ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СОЛЯРНОГО КЛИМАТА ЗЕМЛИ В СОВРЕМЕННУЮ ЭПОХУ

Федоров В.М.

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

FEATURES OF CHANGES IN THE SOLAR CLIMATE OF THE EARTH IN THE MODERN ERA

Fedorov V.M.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The results of the analysis of the performed calculations of the Earth's insolation were presented. The main trends in the change of the modern solar climate are determined. This is an increase in latitude contrast and smoothing of seasonal differences. The relationship between the meridional insolation gradient and the average annual energy transfer in the ocean-atmosphere system was shown. The features of the annual and semi-annual meridional gradient of insolation and the relationship of the latitudinal regions of maximum changes with the spatial localization of circulation cells (Hedley, Ferrell, Polar) and the areas of generation and development of vortex formations (tropical and extratropical cyclones) were shown. The possible relationship between the decrease in the inclination of the Earth's rotation axis and the strengthening of the meridional insolation gradient with an increase in climatic turbulence was noted.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-415-418

Вариации приходящей к Земле солнечной радиации в основном определяются двумя причинами, имеющими различную физическую природу. Одной из причин является изменение активности в излучении Солнца. Другая причина связана с небесно-механическими процессами, изменяющими элементы земной орбиты и наклон оси вращения [2]. Под солярным климатом Земли понимается рассчитываемое теоретически поступление и распределение солнечной радиации на верхней границе атмосферы (ВГА) или на поверхности Земли без учета атмосферы [2]. При этом изменение активности Солнца не учитывается.

Инсоляция рассчитывалась с большим пространственным и временным разрешением [4, 7, 8]. Расчеты выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид [9] 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 (координатного времени – СТ) и всемирного корректируемого времени (UT). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80 – Geodetic Reference System, 1980) с длинами полуосей рав-

ными 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 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. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным $1361 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Изменение активности Солнца не учитывалось [4, 8].

Годовое поступление к Земле солнечной радиации за 5999 лет сокращается всего на $0,005\%$ [6–8]. Однако отмечается увеличение инсоляции в экваториальной области ($0,25\%$) и сокращение в полярных районах ($2,73\%$) – тенденция усиления широтной контрастности в солярном климате. Отмечается сокращение инсоляции в летние для полушарий полугодия ($2,9\%$) и увеличение в зимние ($3,75\%$) – проявляется тенденция сглаживания сезонных различий в солярном климате Земли.

Из-за неравномерности в распределении солнечной радиации на поверхности Земли возникает меридиональный градиент инсоляции (МГИ) [1, 3]. Получено изменение годового МГИ за 5998 лет (рис. 1).

Рис. 1. Изменение годового МГИ за 5998 лет, в процентах относительно среднего.

Максимумы увеличения локализованы вблизи полярных кругов (60° – 70° широты – годовые «зоны турбулентности»). Отмеченные «зоны турбулентности» совпадают с районами максимального развития внетропических циклонов (циклогенеза) в полушариях [1, 3]. В заполярных районах отмечается уменьшение МГИ. Увеличение годового МГИ приходится на области локализации циркуляционных ячеек Хедли и Ферреля в атмосфере.

Определены многолетние изменения МГИ для зимнего и летнего (в северном полушарии) полугодия (рис. 2).

Рис. 2. Изменение МГИ в зимнее (1) и летнее (2) полугодие для северного полушария за 5998 лет в процентах относительно среднего.

Значения МГИ максимально увеличиваются в зимнее (для северного полушария) полугодие в широтной зоне 15° – 20° ю.ш. (11,8%) и максимально сокращаются в зоне 10° – 15° ю.ш. (17,8%). В летнее (для северного полушария) полугодие максимальное увеличение (11,8%) отмечается в широтной зоне 10° – 15° с.ш., максимальное сокращение (17,8%) в широтной зоне 5° – 10° с.ш. Таким образом, в летних полушариях выделяются сезонные «зоны турбулентности» расположенные в широтном диапазоне 5° – 20° градусов широты. Здесь в соседних 5-ти градусных широтных зонах отмечаются максимальные расхождения в тенденциях изменения летнего МГИ. Сезонные «зоны турбулентности» совпадают с областями генерации тропических циклонов (80% которых формируется в пределах диапазона 10° – 20° широты). В полярных областях (полярные циркуляционные ячейки) в зимние полугодия в полушариях отмечается увеличение МГИ, в летние полугодия сокращение. С вихревым переносом энергии связана работа «тепловой машины первого рода», механизма меридионального переноса тепла из низких широт в высокие.

Полученное среднее распределение годового МГИ (рис. 1) сравнивалось с меридиональным распределением среднего годового переноса энергии в системе океан – атмосфера приведенным в работах Лоренца [1] и Пальмена, Ньютона [3]. Коэффициент корреляции между средними значениями годового МГИ и значениями переноса энергии в системе океан – атмосфера составил 0,98 (линейная связь). При этом численные значения переноса энергии в системе океан – атмосфера в работах [1, 3] в среднем в 6–7 раз, превосходят значения МГИ, что может быть связано с участием в переносе энергии в системе океан – атмосфера водных и воздушных масс.

Поскольку перенос энергии в системе океан – атмосфера определяется МГИ, то и полученные для него особенности могут проявляться и в системе океан – атмосфера (возрастание интенсивности циркуляции в ячейках общей циркуляции атмосферы, усиление вихревого переноса энергии и климатической турбулентности). Отмечаемые для современной эпохи особенности солярного климата Земли связаны с уменьшением наклона оси вращения Земли в результате прецессии [2, 7, 8].

Учет вариаций солнечной радиации разной физической природы [5] позволяет получить полную и объективную оценку возможных изменений как общего потока солнечной радиации, так и глобального климата Земли, поскольку солнечная радиация является основным источником энергии гидрометеорологических процессов.

Литература

1. *Лоренц Э.Н.* Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 260 с.
2. *Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.–Л.: ГОНТИ, 1939. 208 с.
3. *Пальмен Э. Ньютон Ч.* Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 616 с.
4. *Федоров В.М., Костин А.А.* Вычисление инсоляции Земли для периода от 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э. // Процессы в геосредах, 2019. № 2. С. 254–262.
5. *Федоров В.М.* Анализ составляющих различной физической природы в межгодовой изменчивости полного потока солнечного излучения // Астрономический вестник, 2019. Т. 53. № 5. С. 394–400. DOI:10.1134/S0320930X19040029
6. *Фёдоров В.М.* Проблема меридионального переноса тепла в астрономической теории климата // Геофизические процессы и биосфера, 2019. Т. 18. № 3. С. 117–128. DOI: 10.21455/GPB2019.3-8
7. *Федоров В.М.* Вариации инсоляции Земли и особенности их учета в физико-математических моделях климата // Успехи физических наук, 2019. Т. 189. № 1. С. 33–46. DOI: 10.3367/UFNr.2017.12.038267
8. *Fedorov V.M., Frolov D.M.* Spatial and temporal variability of solar radiation arriving at the top the atmosphere // Cosmic Research, 2019. V. 57. № 3. Pp. 156–162. DOI: 10.1134/S0010952519030043
9. <http://ssd.jpl.nasa.gov> – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Электронный ресурс национального аэрокосмического агентства США.