

УДК 523.9-7

АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ В МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОЛНОГО ПОТОКА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2019 г. В. М. Федоров*

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

**e-mail: fedorov.msu@mfil.ru*

Поступила в редакцию 02.07.2018 г.

После доработки 19.09.2018 г.

Принята к публикации 22.01.2019 г.

Межгодовая изменчивость приходящего к Земле солнечного излучения по физической природе представляет собой дуплекс с переменными, в зависимости от временного разрешения, соотношениями составляющих по амплитуде. Проведенный нами анализ показывает, что амплитуда многолетней изменчивости интенсивности излучения приблизительно на 95% определяется вариациями, связанными с изменением активности Солнца. При годовом разрешении преобладающей по амплитуде является составляющая, определяемая активностью Солнца (около 80%). При месячном разрешении ведущей по амплитуде составляющей дуплекса является вариация, определяемая небесно-механическими процессами (около 55%). Межгодовые вариации, определяемые небесно-механическими процессами, таким образом, являются ведущими в межгодовой изменчивости приходящего солнечного излучения в диапазоне изменения по сезонам года. Полученные результаты указывают на необходимость дифференцированного использования значений межгодовой изменчивости разной физической природы приходящего к Земле солнечного излучения в климатических моделях, в связи с зависимостью их весовых соотношений от временного разрешения.

Ключевые слова: поток, солнечное излучение, интенсивность солнечного излучения, солнечная активность, небесно-механические процессы, межгодовые вариации

DOI: 10.1134/S0320930X19040029

Важнейшей характеристикой приходящего к Земле солнечного излучения является TSI (Total solar irradiance) – полное количество солнечной энергии по всему спектру, падающее за единицу времени на единицу площади, перпендикулярную солнечным лучам, на среднем расстоянии Земли от Солнца за пределами земной атмосферы. Среднее многолетнее значение TSI принимается за величину солнечной постоянной (Корр, Lean, 2011; Fröhlich, 2012; Корр и др., 2012).

Так как интенсивность солнечного излучения (ISR – intensity of solar radiation) меняется обратно пропорционально квадрату расстояния, то она в течение года меняется и имеет правильный годовой ход с минимумом в афелии и максимумом в перигелии (рис. 1). Годовой ход ISR определяется небесно-механическим процессом – движением Земли по эллиптической орбите.

Однако среднегодовые и среднемесячные значения TSI изменяются и год от года. Изменчивость приходящего к Земле солнечного излучения, определяется двумя основными причинами, имеющими различную физическую природу. Од-

на из них определяется изменением физической активности Солнца, связанной с происходящими на Солнце процессами: пятнообразованием, факельными вспышками и др. (<http://www.pmodwrc.ch/>). Другая причина связана с изменением расстояния Солнце–Земля в результате возмущающего действия ближайших небесных тел на орбитальное движение Земли (Vorisenkov и др., 1985; Федоров, 2012; 2013; 2015; 2016). Далее используются принятые нами обозначения составляющих межгодовой изменчивости TSI. Вариации солнечного излучения, связанные с небесно-механическими процессами, обозначаются $ISR_{СМР}$ (celestial mechanical process). Вариации TSI, связанные с изменением активности Солнца (solar activity), обозначаются как ISR_{SA} . Исследования вариаций TSI, связанных с солнечной активностью, получили широкое развитие (<http://www.pmodwrc.ch/>; Fröhlich, Lean, 1998; Lean и др., 2005; Foukal и др., 2006; Fröhlich, 2000; 2012; Корр и др., 2012). В то же время, многолетние и межгодовые вариации TSI, связанные с изменением расстояния Солнце–Земля исследованы недостаточно.

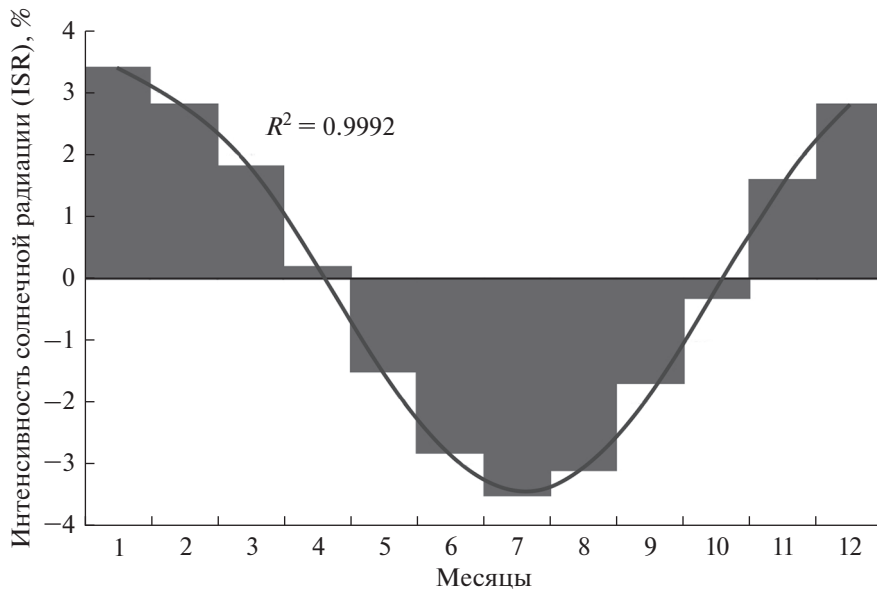


Рис. 1. Годовой ход ISR в процентах, по отношению к TSI — значению при среднем расстоянии Земли от Солнца (аппроксимация — полином 6-й степени).

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Для определения вариаций расстояния между Землей и Солнцем по данным астрономических эфемерид (DE-406) определялись средние расстояния между Землей и Солнцем для календарных суток в интервале с 1740 по 2050 гг. (<http://www.ssd.jpl.nasa.gov>). Точность эфемерид по расстоянию составляет 10^{-9} а. е. или 0.1496 км. Величина солнечной постоянной при расстоянии между Землей и Солнцем равном 1 а. е., принималась равной $I_0 = 1361.0$ Вт/м² (Kopp, Lean, 2011). Известно, что если a — среднее расстояние между Землей и Солнцем (1 а. е.), то на расстоянии l

$$I_l = I_0 \left(\frac{a}{l} \right)^2. \quad (1)$$

По рассчитанным (формула (1)) суточным значениям, были получены месячные и годовые (рис. 2) значения ISR, ненормированные относительно среднего расстояния Солнце—Земля. Эти ненормированные по расстоянию Солнце—Земля значения ISR обозначаются в работе как $ISR_{\text{СМР}}$.

Последовательным вычитанием значений каждого последующего года из значений предшествующего года были получены ряды межгодовой изменчивости TSI и $ISR_{\text{СМР}}$. Таким же образом получены ряды межгодовой изменчивости месячных (для каждого месяца года) значений TSI и $ISR_{\text{СМР}}$. Полученные значения отражают последовательное изменение TSI от одного года к последующему (с годовым и месячным разрешением) в связи с изменением расстояния Солнце—Земля. В результате анализа рассчитанных рядов

были получены амплитудные характеристики межгодовой изменчивости TSI и $ISR_{\text{СМР}}$, связанной с возмущенным орбитальным движением Земли. Под амплитудой нами понимается среднее по модулю значение межгодовых изменений TSI, $ISR_{\text{СМР}}$ и $ISR_{\text{СА}}$. Вариации, связанные с изменением активности Солнца, в этих расчетах не учитывались.

Спутниковые радиометрические измерения TSI проводятся с 1978 г. Известны реконструкции TSI, выполненные на основе обработанных радиометрических данных (по числу солнечных пятен и факельным вспышкам). С 1610 г. получены данные с годовым, а с 1882 г. — с месячным разрешением (Lean и др., 1995; Kopp, Lean, 2011). При анализе межгодовой изменчивости солнечного излучения с годовым разрешением в качестве исходных данных нами использовались эти значения TSI с 1740 по 2012 гг. (рис. 2), рекомендованные для использования в физико-математических моделях климата (Kopp, Lean, 2011; Climate Change, 2013; <http://solarisheppa.geomar.de/cmip5>). При анализе данных с месячным разрешением использовался ряд (TSI 11-yr cycle) опубликованный на (<http://solarisheppa.geomar.de/cmip5>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетняя изменчивость TSI определяется в основном вариациями, связанными с изменением активности Солнца ($ISR_{\text{СА}}$). В этом случае из годовых исходных значений TSI вычитались годовые значения $ISR_{\text{СМР}}$ (рассчитанные по формуле (1)). Средняя амплитуда TSI в исходном

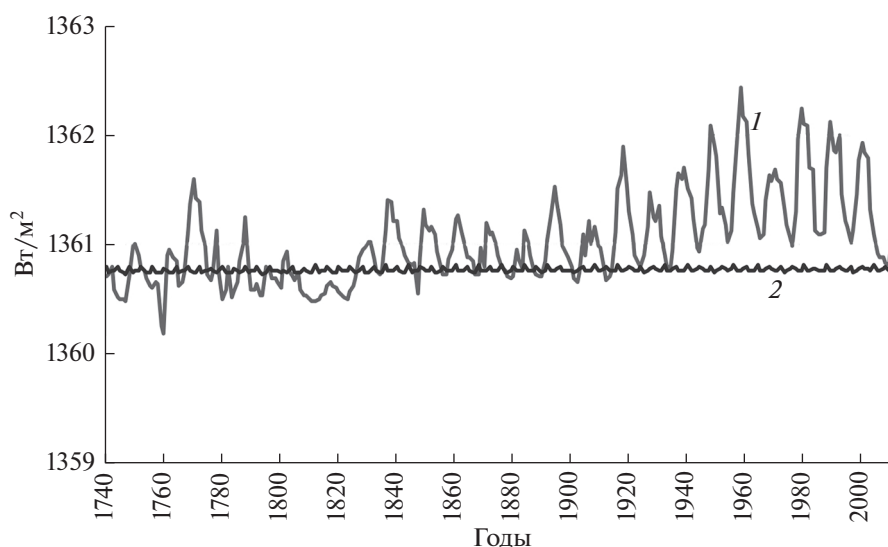


Рис. 2. Многолетняя изменчивость годовых значений TSI (1 – Climate Change, 2013) и $ISR_{СМР}$ (2).

(Корр, Lean, 2011) ряде значений (рис. 2) составляет 0.3242 Вт/м^2 . Средняя амплитуда $ISR_{СМР}$ равняется 0.0158 Вт/м^2 . Таким образом, вариации $ISR_{СМР}$ составляют 4.67% от амплитуды многолетней изменчивости TSI. На вариации ISR_{SA} приходится 95.33%.

Детально анализировалось соотношение $ISR_{СМР}$ и ISR_{SA} в межгодовой изменчивости TSI с годовым разрешением в интервале с 1740 по 2012 гг. (Climate Change, 2013). Среднее многолетнее значение TSI (солнечной постоянной) для этого массива составляет 1361.0 Вт/м^2 (Корр, Lean, 2011). При расчетах $ISR_{СМР}$ (по формуле (1)) это значение принималось за I_0 . В годовом ходе амплитуда ISR составляет около 3.5% (рис. 1), в межгодовой изменчивости с годовым разрешением (годовых значений) амплитуда вариаций TSI значительно меньше – 0.014% (от величины TSI, равного 1361 Вт/м^2). Однако эти малые вариации важны в связи с тем, что верхняя граница атмосферы (ВГА) является поверхностью, характеризующей начальные условия расчета радиационного баланса Земли, ее поверхности и атмосферы. Точностью определения начальных условий определяются возможности тех или иных модельных расчетов.

Расчитанные нами амплитуды межгодовой изменчивости $ISR_{СМР}$ (рис. 3) составляют 0.02 Вт/м^2 или 10.5% от средней амплитуды межгодовой изменчивости TSI (0.19 Вт/м^2) в интервале с 1978 по 2012 гг. Максимальное значение амплитуды $ISR_{СМР}$ составляет на этом интервале 0.05 Вт/м^2 или 26.3% от средней амплитуды TSI. В интервале с 1740 по 2012 гг. средняя амплитуда межгодовой изменчивости $ISR_{СМР}$ так же состав-

ляет 0.02 Вт/м^2 или 13.3% (от 0.15 Вт/м^2 – средней амплитуды межгодовой изменчивости TSI на этом интервале).

Соотношение вариаций $ISR_{СМР}$ и ISR_{SA} в межгодовой изменчивости TSI находилось следующим образом. Межгодовые вариации ISR_{SA} , находились вычитанием рассчитанных нами значений межгодовой изменчивости $ISR_{СМР}$ из значений межгодовой изменчивости TSI. Далее определялись модули полученных значений ISR_{SA} и $ISR_{СМР}$. Сумма модулей ISR_{SA} и $ISR_{СМР}$ для каждого года принималась равной единице. Из полученной пропорции рассчитывались соотношения вариаций ISR_{SA} и $ISR_{СМР}$ в межгодовой изменчивости TSI. Умножением на 100 эти соотношения рассчитывались в процентах. В результате определено, что на интервале с 1978 по 2012 гг. (рис. 4) соотношение межгодовых вариаций в среднем составляет 80.6% (ISR_{SA}) и 19.6% ($ISR_{СМР}$). На интервале с 1740 по 2012 гг. (рис. 5) это соотношение характеризуется значениями 78.7% (ISR_{SA}) и 21.3% ($ISR_{СМР}$). Таким образом, при годовом разрешении, вариации $ISR_{СМР}$ составляют приблизительно 1/5 часть межгодовой изменчивости TSI.

Также анализировалось соотношение вариаций ISR_{SA} и $ISR_{СМР}$ в межгодовой изменчивости TSI с месячным разрешением (в изменчивости месячных значений от года к году). Для анализа соотношений в этом случае использовался массив данных с 1882 по 2008 гг. (<http://solarishepra.geomar.de/cmip5>). Средняя величина TSI для этого массива составляет 1365.9 Вт/м^2 . Поэтому за при расчетах (по формуле (1)) принималось это значение 1366 Вт/м^2 .

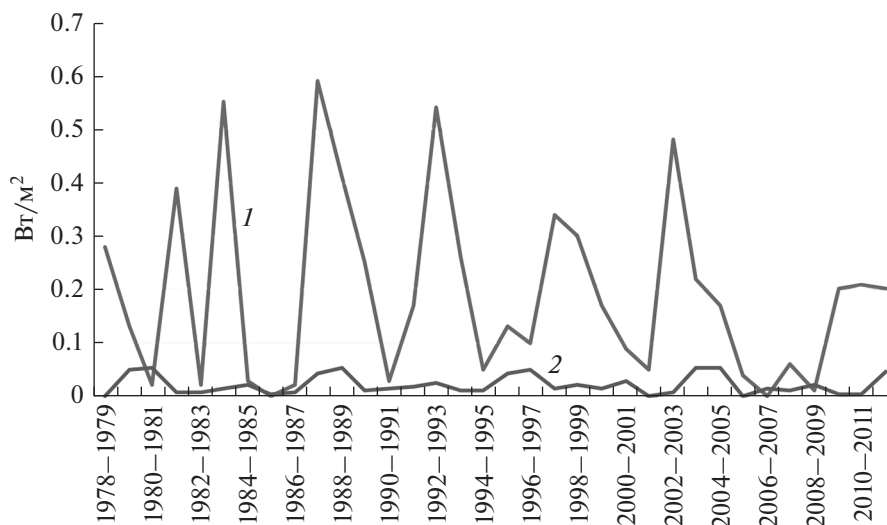


Рис. 3. Амплитуда межгодовых вариаций TSI (1) и ISR_{CMP} (2) при анализе с годовым разрешением.

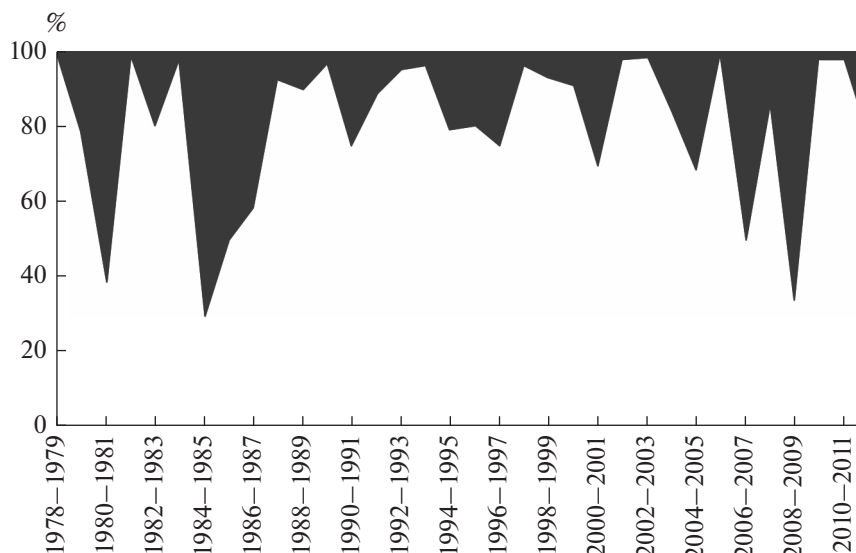


Рис. 4. Соотношение вариаций ISR_{SA} и ISR_{CMP} (показаны темным фоном) в межгодовой изменчивости TSI на интервале с 1978 по 2012 гг. с годовым разрешением.

В интервале с 1882 по 2008 гг. в среднем за месяц амплитуда ISR_{CMP} составляет 0.20 Вт/м^2 , амплитуда TSI – 0.22 Вт/м^2 . В среднем амплитуда ISR_{CMP} составляет 90.9% от амплитуды межгодовой изменчивости TSI. В интервале с 1978 по 2008 гг. средняя амплитуда ISR_{CMP} равна 0.21 Вт/м^2 , амплитуда TSI – 0.27 Вт/м^2 . На этом интервале амплитуда межгодовой изменчивости ISR_{CMP} составляет 77.8% от амплитуды TSI. В отдельные месяцы года (март–май и сентябрь–ноябрь) амплитуда межгодовой изменчивости ISR_{CMP} превосходит амплитуду TSI. В остальные месяцы уступает ей (рис. 6).

Соотношение вариаций ISR_{SA} и ISR_{CMP} в межгодовой изменчивости TSI для каждого месяца находилось так же, как и при анализе с годовым разрешением. Средние соотношения вариаций ISR_{SA} и ISR_{CMP} в межгодовой изменчивости TSI (с 1882 по 2008 гг.) получились равными 45.19 и 54.81% соответственно. Годовой ход соотношения ISR_{SA} и ISR_{CMP} в межгодовой изменчивости TSI представлен на рис. 7.

Разность значений межгодовой изменчивости ISR_{SA} и ISR_{CMP} характеризуется четко выраженным годовым ходом (рис. 8).

Из полученного распределения видно, что при месячном разрешении межгодовые вариации

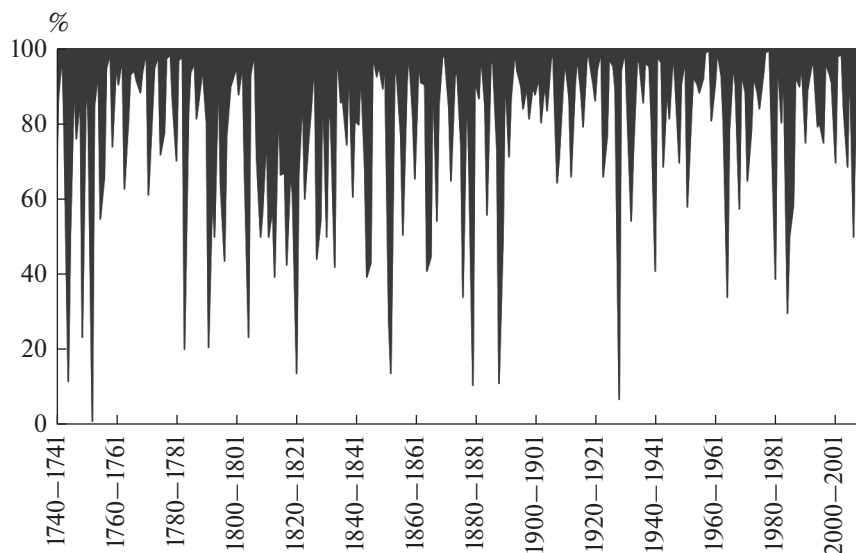


Рис. 5. Соотношение вариаций ISR_{SA} и ISR_{CMP} (показаны темным фоном) в межгодовой изменчивости TSI на интервале с 1740 по 2012 гг. с годовым разрешением.

(месячных значений) ISR_{SA} по амплитуде превышают вариаций ISR_{CMP} на протяжении четырех месяцев (1/3 года): июнь, июль, декабрь, январь. Временные интервалы доминирования вариаций ISR_{SA} хронологически локализованы в окрестностях точек летнего и зимнего солнцестояния. На протяжении остальных восьми месяцев (2/3 года) в межгодовой изменчивости TSI преобладает вариация ISR_{CMP} . Максимальные значения вариаций ISR_{CMP} приходятся на интервалы вблизи равноденственных точек. Поскольку точки весеннего равноденствия в настоящее время расположены вблизи малых полуосей эллиптической земной орбиты, то это согласуется с теоремой устойчивости Лапласа о малой изменчивости больших полуосей (их пересечения с эллипсом расположены в настоящее время вблизи солнцестояний), а значит и рассто-

яния Земля–Солнце в эти периоды. Для периода спутниковых радиометрических наблюдений с 1978 по 2008 гг. среднее соотношение характеризуется значениями 45.71% (ISR_{SA}) и 54.29% (ISR_{CMP}). Таким образом, соотношение вариаций ISR_{SA} и ISR_{CMP} в межгодовой изменчивости TSI изменяется в связи с временным разрешением. При годовом разрешении межгодовые вариации ISR_{CMP} составляют около 1/5 величины межгодовой изменчивости TSI. При месячном разрешении – более 1/2. Сезонное изменение межгодовых вариаций TSI, таким образом, в значительной степени определяется вариациями ISR_{CMP} , связанными с изменением расстояния Солнце–Земля в результате возмущающего действия Луны и планет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетняя изменчивость TSI приблизительно на 95% определяется вариациями, связанными с изменением активности Солнца. Межгодовая изменчивость TSI по физической природе представляет собой дуплекс вариаций ISR_{SA} и ISR_{CMP} . Соотношение вариаций ISR_{SA} и ISR_{CMP} по амплитуде изменяется в зависимости от временного разрешения. При годовом разрешении преобладающей является составляющая ISR_{SA} (около 80%). При месячном разрешении ведущей составляющей дуплекса является вариация ISR_{CMP} (около 55%).

Межгодовая изменчивость ISR_{CMP} рассчитывается (формула (1)) по расстоянию Солнце–Земля (значения которого содержатся в астрономических эфемеридах) как в прошлое, так и в будущее. Поэтому вариации ISR_{CMP} могут исполь-

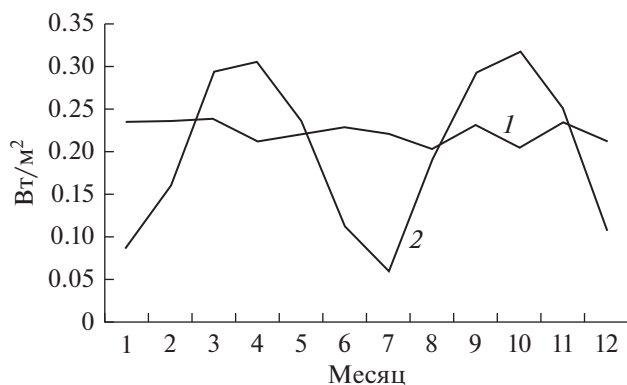


Рис. 6. Амплитуда межгодовых вариаций TSI (1) и ISR_{CMP} (2) в интервале с 1882 по 2008 гг. при анализе с месячным разрешением.

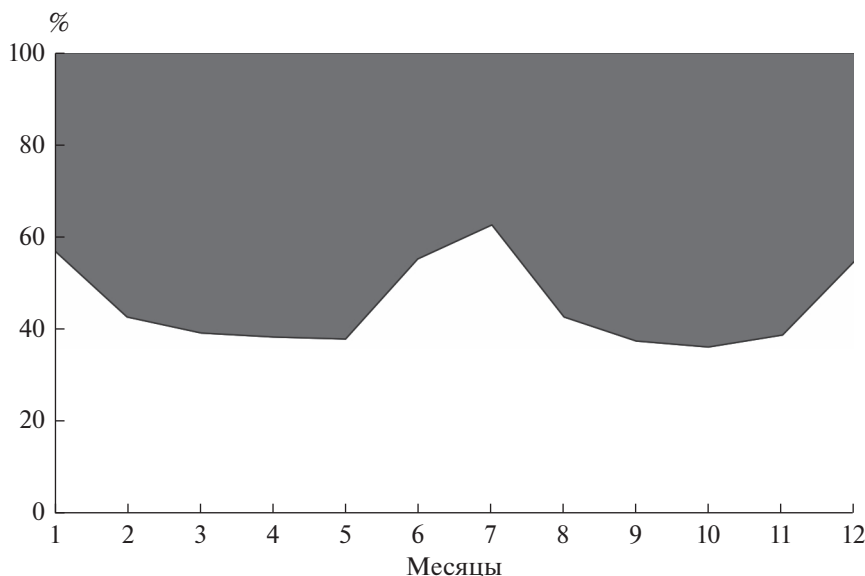


Рис. 7. Соотношение вариаций ISR_{SA} и $ISR_{СМР}$ (показаны темным фоном) в межгодовой изменчивости TSI на интервале с 1882 по 2008 гг. с месячным разрешением.

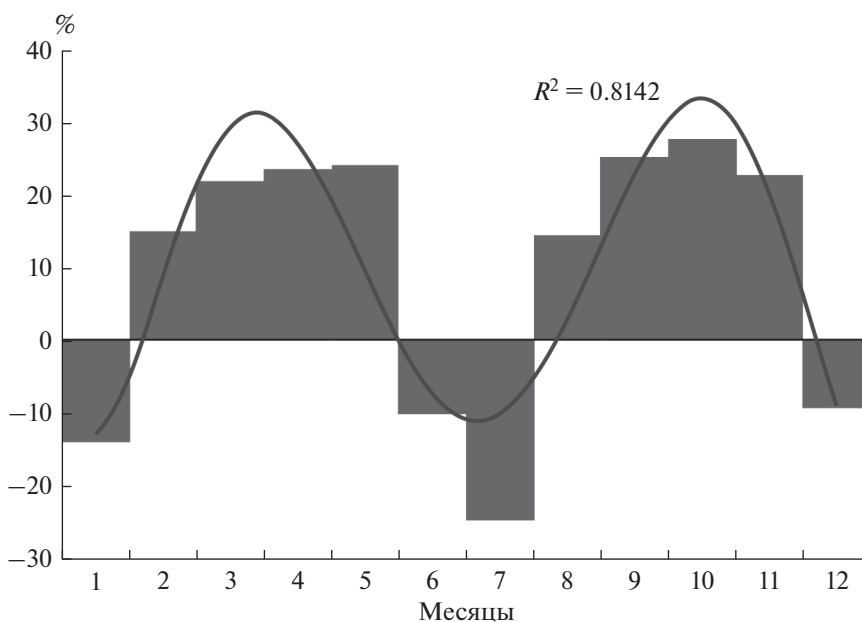


Рис. 8. Годовой ход разности значений межгодовой изменчивости $ISR_{СМР}$ и ISR_{SA} на интервале 1882–2008 гг. (аппроксимация – полином шестой степени).

зоваться в физико-математических моделях для поиска отклика климатической системы на межгодовую изменчивость $ISR_{СМР}$ (с месячным разрешением) в связи с изменением расстояния Солнце–Земля. Полученные результаты так же, вероятно, могут способствовать уточнению отдельных оценок влияния межгодовых вариаций ISR_{SA} и $ISR_{СМР}$ на климатические процессы при разных временных разрешениях как для Земли, так и отдельных планет Солнечной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Федоров В.М. Теоретический расчет межгодовой изменчивости солнечной постоянной // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 2. С. 184–189. (*Fedorov V.M.* Interannual Variability of the Solar Constant // Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. № 2. P. 170–176.) <https://doi.org/10.1134/S0038094612020049>

Федоров В.М. Межгодовые вариации продолжительности тропического года // Докл. РАН. 2013. Т. 451.

- № 1. С. 95–97.
<https://doi.org/10.7868/S086956521319016X>
- Федоров В.М.* Пространственные и временные вариации солнечного климата Земли в современную эпоху // Геофизические процессы и биосфера. 2015. Т. 14. № 1. С. 5–22.
- Федоров В.М.* Теоретический расчет межгодовой изменчивости инсоляции Земли с суточным разрешением // Астрон. вестн. 2016. Т. 50. № 3. С. 233–238. (*Fedorov V.M.* Theoretical calculation of the interannual variability of the Earth's insolation with daily resolution // *Sol. Syst. Res.* 2016. V. 50. № 3. P. 220–224. <https://doi.org/10.7868/S0320930X16030014>)
- 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. № 9. P. 933–940.
- Climate Change, 2013. The Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Publisher: Cambridge Univ. Press. Chapter 8. Anthropogenic and natural radiative forcing. P. 659–740. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>
- Foukal P., Fröhlich C., Spruit H., Wigley T.M.L.* Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate // *Nature.* 2006. V. 443. P. 161–166. <https://doi.org/10.1038/nature05072>
- Frohlich C., Lean J.* The Sun's total irradiance: Cycles, trends and climate change uncertainties since 1976 // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 4377–4380.
- Fröhlich C.* Observations of irradiance variability // *Space Sci. Rev.* 2000. V. 94. P. 15–24.
- Fröhlich C.* Total solar irradiance observations // *Surv. Geophys.* 2012. V. 33. P. 453–473. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9168-5>
<http://ssd.jpl.nasa.gov>. — NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Электронный ресурс национального аэрокосмического агентства США (NASA).
<http://www.pmodwrc.ch>. Электронный ресурс Мирового радиационного центра — World Radiation Center (Швейцария).
<http://solarisheppa.geomar.de/cmip5>.
- Kopp G., Lean J.L.* A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L01706. <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>
- Kopp G., Fehlmann A., Finsterle W., Harber D., Heuerman K., Willson R.* Total solar irradiance data record accuracy and consistency improvements // *Metrologia.* 2012. V. 49. № 2. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/2/S29>
- Lean J., Beer J., Bradley R.* Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 3195–3198.
- Lean J., Rottman G., Harder J., Kopp G.* Sorce contributions to new understanding of global change and solar variability // *Sol. Phys.* 2005. V. 230. P. 27–53.