

Проблема «калорических» полугодий в астрономической теории изменений климата

В.М. Фёдоров*

Несмотря на то, что Милутином Миланковичем наиболее полно сформулирована концепция, в которой смена ледниковых эпох связывается с вековыми изменениями (определяемыми астрономическими факторами) инсоляции, в её сути имеются существенные недостатки. Рассматривается проблема реалистичности рассчитанных Миланковичем значений инсоляции при упрощении им алгоритма расчётов до уровня расчётов облучения отдельных параллелей за калорические полугодия равной продолжительности. Показано, что результаты только 1/3 выполненных Миланковичем расчётов приблизительно отражают реальное облучение параллелей за полугодие. В 2/3 случаев результаты расчётов вследствие принятого им упрощения далеки от реальности. Созданная Миланковичем концепция базируется на двух известных в макромире фундаментальных физических взаимодействиях – гравитационном и электромагнитном, изменениями в которых могут определяться и глобальные изменения природной среды и условий проживания человека на Земле. Выявление имеющихся в астрономической теории изменений климата проблем может способствовать её модернизации, совершенствованию, созданию возможностей для объяснения причин современных изменений климата и прогнозирования глобальных изменений природной среды в будущем.

Ключевые слова: астрономическая теория климата, инсоляция, калорические полугодия.

Ссылка для цитирования: Фёдоров В.М. Проблема «калорических» полугодий в астрономической теории изменений климата // Жизнь Земли. 2026. Т. 48, № 3. С. 338–348. DOI: 10.29003/m5447.0514-7468.2026_48_3/338-348.

Поступила 21.04.2026 / Принята к публикации 02.09.2026

Problem of “caloric” half-years in the astronomical theory of climate changes

V.M. Fedorov, PhD

Lomonosov Moscow State University

Despite the fact that Milutin Milanković formulated the most comprehensive concept linking the succession of Ice Ages to the secular changes (determined by astronomical factors) in insolation, it contains significant shortcomings. Since Milanković simplified his calculation algorithm to the level of the irradiation of individual parallels for “caloric” half-years of equal duration, the reliability of his insolation values should be checked. It is shown that the results of only one-third of Milanković’s calculations approximately reflect the actual irradiation of particular parallels over a half-year. Due to his simplifications, the calculation results are far from reality in two-thirds of all the cases. Milanković’s concept is based on two fundamental physical interactions known in the macrocosm (gravitational and electromagnetic), fluctuations of which could determine global changes in the natural

* Фёдоров Валерий Михайлович – в.н.с., к.г.н., географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, fedorov.msu@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2305-7408.

environment and human habitation on the Earth. Identifying the problems in the astronomical theory of climate changes can contribute to its modernization and improvement, creating opportunities for explaining the causes of current climate changes and predicting global environmental changes in the future.

Keywords: astronomical theory of climate, insolation, caloric half-years.

For citation: Fedorov, V.M., "Problem of 'caloric' half-years in the astronomical theory of climate changes", *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] **48**, no 3, 338–348 (2026) (in Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29003/m5447.0514-7468.2026_48_3/338-348.

Введение. После признания в конце XIX века ледниковой теории возникла необходимость в объяснении причин смены ледниковых эпох. Для решения этой проблемы сербским математиком Милутином Миланковичем в начале XX века была разработана астрономическая теория колебаний климата. Он рассчитал облучение отдельных параллелей с учётом изменения астрономических и геофизических характеристик (эксцентриситет, долгота перигелия, угол наклона оси), которыми определяются вековые вариации в инсоляции Земли [5, 22].

Вначале рассчитанные значения летней интенсивности облучения (ИО) на 65°с.ш. хорошо согласовывались с альпийской морфостратиграфической схемой А. Пенка и Э. Брюкнера (гюнц – миндель – рисс – вюрм). Однако в дальнейшем, с появлением новых геологических данных и методов абсолютного датирования, отмеченные ранее соответствия стали нарушаться. Одной из причин стратиграфических и палеогеографических несоответствий эмпирических данных и теории было то, что в расчётах Миланковича не учитывались механизмы переноса радиационного тепла (меридионального – «тепловая машина первого рода», в системе океан–материк – «тепловая машина второго рода», межполушарного). Ранее это отмечалось М.И. Будыко [2], позднее вопрос меридионального переноса радиационного тепла был рассмотрен в работе [6]. Кроме того, в качестве основного критерия связи солярного климата с глобальным Миланковичем приняты вариации летней инсоляции на 65°с.ш. При этом климатическая репрезентативность этого показателя принималась без доказательства. Такое принятие основывалось только на предположении известного в то время климатолога Владимира Кёппена [3]. В работах [7, 8, 11] показано, что климатическим фактором является летняя ИО всего Северного полушария, являющегося ареной возникновения и развития глобальных климатических изменений в неоплейстоцене и голоцене, а не отдельной его параллели.

Не рассматривая климатические построения, изложенные в астрономической теории Миланковича, проанализируем геофизическую и палеоклиматическую корректность расчётов облучения в «калорических» полугодиях, что и является целью настоящей работы.

«Калорические» (условные) полугодия Миланковича. Вариации солнечной радиации, связанные с небесно-механическими процессами, определяются расчётными методами. Под солярным климатом Земли понимается рассчитываемое теоретически поступление и распределение солнечной радиации на верхней границе атмосферы (ВГА) или на поверхности Земли без учёта атмосферы [1, 12]. По определению Миланковича, «...фиктивный климат земного шара, полученный в результате чисто теоретических расчётов, игнорирующих все посторонние воздействия, называется солярным, или математическим климатом» [5, стр. 5]. При изучении вековых (низкочастотных) вариаций солнечного потока учитываются подверженные вековым возмущениям такие астрономические элементы земной орбиты, как долгота перигелия и эксцентриситет, а также наклон оси вращения Земли, имеющие весьма значительные по продолжительности периоды колебаний [5, 13–16, 21, 22, 26].

К концу XIX века стало известно, что распределение инсоляции по поверхности Земли (точнее, земного шара, без учёта атмосферы) зависит от трёх орбитальных характеристик: эксцентриситета орбиты, наклона оси вращения и положения точек равноденствия в её прецессионном цикле. Вариации, определяемые эллипсоидальной формой Земли, на этом этапе не учитывались.

В начале XX века появились работы немецкого математика Л. Пильгрима, в которых были изложены результаты новых расчётов этих астрономических характеристик («Опыт числовой разработки проблемы ледниковых периодов») за период времени в 1010 тысячелетий до 1850 г. н. э. [24]. В связи с этим расчёт количества поступающей солнечной энергии стал принципиально возможным.

Расчёты вековых изменений астрономических элементов Л. Пильгрима (за 600 000 лет) были пересчитаны В. Мишковичем (директором астрономической обсерватории в Белграде). Эти данные стали основой для расчётов М. Миланковичем вековых вариаций инсоляции Земли. В своих расчётах В. Мишкович исходил из вычислений орбитальных характеристик и масс планет, выполненных У. Леверье. Л. Пильгрим использовал данные Ж. Стоквелла [25], уступающие по точности расчётам У. Леверье. Точность в расчётах В. Мишковича составляла: для эксцентриситета – до 4-х десятичных знаков, для наклона эклиптики – до секунд, для долготы перигелия – до минут для периода времени 100 000 лет до и после эпохи, относящейся к началу 1800 г.

Расчёты У. Леверье основывались на вековых возмущениях, рассчитанных Ж. Лагранжем [19]. Значения масс планет и те цифровые данные, которыми Лагранж воспользовался для установления начальных условий, были недостаточно точны (это отмечает и М. Миланкович). Из известных теперь девяти планет Ж. Лагранж мог принять во внимание только шесть. Уран был открыт (Дж. Гершелем в 1781 г.) во время выполнения расчётов Ж. Лагранжем, и параметры этой новой планеты не были определены даже приблизительно. Не было известно ничего и о спутниках Урана. Нептун был открыт (на основе расчётов У. Леверье, связанных с возмущением в орбитальном движении Урана) только в 1846 г. Марс считался не имеющим спутников. Поэтому для определения масс двух планет (Марс и Уран) Ж. Лагранж мог опираться на приближённые данные. Тем не менее, ему удалось, хотя и приблизительно, определить границы, между которыми могут изменяться эксцентриситеты орбит планет и наклоны плоскостей их орбит к плоскости эклиптики. Важным представляется сделанный Лагранжем вывод о том, что большие полуоси орбит не подвергаются вековым изменениям, который позднее был включён П. Лапласом в теорему устойчивости Солнечной системы [20].

На основе расчётов вековых изменений астрономических элементов (выполненных В. Мишковичем) М. Миланкович рассчитал значения летней инсоляции для параллели 65° Северного полушария за последние 600 000 лет. Полученный Миланковичем график инсоляции (в значениях широтных эквивалентов) впервые был опубликован в 1924 г. в работе В. Кёппена и А. Вегенера [18] «Климаты прошлого» (рис. 1). Под эквивалентными широтами для 65° с.ш. понимаются широты, на которые в настоящее время за летнее калорическое полугодие поступает столько же солнечной радиации, сколько в прошлом поступало на северной широте 65°. Увеличение эквивалентной широты означает сокращение поступающей радиации, и наоборот (например, поступавшая к Земле солнечная радиация на 65° с.ш. 590 000 лет назад характерна для широты 72° с.ш. в 1800 г.).

Вместо расчёта сумм тепла за летнее и зимнее астрономические (реальные) полугодия, М. Миланкович использовал калорические полугодия. Калорические полугодия определяются как полугодия одинаковой продолжительности $\left(\frac{T_0}{2}\right)$, когда на данной ши-

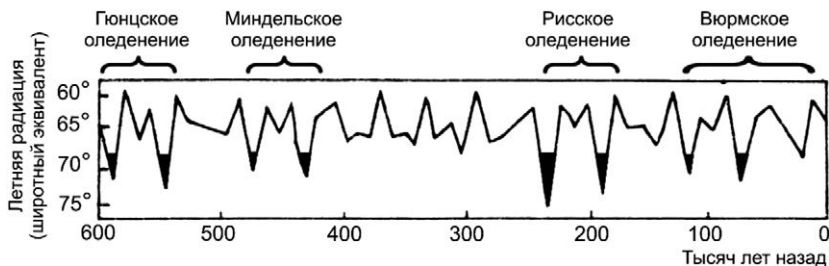


Рис. 1. Амплитуды вековых отклонений летних сумм радиации для 65° с.ш. в значениях широтных эквивалентов [3].

Fig. 1. Amplitudes of the secular deviations in summer radiation for 65° N in latitudinal equivalents [3].

роте любое значение суточной инсоляции в летнее полугодие больше любого значения суточной инсоляции в зимнее полугодие. Продолжительность тропического года (T_0) считалась постоянной. При расчётах использовались канонические единицы (величина солнечной постоянной, равная 2 кал / мин · см² или 1395,6 Вт/м², соответствовала 1 канонической единице, продолжительность тропического года – 100 000 каноническим единицам). В дальнейшем М. Миланковичем были рассчитаны вариации инсоляции для восьми параллелей, располагающихся между 5° и 75° с.ш. Основные результаты его исследований изложены в работе [5].

Однако известно, что в связи с тем, что Земля движется по эллиптической орбите неравномерно (в соответствии со вторым законом Кеплера), то в реальности полугодия имеют различную продолжительность. Эти различия тем больше, чем больше эксцентриситет земной орбиты. Ранее [7, 8] нами были выполнены расчёты инсоляции с высоким пространственным и временным разрешением для неоплейстоцена. Интенсивность облучения рассчитывалась для астрономических месяцев и астрономических полугодий с учётом изменения их продолжительности (рис. 2, 3).

В среднем за последние 600 тыс. лет различия в продолжительности полугодий составляли 8,18 суток. Максимальная разность между продолжительностью летнего и зимнего полугодия в Северном полушарии достигала 23,04 суток. Минимальное различие

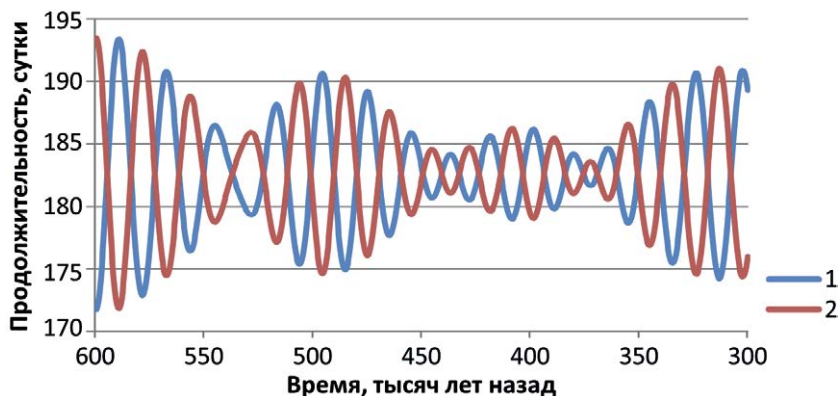


Рис. 2. Изменение продолжительности летнего (1) и зимнего (2) полугодия в Северном полушарии на интервале от 300 до 600 тыс. лет назад.

Fig. 2. Changes in the duration of the summer (1) and winter (2) halves of the year in the Northern Hemisphere over the interval from 300,000 to 600,000 years ago.

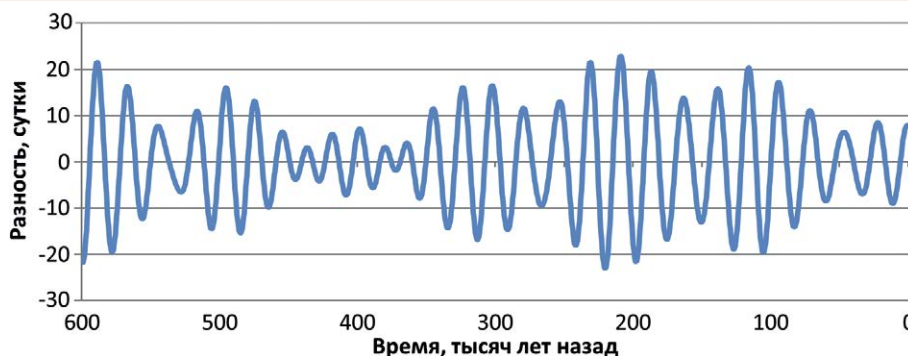


Рис. 3. Разность продолжительностей летнего и зимнего полугодий в Северном полушарии за последние 600 тыс. лет.

Fig. 3. Difference in the duration of the summer and winter halves of the year in the Northern Hemisphere over the past 600,000 years.

составляет, по нашим данным, 0,02 суток, что связано с временным шагом разрешения при расчётах, равным 500 годам. Тем не менее, это разрешение по времени на порядок превышает разрешение в расчётах Миланковича, а также Ш.Г. Шарафа и Н.А. Будниковой, и вдвое – разрешение в расчётах их последователей [13–15, 21, 26]. Теоретически равные по продолжительности полугодия наблюдаются в моменты, когда линия апсид (афелий – перигелий) совпадает с линией равноденствий. Это происходит в среднем через каждые 10,5 тыс. лет. Долгота перигелия при этом равна 0° или 180° . Напомним, что долгота перигелия – это угол с вершиной, расположенной в центре Солнца, между перигелием земной орбиты и точкой весеннего равноденствия (ТВР).

Расчёты Миланковича охватывают период 600 тыс. лет, для которого рассчитана летняя инсоляция на 65° с.ш. для 177 лет с переменным шагом в среднем около 5000 лет. Приблизительно равная продолжительность полугодий на этом интервале отмечается для 55 выполненных Миланковичем расчётов инсоляции. Поэтому в лучшем случае (если годы в его расчётах совпадают с годами, на которые приходятся полугодия с равной продолжительностью) только для 55 лет из 172, для которых была рассчитана инсоляция, полученные результаты могут быть близки к реальному облучению. При этом в 55 годах, расположенных вблизи лет с равной продолжительностью полугодий, их среднее расхождение от лет с равными по продолжительности полугодиями составляет 1,113 тыс. лет. Таким образом, в лучшем случае 32 % рассчитанных Миланковичем значений инсоляции отражают реальное облучение на выбранной параллели. В 68 % случаев (две трети) полученные Миланковичем значения инсоляции реалистичными не являются.

Кроме того, как показывают наши исследования (и отмечено Миланковичем), летняя инсоляция в широтных зонах (и на отдельных параллелях) определяется долготой перигелия (климатической прецессией) и наклоном оси (**рис. 4**). Максимальные значения коэффициента корреляции летней интенсивности облучения и долготы перигелия ($R = 0,738$) характерны для низких широт. В полярных районах значения коэффициента корреляции летней ИО с долготой перигелия снижаются до 0,544. Заметная корреляционная связь летней ИО и угла наклона оси отмечается в полярных областях, где коэффициент корреляции достигает максимального значения 0,662. Связь летней ИО с эксцентриситетом практически отсутствует. Значения коэффициента корреляции для этих величин находятся в пределах от 0,005 до 0,036.

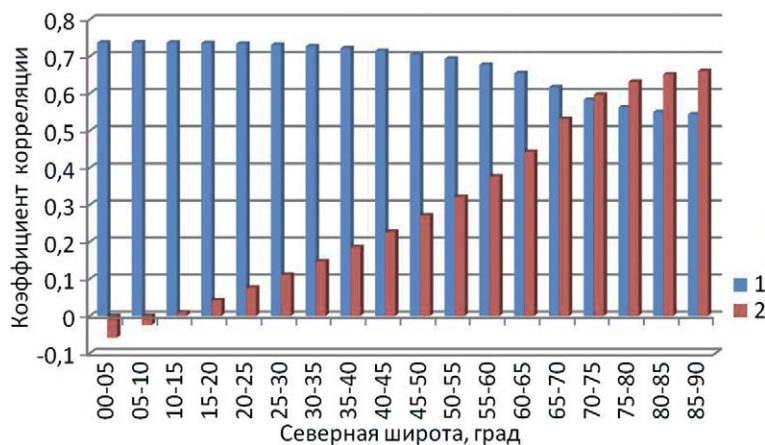


Рис. 4. Значения коэффициента корреляции летней интенсивности облучения в 5-градусных широтных зонах Северного полушария с долготой перигелия (1) и углом наклона оси (2) в неоплейстоцене.

Fig. 4. Values of the correlation coefficient of summer irradiance in 5-degree latitude zones of the Northern Hemisphere with the longitude of perihelion (1) and the inclination angle of the axis (2) in the Neopleistocene.

Долгота перигелия изменяется от 0° до 360° . Миланкович выполнял расчёты, принимая долготы перигелия равными 0° и 180° , при которых отмечаются равные по продолжительности полугодия. Для остального диапазона изменения долготы перигелия, которым определяется климатическая прецессия, расчёты не проводились. Следовательно, климатическая прецессия в расчётах Миланковича учитывается крайне ограниченно, только для полугодий равной продолжительности, которые, как отмечалось выше, случаются приблизительно один раз в 10,5 тыс. лет. Сезонная инсоляция параллелей и широтных зон не связана с эксцентриситетом, динамикой которого определяется годовое облучение Земли и амплитуда сезонного облучения полушарий [7, 8]. Таким образом, результаты расчётов Миланковича отражают изменения летней инсоляции на 65° с.ш., связанные в основном с изменением наклона оси (с периодом в среднем около 41 тыс. лет). Изменением наклона оси регулируется распределение инсоляции в широтных зонах (по меридиану) и по сезонам. Также с изменением наклона оси связана динамика меридионального градиента инсоляции, которым в природной среде регулируется интенсивность переноса радиационного тепла и влаги из низких широт в высокие (интенсивность работы «тепловой машины первого рода») [6]. Таким образом, в модели инсоляции Миланковича климатическая прецессия, вносящая наибольший вклад в вековые изменения сезонного облучения полушарий [7, 8, 11], учитывалась лишь частично. Механизмы переноса радиационного тепла в созданной им климатической модели не учитывались вовсе [5].

Интересно, что расчёты, произведённые М. Миланковичем для калорических полугодий, в дальнейшем воспроизводились с уточнениями рядом авторов (рис. 5). Эти расчёты основывались на новых решениях теории вековых возмущений, полученных для всей Солнечной системы в 1950 г. Д. Брауэром и А. ван Вуркомом [16]. В расчётах использовались последние данные о массах и движении планет, учитывались эффекты второго порядка, вызванные, например, долгопериодическими вариациями в движении

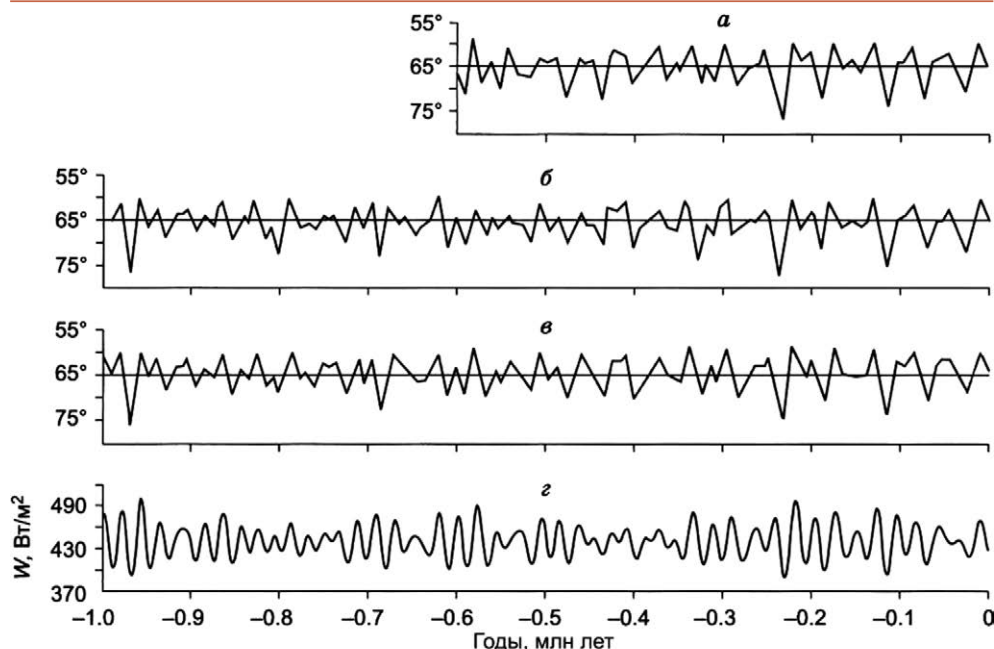


Рис. 5. Изменение инсоляции за летнее калорическое полугодие для широты 65° Северного полушария по данным разных исследователей [4]: а – [5]; б – [16]; в – [13]; г – [15]. По оси абсцисс отложено время в млн лет от 1950 г.; по оси ординат: а, б, в – инсоляция в эквивалентных широтах в течение летнего полугодия, г – среднемесячная инсоляция в июле W ($Вт/м^2$).

Fig. 5. Changes in insolation during the summer caloric half-year for 65° N latitude in the Northern Hemisphere according to data from different sources [4]: а – [5]; б – [16]; в – [13]; г – [15]. The abscissa axis shows time in millions of years from AD 1950; Y-axis: а, б, в – insolation at equivalent latitudes during the summer half-year, г – average monthly insolation in July W (W/m^2).

Юпитера и Сатурна. Однако при этом расчёты также выполнялись для калорических полугодий. Позднее расчёты на отдельные параллели для калорических полугодий выполнены А. Вернекаром [26].

Детальные расчёты приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации провели советские астрономы Ш.Г. Шараф и Н.А. Будникова [13]. Ими были обнаружены ошибки в исходных значениях долготы узлов Венеры и Земли, использованных Д. Брауэром и А. ван Вуркомом. На основе исправленных значений Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой были пересчитаны постоянные интегрирования и выведены тригонометрические формулы для прецессии и наклона оси вращения, которые включали члены второго порядка для эксцентриситета и наклона. В результате ими были рассчитаны вариации инсоляции на период 30 млн лет в прошлое и на 1 млн лет в будущее. При этом расчёты также выполнялись для калорических полугодий равной продолжительности. Расчёты Шарафа и Будниковой выполнялись с шагом по времени, равным 5000 лет. Таким образом, соотношение реалистичных результатов (около 1/3) у этих авторов близко к соотношению в расчётах Миланковича. Следовательно, результаты расчётов инсоляции для калорических полугодий далеки от реальной динамики облучения. С учётом того, что шаг по времени в расчётах Вер-

некара составлял уже 1000 лет, соотношение 1/3 относительно реалистичных значений, полученных Миланковичем, а также Шараф и Будниковой, в расчётах Вернекара для интервала 600 тыс. лет уменьшается (поскольку число лет с равными полугодиями на интервале не менялось). Равные полугодия отмечаются в среднем через 10,5 тыс. лет, а не каждую тысячу лет. Иными словами, если отдельные расчёты выполнены на время равных полугодий, то остальные приблизительно девять из десяти расчётов (~90%), выполненных для калорических полугодий, достоверными не являются. Тем не менее, по результатам расчётов Вернекара летней инсоляции на 65° с.ш. настраивались стратиграфические схемы морских изотопных стадий [17].

Астрономические (естественные) полугодия. Позднее выполнялись корректные расчёты инсоляции – как для отдельных параллелей, так для полушарий и Земли. А. Берже и М.-Ф. Лутр рассчитали инсоляцию отдельных параллелей для астрономических месяцев (июля) и полугодий [14, 15]. С учётом изменения продолжительности полугодий выполнялись расчёты Ласкаром с коллегами с шагом по времени в 1000 лет на продолжительный период [21]. Однако расчёты выполнялись только на одну параллель 65° с.ш. и один день в году – летнее солнцестояние. В настоящее время данные расчёта орбитальных характеристик и наклона оси, ранее выполненные А. Берже и Ж. Ласкаром с коллегами [14, 15, 21], используются в расчётных программах PALINSOL и DINSOL. В этих программах, созданных для приближенных расчётов инсоляции, не учитывается эллипсоидальная форма Земли (расчёты выполняются для сферы, но не только для отдельных параллелей, а и для заданных площадей), и мерой отсчёта времени (например, в DINSOL) являются условные годы разной продолжительности [23]. Однако ранее нами показано, что ошибки при расчётах облучения сферы и равновеликого по объёму эллипсоида соизмеримы с вариациями солнечной активности в 11-летнем цикле в настоящее время [9]. В выполненных В.М. Фёдоровым совместно с А.А. Костиным расчётах форма Земли учитывается, мерой отсчёта времени является продолжительность естественного цикла (тропический год), а разрешение по времени вдвое превышает шаг в расчётах А. Берже и Ж. Ласкара с коллегами [7–9]. Расчёты выполнены не на отдельные параллели (линии – характеристики пространства первого порядка), а на отдельные широтные зоны (протяжённостью в 1 и 5 градусов по широте) – на площадь, характеристику пространства второго порядка. Также рассчитано облучение на различных высотных уровнях окружающего Землю пространства [10]. В итоге, на основе выполненных расчётов в МГУ имени М.В. Ломоносова сформированы базы данных инсоляции, в которых изменение солярного климата Земли представлено в настоящее время наиболее точно и полно¹. Поскольку солнечная радиация является основным источником тепла на Земле, расчёт инсоляции важен для реконструкции изменений палеоклимата и природной среды в неоплейстоцене, а также для прогнозирования изменений природных условий жизни человека в будущем.

Заключение. При выявленных просчётах, которые, вероятно, связаны с техническими возможностями того времени и неучётом механизмов переноса радиационного тепла в моделировании палеоклимата, Миланковичем наиболее полно сформулирована концепция, в которой смена ледниковых эпох связывается с вековыми изменениями (определяемыми астрономическими факторами) инсоляции. Действительно, глобальные изменения природной среды и условия жизни на планете могут определяться глобальными астрономическими и геофизическими факторами. Созданная Миланковичем концепция базируется на двух известных в макромире фундаментальных физических

¹ Электронный ресурс «Солнечная радиация и климат Земли» (<http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm>).

взаимодействиях – гравитационном и электромагнитном. Поэтому для обоснования геофизической и палеоклиматической корректности, а также климатостратиграфической и геохронологической состоятельности астрономической теории климата существуют реальные физические основы. Выявление имеющихся в астрономической теории изменений климата проблем может способствовать её модернизации, совершенствованию, созданию возможностей для объяснения причин современных изменений климата и прогнозирования глобальных изменений природной среды в будущем.

Источники финансирования. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова («Глобальные изменения климата и эволюция природной среды Северной Евразии и арктических морей в квартере: методы, палеорекострукции, долгосрочное прогнозирование»).

Литература

1. Алисов Б.П., Полтараус Б.В. Климатология. М.: Московский университет, 1974. 210 с.
2. Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 351 с.
3. Имбри Д., Имбри К.П. Тайны ледниковых эпох. Пер. с англ. М.: Прогресс, 1988. 264 с.
4. Мельников В.П., Смульский И.И. Астрономическая теория ледниковых периодов: Новые приближения. Решённые и нерешённые проблемы. Новосибирск: ГЕО, 2009. 98 с.
5. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.-Л.: ГОНТИ, 1939. 208 с.
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. Фёдоров В.М. Причины палеоклиматических изменений в неоплейстоцене Северной Евразии // Жизнь Земли. 2025. Т. 47, № 3. С. 348–358. DOI: 10.29003/m4740.0514-7468.2025_47_3/348-358.
8. Фёдоров В.М. Изотопная и соляная геохронология и климатостратиграфия неоплейстоцена Северной Евразии // Геомагнетизм и аэрономия. 2025. Т. 65, № 4. С. 552–563. DOI: 10.31857/S0016794025040133.
9. Фёдоров В.М., Костин А.А., Фролов Д.М. Влияние формы Земли на характеристики облучения земной поверхности // Геофизические процессы и биосфера. 2020. Т. 19, № 3. С. 119–130. DOI: 10.21455/GPB2020.3-7.
10. Фёдоров В.М., Костин А.А., Фролов Д.М. Баланс транзитного облучения окружающей Землю пространства // Космические исследования. 2022. Т. 60, № 2. С. 116–124. DOI: 10.31857/S0023420622020030.
11. Фёдоров В.М., Фролов Д.М., Фёдорова Е.В. Колебания уровня океана, океаническая седиментация и климатическая прецессия в интервале последних 130 тысяч лет // Жизнь Земли. 2026. Т. 48, № 1. С. 11–20. DOI: 10.29003/m5043.0514-7468.2026_48_1/11-20.
12. Хромов С.П., Петросяни М.А. Метеорология и климатология. М.: МГУ, 2006. 582 с.
13. Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. Вековые изменения орбиты Земли и астрономическая теория колебаний климата // Труды Института теоретической астрономии АН СССР. 1969. Вып. 14. С. 48–84.
14. Berger A. Long-term variation of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements // Quaternary research. 1978. V. 9. P. 139–167.
15. Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quaternary Science Reviews. 1991. V. 10. P. 297–317.
16. Brouwer D., van Woerkom A.J.J. The secular variation of the orbital elements of the principal planets // Astronomical Papers. 1950. V. 13. P. 81–107.

17. Hays J.D., Imbrie J., Shackleton N. Variation in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages // *Science*. 1976. V. 194. P. 1121–1132.
18. Köppen W., Wegener A. Die Klimate der geologischen Vorzeit. Berlin: Gebruder Bornetraeger, 1924. 256 p.
19. Lagrange J.-L. Théorie des variations séculaires des éléments des planètes. Berlin: Decker, 1781. V. 5. P. 125–207.
20. Laplace P.S. Traite de Mécanique Céleste. Paris: Bachelier Libraire, 1825. V. 5. 480 p.
21. Laskar J., Joutel F., Boudin F. Orbital, precessional and insolation quantities for the Earth from – 20 Myr to + 10 Myr // *Astronomy & Astrophysics*. 1993. V. 287. P. 522–533.
22. Milankovich M. Théorie mathématique des phénomènes thermique produits par la radiation solaire. Paris: Gauthier-Villars, 1920. 399 p.
23. Oliveira E.D. Daily INSOLation (DINSOL-v1.0): an intuitive tool for classrooms and specifying solar radiation boundary conditions // *Geoscientific Model Development*. 2023. (16):2371–2390. DOI:10.5194/gmd-16-2371-2023.
24. Pilgrim L. Versuch einer rechnerischen Behandlung des Eiszeitalters // *Jahresheften des Vereins für vaterländische Naturkunde in Württemberg*. 1904. Bd. 60. P. 26–117.
25. Stockwell J.N. Memoir on the secular variations of the elements of the orbits of the eight principal Planets, Mercury, Venus, The Earth, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune: with tables of the same: together with the obliquity of the ecliptic, and the precession of the equinoxes in both longitude and right ascension. Washington: Smithsonian Institute, 1872. 236 p.
26. Vernekar A. Long-period global variations of incoming solar radiation // *Series: Meteorological Monographs. American Meteorological Society*. 1972. V. 12, № 34. 128 p.

References

1. Alisov, B.P., Poltarau, B.V., *Klimatologiya* (Moscow: Moskovskiy universitet, 1974) (in Russian).
2. Budyko, M.I., *Climate in the past and future* (Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980) (in Russian).
3. Imbrie, J., Imbrie, K.P., *Ice Ages: Solving the Mystery* (Short Hills, N.J.: Enslow Publishers, 1979). 224 p.
4. Mel'nikov, V.P., Smul'skiy, I.I., *Astronomical Theory of Ice Ages: New Approximations. Solved and Unsolved Problems* (Novosibirsk: GEO, 2009) (in Russian).
5. Milankovich, M., *Mathematical Climatology and the Astronomical Theory of Climate Fluctuations* (Moscow–Leningrad: GONTI, 1939) (in Russian).
6. Fedorov, V.M., "The problem of meridional heat transport in the astronomical theory of climate", *Geophysical processes and the biosphere* **18** (3), 117–128 (2019). DOI:10.21455/GPB2019.3-8 (in Russian).
7. Fedorov, V.M., "Causes of paleoclimatic changes in the Neopleistocene of Northern Eurasia", *Zhizn Zemli* **47** (3), 348–358 (2025). DOI: 10.29003/m4740.0514-7468.2025_47_3/348-358 (in Russian).
8. Fedorov, V.M., "Isotopic and solar geochronology and climatostratigraphy of the Neoplueistocene of northern Eurasia", *Geomagnetism and aeronomy* **65** (4), 552–563 (2025). DOI: 10.31857/S0016794025040133 (in Russian).
9. Fedorov, V.M., Kostin, A.A., Frolov, D.M., "The effect of the Earth's shape on the characteristics of surface radiation", *Geophysical processes and the biosphere* **19** (3), 119–130 (2020). DOI: 10.21455/GPB2020.3-7 (in Russian).
10. Fedorov, V.M., Kostin, A.A., Frolov, D.M., "Balance of Transit Radiation in the Earth's Surrounding Space", *Space Research* **60** (2), 116–124 (2022). DOI: 10.31857/S0023420622020030 (in Russian).
11. Fedorov, V.M., Frolov, D.M., Fedorova, E.V., "Ocean level fluctuations, oceanic sedimentation, and climatic precession over the past 130,000 years", *Zhizn Zemli* **48** (1), 11–20 (2026). DOI: 10.29003/m5043.0514-7468.2026_48_1/11-20 (in Russian).

12. Khromov, S.P., Petrosyanc, M.A., *Meteorology and climatology* (Moscow: MGU, 2006) (in Russian).
13. Sharaf, Sh.G., Budnikova, N.A., "Centennial Changes in the Earth's Orbit and the Astronomical Theory of Climate Fluctuations", *Proc. of the Institute of Theoretical Astronomy of the USSR Academy of Sciences* **14**, 48–84 (1969) (in Russian).
14. Berger, A., "Long-term variation of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements", *Quaternary research* **9**, 139–167 (1978).
15. Berger, A., Loutre, M.F., "Insolation values for the climate of the last 10 million years", *Quaternary Science Reviews* **10**, 297–317 (1991).
16. Brouwer, D., van Woerkom, A.J.J., "The secular variation of the orbital elements of the principal planets", *Astronomical Papers* **13**, 81–107 (1950).
17. Hays, J.D., Imbrie, J., Shackleton, N., "Variation in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages", *Science* **194**, 1121–1132 (1976).
18. Köppen, W., Wegener, A., *Die Klimate der geologischen Vorzeit* (Berlin.: Gebruder Bornetraeger, 1924).
19. Lagrange, J.-L., *Théorie des variations séculaires des éléments des planètes* (Berlin: Decker, 1781. V. 5).
20. Laplace, P.S., *Traite de Mécanique Céleste* (Paris: Bachelier Libraire, 1825. V. 5).
21. Laskar, J., Joutel, F., Boudin, F., "Orbital, precessional and insolation quantities for the Earth from – 20 Myr to + 10 Myr", *Astronomy & Astrophysics* **287** (1993).
22. Milankovich, M., *Théorie mathématique des phénomènes thermique produits par la radiation solaire* (Paris: Gauthier-Villars, 1920).
23. Oliveira, E.D., "Daily INSOLation (DINSOL-v1.0): an intuitive tool for classrooms and specifying solar radiation boundary conditions", *Geoscientific Model Development*, 2023. (16):2371–2390. DOI:10.5194/gmd-16-2371-2023.
24. Pilgrim, L., "Versuch einer rechnerischen Behandlung des Eiszeitalters", *Jahresheften des Vereins für vaterländische Naturkunde in Württemberg* **60**, 26–117 (1904).
25. Stockwell, J.N., *Memoir on the secular variations of the elements of the orbits of the eight principal Planets, Mercury, Venus, The Earth, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune: with tables of the same: together with the obliquity of the ecliptic, and the precession of the equinoxes in both longitude and right ascension* (Washington: Smithsonian Institute, 1872).
26. Vernekar, A., "Long-period global variations of incoming solar radiation", *Series: Meteorological Monographs. American Meteorological Society* **12** (34), 128 (1972).