ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2019, № 5, с. 50–58

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИХОДЯЩЕЙ НА ВЕРХНЮЮ ГРАНИЦУ АТМОСФЕРЫ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ И ИХ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ

© 2019 г. В. М. Федоров*, С. А. Сократов, Д. М. Фролов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
**E-mail: fedorov.msu@mail.ru*

Поступила в редакцию 04.07.2019 г.

Спутниковые измерения общего потока приходящей к Земле солнечной радиации (Total solar irradiance) проводятся с 1977 г. К настоящему времени получен непрерывный ряд изменений общего потока солнечной радиации. В многолетних изменениях солнечной радиации определен 11-летний цикл и его амплитуда. Однако в регулировании поступления солнечной радиации к Земле (без учета атмосферы) и распределении ее по земной поверхности (солярный климат Земли) выделяются два механизма, имеющие различную физическую природу. Один механизм связан с изменением активности Солнца. Другой механизм определяется небесно-механическими процессами, изменяющими элементы земной орбиты (расстояние Земля–Солнце, продолжительность тропического года и др.), наклон оси вращения и связанные с ними изменения в инсоляции Земли. Выполненные расчеты инсоляции, связанные с небесно-механическими процессами, составляют основу для дифференциации данных спутниковых наблюдений по изменениям общего потока радиации (Total solar irradiance) относительно механизмов разной физической природы. Создана возможность для оценки вклада солнечной активности и небесно-механических процессов в изменения общего потока приходящей к Земле солнечной радиации.

Ключевые слова: спутниковые измерения, общий поток радиации, инсоляция Земли, тенденции изменения, наклон оси вращения, астрономические сезоны, широтная локализация

DOI: https://doi.org/10.31857/S0205-96142019550-58

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная радиация является основным источником энергии, определяющим радиационный, тепловой баланс Земли. Годовой приход солнечной радиации на верхнюю границу атмосферы Земли (ВГА) в среднем составляет 5.49E24 Дж (Будыко, 1974; Дроздов и др., 1989; Федоров, 2018; Хромов, Петросянц, 2006) или 1.0777E10 Дж/м^2. 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 (Миланкович, 1939; Монин, 1982; Монин, Шишков, 2000) и наклона оси вращения. В работе рассматриваются пространственные и временные вариации, связанные с небесно-механическими процессами. Изменение активности Солнца не учитывается.

Спутниковые измерения полного потока солнечной радиации (Total solar irradiance) проводятся с 1977 г. К настоящему времени получен непрерывный ряд непосредственных измерений TSI, выполненных несколькими специальными космическими аппаратами («Нимбус-7» — запущен в ноябре 1978 г. и SMM — Solar Maximum Mission — запущен в феврале 1980 г.). Эти измерения выполнены для трех полных циклов солнечной активности (21–23) и продолжаются в текущем 24 цикле. Отсчет получаемой со спутников информации по вариациям TSI ведется относительно неизменного расстояния между Землей и Солнцем равного 1 а.е. (среднее за год). При расчетах вариации инсоляции, связанных с небесно-механическими процессами, расчеты проводятся от принятого и неизменного значения солнечной постоянной (среднего многолетнего значения TSI) и не нормируются по расстоянию. Анализ рассчитанных нами данных инсоляции со спутниковой информацией по TSI позволяет определять соотношение вариаций разной физической природы (связанных с солнечной активностью и с небесно-механическими процессами) в общем потоке солнечной радиации (Федоров, 2019а).

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 (Дроздов и др., 1989; Миланкович, 1939; Монин, Шишков, 2000; Федоров, 2018). Данные дистанционного зондирования Земли по TSI (Total solar irradiance) с учетом полученных при выполнении теоретических расчетов значений инсоляции, могут быть дифференцированы относительно участия вариаций разной физической природы в изменении общего потока солнечной радиации.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Расчеты приходящей солнечной радиации выполнялись по данным астрономических эфемерид (Giorgini et al., 1996; Jet Propulsion Laboratory) (которые составлены по спутниковым данным), 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 — CT) и всемирного корректируемого времени (UT). 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:

$$I_{nm}(\varphi_1,\varphi_2)=\int_{t_1}^{t_2}\left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\sigma(H,\varphi)\left(\int_{-\pi}^{\pi}\Lambda(H,t,\varphi,\alpha)\,d\alpha\right)d\varphi\right)dt\ ,$$

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 (Вт/м^2), t — время (с). Шаги при интегрировании составляли: по долготе 1°, по широте 1°, по времени 1/360 часть продолжительности тропического года (Федоров, 2012, 2013, 2014, 2015а, 2015б, 2016). Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным 1361 Вт/м^2 (Федоров, 2018; Kopp, Lean, 2011). Изменение активности Солнца не учитывалось.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате расчетов инсоляции Земли (Федоров, 2019б; Bertrand et al., 2002; Федоров, 2013) получено распределение инсоляции в Дж и Дж/м^2. Пространственно-временное изменение приходящей на ВГА солнечной радиации за период с 3000 г. до н.э. по 2999 г.н.э. представлено на рис. 1, 2. Изменение инсоляции определялось как разность средних значений для последних ста лет и соответствующих значений первых ста лет в массиве рассчитанных значений инсоляции.

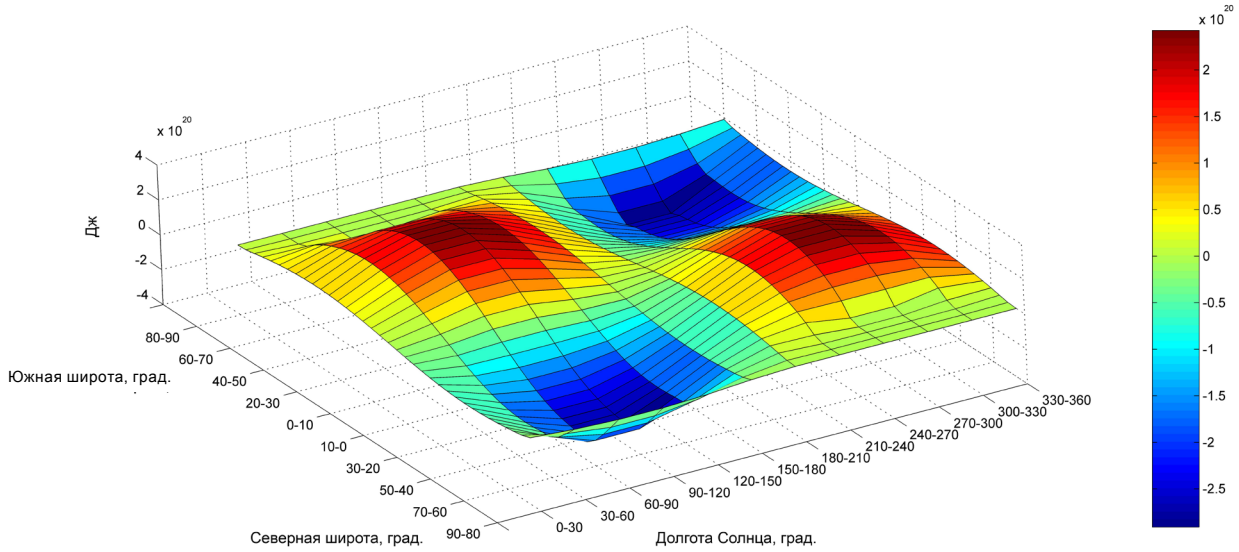

Рис. 1. Пространственно-временное изменение инсоляции Земли за период с 3000 лет до н.э. по 2999 г.н.э. (Дж).

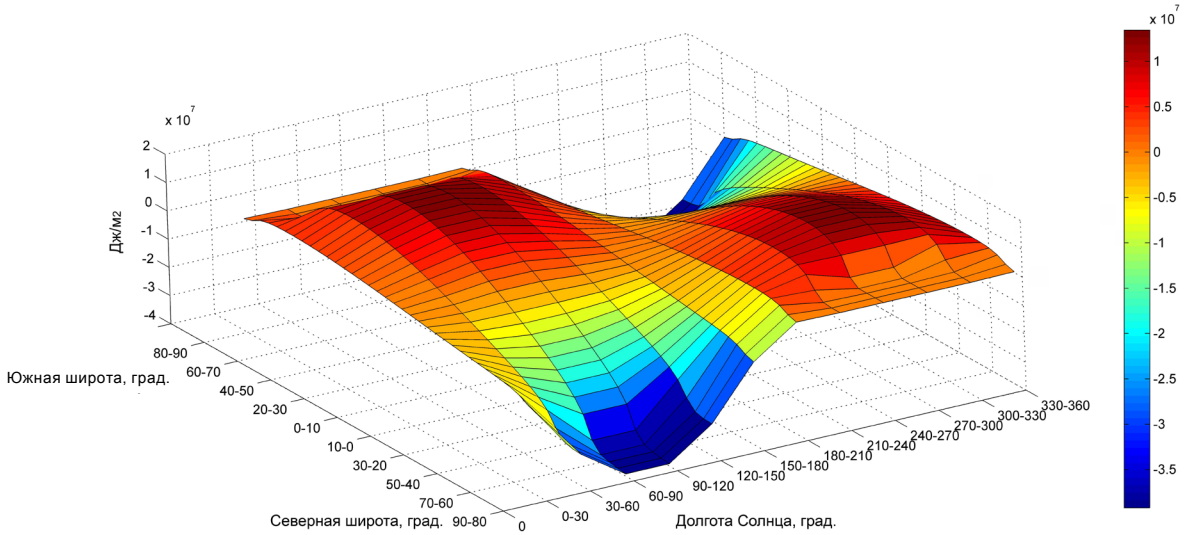

Рис. 2. Пространственно-временное изменение инсоляции Земли за период с 3000 лет до н.э. по 2999 г.н.э. (Дж/м^2).

Результаты показывают, что среднегодовое поступление солнечной энергии на ВГА Земли в последнее (на интервале от 3000 лет до н.э. до 2999 н.э.) столетие по отношению к первому столетию за этот период сократилось незначительно (на 5.78E+05 Дж/м^2 или на 0.005%). Эта медленная тенденция сокращения инсоляции (рис. 3) определяется вековыми изменениями эксцентриситета земной орбиты (Миланкович, 1939; Федоров, 2018, 2019).

При общем малом сокращении приходящей на ВГА за тропический год солнечной радиации в районах ниже 45° широты в каждом полушарии проявляется заметная тенденция к увеличению, а выше 45° — к сокращению инсоляции (рис. 4).

Сокращение приходящей в полярные области (85°–90° географической широты) солнечной энергии за весь период составляет 1.53E+08 Дж/м^2 или 2.73% от начального значения. Увеличение в экваториальной области (в широтных зонах 0°–5° с.ш. и 0°–5° ю.ш.) равно 3.23E+07 Дж/м^2, что составляет 0.25% от начального значения инсоляции. Таким образом, отмечается увеличение меридионального градиента инсоляции между экваториальной областью и полярными районами на 2.98%. Изменение интенсивности приходящей радиации происходит сходным образом. Сокращение интенсивности приходящей солнечной радиации в полярных областях составляет около 5 Вт/м^2, увеличение в экваториальной области 1 Вт/м^2.

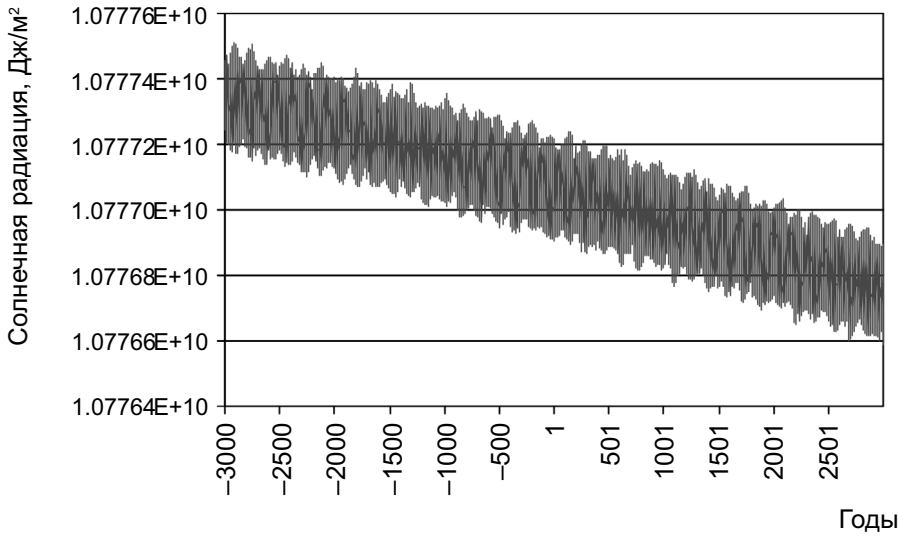

Рис. 3. Изменения инсоляции Земли в интервале с 3000 г. до н.э. по 2999 г.н.э.

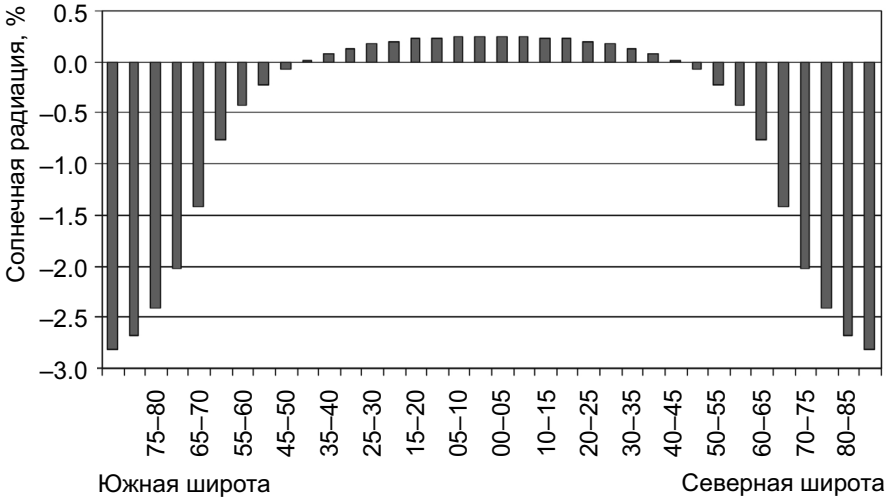

Рис. 4. Широтное изменение инсоляции Земли в интервале с 3000 г. до н.э. по 2999 г.

Увеличение меридионального градиента интенсивности солнечной радиации составляет 6 Вт/м^2. Следовательно, одна из тенденций в изменении приходящей от Солнца энергии в современную эпоху — усиление широтной контрастности (увеличение меридионального градиента) инсоляции (Федоров, 2018, 2019; Федоров, 2014, 2015а, 2015б). Этот эффект проявляется как в общей приходящей на единицу площади земного эллипсоида солнечной радиации, так и в интенсивности ее поступления.

Анализировались также рассчитанные для сезонов (зимнего и летнего астрономического полугодия) значения инсоляции (рис. 5). Вековые изменения (тенденции) оценивались разностью значений приходящей солнечной радиации (Дж/м^2) в последнее (2900–2999 г.н.э.) и первое (3000 г. до н.э.— 2901 г. до н.э.) столетие для соответствующих широтных зон в соответствующие полугодия. В летнее для северного полушария полугодие увеличение приходящей на земной эллипсоид солнечной радиации в абсолютных значениях отмечается в зоне 5°–10° с.ш. и широтной области расположенной южнее. Максимальное увеличение приходящей радиации отмечается в широтной зоне 45°–50° ю.ш., где оно составляет 5.41E+07 Дж/м^2 или 2.038% от среднегодового значения солнечной радиации, поступающей в эту зону за летнее для северного полушария полугодие. Среднее для 5-ти градусной широтной зоны увеличение в этой области составляет 3.14E+07 Дж/м^2. Сокращение инсоляции отмечается в это время в зоне 10°–15° с.ш. и в области, расположенной севернее этой зоны.

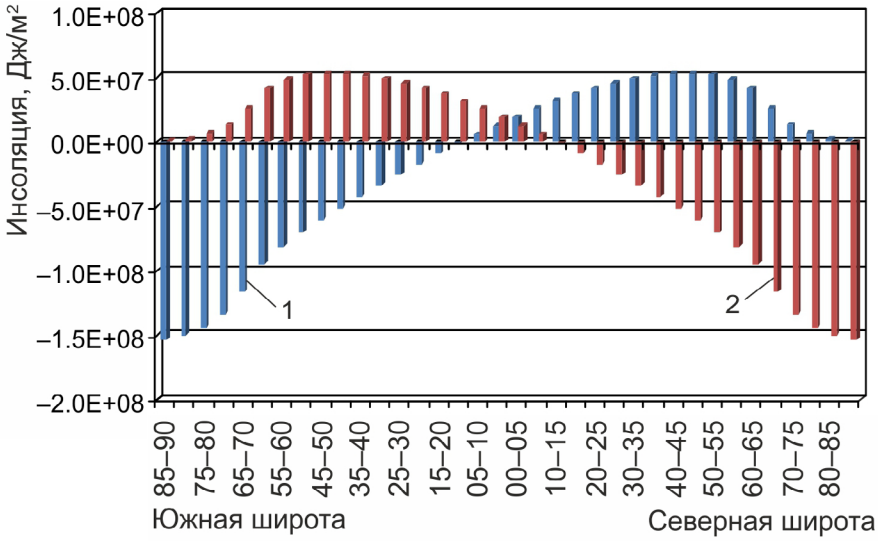

Рис. 5. Широтное изменение инсоляции Земли в интервале с 3000 г. до н.э. по 2999 г. в зимнее (1) и летнее (2) полугодие (для северного полушария).

Максимальное сокращение локализуется в зоне 85°–90° с.ш.— 1.56E+08 Дж/м^2, или 2.83% от среднегодового значения приходящей в эту зону солнечной радиации. Среднее для 5-ти градусной зоны сокращение составляет 7.55E+07 Дж/м^2. Среднегодовое сокращение инсоляции в последнем для интервала столетии по отношению к первому столетию за летнее для северного полушария полугодие составляет 2.98E+05 Дж/м^2 (0.006%). Сокращение приходящей в широтную зону 65°–70° с.ш. (на ВГА) радиации за предшествующее 1000 лет для середины июля (точки с геоцентрической широтой 120°) на 4.8 Вт/м^2 отмечается также в работе бельгийских исследователей (Bertrand et al., 2002).

В зимнее для северного полушария полугодие (рис. 5) отмечается сокращение приходящей на земной эллипсоид солнечной энергии в широтной области от 10° ю.ш. до 90° ю.ш. Максимального значения сокращение достигает в южной полярной области 1.56E+08 Дж/м^2, или 2.83% от среднегодового значения солнечной энергии, поступающей в эту широтную зону земного эллипсоида в зимнее полугодие. Среднее для 5-ти градусной широтной зоны сокращение инсоляции на этом интервале (3000 г. до н.э.— 2999 г.) составляет 7.55E+07 Дж/м^2. Положительные значения в это полугодие характерны для области 5°–10° южной широты и для всех широтных зон, расположенных севернее этой зоны. Максимальное значение инсоляции отмечается в широтной зоне 45°–50° с.ш.— 5.42E+07 Дж/м^2, или 2.04% от среднегодового значения энергии, поступающей в эту зону в зимнее (для северного полушария) полугодие. Среднее для 5-ти градусной зоны увеличение инсоляции характеризуется значением 3.14E+07 Дж/м^2. Среднегодовое увеличение инсоляции в последнем для интервала (с 3000 г. до н.э. по 2999 г.н.э.) столетии по отношению к первому за летнее для северного полушария полугодие составляет 2.80E+05 Дж/м^2 (0.005%). Таким образом, в зимние для полушарий полугодия отмечается увеличение приходящей от Солнца энергии, а в летние полугодия — сокращение. Сезонные различия в приходящей на земной эллипсоид солнечной энергии, следовательно, сглаживаются (Федоров, 2018, 2019; Федоров, 2015б).

Отмеченные низкочастотные изменения — тенденции (усиление широтной контрастности и сглаживание сезонных различий) в инсоляции Земли связаны с вековой тенденцией уменьшения угла наклона оси вращения Земли (относительно перпендикуляра к плоскости эклиптики) в результате прецессии. Известно, что при увеличении угла наклона оси вращения увеличивается приход солнечной радиации в полярные районы, т.е. происходит сглаживание широтной контрастности в полушариях и усиление сезонных различий. При уменьшении угла наклона происходит увеличение радиации, поступающей в приэкваториальные районы, уменьшение радиации, поступающей в полярные районы, и широтные контрасты возрастают, а сезонные различия сглаживаются (Миланкович, 1939; Монин, Шишков, 2000).

В относительных единицах (рис. 6) максимальные изменения приходящей солнечной радиации локализуются в летнее в северном полушарии полугодие в широтной зоне 60°–65° ю.ш. (3.75%). В зимнее в северном полушарии полугодие максимум в полугодовом изменении приходящей

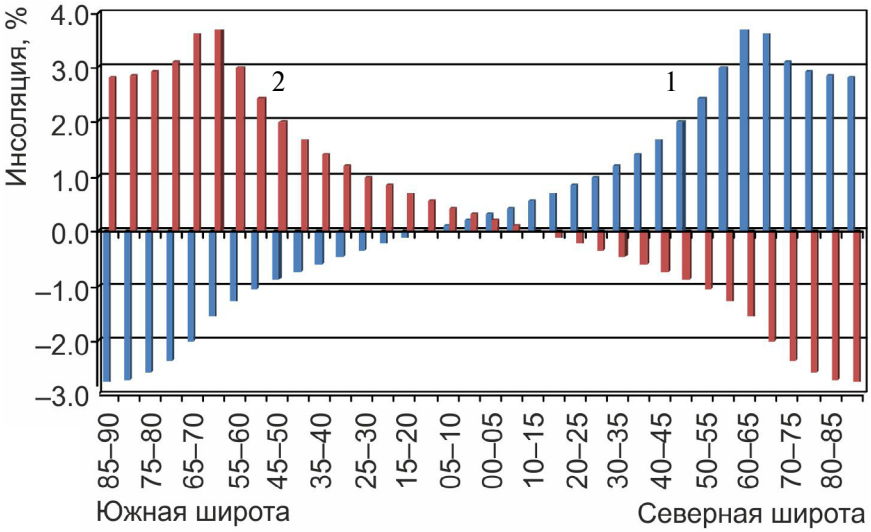

Рис. 6. Широтное изменение инсоляции Земли в % (3000 г. до н.э.— 2999 г.н.э.) в зимнее (1) и летнее (2) полугодие (для северного полушария).

радиации приходится на широтную зону 60°–65° с.ш. (3.75%).

На основе анализа полученных результатов расчета инсоляции выделяются следующие особенности в вековой тенденции изменения приходящей солнечной радиации (рис. 1, 2).

1. В зимние для полушарий полугодия поступление солнечной радиации увеличивается, а в летние — сокращается (сезонные различия сглаживаются). Анализ изменения приходящей радиации на рассматриваемом интервале к Земле по полушариям и полугодиям показывает, что в летние для полушарий полугодия сокращение (по средним значениям первого и последнего столетия в массиве) по полушариям составляет 3.89E+07 Дж/м^2 (0.57%), а в зимнее — увеличение (по средним значениям первого и последнего столетия в массиве) составляет 3.83E+07 Дж/м^2 (0.96%).

2. В зимние для полушарий полугодия наиболее существенное увеличение отмечается в 3-й месяц (точнее 1/3 астрономического сезона) осеннего сезона и 1-й месяц зимнего астрономического сезона в каждом полушарии. Максимальное увеличение приходящей радиации отмечается в широтном диапазоне, расположенном между 35° и 50° широты в обоих полушариях.

3. В летнее для полушарий полугодие наиболее существенное сокращение характерно для 2-го и 3-го астрономических месяцев (точнее, 1/3 астрономического сезона) весеннего сезона и 1-го и 2-го месяцы летнего астрономического сезона в каждом полушарии. Сокращение в отмеченные сезоны последовательно увеличивается с увеличением широты.

4. Выделяются «мертвые» зоны — полярные области, не получающие на протяжении всего интервала (5999 лет) солнечной радиации в отдельные сезоны года. В течение 2-го и 3-го астрономических месяцев осени и двух первых зимних для полушария астрономических месяцев (двух первых третей сезона) широтные зоны от 80° до 90° широты в каждом полушарии солнечной радиации не получают вовсе. В последнюю треть астрономической осени и первую треть астрономической зимы в полушарии приход солнечной радиации также равен нулю в зонах от 70° до 80° широты в каждом полушарии.

5. Выделяется приэкваториальная зона от 5° ю.ш. до 5° с.ш., для которой на всем исследуемом интервале характерно увеличение приходящей радиации в течение всего тропического года. Эта область расширяется до 10° широты во 2-й и 3-й месяцы астрономической весны и первые две трети астрономического лета каждого полушария, и до широты 15° в последнюю треть астрономического весеннего сезона и первую треть астрономического летнего сезона в каждом полушарии (Федоров, 2018; Федоров, 2015б).

Таким образом, на интервале от 3000 г. до н.э. до 2999 г.н.э. в инсоляции Земли отмечается слабое сокращение приходящей радиации. Отмечается увеличение приходящей радиации в экваториальную область (источник тепла) и сокращение в полярных районах (области стока тепла). В летние полугодия отмечается сокращение приходящей радиации, в зимние полугодия — увеличение. В годовом поступлении отмечается сглаживание сезонных различий и увеличением широтной контрастности.

В относительных единицах картина изменения приходящей на ВГА солнечной радиации за период с 3000 г. до н.э. по 2999 г.н.э. заметно меняется (рис. 7).

В северном полушарии в летнее полугодие отмечается постепенное сокращение приходящей солнечной радиации от экваториальной области к полюсу. В 1-й и 6-й астрономические месяцы (1-й астрономический месяц соответствует календарному апрелю) приходящая радиация сокращается от –0.07 и –0.06% в широтной зоне 10°–15° с.ш. до –2.74 и –2.72% в широтной зоне 85°–90° с.ш. Во 2-й и 5-й астрономические месяцы приходящая солнечная радиация сокращается от –0.05% в широтной зоне 10°–15° с.ш. до –2.85% в широтной зоне 85°–90° с.ш. В 3-й и 4-й астрономические месяцы приходящая солнечная радиация сокращается от –0.12% в широтной зоне 15°–20° с.ш. до –2.85% в широтной зоне 85°–90° с.ш.

В северном полушарии в зимнее полугодие на всей территории отмечается увеличение приходящей солнечной радиации. Исключение составляют «мертвые зоны». В 7-й и 12-й астрономические месяцы приход увеличивается от 0.06% в широтной зоне 0°–5° с.ш. до 2.87% и 2.89% в широтной зоне 85°–90° с.ш. В 8-й и 11-й астрономические месяцы увеличение отмечается от 0.31% в широтной зоне 0°–5° с.ш. до 9.83% в широтной зоне 65°–70° с.ш. В 9-й и 10-й астрономические месяцы отмечается увеличение от 0.59% в широтной зоне 0°–5° с.ш. до 2.76% в широтной зоне 55°–60° с.ш. Максимальные увеличения характерны для 8-го и 11-го астрономических месяцев и локализованы в широтных зонах 70°–75° с.ш — 16.5% и 75°–80° с.ш.— 36.83% и 36.85% соответственно. В 9-й и 10-й астрономические месяцы значительное увеличение отмечается в широтной зоне 60°–65° с.ш.— 18.3%. Абсолютный максимум приходится на 9-й и 10-й астрономические месяцы (календарные январь и февраль) и локализован в широтной зоне 65°–70° с.ш.— 52.24% и 52.22% соответственно.

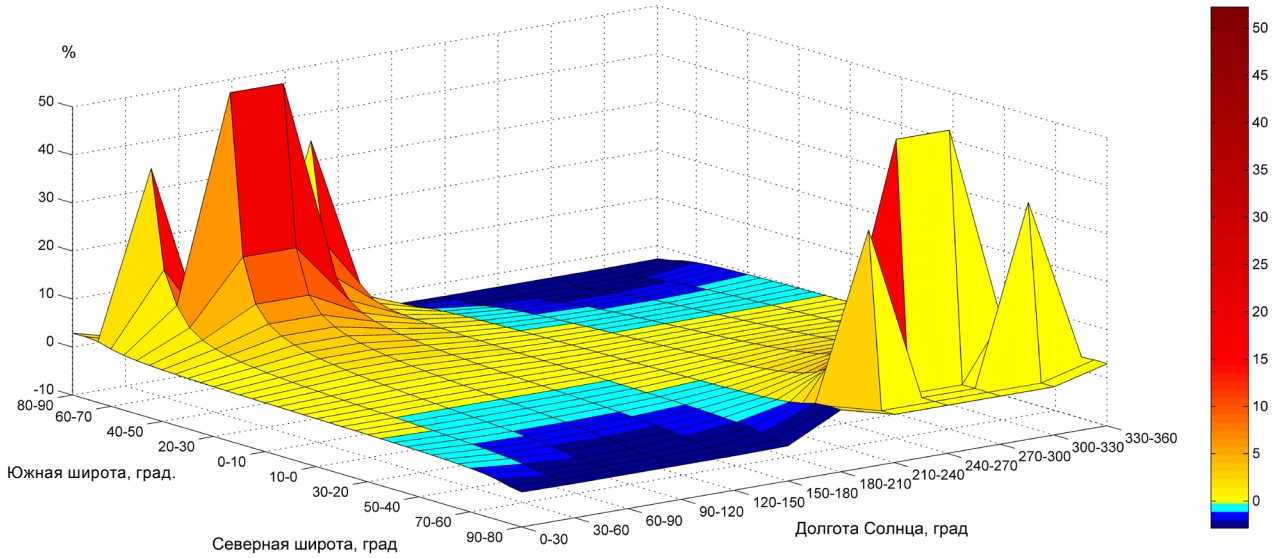

Рис. 7. Пространственно-временное изменение инсоляции Земли в Дж за период с 3000 лет до н.э. по 2999 г.н.э. (%).

Известно, что широтная область 60°–70° с.ш. является зоной внетропического циклогенеза (Федоров, 2018; Хромов, Петросянц, 2006).

В южном полушарии в зимнее полугодие увеличение приходящей солнечной радиации отмечается для всей территории кроме области «мертвых зон». В 1-й и 6-й астрономические месяцы отмечается увеличение от 0.06% в широтной зоне 0°–5° ю.ш. до 2.85% и 2.88%, соответственно, в широтной зоне 85°–90° ю.ш. Во 2-й и 5-й астрономические месяцы увеличение составляет от 0.31% в широтной зоне 0°–5° ю.ш. до 9.83% в широтной зоне 65°–70° ю.ш. В 3-й и 4-й астрономические месяцы увеличение отмечается от 0.59% в широтной зоне 0°–5° ю.ш. до 9.76% в широтной зоне 55°–60° ю.ш. Максимумы увеличения приходящей радиации характерны для 2-го и 5-го астрономических месяцев. Они локализованы в зоне 70°–75° ю.ш.— 16.51% и 16.49% соответственно. В широтной зоне 75°–80° ю.ш. в эти месяцы увеличение приходящей солнечной радиации составляет 38.83% и 36.86% соответственно. В 3-й и 4-й астрономические месяцы в широтной зоне 60°–65° ю.ш. увеличение составляет 18.83% и 18.82% соответственно. Абсолютные максимумы хронологически приходятся на 3-й и 4-й астрономические месяцы (календарные июнь и июль) и локализуются в широтной зоне 60°–65° ю.ш.— 52.24% и 52.22% соответственно.

В южном полушарии в летнее полугодие небольшое увеличение приходящей солнечной радиации отмечается только в экваториальной области. В широтной зоне 0°–5° ю.ш. от 0.02% в 7-й и 12-й астрономические месяцы до 0.40% и 0.39% в 9-й и 10-й астрономический месяц соответственно. В эти месяцы также отмечается увеличение в широтной зоне 5°–10° ю.ш.— 0.22%. На остальной площади полушария отмечается сокращение приходящей радиации. В 7-й и 12-й астрономические месяцы поступление радиации сокращается от –0.06% в широтной зоне 10°–15° ю.ш. до –2.73% в широтной зоне 85°– 90° ю.ш. В 8-й и 11-й астрономические месяцы приход радиации сокращается от –0.17% в широтной зоне 15°–20° ю.ш. до –2.85% в широтной зоне 85°–90° ю.ш. В 9-й и 10-й астрономические месяцы сокращение отмечается от –0.12 в широтной зоне 15°–20° ю.ш. до –2.85% в широтной зоне 85°– 90° с.ш.

В относительных значениях увеличение приходящей солнечной радиации в зимние в полушариях полугодия превышают сокращение солнечной радиации приходящей в летние полушария.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для годовой инсоляции Земли характерна медленная тенденция к сокращению. Отмечается увеличение инсоляции в экваториальной области Земли и сокращение в полярных районах, то есть для современной эпохи характерно усиление широтной контрастности в распределении приходящей к Земле лучистой энергии. Отмечается увеличение приходящей солнечной радиации в зимние для полушарий полугодия и сокращения в летние. Эти тенденции связаны с уменьшением угла наклона оси вращения Земли в современную эпоху. Максимумы относительного увеличения приходящей солнечной радиации отмечаются в январе, декабре в северном полушарии и июне, июле в южном полушарии. Эти максимумы локализованы в широтной области 60°–70° которая

является зоной внетропического циклогенеза и могут проявляться в циркуляционных процессах в атмосфере. Отмечаемые вблизи полярных кругов максимумы в поступлении радиации определяются уменьшением наклона оси вращения Земли и связаны с относительно большим увеличением приходящей радиации к ее относительно небольшому общему поступлению в эти зоны.

Полученные результаты могут учитываться в радиационных блоках физико-математических моделей климата и создают основу для определения долевого участия факторов разной физической природы в изменениях общего потока солнечной радиации определяемых в результате дистанционного зондирования Земли.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по теме ГЗ АААА-А16–116032810055–0 и АААА-А16–116032810093–2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Будыко М.И. Изменение климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 280 с.

Дроздов О.А., Васильев Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный В.П. Климатология. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 568 с.

Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.-Л.: ГОНТИ, 1939. 208 с.

Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 246 с.

Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 4. С. 419–445.

Федоров В.М. Анализ составляющих различной физической природы в межгодовой изменчивости полного потока солнечного излучения // Астрономический вестник. 2019а. Т. 53. № 5. С. 394–400. doi: 10.1134/S0320930X19040029

Федоров В.М. Вариации инсоляции Земли и особенности их учета в физико-математических моделях климата // Успехи физических наук. 2019б. Т. 189. № 1. С. 33–46. doi: 10.3367/UFNr.2017.12.038267

Федоров В.М. Инсоляция Земли и современные изменения климата. М.: Физматлит, 2018. 232 с.

Федоров В.М. Межгодовые вариации продолжительности тропического года // Доклады Академии наук. 2013. Т. 451. № 1. С. 95–97. doi: 10.7868/S086956521319016X

Федоров В.М. Периодические возмущения и малые вариации солярного климата Земли // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457. № 2. С. 222–225. doi: 10.7868/S0869565214200213

Федоров В.М. Пространственные и временные вариации солярного климата Земли в современную эпоху // Геофизические процессы и биосфера. 2015б. Т. 14. № 1. С. 5–22.

Федоров В.М. Теоретический расчет межгодовой изменчивости инсоляции Земли с суточным разрешением // Астрономический вестник. Исследования солнечной системы. 2016. Т. 50, № 3. С. 233–238. doi: 10.7868/S0320930X16030014

Федоров В.М. Теоретический расчет межгодовой изменчивости солнечной постоянной // Астрономический вестник. Исследования солнечной системы. 2012. Т. 46. № 2. С. 184–189.

Федоров В.М. Широтная изменчивость приходящей солнечной радиации в различных временных циклах // Доклады Академии наук. 2015а. Т. 460. № 3. С. 339–342. doi: 10.7868/S0869565215030196

Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. М.: МГУ, 2006. 582 с.

Bertrand C., Loutre M.F., Berger A. High frequency variations of the Earth`s orbital parameters and climate change // Geophysical research letters. 2002. V. 29. № 18. P. 40–1–40–3. doi: 10.1029/2002GL015622

Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B., Chodas P.W., Jacobson R.A., Keesey M.S., Lieske J.H., Ostro S.J., Standish E.M., Wimberly R.N. JPL's on-line solar system data service // Bulletin of the American Astronomical Society. 1996. V. 28. № 3. P. 1158.

Jet Propulsion Laboratory, Solar System Dynamics. http://ssd.jpl.nasa.gov

Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // Geophysical Research Letters. 2011. V. 37. № 1. L01706. doi: 10.1029/2010GL045777

Alteration Tendencies of Upcoming on the Upper Atmosphere Boundary Solar Radiation and Theirs Spatial Localization

V. M. Fedorov, S. A. Sokratov, D. M. Frolov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Satellite measurements of total flow of upcoming to the Earth solar radiation (Total solar irradiance) are performed since 1977. At present time continues measurement series of total flow of upcoming solar radiation are obtained. In long-term measurements of solar radiation the eleven-year cycle and its amplitude is revealed. However in regularity of solar radiation income to the Earth (without consideration of atmosphere) and spatial distribution of it along the Earth surface (solar climate of the Earth) two mechanisms having different physical nature are marked out. One mechanism is related to variation of solar activity. Another mechanism is defined

by celestial mechanical processes varying elements of Earth orbit (Earth-Sun distance, tropical year duration, etc.), Earth rotation axis declination and related to it variation in Earth insolation. Performed calculations of Earth insolation related to celestial mechanical processes are the basis for differentiation of remote sensing data on total solar irradiance regarding mechanisms of different physical nature. The possibility of estimation of contribution of solar activity and celestial mechanical processes in variation of total flow of upcoming to the Earth solar radiation is created.

Keywords: remote sensing, total solar irradiation, Earth insolation, alteration tendencies, Earth rotation axe inclination, astronomical seasons, latitudinal localization, satellite measurements

REFERENCES

Budyko M.I. Izmenenie klimata [Measurement of climate], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974 (In Russian).

Drozdov O.A., Vasil'ev N.V., Raevskii A.N. et al. Klimatologiya [Climatology], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989 (In Russian).

Milankovich M. Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebanii klimata [Mathematical climatology and astronomical theory of climate fluctuations], Moscow–Leningrad: GONTI, 1939 (In Russian).

Monin A.S. Vvedenie v teoriyu klimata [Introduction to the climate theory], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982 (In Russian).

Monin A.S., Shishkov Yu.A. Climate as a problem of physics // Physics–Uspekhi. 2000. V. 43. № 4. P. 381–406. doi: 10.1070/PU2000v043n04ABEH000678

Fedorov V.M. Analysis of the components of a different physical nature in the interannual variability of the total solar irradiance flux // Solar System Research. 2019a. V. 53. № 5. P. 70–76. doi: 10.1134/S0038094619040026

Fedorov V.M. Earth's insolation variation and its incorporation into physical and mathematical climate models // Physics–Uspekhi. 2019b. V. 62. № 1. P. 32–45. doi: 10.3367/UFNe.2017.12.038267

Fedorov V.M. Insolyatsiya Zemli i sovremennye izmeneniya klimata [The Earth's insolation and current climate changes], Moscow: Fizmatlit, 2018 (In Russian).

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

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

Fedorov V.M. Spatial and temporal variation in solar climate of the Earth in the present epoch // Izvestiya, Atmospheric and oceanic physics. 2015b. V. 51. № 8. P. 779–791. doi: 10.1134/S0001433815080034

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

Fedorov V.M. Interannual variability of the solar constant // Solar System Research. 2012. V. 46. № . 2. P. 170–176. doi: 10.1134/S0038094612020049

Fedorov V.M. Latitudinal variability of incoming solar radiation in various time cycles // Doklady Earth Sciences. 2015a. V. 460. Part 1. P. 96–99. doi: 10.1134/S1028334X15010183

Khromov S.P., Petrosyants M.A. Meteorologiya i klimatologiya [Meteorology and climatology]. Moscow: MGU, 2006 (In Russian).

Bertrand C., Loutre M.F., Berger A. High frequency variations of the Earth`s orbital parameters and climate change // Geophysical research letters. 2002. V. 29. № 18. P. 40–1–40–3. doi: 10.1029/2002GL015622

Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B., Chodas P.W., Jacobson R.A., Keesey M.S., Lieske J.H., Ostro S.J., Standish E.M., Wimberly R.N. JPL's on-line solar system data service // Bulletin of the American Astronomical Society. 1996. V. 28. № 3. P. 1158.

Jet Propulsion Laboratory, Solar System Dynamics http://ssd.jpl.nasa.gov

Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // Geophysical Research Letters. 2011. V. 37. № 1. L01706. doi: 10.1029/2010GL045777