

УДК 523.9-7

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ИНСОЛЯЦИИ ЗЕМЛИ С СУТОЧНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2016 г. В. М. Федоров

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

e-mail: fedorovmsu@gmail.com

Поступила в редакцию 26.05.2015 г.

На основе астрономических эфемерид DE-406 выполнены теоретические расчеты межгодовой изменчивости инсоляции Земли, связанной с небесно-механическими процессами, для 365 точек тропического года в интервале с 1900 по 2050 гг. Определено, что средний размах вариаций межгодовой изменчивости инсоляции составляет 0.310 Вт/м^2 (0.023% от величины солнечной постоянной). Рассчитанные вариации характеризуются строгой периодичностью соответствующей продолжительности синодического лунного месяца. Определена связь экстремальных значений рассчитанной вариации инсоляции с сизигиями. Средний размах рассчитанной вариации в 1.7 раза (на 0.01% величины солнечной постоянной) превышает размах межгодовой изменчивости в 11-летней вариации общей инсоляции Земли.

Ключевые слова: инсоляция, общий поток солнечной радиации, солнечная постоянная, межгодовая изменчивость, синодический период, синодическая вариация.

DOI: 10.7868/S0320930X16030014

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей характеристикой инсоляции является полное количество солнечной энергии (Total Solar Irradiance – TSI) по всему спектру, падающее за единицу времени на единицу площади, перпендикулярную солнечным лучам, на среднем расстоянии Земли от Солнца за пределами земной атмосферы (или на верхней границе атмосферы – ВГА). Среднее многолетнее значение TSI принимается за величину солнечной постоянной (Коор, Leun, 2011).

Приходящая на ВГА солнечная радиация характеризует начальные условия для расчетов радиационного баланса Земли, ее поверхности и атмосферы. Солнечная радиация является важнейшим фактором климата, в связи с этим тенденциями и вариациями приходящей, на ВГА солнечной радиации могут определяться изменения в глобальном климате Земли (Миланкович, 1939; Кондратьев, 1965; Дроздов и др., 1989; Макарова и др., 1991; Монин, Шишков, 2000). Таким образом, расчет приходящей на ВГА солнечной радиации с суточным разрешением представляется важным в проблеме исследования солярного климата Земли и объяснения причин и тенденций изменения глобального климата и погоды.

Инсоляция Земли не является неизменной во времени величиной. Ее межгодовые вариации определяются 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. (Willson, 1982; Макарова и др., 1991; Willson, Mordvinov, 2003; <http://www.pmodwrc.ch>). Известны многочисленные публикации, посвященные исследованиям связи этой вариации с климатическими изменениями. Однако этот вопрос остается дискуссионным (Beer и др., 2000; Foukal и др., 2006; Абдусаматов, 2007; Mackey, 2009; Корр, Lean, 2011). Другая причина связана с небесно-механическими процессами (изменением расстояния Земля–Солнце) в результате возмущающего действия ближайших небесных тел на орбитальное движение Земли (Vorisenkov и др., 1985; Fedorov, 2012). При невозмущенном (кеплеровском) движении Земли инсоляция изменяется в пределах годового орбитального движения Земли вокруг Солнца с правильным годовым ходом (максимум в перигелии, минимум – в афелии). Реальное орбитальное движение Земли подвержено периодическим возмущением со стороны Луны и планет, т.е. является возмущенным (Гребенников, Рябов, 1978; Дубошин, 1975; Маров, 1981). В связи с этим Земля год от года в одно и то же календарное время оказывается на различном расстоянии от Солнца, что является еще одной, до настоящего времени детально не изученной, причиной межгодовых вариаций инсоляции Земли. Исследования по расчету инсоляции Земли с учетом возмущенного орбитального движения Земли

были начаты в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, однако, дальнейшего развития они не получили (Vorisenkov и др., 1983; 1985). В настоящее время такие исследования ведутся в МГУ им. М.В. Ломоносова (Федоров, 2012, 2013, 2015; Fedorov, 2012). В работе используются принятые нами обозначения составляющих межгодовой изменчивости инсоляции Земли. Вариации, связанные с небесно механическими процессами обозначаются $TSI_{СМР}$ (celestial mechanical process). Вариации TSI , связанные с изменением активности Солнца (solar activity), обозначаются как TSI_{SA} .

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

По данным астрономических эфемерид – JPL Planetary and Lunar Ephemerides (DE–406) определялась продолжительность тропических лет в интервале с 1900 по 2050 гг. (Федоров, 2013; Fedorov, 2013). Тропическим годом является промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра истинного Солнца через точку весеннего равноденствия (Бакулин и др., 1983). Каждый тропический год делился на 365 равных (в каждом году) интервалов (приблизительно соответствующих календарным суткам). Для начала каждого интервала определялось расстояние от Земли до Солнца. Точность эфемерид по расстоянию составляет 10^{-9} а. е. или 0.1496 км (<http://ssd.jpl.nasa.gov>; Giorgini и др., 1996).

Величина солнечной постоянной I_0 , по обработанным данным радиометрических измерений, составляет 1361 Вт/м^2 (Кооп, Lean, 2011). Относительно этой величины рассчитывались значения $TSI_{СМР}$. Известно, что если a – среднее расстояние между Землей и Солнцем, равное большой полуоси эллипса земной орбиты (1 а. е.), то на расстоянии l

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

По формуле (1) были рассчитаны значения $TSI_{СМР}$ (значение I_l принималось равным $TSI_{СМР}$) на моменты положения Земли в 365 точках каждого тропического года в интервале с 1900 по 2050 гг. Последовательным вычитанием значений $TSI_{СМР}$ для соответствующих точек были получены ряды значений межгодовой изменчивости $TSI_{СМР}$ для 365 точек земной орбиты. Вариации, связанные с изменением солнечной активности (TSI_{SA}), не учитывались.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Из рассчитанных значений расстояния между Землей и Солнцем следует, что в среднем максимальное увеличение расстояния составляет 14.021 тыс. км, а среднее максимальное сокраще-

ние – 13.945 тыс. км. Экстремальные значения расстояния Земля–Солнце определялись по 365 точкам для каждого тропического года (с 1900 по 2050 гг.). Затем находились средние по всем тропическим годам значения максимального увеличения и максимального сокращения расстояния (рис. 1). Таким образом, в среднем максимальный размах по расстоянию для тропического года составляет около 28 тыс. км. Максимальное увеличение расстояния в массиве (абсолютный максимум) характеризуется величиной 17.370 тыс. км, а сокращение (абсолютный минимум) – 16.255 тыс. км.

Среднегодовой максимальный размах изменения $TSI_{СМР}$ характеризуется величиной 0.511 Вт/м^2 (0.037% от величины солнечной постоянной). Максимальное, для исследуемого интервала (1900–2050 гг.), увеличение $TSI_{СМР}$ (абсолютный максимум) определяется величиной 0.309 Вт/м^2 , максимальное сокращение (абсолютный минимум) – 0.315. Среднегодовое максимальное увеличение $TSI_{СМР}$ составляет 0.255 Вт/м^2 , среднегодовое максимальное сокращение – 0.256 Вт/м^2 (рис. 2). Максимальный размах межгодовой изменчивости $TSI_{СМР}$ составляет 0.624 Вт/м^2 (0.046%). Средняя амплитуда межгодовой изменчивости для точки тропического года составляет 8.454 тыс. км (рис. 3). Этому изменению соответствует средняя для точки амплитуда межгодовой изменчивости $TSI_{СМР}$, равная 0.155 Вт/м^2 (рис. 4). Размах колебаний по расстоянию составляет 16.908 тыс. км, изменчивость $TSI_{СМР}$ в среднем определяется диапазоном в 0.310 Вт/м^2 . Отметим, что амплитуда межгодовой изменчивости в 11-летнем цикле TSI характеризуется величиной 0.091 Вт/м^2 .

Рассчитанная, приблизительно с суточным разрешением, межгодовая изменчивость расстояния Земля–Солнце и межгодовая изменчивость $TSI_{СМР}$ характеризуются строгой периодичностью (рис. 3, 4).

Продолжительность интервалов между максимумами (или между минимумами) характеризуются значениями 29 и 30 суток (интервалов 1/365 продолжительности тропического года). Средняя величина составляет 29.54, что соответствует синодическому лунному месяцу – промежутку времени между двумя последовательными одноименными фазами Луны (Бакулин и др., 1983; Идельсон, 1975). Сравнение положения экстремумов в межгодовой изменчивости $TSI_{СМР}$ с разностью геоцентрических долгот Солнца и Луны показывает, что экстремумы связаны с сизигиями (разность долгот 0° – новолуния и 180° – полнолуния). При этом, если межгодовая изменчивость $TSI_{СМР}$ определяется вычитанием значений предыдущего года из соответствующих значений последующего, максимумы межгодовой изменчивости всегда располагаются между новолуниями преды-

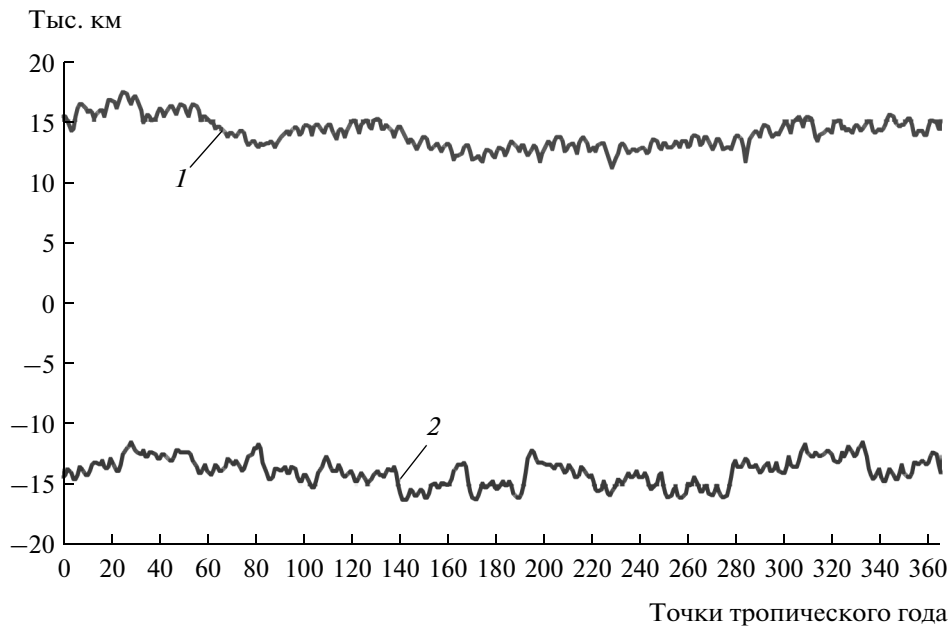


Рис. 1. Максимальный размах межгодового изменения среднего расстояния Земля–Солнце (1 – максимальное увеличение, 2 – максимальное сокращение).

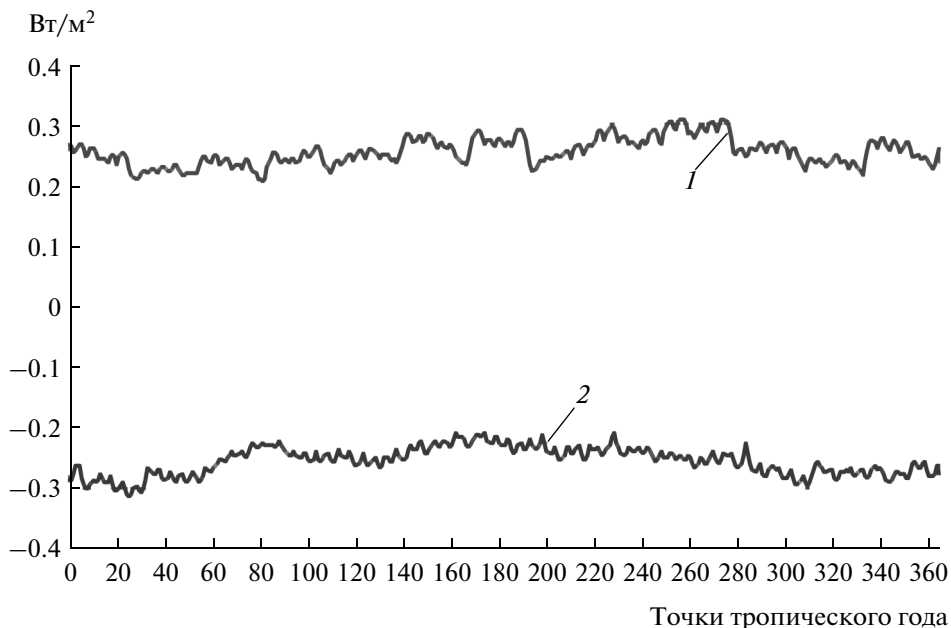


Рис. 2. Максимальный размах межгодового изменения TSI_{CMP} (1 – максимальное увеличение, 2 – максимальное сокращение).

дущего года и ближайшими полнолуниями последующего (эти фазы год от года смещаются на 3–5 суток по ходу года). Минимумы межгодовой изменчивости всегда располагаются между полнолуниями предшествующего года и новолуниями последующего. Таким образом, экстремумы меж-

годовой изменчивости TSI_{CMP} во всех случаях либо опережают сизигию последующего года, либо совпадают с ней (но никогда по отношению к ней не запаздывают). При этом совпадение экстремумов с новолунием или полнолунием последующего года отмечается в 4.79% случаев. Опереже-

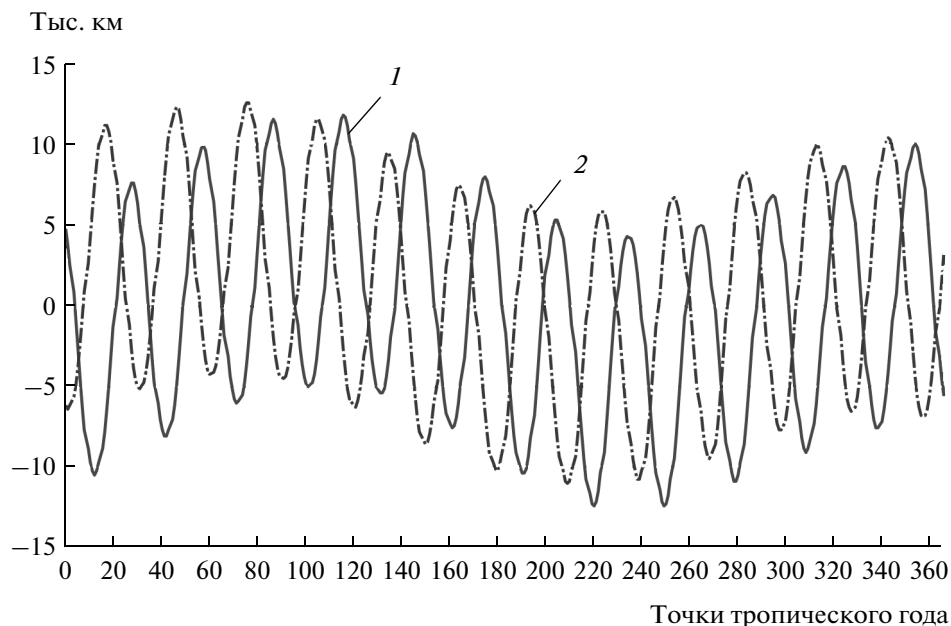


Рис. 3. Межгодовая изменчивость расстояния Земля—Солнце по 365 соответствующим точкам тропического года: 1 — 2015–2014 гг., 2 — 2016–2015 гг. 0 соответствует точке весеннего равноденствия (21 марта в современную эпоху).

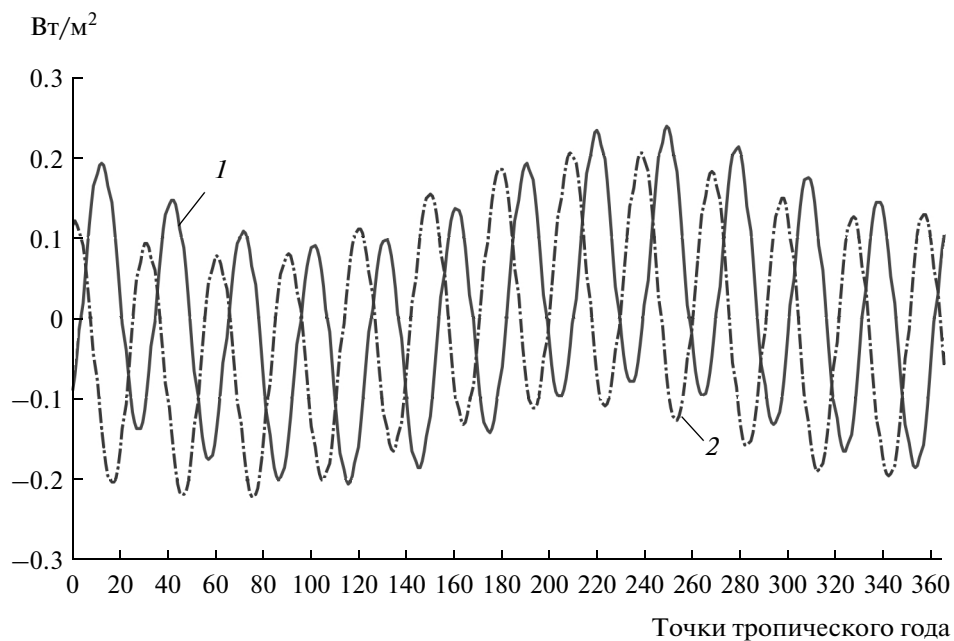


Рис. 4. Межгодовая изменчивость $TSI_{СМР}$ по 365 соответствующим точкам тропического года: 1 — 2015–2014 гг., 2 — 2016–2015 гг.

ние экстремумов на сутки новолуний и полнолуний последующего года отмечается в 63.90% случаев, на двое суток — в 31.31% случаев. При вычитании значений последующего года из соответствующих значений предыдущего года наблюдается обратная картина: максимумы отмечаются между полнолуниями предшествующего года и ближайшими новолуниями последующего, ми-

нимумы между полнолуниями предшествующего года и полнолуниями последующего. Отмечается чередование экстремумов, в межгодовой изменчивости $TSI_{СМР}$ от года к году, со смещением по ходу года на 3–5 сут и сменой знака экстремума (рис. 3, 4). То есть, если в определенной точке предыдущего года в межгодовой изменчивости $TSI_{СМР}$ отмечается максимум, то в следующем го-

ду со смещением от этой точки на 3–5 сут по ходу года в межгодовой изменчивости будет отмечаться минимум и т. д. При этом смещение в 3 сут отмечается в 23.1%, в 4 сут – в 69.8%, в 5 сут – в 7.1% случаев (в среднем 3.8 сут).

Отмеченная связь экстремумов межгодовой изменчивости $TSI_{СМР}$ с сизигиями объясняется следующим образом. Известно, что Земля и Луна с годовым периодом вращаются вокруг центра масс Земля, Луна и Солнце. Это движение происходит под действием двух сил: силы притяжения и центробежной силы. Во время новолуния Луна оказывается ближе к Солнцу (центру вращения). Для сохранения момента импульса в системе Земля–Луна необходимо увеличение расстояния между Землей и Солнцем (центром вращения). Величина $TSI_{СМР}$ при этом уменьшается. Во время полнолуния Земля оказывается ближе к Солнцу (сильнее притягивается, чем в новолуние и, вследствие этого, смещается в сторону Солнца относительно среднего радиуса вращения), поэтому значение $TSI_{СМР}$ увеличивается. В связи с этим, если в текущем году в определенных точках тропического года (орбиты) отмечается новолуние, а в предыдущем, следовательно, вблизи этих точек (3–5 сут) отмечалось полнолуние, то в межгодовой изменчивости (при вычитании предыдущего года из текущего) отмечается максимум. В обратном случае – минимум.

В связи с тем, что спутниковые радиометрические изменения TSI проводятся только с 1978 г. и полученные результаты содержат пропуски в суточных данных, провести сравнение рассчитанных нами значений межгодовой изменчивости $TSI_{СМР}$ с радиометрическими данными по межгодовой изменчивости TSI с суточным разрешением, в настоящее время не представляется возможным. Представляется возможным сравнить рассчитанные характеристики с межгодовой изменчивостью TSI в 11-летнем цикле. Известно, что амплитуда 11-летней вариации TSI характеризуется значением, близким к 1 Вт/м^2 (Макарова и др., 1991; <http://www.pmodwrc.ch>). Следовательно, межгодовая изменчивость в 11-летнем цикле TSI характеризуется средней величиной размаха, равной 0.182 Вт/м^2 (0.013% солнечной постоянной). Это значение в 3.42 раза уступает абсолютному максимальному размаху (0.624 Вт/м^2), в 2.81 раза уступает среднему максимальному размаху (0.511 Вт/м^2) и в 1.70 раза или на 0.010% от величины солнечной постоянной меньше среднего размаха синодической вариации $TSI_{СМР}$ (0.310 Вт/м^2 или 0.023%). Таким образом, синодическая вариация $TSI_{СМР}$ представляется значимой в межгодовой изменчивости TSI .

ВЫВОДЫ

В результате расчетов в межгодовой изменчивости инсоляции Земли определена вариация, свя-

занная с синодическим лунным периодом. Рассчитаны ее амплитудно–периодические характеристики. Следствием синодической вариации $TSI_{СМР}$ может быть изменение начальных радиационных условий в одних и тех же точках тропического года, влияющих на развитие синоптических процессов. Полученные результаты могут быть использованы в качестве внешнего фактора в физико-математических моделях климата, а также учитываться в методах долгосрочного прогноза погоды.

Полученные результаты могут оказаться полезными при исследованиях (с различным разрешением по времени) соотношения многолетних и межгодовых вариаций различной физической природы в изменчивости общей инсоляции Земли. Эти исследования могут способствовать определению степени (веса) отдельного влияния вариаций $TSI_{СМР}$ и TSI_{SA} на природные процессы (гидрометеорологические, геофизические, биологические и др.).

Из полученных результатов также следует, что межгодовая изменчивость инсоляции, связанная с небесно-механическими процессами ($TSI_{СМР}$) для планет Солнечной системы в значительной степени определяется движением их спутников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдусаматов Х.И.* Об уменьшении потока солнечного излучения и понижении глобальной температуры Земли до состояния глубокого похолодания в середине XXI века // Изв. Крымской астрофизической обсерватории. 2007. Т. 103. № 4. С. 292–298.
- Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И.* Курс общей астрономии. М.: Наука, 1983. 560 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.: Гидрометеоиздат, 1989. 568 с.
- Дубошин Г.Н.* Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1975. 800 с.
- Идельсон Н.И.* Этюды по небесной механике. М.: Наука, 1975. 496 с.
- Кондратьев К.Я.* Актинометрия. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 692 с.
- Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В.* Поток солнечного излучения. М.: Наука, 1991. 400 с.
- Маров М.Я.* Планеты Солнечной системы. М.: Наука, 1981. 256 с.
- Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.—Л.: ГОНТИ, 1939. 208 с.
- Монин А.С., Шишков Ю.А.* Климат как проблема физики // Успехи физ. наук. 2000. Т. 170. № 4. С. 419–445.
- Федоров В.М.* Теоретический расчет межгодовой изменчивости солнечной постоянной // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 2. С. 184–189. (*Fedorov V.M.* In-

- terannual variability of the Solar constant // *Sol. Syst. Res.* 2012. V. 46. № 2. P. 170–176.)
- Федоров В.М.* Межгодовые вариации продолжительности тропического года // *Докл. РАН.* 2013. Т. 451. № 1. С. 95–97. Doi: 10.7868/S086956521319016X.
- Федоров В.М.* Широкая изменчивость приходящей солнечной радиации в различных временных циклах // *Докл. РАН.* 2015. Т. 460. № 3. С. 339–342. Doi: 10.7868/S0869565215030196.
- Beer J., Mende W., Stellmacher R.* The role of the Sun in climate forcing // *J. Quaternary Sci. Rev.* 2000. V. 19. P. 403–415.
- Borisenkov E.P., Tsvetkov A.V., Agaponov S.V.* On some characteristics of insolation changes in the past and the future // *Climatic Change.* 1983. № 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. № 9. P. 933–940.
- Crommelynck D., Dewitte S.* Solar constant temporal and frequency characteristics // *Sol. Phys.* 1997. V. 173(1). P. 177–191. Doi: 10.1023/A:1004916413800.
- 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. Doi: 10.1038/nature05072
- Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B., Chodas P.W., Jacobson R.A., Keesey M.S., Koop G., Lean J.L.* A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L01706. Doi: 10.1029/2010GL045777.
- Koop G., Lean J.L.* A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L01706. Doi: 10.1029/2010GL045777.
- Lieske J.H., Ostro S.J., Standish E.M., Wimberly R.N.* JPL's on-line Solar System data service // *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1996. V. 28 (3). P. 1158.
<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).
- Mackey R.* The Sun's role in regulating the Earth's climate dynamics // *Energy and Environment.* 2009. V. 20. № 1, 2. P. 25–73.
- Willson R.C.* Solar irradiance variations and solar activity // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 86. P. 4319–4326.
- Willson R.C., Mordvinov A.V.* Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21 and 22 // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. P. 1199–1202. Doi: 10.1029/2002GL016038.