

УДК 551.24

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-3-13-16

ЭФФЕКТ РАЗДЕЛЕНИЯ СЕЗОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ В НЕОПЛЕЙСТОЦЕНЕ ПО ФАЗАМ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ЕЕ ОРБИТЫ

Валерий Михайлович Федоров¹✉, Денис Максимович Фролов²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; fedorov.msu@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-2305-7408>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; denisfrolov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0307-8175>

Аннотация. Для неоплейстоцена выполнены расчеты интенсивности облучения Земли и полушарий с высоким пространственным и временным разрешением. Обнаружен эффект разделения сезонного облучения полушарий по фазам увеличения и уменьшения эксцентриситета земной орбиты. Эффект проявляется в том, что интенсивность летнего облучения в Северном полушарии в фазу увеличения эксцентриситета превышает интенсивность его облучения в фазу уменьшения эксцентриситета. В зимнее полугодие в Северном полушарии отмечается обратный эффект. В фазу увеличения эксцентриситета интенсивность облучения уступает интенсивности облучения в фазу уменьшения эксцентриситета. В Южном полушарии в зимнее полугодие отмечается прямой эффект сезонного разделения, в летнее полугодие — обратный. Эффект сезонного разделения связан с тем, что эксцентриситетом определяется интенсивность годового облучения Земли и полушарий, а также амплитуда интенсивности сезонного облучения. Эффектом разделения сезонного облучения объясняется механизм образования и проявления 100-тысячелетнего цикла в изменении природной среды в неоплейстоцене.

Ключевые слова: неоплейстоцен, годовое и месячное облучение Земли, солярная геохронология, климатостратиграфия, фазовое разделение

Для цитирования: Федоров В.М., Фролов Д.М. Эффект разделения сезонного облучения Земли в неоплейстоцене по фазам изменения эксцентриситета ее орбиты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 3. С. 13–16.

THE EFFECT OF DIVIDING THE SEASONAL IRRADIATION OF THE EARTH IN THE LATE PLEISTOCENE ACCORDING TO THE PHASES OF CHANGE IN THE ECCENTRICITY OF ITS ORBIT

Valery M. Fedorov¹✉, Denis M. Frolov²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; fedorov.msu@mail.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; denisfrolov@mail.ru

Abstract. The calculations of the intensity of irradiation of the Earth and hemispheres with high spatial and temporal resolution were performed for the Late Pleistocene. The effect of division of seasonal irradiation of the hemispheres by phases of increasing and decreasing eccentricity of the Earth's orbit was discovered. The effect is manifested in the fact that the intensity of summer irradiation in the Northern Hemisphere in the phase of increasing eccentricity exceeds the intensity of its irradiation in the phase of decreasing eccentricity. In the winter half-year, the opposite effect is observed in the Northern Hemisphere. In the phase of increasing eccentricity, the intensity of irradiation is inferior to the intensity of irradiation in the phase of decreasing eccentricity. In the Southern Hemisphere, in the winter half-year, a direct effect of seasonal division is observed, in the summer half-year — the opposite. The effect of seasonal division is associated with the fact that the intensity of annual irradiation of the Earth and hemispheres, as well as the amplitude of the intensity of seasonal irradiation, are determined by eccentricity. The effect of seasonal irradiation division explains the mechanism of formation and manifestation of the 100-thousand-year cycle in the change of the natural environment in the Late Pleistocene.

Keywords: Late Pleistocene, annual and monthly irradiation of the Earth, solar geochronology, climatostratigraphy, phase separation

For citation: Fedorov V.M., Frolov D.M. The effect of dividing the seasonal irradiation of the Earth in the Late Pleistocene according to the phases of change in the eccentricity of its orbit. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 3: 13–16. (In Russ.).

Введение. В настоящее время основу геохронологии и климатостратиграфии неоплейстоцена составляют схемы, построенные на изменении

соотношений изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) в составе донных фораминифер — морские изотопные стадии [Hays, et al., 1976; Imbrie, et al., 1984; Lisiecki,

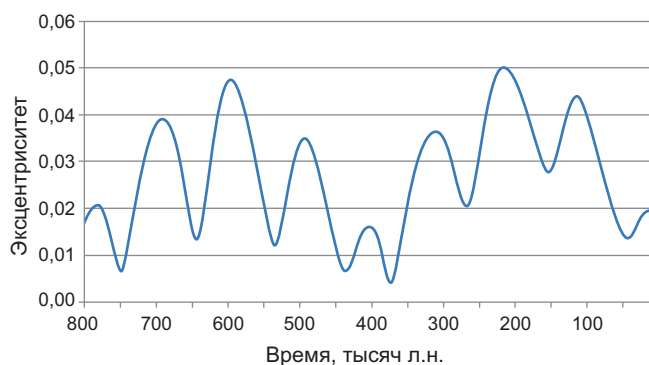


Рис. 1. Изменение эксцентриситета земной орбиты в неоплейстоцене

Raymo, 2005]. В изотопно-кислородном составе неоплейстоценовых морских отложений выделяются периодичности (около 100, 41 и 23 тысяч лет), соответствующие периодам изменения эксцентриситета, наклона оси и долготы перигелия, регулирующих облучение Земли, при этом механизм главной 100-тысячелетней периодичности не определен [Berger, 1999; Большаков, 2003]. Кроме того, ИК шкалы, составляющие основу изотопно-кислородной геохронологии и климатостратиграфии, настраиваются по летним инсоляционным кривым (рассчитанным для 65° с.ш.) [Hays, et al., 1976; Imbrie, et al., 1984; Bassinot, et al., 1994; Lisiecki, Raymo, 2000]. Однако, климатологическая репрезентативность инсоляции на 65° с.ш. принимается без доказательства. Следовательно, актуальным представляется исследование образования и проявления 100-тысячелетнего цикла в изотопно-кислородном составе морских отложений в связи с вариациями солярного климата Земли, происходящими из-за изменения эксцентриситета ее орбиты.

Методика расчета облучения. Расчеты выполнялись на основе модели Ж. Ласкара [Laskar, et al., 2004; Laskar, et al., 2011], описывающей сглаженное (без короткопериодных колебаний) орбитальное движение и вращение Земли. Данные Ж. Ласкара (эксцентриситет земной орбиты, угол наклона земной оси к плоскости орбиты, долгота перигелия) для промежутка от –50 млн до +20 млн юлианских лет относительно 2000 года с шагом 1000 лет, размещенные на электронном ресурсе Жака Ласкара (revision 15 august 2015) [La2004..., 2004; Laskar, et al., 2004] были интерполированы с шагом 500 лет.

По интерполированным данным Ж. Ласкара и его оценкам смещения точки весеннего равноденствия было реконструировано соответствующее второму закону Кеплера орбитальное движение и вращение Земли в тропических годах, отстоящих от 2000 г. на 800 тысяч юлианских лет в прошлое с шагом 500 лет. При этом продолжительность сидерического года считалась равной 365,256363 суткам СИ. Для узловых моментов тропических лет (по 24 момента на каждые тропические сутки) были вычислены склонение Солнца и расстояние Солнце–Земля.

Земная поверхность аппроксимировалась эллипсоидом с осью, совмещенной с осью вращения Земли, с длинами полуосей 6378 137 м (большие) и 6356 752 м (малая), что соответствует параметрам земного эллипсоида Geodetic Reference System 1980 (GRS80). Все характеристики облучения земной поверхности и ее частей рассчитывались, исходя из энергий облучения широтных зон. Энергия облучения (Дж) широтной зоны (φ_1 , φ_2) в интервале времени (t_1 , t_2) вычислялась по формуле:

$$\text{ЭО}(\varphi_1, \varphi_2, t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma(\varphi) \int_{-\pi}^{\pi} \Lambda(t, \varphi, \alpha) d\alpha d\varphi dt,$$

где α — часовой угол Солнца (в радианах) в момент t (измеряется в СИ в секундах) в точке P с геодезической широтой φ (в радианах), находящейся на земной поверхности; $\sigma(\varphi)$ — площадной множитель в точке P ; $\sigma(\varphi) d\alpha d\varphi$ — площадь (м^2) бесконечно малой трапеции с центром в точке P (трапеция является ячейкой поверхности); $\Lambda(t, \varphi, \alpha)$ — интенсивность облучения ($\text{Вт}/\text{м}^2$) этой трапеции в малой окрестности момента t . Расчет $\sigma(\varphi)$ и $\Lambda(t, \varphi, \alpha)$ выполнялся с использованием склонения Солнца и расстояния Солнце–Земля так же, как в работе [Fedorov, Kostin, 2020]. Влияние атмосферы, приливные деформации Земли, а также изменение активности Солнца не учитывались. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным $1361 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Результаты. Среднее значение эксцентриситета (e) в неоплейстоцене составляет 0,027, максимальное — 0,050, минимальное — 0,004 (рис. 1). При расчете по максимумам продолжительность цикла эксцентриситета изменяется от 90 до 102,5 тысяч лет, составляя в среднем 95,3 тысяч лет. При расчете по минимумам продолжительность цикла изменяется в более широких пределах (65–113 тысяч лет), в среднем составляя 100,6 тысяч лет. Эксцентриситетом определяется динамика годового облучения Земли и полушарий ($R = 0,977$), а также амплитуда изменений сезонной интенсивности облучения (ИО) полушарий.

В среднем значение годовой интенсивности облучения Земли и полушарий в неоплейстоцене составляет $340,107 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Максимальное значение равняется $340,391 \text{ Вт}/\text{м}^2$, минимальное — $339,959 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Максимальный размах изменений годовой ИО в неоплейстоцене составляет, таким образом, $0,432 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (0,127 % от среднего). Определяемый спектральным анализом в изотопно-кислородном составе фораминифер основной максимум, соответствующий 100-тысячелетнему циклу, вряд ли регулируется слабыми колебаниями годовой ИО в неоплейстоцене [Berger, Loutre, 1991].

Рассчитывались средние значения сезонной (летней и зимней) интенсивности облучения полушарий для фаз увеличения и уменьшения эксцентриситета (табл. 1).

Таблица 1

Средние значения сезонного облучения полушарий в фазы уменьшения и увеличения эксцентриситета

Фаза цикла <i>e</i>	Интервал, тысяч лет назад	Летняя ИО в СП, Вт/м ²	Зимняя ИО в СП, Вт/м ²	Зимняя ИО в ЮП, Вт/м ²	Летняя ИО в ЮП, Вт/м ²
Уменьшения	781,5–748,0	424,632	255,134	254,124	426,365
Увеличения	747,5–690,0	427,662	253,374	254,379	425,976
Уменьшения	689,5–644,0	425,645	254,883	253,965	427,020
Увеличения	643,5–595,5	427,658	254,026	255,558	424,954
Уменьшения	595,0–534,0	425,121	255,062	252,991	428,653
Увеличения	533,5–493,0	425,785	254,653	253,992	426,798
Уменьшения	492,5–438,0	427,076	253,579	254,678	425,323
Увеличения	437,5–403,0	427,120	253,109	253,955	425,818
Уменьшения	402,5–373,0	424,378	255,283	254,180	426,225
Увеличения	372,5–311,0	427,016	253,863	254,712	425,568
Уменьшения	310,5–268,0	425,137	255,248	253,724	427,469
Увеличения	267,5–216,0	428,949	253,263	255,700	424,704
Уменьшения	215,5–155,0	425,000	255,475	252,610	429,788
Увеличения	154,5–115,0	427,128	254,312	254,856	426,096
Уменьшения	114,5–44,0	426,571	254,035	254,261	426,421
Увеличения	43,5–14	424,835	255,242	255,138	425,043

Примечание: СП — Северное полушарие, ЮП — Южное полушарие.

Среднее значение летней ИО в Северном полушарии в фазах увеличения эксцентриситета составляет 427,019 Вт/м², в фазах уменьшения эксцентриситета — 425,445 Вт/м². Разность средних значений летнего облучения Северного полушария в фазах увеличения и уменьшения эксцентриситета равняется 1,574 Вт/м² или 0,369 % от среднего многолетнего значения летней ИО в Северном полушарии в неоплейстоцене.

Среднее значение зимней ИО в Северном полушарии в фазах увеличения эксцентриситета составляет 253,980 Вт/м², в фазах уменьшения эксцентриситета — 254,838 Вт/м². Разность средних значений зимнего облучения Северного полушария в фазах увеличения и уменьшения эксцентриситета равняется –0,857 Вт/м² или 0,337 % от среднего многолетнего значения зимней ИО в Северном полушарии в неоплейстоцене. Таким образом, в фазах увеличения эксцентриситета летняя ИО в Северном полушарии превышает летнюю ИО в фазах уменьшения эксцентриситета. В зимнее полугодие, наоборот, зимняя ИО в фазах уменьшения эксцентриситета превышает зимнюю ИО в фазах его увеличения.

Среднее значение зимней ИО в Южном полушарии во фазах увеличения эксцентриситета составляет 254,786 Вт/м², в фазах уменьшения эксцентриситета — 253,817 Вт/м². Разность средних значений зимнего облучения Южного полушария в фазах увеличения и уменьшения эксцентриситета определяется значением 0,970 Вт/м², что составляет 0,381 % от среднего многолетнего значения зимней ИО в Южном полушарии в неоплейстоцене.

Среднее значение летней ИО в Южном полушарии в фазах увеличения эксцентриситета характери-

Таблица 2

Средние значения разделения сезонного облучения в полушариях в фазу увеличения эксцентриситета

Северное полушарие	
Летнее полугодие 1,574 Вт/м ² (0,369 %)	Зимнее полугодие –0,857 Вт/м ² (–0,337 %)
Южное полушарие	
Зимнее полугодие 0,970 Вт/м ² (0,381 %)	Летнее полугодие –1,539 Вт/м ² (–0,361 %)

зуется значением 425,619 Вт/м², в фазах уменьшения эксцентриситета — 427,158 Вт/м². Разность средних значений летнего облучения Южного полушария в фазах увеличения и уменьшения эксцентриситета равняется –1,539 Вт/м² или 0,361 % от среднего многолетнего значения летней ИО в Южном полушарии в неоплейстоцене.

Таким образом, в первое астрономическое полугодие (летнее в Северном полушарии и зимнее в Южном полушарии) отмечается прямой эффект фазового разделения сезонного облучения полушарий по фазам колебания эксцентриситета. Во второе астрономическое полугодие (зимнее в Северном полушарии и летнее в Южном полушарии) — обратный эффект (табл. 2).

Эффект разделения сезонного облучения позволяет выделить теплые и холодные эпохи в солярном климате Земли, если учесть, что с динамикой летнего облучения, в основном, связаны изменения солярного и глобального климата Земли. Известно, что летняя инсоляция имеет особое значение в генезисе климата и его изменениях [Воейков, 1903; Миланкович, 1939; Lamb, 1965; Федоров, 2023]. Климатиче-

ские эффекты вариации летней инсоляции заключаются в следующем. Во-первых, при увеличении летней инсоляции увеличивается приповерхностная температура воздуха и температура поверхности океана, а также испарение и содержание водяного пара в атмосфере. Это приводит к усилению парникового эффекта и выделению дополнительного тепла, следствием которого является новое усиление испарения и т.д. Эти процессы, многократно повторяясь, приводят к формированию механизма усиления потепления климата. Во-вторых, возрастает выделение скрытого тепла вследствие увеличения атмосферных осадков (переход водяного пара в воду и снег), главным образом в экваториальной и тропической областях. В-третьих, происходит уменьшение альбедо за счет сокращения площади морских льдов, ледников и продолжительности залегания снежного покрова (в умеренных и высоких широтах и в горных областях). Следствием этого является увеличение площади облучения материков и океанов, от поверхности которых нагревается атмосфера. При сокращении летней инсоляции, очевидно, происходят обратные процессы. Значение летней ИО подтверждается и превышением величин фазового расхождения летней ИО по сравнению с зимней ИО в полушариях (табл. 2). В полушариях теплые и холодные солярные эпохи проявляются асинхронно.

Заключение. Обнаружен эффект разделения сезонного облучения по фазам эксцентриситета

земной орбиты позволяющий объяснить механизм влияния 100-тысячелетнего цикла на изменения природной среды и причины его проявления в изотопно-кислородном составе донных фораминифер. Его средние вариации втрое (в относительных величинах) превышают максимальный размах имеющих такую же периодичность колебаний, годовой ИО Земли и полушарий. Эффект определяется тем, что динамикой эксцентриситета земной орбиты регулируется годовое облучение Земли и полушарий, а также амплитуда колебаний сезонной интенсивности облучения. На основе эффекта сезонного разделения в механизме влияния 100-тысячелетнего цикла на солярный климат Земли в неоплейстоцене выделяются 7 теплых и 9 холодных солярных эпох (табл. 1), соответствующих в Северном полушарии фазам увеличения и уменьшения эксцентриситета земной орбиты, которые могут стать основой солярной геохронологии и климатостратиграфии неоплейстоцена.

Финансирование. Работа выполнена в соответствии с госбюджетными темами Географического факультета МГУ «Палеогеографические реконструкции природных геосистем и прогнозирование их изменений» (121051100135-0), «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4), «Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики» (121051100167-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Большаков В.А. Новая концепция орбитальной теории палеоклимата. М.: МГУ, 2003. 256 с.

Войков А.И. Метеорология. СПб.: Издание картографического заведения А. Ильина, 1903. 737 с.

Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л.: ГОНТИ, 1939. 207 с.

Федоров В.М. Проблемы параметризации радиационного блока физико-математических моделей климата и возможности их решения // Успехи физических наук. 2023. Т. 193, № 9. С. 971–988.

Bassinot F.C., Labeyrie L.D., Vincent E., et al. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal // Earth Planet. Sci. Lett. 1994. Vol. 126. P. 91–108.

Berger A.L., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quat. Sci. Rev. 1991. Vol. 10. P. 297–317.

Berger W.H. The 100-kyr ice age cycle: internal oscillation or inclinational forcing? // International Journal of Earth Sciences. 1999. Vol. 88 (2). P. 305–316.

Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's Insolation for the Period 3000 BC–AD 2999 // Processes in GeoMedia. 2020. Vol. I. Springer Geology P. 181–92.

Hays J.D., Imbrie J., Shackleton N. Variation in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages // Science. 1976. Vol. 194. P. 1121–1132.

Imbrie J., Hays J., Martinson D., et al. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record // Milankovitch and Climate. NATO ASI Ser. C. 126 / Eds. A.L. Berger, et al. Dordrecht: Reidel, 1984. P. 269–305.

La2004. Supplement materials to Laskar J., Gastineau M., Joutel F., et al. 2004. A long term numerical solution for the insolation quantities of Earth. URL: <https://vo.imcce.fr/insola/earth/online/earth/La2004/index.html> (дата обращения: 07.04.2025)

Lamb H.H. The early medieval warm epoch and its sequel // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 1965. Vol. 1. P. 13–37.

Laskar J., Robutel P., Joutel F., et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // Astronomy & Astrophysics 2004. Vol. 428, N 1, P. 261–285.

Laskar J., Fienga A., Gastineau M., Manche H. La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth // Astronomy & Astrophysics 2011. Vol. 532, A89 (2011). 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 // Paleoceanography. 2005. Vol. 20. PA 1003. doi: 10.1029/2004PA001071

Статья поступила в редакцию 14.05.2024,
одобрена после рецензирования 12.05.2025,
принята к публикации 28.06.2025