changes in the flow of energy through the Earth's climate system // *Meteorologische Zeitschrift*. 2009. V. 18. № 4. P. 369–377.
26. *Trenberth K.E., Fasullo J.T.* Tracking Earth's energy: from El Nino to global warning // *Surv. Geophys.* 2011. doi 10.1007/s10712-011-9150-2
27. *Trenberth K.E., Fasullo J.T., Kiehl J.* Earth's global energy budget // *Bull. American Meteorological Society*. 2009. P. 311–323. doi 10.1175/2008BAMS2634.1