

МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПЕРЕНОСЕ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ НА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ АТМОСФЕРЫ

В.М. Федоров

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Ленинские горы, 1, fedorov.msu@mail.ru

Аннотация. Приводятся результаты исследований изменения в переносе лучистой энергии на верхней границе атмосферы. На основе выполненных расчетов инсоляции определены особенности многолетней изменчивости в переносе лучистой энергии на верхней границе атмосферы. Определены широтные зоны локализации экстремумов в изменении годового и сезонного переноса лучистой энергии, совпадающие с областями генерации тропических и максимального развития внетропических атмосферных вихрей. Показано, что средний перенос энергии в системе океан–атмосфера определяется переносом лучистой энергии на верхней границе атмосферы.

Ключевые слова: *инсоляция, солярный климат, лучистая энергия, перенос лучистой энергии, зоны турбулентности, атмосферные вихри.*

LONG-TERM VARIATIONS IN SOLAR ENERGY TRANSFER AT THE UPPER BOUNDARY OF THE EARTH'S ATMOSPHERE

V. M. Fedorov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Leninskie gory, 1

Abstract. The paper presents the results of studies of changes in the transfer of solar irradiance at the upper boundary of the Earth's atmosphere. The features of long-term variability in the transfer of solar energy at the upper boundary of the atmosphere were determined on the basis of the theoretical calculations of insolation from astronomical ephemerides. Areas of spatial localization of the extrema in the annual and seasonal transfer of solar energy that coincide with the regions of generation of tropical and extratropical cyclones were determined. The paper shows that the energy transfer in the ocean-atmosphere system is closely related to the transfer of solar energy at the upper boundary of the atmosphere. The necessity to take into account the found variations in the transfer of solar energy in the equations of hydrothermodynamics for the development of physico-mathematical models of the climate and numerical experiments was substantiated.

Keywords: *insolation, solar climate, solar energy, transfer of solar energy, turbulence zones, atmospheric vortices.*

Солнечная радиация является важнейшим источником энергии многих геофизических, гидрометеорологических и биологических процессов. Приходящая к Земле лучистая энергия испытывает изменения как во времени, так и в пространстве. Вариации в приходе солнечной радиации к Земле невелики. За период с 2999 до н.э. (5998 лет) они составляют около 0.005% от приходящей к Земле в среднем за год радиации. Однако, изменения распределения по широтам и сезонам года приходящей радиации за тот же период меняется более значительно, до 3.0% [1–3]. В связи с существенными изменениями в меридиональном распределении приходящей солнечной радиации можно ожидать значимых изменений и в переносе лучистой энергии на верхней границе атмосферы (ВГА), определяемых изменением угла наклона оси вращения Земли [3, 4]. Этот вопрос в геофизике исследован еще недостаточно.

Методика расчетов

Расчеты приходящей солнечной радиации выполнялись по данным астрономических эфемерид [5] 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 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:

$$I_{nm}(\phi_1, \phi_2) = \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_{\phi_1}^{\phi_2} \sigma(H, \phi) \left(\int_{-\pi}^{\pi} \Lambda(H, t, \phi, \alpha) d\alpha \right) d\phi \right) dt,$$

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 $\sigma(H, \phi)d\alpha d\phi$ – площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида, α – часовой угол, ϕ – географическая широта, выраженные в радианах, H – высота поверхности эллипсоида относительно поверхности Земли (м), $\Lambda(H, t, \phi, \alpha)$ – 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 [5, 6]. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным $1361 \text{ Вт}/\text{м}^2$ [1, 5, 7]. Изменение активности Солнца не учитывалось.

Полученные результаты

Вариации солнечной радиации, связанные с небесно-механическими процессами, определяются расчетными методами. Под солярным климатом Земли понимается рассчитываемое теоретически поступление и распределение солнечной радиации на верхней границе атмосферы (ВГА) или на поверхности Земли без учета атмосферы [3, 9, 10]. В результате расчетов инсоляции Земли [3, 6] получено среднее годовое распределение инсоляции по 5-ти градусным широтным зонам (рис. 1).

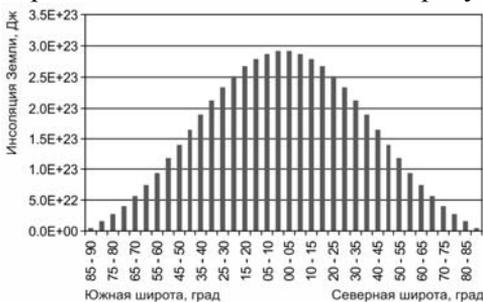


Рисунок 1. Средняя годовая инсоляция в широтных зонах Земли на ВГА.

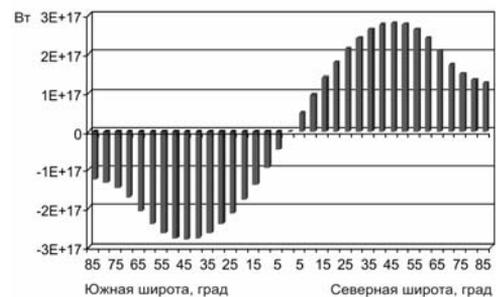


Рисунок 2. Средний (за период с 2999 года до н.э. по 2999 года н.э.) годовой перенос энергии на ВГА к северу.

В связи с неравномерностью в распределении лучистой энергии на ВГА были рассчитаны характеристики ее переноса и получены оценки многолетней изменчивости для годового и сезонного переноса. Лучистая энергия переносится от экваториальной области (0° – 45° широты), куда ее поступает больше в полярные районы (45° – 90° широты), где инсоляция (из-за эллипсоидальной формы Земли) меньше. В качестве характеристики переноса лучистой энергии использовался меридиональный градиент инсоляции. Традиционно, для океана и атмосферы рассчитывается перенос энергии к северу [8, 9]. Меридиональный градиент инсоляции рассчитывался последовательным вычитанием значений годовой (или полугодовой) инсоляции полученных для 5-ти градусных широтных зон. При этом из значений инсоляции южных зон вычитались

значения соседних зон, расположенных севернее. Такие расчеты проведены для первого в массиве столетия (2999 – 2900 г. до н.э.) и последнего (2900 – 2999 г. н.э.). По этим значениям определились средние (для первого и последнего в массиве столетия) значения меридионального градиента для 5-ти градусных широтных зон (рис. 2).

Вычитанием из значений меридионального градиента инсоляции, полученных для последнего в массиве столетия соответствующих (для широтных зон) значений градиента, рассчитанных для первого столетия получено изменение годового переноса энергии на ВГА в широтных зонах за 5998 лет. Делением полученных значений (в Дж) на среднюю продолжительность тропического года (с) получены значения переноса энергии в Вт. Делением полученных для широтных зон значений изменения переноса на средние значения меридионального градиента инсоляции (для соответствующих зон) определялись показатели изменения годового переноса энергии на ВГА в процентах (рис. 3).

Отмечается постепенное увеличение переноса лучистой энергии от экватора к полярным кругам в каждом полушарии. Физический процесс переноса лучистой энергии – излучение. В заполярных областях отмечается постепенное уменьшение переноса лучистой энергии от полярных кругов к полюсам. Максимальное увеличение (на $2.61 \cdot 10^{15}$ Вт или 1.25%) отмечается вблизи полярных кругов (около 65° широты) в каждом полушарии (годовые «зоны турбулентности»). Максимальное уменьшение переноса по модулю (на $3.3 \cdot 10^{15}$ Вт или 2.56%) отмечается вблизи географических полюсов. Отмеченные «зоны турбулентности» совпадают с районами (60° – 70° широты) максимального развития внетропических циклонов (циклогенеза) в полушариях [13] или субполярными зонами низкого давления [11, 12].

Аналогичным образом рассчитывались средние полугодовые значения переноса энергии для зимнего и летнего (для северном полушария) полугодия. В зимнее (для северного полушария) полугодие максимумы переноса лучистой энергии относительно годового распределения смещаются к югу и локализуются вблизи 55° широты в южном полушарии и вблизи 35° широты в северном полушарии. В летнее для северного полушария полугодие максимумы переноса лучистой энергии смещаются к северу, относительно годового и зимнего распределения, и локализуются вблизи 35° широты в южном полушарии и 55° широты в северном полушарии. Смещение по широте максимумов среднего переноса лучистой энергии от полугодия к полугодю составляет, таким образом, около 20° по широте.

Изменение в переносе энергии по полугодиям находилось как разность значений градиентов инсоляции в полугодие между средними за последнее (2900–2999 гг.) и первое (2900–2999 гг. до н.э.) столетие, значениями (по модулю) для соответствующих широтных зон (рис. 4).

В зимнее (для северного полушария) полугодие за 5998 лет максимальное уменьшение (на 17.8%) отмечается в зоне 10° – 15° ю.ш., максимальное увеличение (на 11.8%) локализовано в зоне 15° – 20° ю.ш. В летнее (для северного полушария) максимум в изменении меридионального градиента (11.8%) локализован в зоне 15° – 20° с.ш., минимум (17.8%) приходится на широтную зону 10° – 15° с.ш. Таким образом, выделяются сезонные «зоны турбулентности» соответствующие широтным диапазонам 10° – 20° в каждом полушарии. Здесь в соседних широтных зонах отмечаются максимальные расхождения в тенденциях изменения переноса лучистой энергии (в зоне 10° – 15° отмечается максимальное сокращение, в зоне 15° – 20° широты – максимальное увеличение).

Известно, что подавляющее большинство тропических циклонов формируется в

пределах экваториального пояса между 10° и 30° широты в обоих полушариях. Приблизительно 87% тропических циклонов формируются в районах, расположенных не выше 20° широты [14]. Таким образом, область генерации тропических циклонов, наносящих огромный ущерб природе и человечеству (например, ущерб от ураганов «Харви» и «Ирма» в 2017 г. оценивается в 290 млрд. долларов), совпадает с сезонными «зонами турбулентности» в многолетнем изменении в переносе лучистой энергии [14].

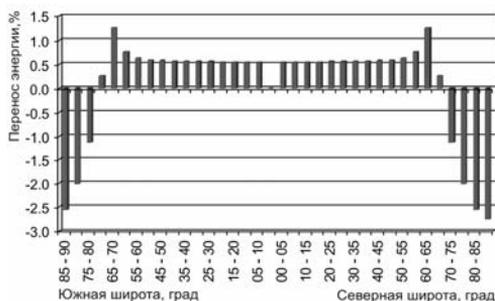


Рисунок 3. Изменение годового переноса энергии на ВГА за 5998 лет.

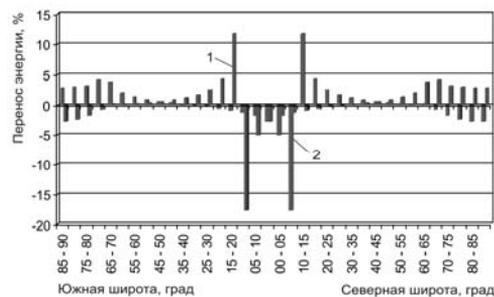


Рисунок 4. Изменение переноса лучистой энергии на ВГА в зимнее (1) и летнее (2) полугодие для северного полушария за 5998 лет.

Отмеченные нами области вблизи 65° и 10° – 20° широты характеризуют разные стадии развития циклонических вихрей. Если с сезонными «зонами турбулентности» связано зарождение тропических циклонов (в области 10° – 20° широты в каждом полушарии), то с годовыми «зонами турбулентности» (вблизи 65° в каждом полушарии) связана стадия максимального развития внетропических циклонов [13]. Главным образом, с вихревым переносом энергии связана работа «тепловой машины первого рода», механизма меридионального теплообмена в атмосфере. Вихри (циклоны) переносят энергию в атмосфере из области источника тепла (из низких широт) в области его стока (в высокие широты). Общее количество энергии, которая выделяется в тропическом циклоне, составляет от 10^{14} Дж (при $V = 17$ м/с) до 10^{17} Дж (при $V = 27$ м/с). В первом случае это соответствует взрыву атомной бомбы с тротильным эквивалентом равным 20 килотонн (такие бомбы были сброшены на Хиросиму и Нагасаки). Во втором случае энергия тропического циклона соответствует взрыву водородной бомбы с энергией соответствующей 20 мегатонн в тротильном эквиваленте.

Полученное среднее распределение годового переноса лучистой энергии на ВГА (рис. 2) сравнивалось с распределением среднего годового переноса энергии в системе океан-атмосфера приведенным в работах Э. Пальмена, Ч. Ньютона [12] и Э. Лоренца [11]. Коэффициент корреляции между значениями годового переноса энергии на ВГА и в системе океан-атмосфера составил 0.98. Следовательно, можно предположить, что средний годовой перенос в системе океан-атмосфера определяется средним годовым переносом лучистой энергии на ВГА.

Заключение

В изменении годового переноса энергии на ВГА отмечается область увеличения переноса лучистой энергии, расположенная приблизительно между полярными кругами с максимумами (годовые «зоны турбулентности») вблизи полярных кругов (около 65° в каждом полушарии) и области уменьшения переноса лучистой энергии, расположенные за полярными кругами. Максимумы увеличения годового переноса энергии соответствуют областям максимального развития внетропических вихрей – циклонов в обоих полушариях.

В летние для полушарий полугодия в областях 10° – 15° широты отмечается максимальная дивергенция в тенденциях изменения переноса лучистой энергии (сезонные «зоны турбулентности»). С этими зонами связывается образование тропических циклонов в полушариях. Из полученных результатов следует, что в связи с отмеченными особенностями в изменении переноса лучистой энергии на ВГА будет возрастать и интенсивность вихревого переноса энергии в атмосфере (тропические и внетропические циклоны), т.е. будет происходить усиление работы «тепловой машины первого рода» – усиление меридионального теплообмена в атмосфере.

Полученные изменения в переносе энергии на ВГА, вероятно, следует учитывать в системе уравнений гидротермодинамики (уравнения законов сохранения массы, импульса, энергии и состояния газа) для атмосферы используемой при численных экспериментах в физико-математических моделях климата.

Литература / References:

1. Fedorov V.M. Periodic perturbations and small variations of the solar climate of the Earth // Dokl. Earth Sci. 2014. V. 457. No. 1. pp. 869–872. DOI: 10.7868/S0869565214200213
2. Fedorov V.M. Latitudinal variability of incoming solar radiation in various time cycles // Dokl. Earth Sci. 2015. V. 460. No. 1. pp. 96–99. DOI 10.7868/S0869565215030196
3. Fedorov V.M. Insolyaciya Zemli i sovremennye izmeneniya klimata. Moscow: Fizmatlit, 2018. 232 p.
4. Fedorov V.M. Spatial and temporal variation in solar climate of the Earth in the present epoch // Izv. Atm. and Oceanic phys. 2015. V. 51. No. 8. pp. 779–791. DOI 10.1134/S0001433815080034
5. <http://ssd.jpl.nasa.gov> – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics)
6. 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
7. Fedorov V.M. Interannual Variations in the Duration of the Tropical Year // Dokl. Earth Sci. 2013. V. 451. pp. 750–753. DOI: 10.1134/S1028334X13070015.
8. Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 37. L01706. DOI 10.1029/2010GL045777
9. Milankovich M. Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebanij klimata. Moscow-Leningrad: GONTI, 1939. 207 p. [in Russian]
10. Monin A.S., Shishkov Yu.A. Istoriya klimata. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 408 p. [in Russian]
11. Lorenc E.N. Priroda i teoriya obshchej cirkulyacii atmosfery. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 260 p. [in Russian]
12. Pal'men E.H., N'yuton CH. Cirkulyacionnye sistemy atmosfery. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 616 p. [in Russian] (transl. Palmen E., Newton C.W. Atmospheric circulation systems. New York, London: Academic Press, 1969.)
13. Pogosyan H. Ciklony. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976. 148 p. [in Russian]
14. <http://www.aoml.noaa.gov>