

КЛИМАТ И КРИОСФЕРА

УДК: 551.551.1+551.581
DOI: 10.15372/KZ20240205
EDN: КТКОФВ

СОЛЯРНАЯ ГЕОХРОНОЛОГИЯ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА И ГОЛОЦЕНА

В.М. Федоров*, Д.М. Фролов

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия*

**Автор для контакта; e-mail: fedorov.msu@mail.ru*

Вычисление инсоляции Земли с высоким пространственным и временным разрешением позволило рассчитать солярные характеристики, отражающие изменение астрономических факторов, регулирующих вариации приходящей солнечной радиации и изменение интенсивности переноса радиационного тепла (меридионального, в системе “океан–материк”, межполушарного). В соответствии с этим в масштабах голоцена проведена модернизация астрономической теории изменения климата. На основе синхронизации глобальных климатических событий с экстремумами солярных характеристик в голоцене и позднем плейстоцене предложен метод солярной геохронологии, позволяющий уточнять хронологию глобальных климатических событий и объяснять их генетическую природу.

Ключевые слова: астрономическая теория изменения климата, вариации инсоляции, перенос радиационного тепла, синхронизация, солярная геохронология, голоцен, поздний плейстоцен.

Ссылка для цитирования: Федоров В.М., Фролов Д.М. Солярная геохронология позднего плейстоцена и голоцена // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 2, с. 47–57. DOI: 10.15372/KZ20240205. EDN: КТКОФВ.

SOLAR GEOCHRONOLOGY OF THE LATE PLEISTOCENE AND HOLOCENE

V.M. Fedorov*, D.M. Frolov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia

**Corresponding author; e-mail: fedorov.msu@mail.ru*

The calculation of the Earth's insolation with high spatial and temporal resolution made it possible to calculate solar characteristics reflecting changes in astronomical factors regulating variations in incoming solar radiation and changes in the intensity of radiative heat transfer (meridional, in the ocean–mainland system, and interhemispheric). Following this, the astronomical theory of climate change has been modernized on the Holocene scale. Based on the synchronization of global climatic events with extremes of solar characteristics in the Holocene and Late Pleistocene, a method of solar geochronology is proposed, which makes it possible to clarify the chronology of global climatic events and explain their origin.

Keywords: astronomical theory of climate change, variations of insolation, radiative heat transfer, synchronization, solar geochronology, Late Pleistocene, Holocene.

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз изменений климата в будущем и знания о них во многом определяются ретроспективным анализом изменений климата в прошлом. В связи с этим информация о характере и причинах изменений солярного и глобального климата Земли в прошлом представляется актуальной. Солнечная радиация является основным источником энергии, определяющим радиационный, тепловой баланс Земли (ее поверхности и атмосферы) и характер гидрометеорологических процессов. Поэтому исследование солярного климата

Земли в голоцене и позднем плейстоцене представляется важным для определения роли радиационных факторов в глобальных климатических событиях недавнего геологического прошлого и для прогнозирования изменений глобального климата в будущем. Целью работы является модернизация и развитие астрономической теории изменения климата в масштабах голоцена и позднего плейстоцена на основе анализа результатов теоретических расчетов инсоляции с высоким пространственным и временным разрешением на

период от 12 тыс. лет в прошлое до 8 тыс. лет в будущее.

АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Астрономическая теория изменения климата (АТИК) была разработана сербским математиком Милутином Миланковичем на основе расчетов инсоляции Земли [Миланкович, 1939]. Основной целью АТИК было объяснение глобальных климатических событий (ледниковых эпох с развитием материковых оледенений и разделяющих их межледниковых эпох) в плейстоценовой истории Земли в связи с вековыми вариациями приходящей солнечной радиации, определяемыми изменениями астрономических параметров (долгота перигелия, наклон оси, эксцентриситет земной орбиты). В соответствии с поставленной целью, учитывая техническую возможность того времени, инсоляция рассчитывалась с низким пространственным и временным разрешением.

М. Миланковичем была рассчитана летняя инсоляция для 65° с.ш. за последние 600 тыс. лет. Полученный М. Миланковичем график инсоляции (в значениях широтных эквивалентов) впервые был опубликован около ста лет назад в 1924 г. в работе “Климаты прошлого” В. Кёппена (V. Köppen) и А. Вегенера (A. Wegener). Под эквивалентными широтами понимают широты, на которых в настоящее время за летнее калорическое полугодие поступает столько же солнечной радиации, сколько в прошлом поступало на широте 65° с.ш. Увеличение эквивалентной широты (рис. 1) означает сокращение поступающей радиации, и наоборот (например, поступающая к Земле солнечная радиация на 65° с.ш. 590 000 лет назад (л.н.) характерна для широты 72° с.ш. в эпоху 1800 г.). Черной заливкой на рис. 1 отмечены минимумы широтных эквивалентов в ледниковых эпохах.

Летняя инсоляция имеет большое значение в изменениях природной системы Земли и ее компонентов, одним из которых является криосфера. Это определяется, во-первых, тем, что при увеличении летней инсоляции возрастают приповерхностная температура воздуха и температура по-

верхности океана (т. е. становится теплее). Следствием этого является увеличение испарения и повышение содержания водяного пара в атмосфере, что, в свою очередь, приводит к усилению парникового эффекта планеты. В результате этого явления имеется дополнительное тепло, которое вносит очередной вклад в увеличение испарения, повышение содержания водяного пара в атмосфере, усиление парникового эффекта и вновь приводит к появлению дополнительного тепла. Эти процессы, многократно повторяясь, формируют механизм усиления потепления. Во-вторых, происходит выделение скрытого тепла от увеличения атмосферных осадков (переход водяного пара в воду и снег или лед). В-третьих, изменения определяются уменьшением альбедо за счет сокращения площади морских льдов и ледников, продолжительности залегания снежного покрова – нагреванием большей площади поверхности (материков и океанов), а от нее – атмосферы. При сокращении летней инсоляции, очевидно, происходят обратные процессы.

Вместо расчета сумм тепла за летнее и зимнее полугодия М. Миланкович использовал калорические полугодия, т. е. полугодия одинаковой продолжительности, когда на данной широте любое значение суточной инсоляции в летнее полугодие больше любого значения суточной инсоляции в зимнее полугодие. Основные результаты его исследований изложены в работе [Миланкович, 1939]. Принятие М. Миланковичем равной продолжительности полугодий не позволяет учитывать сезонность, регулирующую перенос радиационного тепла в системе “океан–материк” [Шулейкин, 1953] и межполушарный перенос радиационного тепла в системе “океан–атмосфера” [Федоров, 2021а].

Расчеты, произведенные М. Миланковичем, в дальнейшем выполнялись и уточнялись рядом авторов. Эти расчеты основывались на новых решениях теории вековых возмущений, полученных для всей Солнечной системы [Brouwer, Van Woerkom, 1950]. В расчетах использовались последние данные о массах и движении планет, учитывались эффекты второго порядка, вызванные, например,

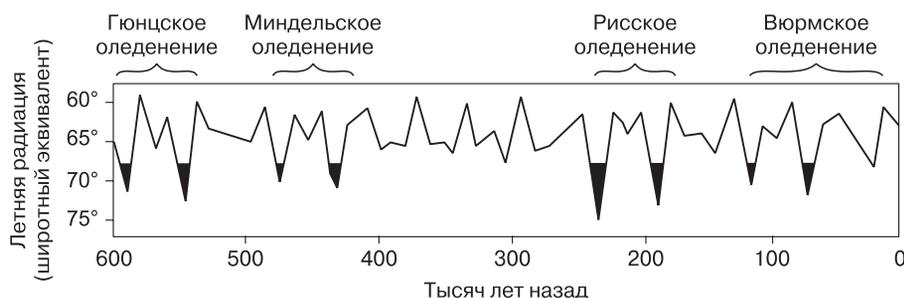


Рис. 1. Амплитуда вековых отклонений летних сумм радиации для 65° с.ш. в значениях широтных эквивалентов [Имбри, Имбри, 1988].

долгопериодическими вариациями в движении Юпитера и Сатурна [Шараф, Будникова, 1968; Монин, 1982; Vernekar, 1972; Berger, 1978; Bretagnon, 1982]. Жак Ласкар с коллегами подготовили решение для орбитальных, прецессионных и наклонных переменных для расчетов низкочастотных вариаций инсоляции [Laskar et al., 1993]. Высокоточные астрономические эфемериды DE-406 он использовал как эталон для тестирования своих решений на коротком участке времени. Отметим, что авторами эти эфемериды DE-406 использовались в качестве исходных астрономических данных для предварительных расчетов вариаций инсоляции с высоким пространственным и временным разрешением [Федоров, 2018]. В работе [Laskar et al., 1993] инсоляция рассчитывалась только для параллели 65° с.ш. и только на 1 день в году с шагом 1000 лет (на периоде в 1 млн лет).

Таким образом, расчет инсоляции Земли неоднократно проводился в связи с появлением новых астрономических данных. Принятая М. Миланковичем схема объяснения климата при этом не подвергалась модернизации и развитию. Ее основу (см. рис. 1) составлял учет только изменений летней инсоляции на 65° с.ш. В АТИК, следовательно, не учитывался вклад в изменение температурного режима Земли механизмов переноса радиационного тепла (теплообмена), связанных с неравномерным приходом и распределением солнечной радиации по широтам и сезонам [Федоров, 2019а,б, 2021а,б].

В целом с историей развития астрономической теории климата связано получение серии расчетных значений вековых (низкочастотных) вариаций приходящей солнечной радиации (солярного климата Земли), обусловленных вековыми вариациями элементов орбиты Земли (эксцентриситета, долготы перигелия) и наклона оси вращения. Количественные результаты этого решения (расчета вековых вариаций приходящей солнечной радиации) у разных исследователей несколько отличаются в связи с различиями в начальных условиях и способах расчетов [Федоров, 2019б]. Физическую основу перехода от солярного к глобальному климату в АТИК составляет принятие прямой зависимости температуры от вариаций приходящей летней радиации на 65° с.ш. Однако температурный режим глобального климата определяется не только вариациями приходящей радиации, но и изменениями интенсивности переноса радиационного тепла. Эти изменения описывались в АТИК только качественно (изменение сезонных и широтных различий в связи с изменением орбитальных характеристик) и не учитывались в палеоклиматических построениях и выводах. Тем не менее многолетние изменения температуры определяются изменением меридионального переноса тепла, регулируемого меридио-

нальным градиентом инсоляции, связанным с изменением наклона оси (“тепловая машина первого рода”) [Шулейкин, 1953]. Другими факторами изменения температурного режима являются межполушарный перенос радиационного тепла (регулируемый инсоляционной сезонностью Земли) и перенос радиационного тепла в системе “океан–материк” (регулируемого инсоляционной сезонностью – “тепловая машина второго рода”) [Шулейкин, 1953; Монин, Шишков, 1979].

Следовательно, физическую основу моделирования климата должны составлять такие радиационные (солярные) характеристики, как вариации приходящей на верхнюю границу атмосферы (ВГА) летней радиации, меридиональный градиент инсоляции (МГИ) или инсоляционная контрастность (ИК), инсоляционная сезонность Земли (ИСЗ) и полушарий (ИС). В существующем виде АТИК по ее физическим основам не может реалистично отражать и объяснять изменения глобального климата. Кроме физических причин, невозможность применения астрономической теории климата к объяснению климата голоцена связана с математическими причинами – низким пространственным и временным разрешением в расчетах инсоляции. Инсоляция рассчитывалась М. Миланковичем [1939] для отдельных параллелей с разрешением по времени около 5000 лет. Его последователями инсоляция также рассчитывалась для отдельных параллелей с разрешением по времени от 5000 лет [Шараф, Будникова, 1968; Монин, 1982] до 1000 лет [Vernekar, 1972; Berger, 1978; Bretagnon, 1982; Laskar et al., 1993].

Таким образом, существуют математические (связанные с низким пространственным и временным разрешением расчетов инсоляции) и физические (неучет изменений интенсивности переноса радиационного тепла) проблемы, ограничивающие возможность применения АТИК (в ее настоящем виде) к объяснению глобальных климатических событий голоцена и, очевидно, плейстоцена.

МОДЕРНИЗАЦИЯ И РАЗВИТИЕ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В МАСШТАБАХ ГОЛОЦЕНА

Модернизация АТИК включает расчет инсоляции с высоким пространственным и временным разрешением (решение математической проблемы АТИК) и расчет солярных характеристик, регулирующих интенсивность переноса радиационного тепла (меридионального, в системе “океан–материк”, межполушарного). В соответствии с этим автором совместно с А.А. Костинным [Fedorov, Kostin, 2020] были выполнены расчеты инсоляции с высоким пространственным и временным разрешением на основе новейших астрономических эфемерид DE-441 на период 12 000 лет в прошлое и на 8000 лет в будущее (относительно 2000 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 (Coordinate Time – СТ) и всемирного корректируемого времени (Universal Time – UT). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом Geodetic Reference System 1980 (GRS80) с длинами полуосей, равными 6 378 137 м (большие) и 6 356 752 м (малая). В общем виде алгоритм расчетов можно представить выражением

$$I_{nm}(\varphi_1, \varphi_2) = \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma(\varphi) \left(\int_{-\pi}^{\pi} \Lambda(t, \varphi, \alpha) d\alpha \right) d\varphi \right) dt, \quad (1)$$

где I_{nm} – приходящая солнечная радиация за элементарный n -й фрагмент m -го тропического года, Дж; σ – площадью множитель (м^2), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал $\sigma(\varphi)$; $d\alpha d\varphi$ – площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида; α – часовой угол; φ_1, φ_2 – географические широты, выраженные в радианах; $\Lambda(t, \varphi, \alpha)$ – солнечная радиация 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 – $1/360$ продолжительности тропического года с учетом ее изменения. Изменение активности Солнца не учитывалось. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI – Total Solar Irradiance) принималось равным $1361 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

В результате расчетов для голоцена были получены количественные значения летней инсоляции на ВГА и солярных характеристик, регулирующих перенос радиационного тепла с высоким пространственным и временным разрешением. Климатические эффекты переноса радиационного тепла сводятся к следующему.

1. Меридиональный перенос радиационного тепла (“тепловая машина первого рода”) регулируется меридиональным градиентом инсоляции

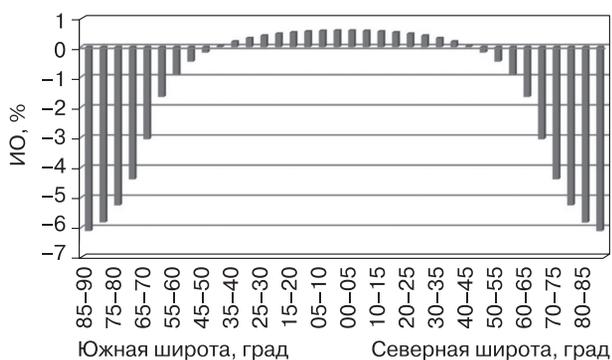


Рис. 2. Изменение годовой интенсивности облучения (ИО) в фазу уменьшения угла наклона оси от 7487 г. до н.э. до 10 тыс. лет н.э.

или инсоляционной контрастностью полушария. Величины МГИ и ИК определяются изменением наклона оси вращения Земли [Федоров, 2018, 2019a]. С изменением наклона оси связаны три климатических эффекта. Например, в фазу уменьшения наклона оси (в голоцене) происходит увеличение годовой инсоляции в районах ниже 45° широты каждого полушария (источника тепла) и сокращение в районах выше 45° (области стока тепла) (рис. 2).

Вследствие этого в районах, расположенных выше 45° широты, предполагается понижение температуры, а ниже 45° широты – ее повышение [Воейков, 1903; Миланкович, 1939]. При этом увеличиваются меридиональный градиент инсоляции и интенсивность меридионального переноса радиационного тепла, что приводит к обратному эффекту – повышению температуры в области стока радиационного тепла и сглаживанию температурного градиента “экватор–полюс”. Также следует учитывать, что площадь областей источника тепла (в каждом полушарии) в 2.7 раза больше площади областей стока. В связи с этим энергия (тепло) переносится с большей площади на меньшую площадь, и удельные характеристики энергии (тепла) в областях стока тепла значительно возрастают. Все это приводит к потеплению в фазу уменьшения наклона оси, прежде всего в областях стока тепла (выше 45° широты). Кроме того, при этом формируется механизм усиления потепления [Федоров, 2018]. Таким образом, М. Миланкович и А.И. Воейков учитывали первый эффект, связанный с вариациями приходящей радиации, и не учитывали другого, не менее важного климатического эффекта, связанного с изменением угла наклона оси – изменения интенсивности меридионального переноса радиационного тепла. Астрономическая теория в связи с этим подвергалась критике со стороны многих климатологов и палеогеографов [Брукс, 1952; Шварцбах, 1955; Марков, 1960; Будыко, 1974; Федоров, 2021a].

Следует также учитывать, что колебания широтных эквивалентов (см. рис. 1) с размахом 2.6° широты (и периодом около 41 тыс. лет) определяются изменением экспозиции земной поверхности в связи с изменением угла наклона оси (смещением полярных кругов, тропиков Рака и Козерога). Так, в фазу уменьшения угла наклона происходит сокращение площади областей, расположенных за полярными кругами, приблизительно на 25.93%. Площадь областей, расположенных между тропиками и соответствующими полярными кругами, наоборот, увеличивается на 12.87%, а площадь областей, расположенных между тропиками и экватором, сокращается на 9.8%. Отмеченные области характеризуются различным годовым ходом облучения [Федоров, Фролов, 2022]. Таким образом, представленные на рис. 1 амплитуды изменения

летней инсоляции в широтных эквивалентах включают и широтные колебания, связанные с изменением экспозиции земной поверхности (регулируемой изменением угла наклона оси), и соответствующие изменения характера облучения на различных широтах.

Годовая ИК для каждого полушария рассчитывается как разность годовой инсоляции в области $0-45^\circ$ широты (источник тепла) и области $45-90^\circ$ (сток тепла) (см. рис. 2). Таким образом, она обобщенно (по областям источника и стока тепла) отражает многолетние изменения годового меридионального градиента инсоляции, регулирующего интенсивность меридионального переноса тепла [Шулейкин, 1953]. Возрастание годовой ИК определяет термические условия современного межледникового периода (голоцена). Значения годовой ИК в полушариях приблизительно (до третьего знака после запятой) равны (рис. 3).

В начале расчетного периода отмечается сокращение годовой ИК. Абсолютный минимум (137.738 Вт/м^2) отмечается в бореальном периоде в 7431 г. до н.э. Начиная с этого времени (совпадает с максимумом наклона оси вращения) годовая ИК возрастает. Максимальное значение годовой ИК на интервале составляет 143.227 Вт/м^2 (10 000 лет н.э.). Размах изменений годовой ИК, таким образом, составляет 5.489 Вт/м^2 . Годовая ИК в Южном и Северном полушарии линейно связана с углом наклона оси вращения ($R = -0.99998$). На этом основании можно предположить, что период изменения годовой ИК близок к 41 000 лет. В настоящее время отмечается максимальная скорость увеличения годовой ИК.

Расчеты ИК выполнялись с учетом сезонного смещения областей источника ($0-35^\circ$) и стока ($35-90^\circ$) тепла для зимнего (астрономического) полугодия в полушарии и областей источника ($0-55^\circ$) и стока ($55-90^\circ$) тепла для летнего (астрономического) полугодия [Федоров, 2018]. Период изменения летних ИК в среднем около 41 тыс. лет, зимних ИК – около 21 тыс. лет. При этом связь

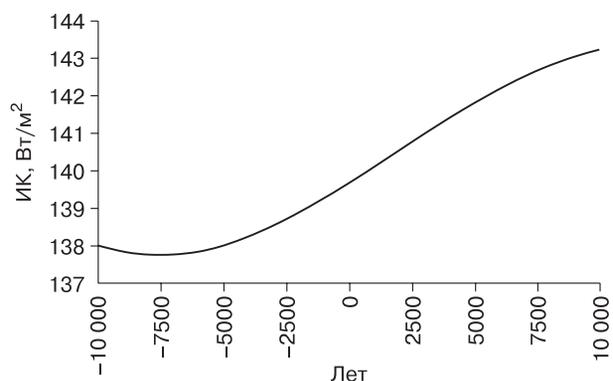


Рис. 3. Изменение годовой инсоляционной контрастности (ИК) в полушариях.

между летними ИК в полушариях положительная, а зимними – отрицательная. Коэффициент корреляции между летними ИК Северного и Южного полушария составляет 0.902, между зимними ИК – 0.973. Летняя ИК в Северном и Южном полушарии тесно связана с углом наклона оси $R = -0.973$ и -0.977 соответственно и с годовой ИК. Коэффициент корреляции для Северного полушария составляет 0.972, для Южного – 0.978. Климатическим следствием увеличения годовой ИК является постепенное повышение температуры в областях стока тепла и уменьшение температурного градиента “экватор–полюс”.

2. Межполушарный перенос радиационного тепла регулируется инсоляционной сезонностью Земли (ИСЗ), которая определяется соотношением циклов прецессии и долготы перигелия. Межполушарный перенос радиационного тепла на ВГА рассчитывался следующим образом. Рассчитывались: 1) разность летней ИО в Южном полушарии и зимней ИО в Северном полушарии; 2) разность летней ИО в Северном полушарии и зимней ИО в Южном полушарии. Вычитанием этих разностей получалась функция (ИСЗ), отражающая суммарный годовой перенос радиационного тепла из одного полушария в другое. При этом в случае вычитания разности 2 из разности 1 положительные значения соответствуют преобладанию годового переноса из Южного летнего полушария в зимнее Северное, а отрицательные значения, наоборот, – преобладанию переноса из летнего Северного полушария в зимнее Южное. Механизм межполушарного теплообмена в атмосфере реализуется через частично смещенную в летнее полушарие циркуляционную ячейку Хэдли зимнего полушария. Перенос радиационного тепла (воздушными и водными массами) из летнего полушария в зимнее со временем изменяется в связи с различием летней и зимней инсоляции в полушариях (рис. 4).

На рис. 4 представлен перенос энергии с 1 м^2 поверхности полушария. Чтобы оценить перенос

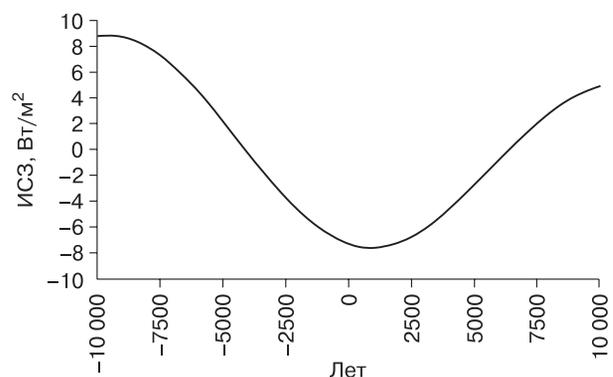


Рис. 4. Инсоляционная сезонность Земли (ИСЗ).

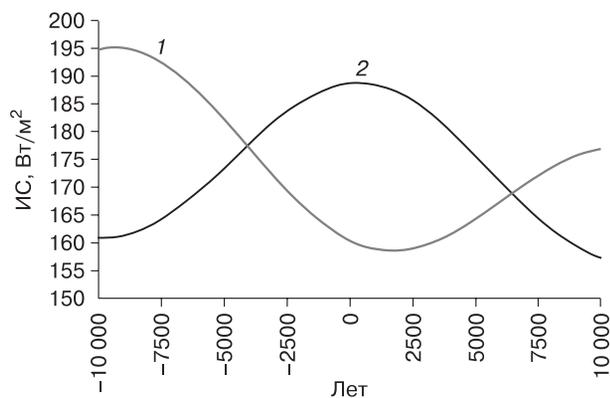


Рис. 5. Инсоляционная сезонность полушарий (ИС).

1 – Северное полушарие; 2 – Южное полушарие.

для полушарий, следует умножить полученные значения на площадь полушария ($2.550328025 \times 10^{14} \text{ м}^2$). Для абсолютного максимума в 976 г. эта величина составит $1.9232 \cdot 10^{15} \text{ Вт}$, что сопоставимо с величиной годового МГИ и меридионального переноса энергии в системе “океан–атмосфера” [Федоров, 2019а]. Вследствие межполушарного переноса, который определяется угловым соотношением линии апсид и линии узлов, одно зимнее полушарие за год получает больше или меньше радиационного тепла, чем другое зимнее полушарие. Сезонные температурные различия в полушариях при этом сглаживаются. Период колебания ИСЗ в среднем около 21 тыс. лет.

3. Перенос радиационного тепла в системе “океан–материк” регулируется ИС полушария, которая также определяется соотношением прецессионного цикла с циклом долготы перигелия (рис. 5). Инсоляционная сезонность полушария рассчитывается как разность летней и зимней инсоляции (ИО, Вт/м²) в полушарии [Монин, Шишков, 1979]. Многолетние изменения интенсивности этого теплообмена связаны с сезонной сменой областей источника и стока тепла. При сглаживании сезонных различий в инсоляции интенсивность теплообмена в системе “океан–материк” снижается, и наоборот.

В максимумах ИС глобальный климат, вероятно, приобретает более континентальный характер (с резкими сезонными различиями), при минимумах – более морской (со сглаженными сезонными различиями).

Указанные механизмы теплообмена (переноса радиационного тепла) определяются неравномерным поступлением и распределением солнечной радиации по сезонам и широтам. Это регулируется астрономическими характеристиками орбитального движения Земли (соотношением линии апсид, определяемой движением периге-

лия, и линии узлов, определяемой прецессией точки весеннего равноденствия) и углом наклона оси вращения Земли.

Отмеченные механизмы переноса радиационного тепла действуют одновременно. Однако интенсивность каждого из них определяется изменением регулирующих ее характеристик инсоляции, связанных с орбитальным движением Земли и наклоном оси ее вращения. Эти механизмы теплообмена, связывающие многолетние изменения солярного и глобального климата, не учитывались в АТИК при объяснении изменений палеоклимата. Так, использование М. Миланковичем и некоторыми его последователями [Шараф, Будникова, 1968; Монин, 1982; Brouwer, Van Woerkom, 1950] калорических полугодий равной продолжительности исключает возможность учета межполушарного теплообмена и теплообмена в системе “океан–материк”. В настоящее время разность продолжительности летнего и зимнего полугодия в полушариях составляет около 7.5 сут. Период колебания ИС в полушариях в среднем близок к 21 тыс. лет.

Таким образом, низкое пространственное и временное разрешение (математическая проблема) и неучет механизмов переноса радиационного тепла (физическая проблема) являются причинами, ограничивающими применение астрономической теории климата в существующем виде, как для моделирования палеоклимата, так и для объяснения изменений климата в голоцене. Модернизация АТИК в масштабах голоцена, основанная на расчетах инсоляции с высоким пространственным и временным разрешением и на учете механизмов переноса радиационного тепла, создает возможности для уточнения хронологии и объяснения причин изменений глобального климата Земли и глобальных климатических событий в голоцене и позднем плейстоцене [Федоров, 2021а]. Модернизированная для голоцена АТИК может стать ключом и к объяснению изменений глобального климата Земли в плейстоцене. Однако при этом следует учитывать состояние природной системы на момент наступления экстремумов солярных характеристик и влияние иных факторов, кроме радиационного, таких, например, как тектонический, изменяющий очертания материков и океанов, их географическое положение и высотные отметки, изменение активности Солнца, состава атмосферы, скорости осевого вращения Земли и др.

В настоящее время по АТИК Миланковича настраивается климатостратиграфическая модель/схема плейстоцена (МИС) [Lisiecki, Raymo, 2005]. МИС (морская изотопная стадия) представляет собой орбитально настроенную стратиграфическую модель (LR04) (изотопно-кислородную кривую), основанную на глобально осредненных по 57 колонкам данных изотопно-

кислородного анализа (δQ^{18}) бентосных фораминифер. Результаты этого анализа настраивались по инсоляции 65° с.ш. 21 июня [Lisiecki, Raymo, 2005]. Для настройки использовались отмеченные выше расчеты [Laskar et al., 1993]. То есть настройка изотопной кривой для Земли осуществляется по одной из 180 параллелей и одному из 365 дней в году. При этом известно, что облучение изменяется как в пространстве (по широтам – рис. 2), так и во времени (по дням и сезонам года). Подобная настройка изотопной кривой Земли не представляется физически обоснованной.

Поскольку изменение температурного режима глобального климата определяется как вариациями приходящей летней радиации (в полушарии), так и изменениями интенсивности переноса радиационного тепла, МИС-стратиграфия, настроенная только по вариациям рассчитанной для одних суток (21 июня) летней инсоляции на одну параллель 65° с.ш., реалистично не отражает изменений температуры полушария и Земли, определяемых совместным действием изменений облучения полушарий и Земли в целом, и изменений интенсивности переноса радиационного тепла (меридионального, в системе “океан–материк”, межполушарного). В результате получившая широкое распространение климатостратиграфическая модель/схема МИС, по крайней мере, неточна. Кроме того, схема МИС не объясняет причины представленных в ней климатических изменений. В отличие от схемы МИС, солярная геохронология позволяет определять не только время климатического события в полушарии или для Земли (по синхронизации с экстремумом солярной характеристики/фактора), но и его причину (по климатическому эффекту солярной характеристики). Солярный инструментарий позволяет получить более полную и детальную характеристику радиационных условий в позднем плейстоцене и голоцене, со сменой которых связаны изменения состояния природной среды (и климата как обобщенной характеристики этого состояния).

Следует также отметить, что летняя инсоляция в полушариях изменяется асинхронно (рис. 6). Летняя инсоляция рассчитывалась авторами как интенсивность облучения всего полушария за летнее астрономическое полугодие.

Минимуму летней ИО в Северном полушарии соответствует максимум летней инсоляции в Южном полушарии, и наоборот. Также асинхронно меняется ИС в обоих полушариях. Отмечаемая многими исследователями синхронность развития событий в полушариях на основе изотопного анализа ледовых кернов Антарктиды и Гренландии [Petit et al., 1999; Veres et al., 2013] в случае реальности этого эффекта может определяться только как отклик Южного полушария на глобальные климатические события, возникающие и происхо-

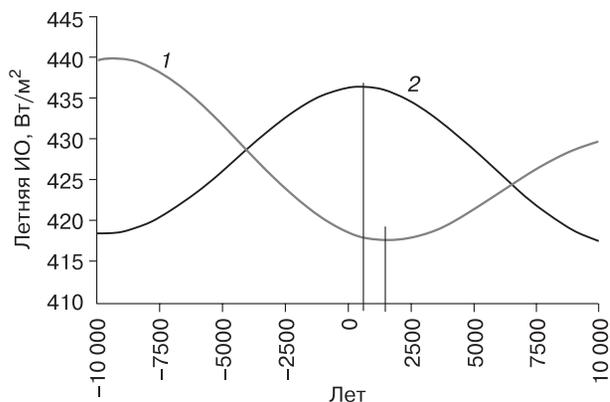


Рис. 6. Летняя интенсивность облучения (ИО) в Северном (1) и Южном (2) полушарии.

дящие в Северном полушарии. Отклик, вероятно, реализуется через механизм межполушарного переноса в атмосфере и конвейер Уолеса Брокера – в океане [Broecker, 1991].

СОЛЯРНАЯ ГЕОХРОНОЛОГИЯ ГОЛОЦЕНА И ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА

Предложенный авторами принцип объяснения глобальных климатических событий основан на их синхронизации с экстремальными значениями солярных характеристик (как приходящей летней радиации, рассчитанной для полушария, так и переноса радиационного тепла), отражающих влияние астрономических факторов на солярный и глобальный климат Земли. В позднплейстоценовой–голоценовой истории Земли рассматриваются и объясняются радиационными факторами (см. таблицу) восемь климатических событий, большинство из которых имели глобальное распространение. Нижняя граница голоцена проводится по началу интенсивного потепления, наступившего около 11 700 кал. л.н. [Head, 2019; Walker et al., 2019]. Начало позднплейстоценового (валдайского) оледенения относится ко времени 71 тыс. л.н. (МСК, 2008, 2011). Хронология других, представленных в таблице климатических событий в голоцене и позднем плейстоцене, получена из классических работ [Марков и др., 1965; Марков, 1968; Четвертичный период..., 1968; Монин, Шишков, 1979; Величко, 2012].

Хронология экстремумов для голоцена получена из результатов расчетов солярных характеристик. Хронология экстремумов для позднего плейстоцена представлена по рассчитанным для голоцена периодам солярных характеристик на основе предположения равной продолжительности ветвей роста и спада в цикле солярной характеристики.

Важнейшим геохронологическим репером в исследуемом интервале представляется цикл кли-

Солярная геохронология голоцена и позднего плейстоцена

Солярный фактор*	Климатическое событие	
	Европа	Северная Америка
Минимум летней ИО (1400–1850 гг.) и ИС (1550–1850 гг.)	Малый ледниковый период 1550–1850 гг.	
Максимум зимней ИК (750–900 гг.) и ИСЗ (850–1000 гг.)	Средневековый оптимум голоцена 800–1100 гг.	
Максимум летней ИО и ИС (11 350–11 550 л.н.)	Переход от плейстоцена к голоцену ~10–12 тыс. л.н. (11 700 л.н.)	
Минимум летней ИО и ИС (22.5/22 тыс. л.н.)	Максимальное распространение последнего оледенения (бологовская, бранденбургская стадии) ~20 тыс. л.н. Брянский интервал (дунаевский, паудорф, штильфрид Б, денакамп) ~25–29 тыс. л.н.	Тейзуэлл ~18–20 тыс. л.н.
Максимум летней ИК (27.5 тыс. л.н.) Максимум годовой ИК (29 тыс. л.н.) Максимум летней ИО и ИС (33.3/33 тыс. л.н.)		Плам-Пойнт ~23–32 тыс. л.н. Фармдейл ~27–22 тыс. л.н.
Минимум летней ИО и ИС (44.4/47 тыс. л.н.) Минимум годовой ИК (49 тыс. л.н.)	Шестихинское (?) похолодание ~47–49 тыс. л.н.	? Морена Могадор ~42 тыс. л.н.
Максимум летней ИО и ИС (55.2/59 тыс. л.н.)	Интерстадиал брёруп ~53–55/59 тыс. л.н.	Порт-Толбот 50–57 тыс. л.н.
Максимум зимней ИК (63.5 тыс. л.н.)	Интерстадиал амерсфорт ~64 тыс. л.н.	Сен-Пьер ~64–65 тыс. л.н.
Минимум летней ИО и ИС (66.3/71 тыс. л.н.)	Начало валдайской ледниковой эпохи ~70 тыс. л.н.	Начало висконсина ~70 тыс. л.н.

Примечание. Курсивом выделены даты экстремумов солярных характеристик, уточненные по эфемеридам [Laskar et al., 2011; <http://vo.imcce.fr/insola/earth/online/earth/earth.html>].

* ИО – интенсивность облучения, ИК – инсоляционная контрастность, ИС – инсоляционная сезонность полушарий, ИСЗ – инсоляционная сезонность Земли.

матической прецессии – цикл изменения летней ИО в Северном полушарии (рис. 7). По результатам анализа на интервале от 12 000 тыс. лет в прошлое до 8000 тыс. лет в будущее его продолжительность (по ветви спада) определяется в 22 100 лет. Этот цикл линейно (0.999) связан с циклом ИС Северного полушария. Таким образом, летняя ИО и ИС в полушарии изменяются синхронно, соответственно, совместно проявляются и их климатические эффекты. Из наложения эффектов следует, что максимуму летней ИО и

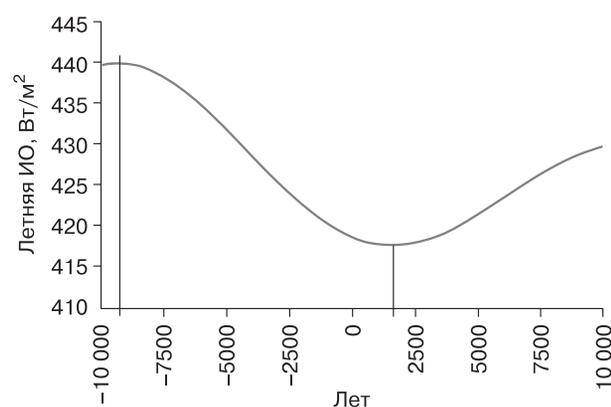


Рис. 7. Экстремумы летней интенсивности облучения (ИО) в Северном полушарии.

ИС соответствует преимущественно теплый и сухой (более континентальный) глобальный климат, минимуму – холодный и влажный (более морской).

В Северном полушарии абсолютный максимум летней ИО отмечается в начале пребореального периода (440.012 Вт/м²), в 9442 г. до н.э. Абсолютный минимум (417.600 Вт/м²) фиксируется в 1605 г. н.э. Продолжительность ветви спада ИО в Северном полушарии в голоцене составляет 11 047 лет (по значениям абсолютных экстремумов). Размах колебания оценивается в 22.406 Вт/м², а период при равновесности ветвей составляет около 22 100 лет. В соответствии с формулой Стефана–Больцмана ($L = \sigma T^4$) экстремальным значениям летней инсоляции соответствует температура 296.68 К (23.68 °С) для максимума и 292.83 К (19.83 °С) для минимума. Температурный размах составляет 3.85 градуса. Если учитывать неодинаковое альbedo для экстремумов (в максимуме меньше, в минимуме – больше), то разность возрастет. Также температурные различия в экстремальные периоды, вероятно, увеличиваются за счет механизмов усиления потепления (в максимуме) и усиления похолодания (в минимуме).

Цикл изменения летней ИО определяется угловым соотношением линии аписид (афелий–пе-

ригелий) и линии узлов (точек равноденствия). Напомним, что узлы или точки равноденствия – это точки пересечения земной орбиты с плоскостью эклиптики. Долгота перигелия – это угол между точкой весеннего равноденствия и перигелием земной орбиты, вершина которого помещена в центр Солнца. При совпадении перигелия с точкой летнего солнцестояния отмечается максимум летней ИО в Северном полушарии и минимум в Южном. Зимняя ИО в это время в Южном полушарии достигает максимума, а в Северном – минимума. При совпадении афелия с точкой летнего солнцестояния в Северном полушарии летом отмечается минимум ИО, в Южном полушарии – максимум (зимой – наоборот). Максимумы и минимумы летней ИО в полушарии (в цикле климатической прецессии) повторяются в среднем приблизительно через 11 тыс. лет и проявляются в полушариях асимметрично. Экстремумы цикла климатической прецессии представлены в семи глобальных климатических событиях голоцена и позднего плейстоцена (см. таблицу). В голоцене, например, максимум летней ИО в Северном полушарии синхронизируется с началом активной фазы деградации ледникового покрова в Европе и Северной Америке, т. е. с переходом от холодной плейстоценовой к теплой голоценовой эпохе, а минимум – с Малым ледниковым периодом. Поскольку летняя ИО в Северном и Южном полушариях изменяется асинхронно, районом возникновения отмеченных событий является Северное полушарие. В Южном полушарии они могли проявляться в качестве откликов как следствие межполушарного переноса тепла в океане и атмосфере.

С учетом найденного периода климатической прецессии можно приблизительно определить даты экстремальных значений летней ИО Северного полушария в позднем плейстоцене. Максимумы приходится на 33.3 и 52.2 тыс. лет назад. С максимумами летней ИО в Северном полушарии в позднем плейстоцене синхронизируются брянский интервал (дунаевский, паудорф, штильфрид Б, денекамп) около 25–29 тыс. л.н., интерстадиал брёруп (~53–55/59 тыс. л.н.). Минимумы летней ИО в Северном полушарии в позднем плейстоцене приходятся на 22.5 тыс. л.н., 44.4 тыс. л.н., 63.3 тыс. л.н. С минимумами летней ИО в Северном полушарии синхронизируются: максимальное распространение последнего оледенения (бологовская, бранденбургская стадия) ~20 тыс. л.н., шестихинское похолодание (~47–49 тыс. л.н.) и начало валдайской ледниковой эпохи (~70 тыс. л.н.).

Период климатической прецессии для позднего плейстоцена уточнялся по эфемеридам, рассчитанным Ж. Ласкаром (по долготе перигелия). Продолжительность этого цикла заметно меняется, поэтому в таблице курсивом выделены уточненные даты экстремумов климатической прецес-

сии по Ж. Ласкару [*Laskar et al., 2011; <http://vo.imcce.fr/insola/earth/online/earth/earth.html>*]. По данным Ж. Ласкара, для интервала продолжительностью 10 млн лет (эфемериды охватывают период от 5 млн лет в прошлое и 5 млн лет в будущее) оказалось, что продолжительность цикла климатической прецессии изменяется в широких пределах (от 10 до 33 тыс. лет), в среднем составляя 21585 лет. Всего на интервале около 10 млн лет выделяется 464 полных цикла. Из них только 200 имеют продолжительность 21 и 22 тыс. лет.

С максимумом зимней ИК в Северном полушарии (и максимумом ИСЗ – межполушарного переноса радиационного тепла из Южного полушария в Северное) синхронизируется средневековый оптимум голоцена (800–1100 гг.). С максимумом зимней ИК в Северном полушарии (63.5 тыс. л.н.) также синхронизируется событие амерсфорт (64 тыс. л.н.) в Европе и Сен-Пьер (~64–65 тыс. л.н.) в Северной Америке.

Также по данным Ж. Ласкара анализировалась продолжительность цикла изменений угла наклона оси вращения, которым регулируется колебание годовой и летней ИК. На интервале 10 млн лет выделяются 242 полных цикла. Их продолжительность изменяется от 33 до 52 тыс. лет, только в среднем составляя 40 967 лет. В настоящее время по эфемеридам Ласкара авторами выполняются с высоким пространственным разрешением расчеты солярных характеристик для периода от 3 млн лет в прошлое до 100 тыс. лет в будущее для построения солярной геохронологической схемы плейстоцена, основу которой составляет динамика внешнего энергетического (радиационного) сигнала, определяемая астрономическими факторами.

Как следует из таблицы, в семи отмеченных климатических глобальных событиях голоцена и позднего плейстоцена представлены экстремумы летней ИО, рассчитанной для Северного полушария (радиационный фактор, учитываемый АТИК по облучению 65° с.ш.). Кроме того, во всех глобальных климатических событиях участвуют факторы переноса радиационного тепла – ИС, ИСЗ и ИК (радиационные факторы, не учитываемые АТИК). Модернизация и развитие АТИК позволяет, таким образом, учитывать и вариации входящей радиации и изменения интенсивности переноса радиационного тепла. То есть модернизированная АТИК представляет собой более совершенный инструментарий для геохронологии, климатостратиграфии и объяснения причин глобальных климатических событий голоцена и позднего плейстоцена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основу солярной геохронологии голоцена и позднего плейстоцена составляет синхронизация

глобальных климатических событий и экстремальных значений солярных характеристик, отражающих вариации приходящей в полушарие летней радиации и изменения интенсивности переноса радиационного тепла (меридионального – “тепловая машина первого рода”, в системе “океан–атмосфера” – “тепловая машина второго рода” и межполушарного теплообмена). Вариации солярных характеристик отражают влияние астрономических факторов на характер облучения Земли, ее солярный и глобальный климат. Учитывая тот факт, что солнечная радиация является основным источником тепла на Земле, синхронизацию глобальных климатических событий и экстремумов солярных характеристик можно рассматривать как результат причинно-следственных связей между ними. Это позволяет уточнить хронологию глобальных климатических событий в голоцене и позднем плейстоцене и определять солярные (радиационные) характеристики/факторы в качестве возможной причины таких событий. На основе рассчитанных для будущего экстремумов солярных характеристик возможен прогноз глобальных климатических событий. Например, приблизительно через 7–8 тыс. лет ожидается наложение экстремумов (максимумов) трех солярных характеристик в Северном полушарии (летней ИО, ИС и годовой ИК), следствием которого может быть существенное потепление глобального климата.

Благодарности. Работа выполнена в соответствии с госбюджетными темами географического факультета МГУ “Палеогеографические реконструкции природных геосистем и прогнозирование их изменений” (121051100135-0) и “Опасность и риск природных процессов и явлений” (121051300175-4).

Литература

- Брукс К.** Климаты прошлого. М., Изд-во иностр. лит., 1952, 358 с.
- Будыко М.И.** Изменение климата. Л., Гидрометеоздат, 1974, 280 с.
- Величко А.А.** Эволюционная география: проблемы и решения. М., ГЕОС, 2012, 562 с.
- Воейков А.И.** Метеорология. СПб., Изд. картогр. заведения А. Ильина, 1903, 737 с.
- Имбри Д.** Тайны ледниковых эпох / Д. Имбри, К.П. Имбри. М., Прогресс, 1988, 264 с.
- Марков К.К.** Палеогеография. М., МГУ, 1960, 268 с.
- Марков К.К.** Четвертичный период / К.К. Марков, Г.И. Лазуков, В.А. Николаев. М., МГУ, 1965, т. 1, 372 с.
- Марков К.К.** Плейстоцен. М., Высш. шк., 1968, 304 с.
- Миланкович М.** Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л., ГОНТИ, 1939, 208 с.
- Монин А.С.** История климата / А.С. Монин, Ю.А. Шишков. Л., Гидрометеоздат, 1979, 408 с.
- Монин А.С.** Введение в теорию климата. Л., Гидрометеоздат, 1982, 246 с.
- Федоров В.М.** Инсоляция Земли и современные изменения климата. М., Физматлит, 2018, 232 с.
- Федоров В.М.** Проблема меридионального переноса тепла в астрономической теории климата // Геофиз. процессы и биосфера, 2019а, т. 18, № 3, с. 117–128. DOI: 10.21455/GRB2019.3-8.
- Федоров В.М.** Вариации инсоляции Земли и особенности их учета в физико-математических моделях климата // Успехи физ. наук, 2019б, т. 189, № 1, с. 33–46. DOI: 10.3367/UFN.2017.12.038267.
- Федоров В.М.** Астрономическая теория климата: вопросы модернизации и развития // Гидрометеорология и экология, 2021а, № 64, с. 435–465. DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-435-465.
- Федоров В.М.** Голоценовый парадокс в астрономической теории климата и проблемы орбитальной настройки // Геофиз. процессы и биосфера, 2021б, т. 20, № 1, с. 95–104. DOI: 10.21455/GRB2021.1-9.
- Федоров В.М., Фролов Д.М.** Изменение облучения Земли в фазу уменьшения наклона ее оси вращения // Геофиз. процессы и биосфера, 2022, т. 21, № 3, с. 75 – 84. DOI: 10.21455/GRB2022.4-5.
- Четвертичный период в США** / Под ред. К.К. Маркова. М., Мир, 1968, т. 1, 696 с.
- Шараф Ш.Г., Будникова Н.А.** Колебания солнечного облучения Земли, вызванные вековыми изменениями элементов земной орбиты // Докл. АН СССР, 1968, т. 182, № 2, с. 291–293.
- Шварцбах М.** Климаты прошлого. М., Изд-во иностр. лит., 1955, 284 с.
- Шулейкин В.В.** Физика моря. М., АН СССР, 1953, 990 с.
- Berger A.** Long-term variation of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements // Quat. Res., 1978, vol. 9, p. 139–167.
- Bretagnon P.** Theorie du mouvement de l'ensemble des planetes. Solution VSOP82 // Astron. Astrophys., 1982, vol. 114, p. 278–288.
- Broecker W.S.** The great ocean conveyor // Oceanography, 1991, vol. 4 (2), p. 79–89.
- Brouwer D., Van Woerkom A.J.J.** The secular variation of the orbital elements of the principal planets // Astron. Pap., 1950, vol. 13, p. 81–107.
- Fedorov V.M., Kostin A.A.** The calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC – AD 2999 // Springer Ser. Geol., 2020, vol. I, p. 181–192. DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6_20.
- Head M.J.** Formal subdivision of the Quaternary System/Period: Present status and future directions // Quat. Int., 2019, vol. 500, p. 32–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.05.018>.
- Laskar J., Joutel F., Boudin F.** Orbital, precessional and insolation quantities for the Earth from –20 Myr to +10 Myr // Astron. Astrophys., 1993, vol. 287, p. 522–533.
- Laskar J., Fienga A., Gastineau M., Manche H.** La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth // Astron. Astrophys., 2011, vol. 5, A89. DOI: 10.1051/0004-6361/201116836.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E.** A Pliocene–Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records // Paleoclimatology, 2005, vol. 20, PA1003, p. 1–17. DOI: 10.1029/2004PA001071.
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D. et al.** Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature, 1999, vol. 399, p. 429–437.
- Veres D., Bazin L., Landais A. et al.** The Antarctic ice core chronology (AICC2012): an optimized multi-parameter and multi-site dating approach for the last 120 thousand years //

Clim. Past, 2013, vol. 9, No. 4, p. 1733–1748. DOI: 10.5194/cp-9-1733-2013.

Vernekar A. Long-period global variations of incoming solar radiation // Ser.: Meteorol. Monographs. Am. Meteorol. Soc., 1972, vol. 12, No. 34, 128 p.

Walker M., Head M.J., Lowe J. et al. Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalization of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes // J. Quat. Sci., 2019, vol. 34, No. 3, p. 173–186. – <https://doi.org/10.1002/jqs.3097>

URL: <http://vo.imcce.fr/insola/earth/online/earth/earth.html> (дата обращения: 29.01.2024).

References

Brooks K. Klimaty proshlogo [Climates of the past]. Moscow, Izd-vo inostr. literature, 1952, 358 p. (in Russian).

Budyko M.I. Izmeneniye klimata [Changing of the climate]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1974, 280 p. (in Russian).

Velichko A.A. Evolyutsionnaya geografiya: problemy i resheniya [Evolutionary geography: problems and solutions]. Moscow, GEOS, 2012, 562 p. (in Russian).

Voeikov A.I. Meteorologiya [Meteorology]. St. Petersburg, Edition of the Cartographic Institution A. Ilyin, 1903, 737 p. (in Russian).

Imbri D., Imbri K.P. Tayny lednikovyykh epokh [Mysteries of the Ice Ages]. Moscow, Progress, 1988, 264 p. (in Russian).

Markov K.K. Paleogeografiya [Paleogeography]. Moscow, MGU, 1960, 268 p. (in Russian).

Markov K.K., Lazukov G.I., Nikolaev V.A. Chetvertichnyy period [Quaternary period]. Moscow, MGU, 1965, vol. 1, 372 p. (in Russian).

Markov K.K. Pleistotsen [Pleistocene]. Moscow, Vysshaya shkola, 1968, 304 p. (in Russian).

Milankovich M. Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebaniy klimata [Mathematical Climatology and Astronomical Theory of Climate Fluctuations]. Moscow; Leningrad, GONTI, 1939, 208 p. (in Russian).

Monin A.S., Shishkov Yu.A. Istoriya klimata [Climate history]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1979, 408 p. (in Russian).

Monin A.S. Vvedeniye v teoriyu klimata [Introduction to the theory of climate]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1982, 246 p. (in Russian).

Fedorov V.M. Insolyatsiya Zemli i sovremennyye izmeneniya klimata [Insolation of the Earth and modern climate change]. Moscow, Fizmatlit, 2018, 232 p. (in Russian).

Fedorov V.M. The problem of meridional heat transfer in the astronomical theory of climate. Geofizicheskiye protsessy i biosfera [Geophysical processes and biosphere], 2019a, vol. 18, No. 3, p. 117–128. DOI: 10.21455/GPB 2019.3-8.

Fedorov V.M. Variations in the Earth's insolation and features of their consideration in physical and mathematical climate models. Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances in the physical sciences], 2019b, vol. 189, No. 1, p. 33–46. DOI: 10.3367/UFNr.2017.12.038267.

Fedorov V.M. Astronomical theory of climate: issues of modernization and development. Gidrometeorologiya i ekologiya [Hydrometeorology and ecology], 2021a, No. 64, p. 435–465. DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-435-465.

Fedorov V.M. Holocene paradox in the astronomical theory of climate and problems of orbital tuning. Geofizicheskiye protsessy i biosfera [Geophysical processes and biosphere], 2021b, vol. 20, No. 1, p. 95–104. DOI: 10.21455/GPB2021.1-9.

Fedorov V.M., Frolov D.M. Change in the irradiation of the Earth in the phase of decreasing the inclination of its axis of rotation. Geofizicheskiye protsessy i biosfera [Geophysical processes and biosphere], 2022, vol. 21, No. 3, p. 75–84. DOI: 10.21455/GPB 2022.4-5.

Chetvertichnyy period v SSHA [Quaternary period in the USA]. K.K. Markov (ed.). Moscow, Mir, 1968, vol. 1, 696 p. (in Russian).

Sharaf Sh.G., Budnikova N.A. Fluctuations in the Earth's solar irradiation caused by secular changes in the elements of the Earth's orbit. DAN SSSR [Proc. of the Academy of Sciences of the USSR], 1968, vol. 182, No. 2, p. 291–293 (in Russian).

Shvartsbakh M. Klimaty proshlogo [Climates of the past]. Moscow, Izd-vo inostr. literature, 1955, 284 p. (in Russian).

Shuleikin V.V. Fizika morya [Sea physics]. Moscow, AN SSSR, 1953, 990 p. (in Russian).

Berger A. Long-term variation of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements. Quat. Res., 1978, vol. 9, p. 139–167.

Bretagnon P. Theorie du mouvement de l'ensemble des planetes. Solution VSOP82. Astr. Astrophys., 1982, vol. 114, p. 278–288.

Broecker W.S. The great ocean conveyor. Oceanography, 1991, vol. 4 (2), p. 79–89.

Brouwer D., Van Woerkom A.J.J. The secular variation of the orbital elements of the principal planets. Astr. Pap., 1950, vol. 13, p. 81–107.

Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC – AD 2999. Springer Ser. Geol., 2020, vol. 1, p. 181–192. DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6_20.

Head M.J. Formal subdivision of the Quaternary System/Period: Present status and future directions. Quat. Int., 2019, vol. 500, p. 32–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.05.018>.

Laskar J., Joutel F., Boudin F. Orbital, pretreatment and insolation for the earth from –20 Myr to +10 Myr. Astron. Astrophys., 1993, vol. 287, p. 522–533.

Laskar J., Fienga A., Gastineau M., Manche H. La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth. Astr. Astrophys., 2011, vol. 5, A89. DOI: 10.1051/0004-6361/201116836.

Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene–Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. Paleoclimatology, 2005, vol. 20, PA1003, p. 1–17. DOI: 10.1029/2004PA001071.

Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. Nature, 1999, vol. 399, p. 429–437.

Veres D., Bazin L., Landais A. et al. The Antarctic ice core chronology (AICC2012): an optimized multi-parameter and multi-site dating approach for the last 120 thousand years. Clim. Past, 2013, vol. 9, No. 4, p. 1733–1748. DOI: 10.5194/cp-9-1733-2013.

Vernekar A. Long-period global variations of incoming solar radiation. Ser.: Meteorol. Monographs. Am. Meteorol. Soc., 1972, vol. 12, No. 34, 128 p.

Walker M., Head M.J., Lowe J. et al. Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalization of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes. J. Quat. Sci., 2019, vol. 34, No. 3, p. 173–186. – <https://doi.org/10.1002/jqs.3097>

URL: <http://vo.imcce.fr/insola/earth/online/earth/earth.html> (last visited: 29.01.2024).

*Поступила в редакцию 26 июля 2023 г.,
после доработки – 22 января 2024 г.,
принята к публикации 5 февраля 2024 г.*