

СОЛЯРНЫЙ КЛИМАТ АРКТИКИ В НЕОПЛЕЙСТОЦЕНЕ

В.М. Фёдоров, Д.М. Фролов, А.М. Залиханов*

Получены статистические характеристики изменений интенсивности годового и сезонного облучения на верхней границе атмосферы пятиградусных широтных зон Арктического региона в неоплейстоцене. Не выявлена связь интенсивности годового и сезонного облучения пятиградусных широтных зон с эксцентриситетом земной орбиты, однако выявлена положительная заметная связь интенсивности летнего облучения и отрицательная интенсивности зимнего облучения с изменением наклона оси и долготы перигелия. Максимальный размах колебаний зимней интенсивности облучения в Арктике с географической широтой в неоплейстоцене заметно (на $10,211 \text{ Вт/м}^2$) уменьшается, в то время как максимальный размах колебаний летней интенсивности облучения с географической широтой слабо (на $4,3 \text{ Вт/м}^2$) увеличивается. Коэффициент корреляции летней интенсивности облучения и долготы перигелия в неоплейстоцене с географической широтой уменьшается, а с наклоном оси вращения – увеличивается. Модуль коэффициента корреляции зимней интенсивности облучения с долготой перигелия уменьшается, а с углом наклона оси – увеличивается. Максимальный размах изменений интенсивности годового и сезонного облучения пятиградусных широтных зон в неоплейстоцене на 1–2 порядка превышает максимальные вариации показателя $\delta^{18}\text{O}$ изотопно-кислородного анализа донных фораминифер, что показывает необоснованность использования его значений для решения задач геохронологии и климатостратиграфии неоплейстоцена.

Ключевые слова: солярный климат Земли, вариации приходящей солнечной радиации, перенос радиационного тепла, инсоляционная контрастность, инсоляционная сезонность, Арктика.

Ссылка для цитирования: Фёдоров В.М., Фролов Д.М., Залиханов А.М. Солярный климат Арктики в неоплейстоцене // Жизнь Земли. 2025. Т. 47, № 1. С. 34–45. DOI: 10.29003/m4377.0514-7468.2025_47_1/34-45.

Поступила 02.12.2024 / Принята к публикации 26.02.2025

SOLAR CLIMATE OF THE ARCTIC IN THE LATE PLEISTOCENE

V.M. Fyodorov, PhD, D.M. Frolov, A.M. Zalikhanov, PhD

Lomonosov Moscow State University (Faculty of Geography)

Statistical characteristics of changes in the intensity of annual and seasonal irradiation at the upper boundary of the atmosphere of 5-degree latitude zones of the Arctic region in the Late Pleistocene were obtained. No relationship was found between the intensity of annual and seasonal irradiation of 5-degree latitude zones and the eccentricity of the Earth's orbit, but a positive noticeable relationship was found between the intensity of summer irradiation and a negative relationship between the intensity of winter irradiation and a change in the tilt of the axis and the longitude of the perihelion. The maximum range of variations in winter irradiation intensity in the Arctic with geographic latitude in the Late Pleistocene noticeably (by $10,211 \text{ W/m}^2$) decreases, while the maximum range of variations in summer irradiation intensity with geographic latitude slightly (by 4.3 W/

* Фёдоров Валерий Михайлович – к.г.н., в.н.с., fedorov.msu@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2305-7408; Фролов Денис Максимович – н.с., denisfrolov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0307-8175; Залиханов Алим Михайлович – к.г.н., с.н.с., географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, bulungu@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-2540-6045.

m²) increases. The correlation coefficient of summer irradiation intensity and perihelion longitude in the Late Pleistocene decreases with geographic latitude, and increases with the tilt of the rotation axis. The modulus of the correlation coefficient of winter irradiation intensity with perihelion longitude decreases, and increases with the tilt of the rotation axis. The maximum range of changes in the intensity of annual and seasonal irradiation of 5-degree latitudinal zones by 1–2 orders of magnitude in the Late Pleistocene exceeds the maximum variations in the $\delta^{18}\text{O}$ isotope-oxygen analysis of benthic foraminifera, which shows the groundlessness of using its values to solve problems of Late Pleistocene geochronology and climatostratigraphy.

Keywords: Earth' solar climate, variations in incoming solar radiation, radiative heat transfer, insolation contrast, insolation seasonality, Arctic.

For citation: Fyodorov, V.M., Frolov, D.M., Zalikhanov, A.M., "Solar climate of the Arctic in the Neopleistocene", *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] 47, no 1, 34–45 (2025) (in Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29003/m4377.0514-7468.2025_47_1/34-45.

Введение. Радиационный баланс Земли, её поверхности и атмосферы связан с вариациями интенсивности приходящей на верхнюю границу атмосферы (ВГА) солнечной радиации. Арктика – регион с максимальными сезонными вариациями приходящей солнечной энергии. В связи с этим представляется актуальным исследование изменений приходной составляющей радиационного и теплового баланса в этом регионе. Динамика интенсивного годового и сезонного облучения Арктики отражает и изменения её термического режима в неоплейстоцене, способствует поискам причин глобальных климатических изменений в палеомагнитную эпоху Брюнес.

Исследовались изменения приходящей на верхнюю границу атмосферы (ВГА) солнечной радиации в неоплейстоцене. ВГА является поверхностью, от которой рассчитывается радиационный баланс Земли, её поверхности и атмосферы. Изменение солярного климата в позднем плейстоцене и голоцене подробно рассмотрено в работе [4]. Для неоплейстоцена анализируется облучение 5-ти градусных широтных зон, охватывающих регион, расположенный севернее 65° с.ш. (широтные зоны 65°–70°, 70°–75°, 75°–80°, 80°–85° и 85°–90°). Расчёты облучения выполнялись совместно с А.А. Костиным в соответствии с ранее разработанной методикой [8] по значениям эксцентриситета, угла наклона оси и долготы перигелия, рассчитанными Ж. Ласкаром с коллегами [11, 12]. Отметим, что данные изотопно-кислородного анализа донных фораминифер, составляющие основу геохронологии и климатостратиграфии неоплейстоцена, настраиваются по облучению 65° с.ш. [7, 9, 10, 13]. Также данные облучения 65° с.ш. используются при корректировке данных изотопно-кислородного анализа кернов ледовых скважин в Антарктиде [15]. Однако климатическая репрезентативность облучения этой параллели для неоплейстоцена и климатических условий всей Земли не обосновывается. В связи с этим представляется актуальным анализ изменения облучения арктической зоны для сравнения в дальнейшем с результатами изотопно-кислородного состава ледовых кернов гренландских скважин, расположенных в различных широтных зонах Арктики с динамикой облучения этих зон. Это может способствовать определению достоверности изотопных данных и уточнению области применения изотопно-кислородного метода в геохронологии и климатостратиграфии.

Методика расчёта интенсивности облучения (ИО). Расчёты выполнялись на основе модели Ж. Ласкара [11, 12], описывающей сглаженное (без короткопериодных колебаний) орбитальное движение и вращение Земли. Данные Ж. Ласкара (эксцентриситет земной орбиты, угол наклона земной оси к перпендикуляру к плоскости орбиты, долгота перигелия) для промежутка от -50 млн до +20 млн юлианских лет

относительно 2000 года с шагом 1000 лет, размещённые на электронном ресурсе¹, 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 года на 800 тысяч юлианских лет в прошлое с шагом 500 лет (палеомагнитная эпоха Брунес). 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, совмещённой с осью вращения Земли, с длинами полуосей 6 378 137 м (большие) и 6 356 752 м (малая), что соответствует параметрам земного эллипсоида Geodetic Reference System 1980 (GRS80). Все характеристики облучения земной поверхности и её 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 секундах СИ) 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 . Расчёт $\sigma(\varphi)$ и $\Lambda(t, \varphi, \alpha)$ выполнялся с использованием склонения Солнца и расстояния Солнце–Земля так же, как в работе [8]. Влияние атмосферы, рельеф и приливные деформации Земли, а также изменение активности Солнца не учитывались. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным $1361 \text{ Вт}/\text{м}^2$. В качестве единиц изменения времени использовался тропический год, астрономические полугодия и месяцы тропического года [3]. Напомним, что тропическим годом называется промежуток времени между двумя последовательными прохождением центра Солнца через точку весеннего равноденствия [1]. На основе расчётов сформирована база данных годовой, летней и зимней интенсивности облучения пятиградусных широтных зон, которая используется в работе для исследования солярного климата Арктического региона.

Интенсивность годового облучения широтных зон. Средние, максимальные и минимальные значения годовой интенсивности облучения (ИО) уменьшаются с увеличением широты. Максимальный размах колебаний с широтой возрастает. Так, в широтной зоне $85^\circ\text{--}90^\circ$ с.ш. он в 1,741 раз (или на 74,085%) превышает максимальный размах колебаний годовой ИО в широтной зоне $65^\circ\text{--}70^\circ$ с.ш. (табл. 1).

Изменение интенсивности годового облучения в широтных зонах в неоплейстоцене происходит синхронно. Это объясняется тем, что годовая ИО в широтных зонах регулируется изменением наклона оси, с которым для всех рассматриваемых широтных зон отмечается близкая к линейной связь (рис. 1, табл. 2).

Средний период колебаний угла наклона в неоплейстоцене составляет 41 000 лет. Среднее значение угла наклона оси вращения в неоплейстоцене составляет $23,354^\circ$. Угол наклона в это время изменяется от минимального – $22,076^\circ$ (232 тысячи л.н.) до максимального значения $24,454^\circ$ (232 тыс. л.н.). Максимальный размах колебаний угла

¹ <https://vo.imcce.fr/insola/earth/online/earth/La2004/index.html>

Таблица 1. Статистические характеристики интенсивности годового облучения (W/m^2) 5-ти градусных широтных зон

Table 1. Statistical characteristics of the annual irradiation intensity (W/m^2) of 5-degree latitudinal zones

Статистические характеристики	Северная широта, град. с.ш.				
	65–70	70–75	75–80	80–85	85–90
Среднее	204,529	190,582	181,193	175,244	172,345
Максимум	209,283	196,832	188,290	182,853	180,199
Минимум	199,840	183,966	173,530	166,957	163,761
Размах (макс)	9,443	12,866	14,760	15,896	16,438

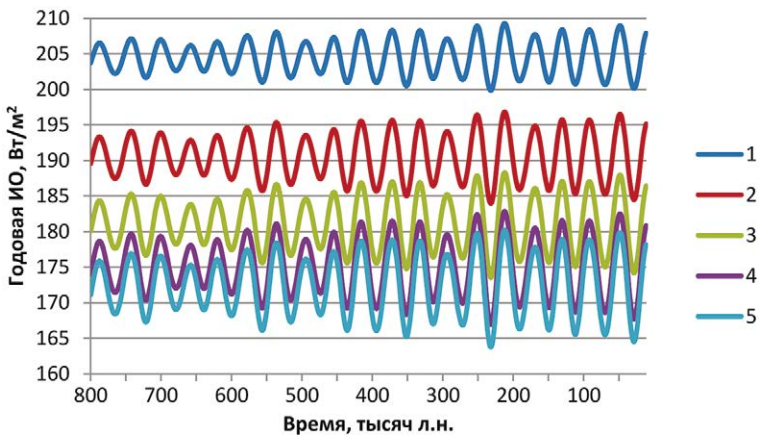


Рис. 1. Изменение интенсивности годового облучения 5-ти градусных широтных зон Северного полушария в неоплейстоцене: 1 – 65°–70°, 2 – 70°–75°, 3 – 75°–80°, 4 – 80°–85°, 5 – 85°–90°.

Fig. 1. Changes in the annual irradiation intensity of 5-degree latitudinal zones of the Northern Hemisphere in the Late Pleistocene: 1 – 65°–70°, 2 – 70°–75°, 3 – 75°–80°, 4 – 80°–85°, 5 – 85°–90°.

Таблица 2. Коэффициент корреляции астрономических характеристик и интенсивности годового облучения в 5-ти градусных широтных зонах

Table 2. Correlation coefficient of astronomical characteristics and annual irradiation intensity in 5-degree latitudinal zones

Астрономические характеристики	Широтные зоны, град с.ш.				
	65–70	70–75	75–80	80–85	85–90
Эксцентриситет	-0,0026	-0,0121	-0,0156	-0,0173	-0,0180
Долгота перигелия	-0,0165	-0,0147	-0,0143	-0,0141	-0,0141
Наклон оси	0,9993	0,9998	0,9999	0,9999	0,9999

наклона оси составляет $2,378^\circ$ (рис. 2). При расчётах по максимумам значений период изменений угла наклона в среднем составляет 41 000 лет (изменяясь от 38 до 46 тысяч лет). При расчётах по минимумам средняя продолжительность цикла равняется 40,889 тысяч лет (изменения находятся в пределах от 37 до 44 тысяч лет).

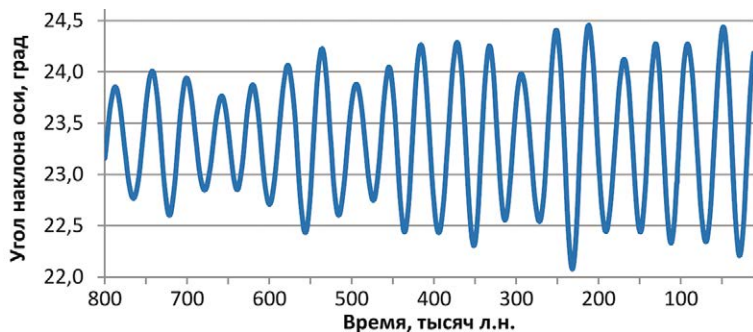


Рис. 2. Изменение угла наклона оси вращения в неоплейстоцене.
 Fig. 2. Changes in the inclination angle of the rotation axis in the Late Pleistocene.

В изменениях годовой ИО в неоплейстоцене (см. рис. 1) выделяются два интервала с различным размахом колебаний. Статистические характеристики облучения в этих интервалах представлены в табл. 3.

Таблица 3. Статистические характеристики годовой ИО ($Вт/м^2$) для интервалов 800 – 550 тысяч л.н. и 550 – 11,5 тысяч л.н.

Table 3. Statistical characteristics of the annual IR (W/m^2) for the ranges of 800–550 thousand years ago and 550–11.5 thousand years ago

Статистические характеристики	Широтные зоны, град с.ш.				
	65–70	70–75	75–80	80–85	85–90
Интервал от 800 до 550 тысяч л.н.					
Среднее	204,463	190,514	181,121	175,169	172,268
Максимум	207,551	194,620	185,797	180,188	177,452
Минимум	201,006	185,731	175,616	169,232	166,126
Размах (макс)	6,545	8,888	10,180	10,956	11,326
Интервал от 550 до 11,50 тысяч л.н.					
Среднее	204,557	190,611	181,224	175,276	172,377
Максимум	209,283	196,832	188,290	182,853	180,199
Минимум	199,840	183,966	173,530	166,957	163,761
Размах (макс)	9,443	12,866	14,760	15,896	16,438

Приблизительно от 550 тысяч л.н. отмечается увеличение размаха колебаний годовой интенсивности облучения всех 5-ти градусных широтных зон арктического сегмента. Максимальный размах колебаний годовой ИО в широтных зонах увеличивается во втором интервале (550–11,5 тысяч л.н.) в 1,443 (в зоне 60°–65°) и в 1,451 раза (в зоне 85°–90°). То есть размах колебаний слабо увеличивается с широтой. Максимальный размах колебания угла наклона на первом интервале составляет 1,629°, на втором интервале – 2,378°. Увеличение максимального размаха составляет 1,460 раз.

Таким образом, увеличение размаха (и амплитуды) колебаний годовой ИО в Арктике приблизительно от 550 тысяч л.н. объясняется увеличением размаха (амплитуды) колебаний угла наклона оси вращения. На рис. 3 представлено изменения модуля аномалии угла наклона, принимаемого нами за амплитуду колебаний.

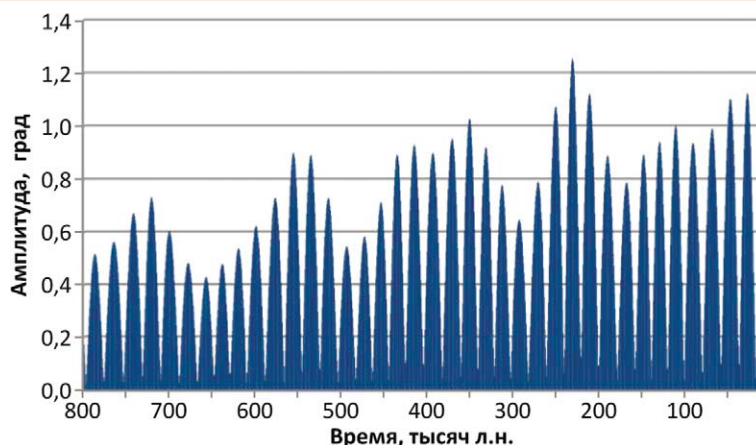


Рис. 3. Изменение амплитуды колебания угла наклона оси вращения Земли в неоплейстоцене.
Fig. 3. Changes in the amplitude of oscillations of the inclination angle of the Earth's rotation axis in the Late Pleistocene.

Интенсивность летнего облучения широтных зон. Максимумы и минимумы летней интенсивности облучения 5-ти градусных широтных зон с географической широтой уменьшаются, а их максимальный размах слабо увеличивается (**рис. 4, табл. 4**). От широтной зоны 65° – 70° с.ш. до широтной зоны 85° – 80° максимальный размах колебаний увеличивается на $4,3 \text{ Вт/м}^2$ (6,999%).

Отмечается заметная корреляционная связь изменений летней ИО Северного полушария в неоплейстоцене с долготой перигелия (которая уменьшается с увеличением географической широты) и с углом наклона оси (которая увеличивается с географической широтой) (**табл. 5**). В то же время интенсивность летнего облучения 5-ти градусных широтных зон тесно связана между собой. Значения попарного коэффициента корреляции изменяется в пределах от 0,989 до 1,000.

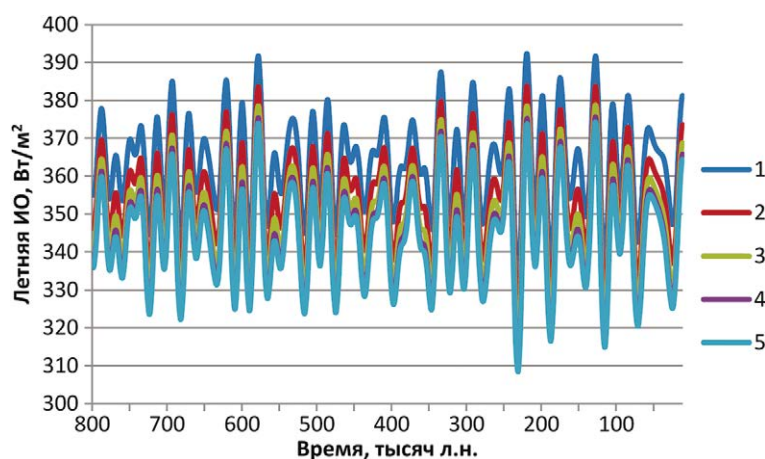


Рис. 4. Изменение интенсивности летнего облучения 5-ти градусных широтных зон Северного полушария в неоплейстоцене (1 – 65° – 70° , 2 – 70° – 75° , 3 – 75° – 80° , 4 – 80° – 85° , 5 – 85° – 90°).

Fig. 4. Changes in the summer irradiation intensity of 5-degree latitudinal zones of the Northern Hemisphere in the Late Pleistocene (1 – 65° – 70° , 2 – 70° – 75° , 3 – 75° – 80° , 4 – 80° – 85° , 5 – 85° – 90°).

Таблица 4. Статистические характеристики интенсивности летнего облучения ($Вт/м^2$) 5-ти градусных широтных зон

Table 4. Statistical characteristics of summer irradiation intensity (W/m^2) of 5-degree latitudinal zones

Статистические характеристики	Северная широта, град. с.ш.				
	65–70	70–75	75–80	80–85	85–90
Среднее	363,200	354,359	348,834	345,477	343,878
Максимум	392,357	383,786	378,663	375,628	374,189
Минимум	330,900	320,522	314,151	310,279	308,432
Размах (макс)	61,458	63,264	64,512	65,349	65,757

Таблица 5. Коэффициент корреляции астрономических характеристик и интенсивности летнего облучения в 5-ти градусных широтных зонах

Table 5. Correlation coefficient of astronomical characteristics and summer irradiation intensity in 5-degree latitudinal zones

Астрономические характеристики	Широтные зоны, град с.ш.				
	65–70	70–75	75–80	80–85	85–90
Эксцентриситет	0,013	0,009	0,007	0,006	0,005
Долгота перигелия	0,617	0,583	0,562	0,550	0,544
Наклон оси	0,531	0,596	0,631	0,651	0,661

Максимальный размах имеет минимальные значения в интервале от приблизительно 350 тысяч л.н. до 450 тысяч л.н. Проведена оценка максимального размаха колебаний летней ИО в широтных зонах для трёх интервалов времени в неоплейстоцене (**табл. 6**).

Размах колебаний в интервале от 350 до 450 тысяч лет (соответствует лихвинскому межледниковью) в среднем по широтным зонам уступал максимальному размаху колебаний летней ИО в предшествующее время неоплейстоцена в 1,674 раза, максимальному размаху в последующее время в неоплейстоцене – в 2,104 раза.

Таблица 6. Изменение максимального размаха колебаний летней ИО ($Вт/м^2$) в разных интервалах времени

Table 6. Changes in the maximum range of summer IR oscillations (W/m^2) in several time intervals

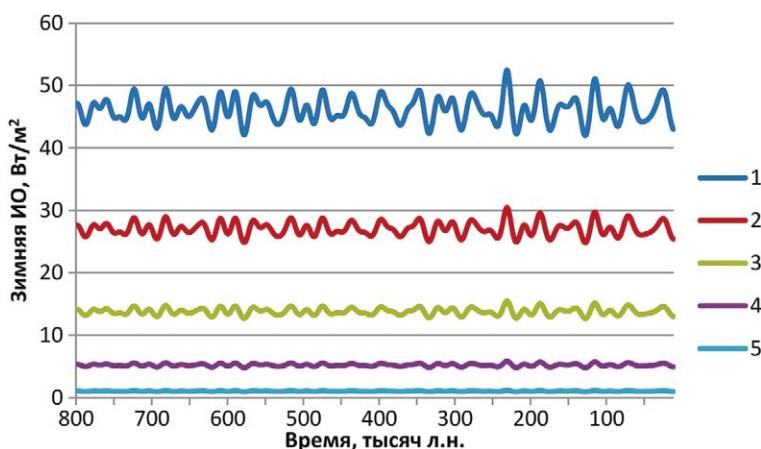
Границы интервала, тысяч л.н.	Широтные зоны, град с.ш.				
	65–70	70–75	75–80	80–85	85–90
800–450	49,664	50,660	51,204	51,542	51,707
450–350	27,629	29,605	30,997	31,932	32,384
350–11,5	61,458	63,264	64,512	65,349	65,757

Интенсивность зимнего облучения широтных зон. Для зимнего полугодия (как и для летнего) отмечается уменьшение экстремальных значений зимнего облучения с широтой (**табл. 7**). Однако максимальный размах колебаний зимней ИО с географической широтой заметно (на $10,211 Вт/м^2$) уменьшается, в то время как максимальный размах колебаний летней ИО с широтой слабо (на $4,3 Вт/м^2$) увеличивается (см. табл. 4).

Таблица 7. Статистические характеристики интенсивности зимнего облучения ($Вт/м^2$) 5-ти градусных широтных зон**Table 7.** Statistical characteristics of the winter irradiation intensity (W/m^2) of 5-degree latitudinal zones

Статистические характеристики	Северная широта, град. с.ш.				
	65–70	70–75	75–80	80–85	85–90
Среднее	46,135	27,063	13,796	5,246	1,043
Максимум	52,455	30,451	15,470	5,873	1,167
Минимум	42,017	24,804	12,672	4,824	0,959
Размах (макс)	10,438	5,647	2,798	1,049	0,207

Изменения интенсивности зимнего облучения в широтных зонах происходят синхронно (рис. 5). Коэффициент попарной корреляции изменяется в пределах от 0,992 до 1,000.

**Рис. 5.** Изменение интенсивности зимнего облучения 5-ти градусных широтных зон Северного полушария в неоплейстоцене (1 – 65°–70°, 2 – 70°–75°, 3 – 75°–80°, 4 – 80°–85°, 5 – 85°–90°).**Fig. 5.** Changes in the winter irradiation intensity of 5-degree latitudinal zones of the Northern Hemisphere in the Late Pleistocene (1 – 65°–70°, 2 – 70°–75°, 3 – 75°–80°, 4 – 80°–85°, 5 – 85°–90°).

Связь интенсивности годовой и сезонной интенсивности облучения широтных зон с эксцентриситетом отсутствует. Изменение интенсивности зимнего облучения широтных зон в арктическом регионе характеризуется отрицательной корреляционной связью с динамикой наклона оси и долготой перигелия (табл. 8).

При этом модуль коэффициента корреляции зимней ИО и углом наклона оси с географической широтой увеличивается, а с долготой перигелия – уменьшается.

Обсуждение результатов. Долгота перигелия изменяется от 0 до 360° со средним периодом в неоплейстоцене, равным 21 514 лет. Изменения продолжительности цикла находятся в диапазоне от 14 до 28 тысяч лет. Долготой перигелия регулируется климатическая прецессия, с которой связана периодичность сезонных экстремумов облучения (амплитуда которых модулируется динамикой эксцентриситета земной орбиты). Максимумы летнего облучения в Северном полушарии приходятся на положение Земли вблизи перигелия её орбиты в периоды летнего солнцестояния. Минимумы летней ИО в Северном полушарии приходятся на положение Земли в

Таблица 8. Коэффициент корреляции астрономических характеристик и интенсивности зимнего облучения в широтных зонах

Table 8. Correlation coefficient of astronomical characteristics and winter irradiation intensity in 5-degree latitudinal zones

Астрономические характеристики	Широтные зоны, град с.ш.				
	65–70	70–75	75–80	80–85	85–90
Эксцентриситет	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
Долгота перигелия	-0,471	-0,514	-0,529	-0,537	-0,540
Наклон оси	-0,757	-0,703	-0,683	-0,672	-0,667

афелии в периоды летнего солнцестояния. В Южном полушарии отмечаются обратные соотношения.

Эксцентриситет (e) характеризует степень удлиненности эллиптической орбиты.

Он вычисляется по формуле $e = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{a}$, где a и b – большая и малая полуось эллипса соответственно. Средняя продолжительность цикла изменения эксцентриситета в неоплейстоцене по максимумам составляет 95,3 тысяч лет. Продолжительность цикла меняется в пределах от 90 до 102,5 тысяч лет. При расчётах по минимумам продолжительность изменяется в более широком диапазоне – от 65 до 113 тысяч лет, в среднем составляя 100,6 тысяч лет. Значение эксцентриситета в неоплейстоцене изменяется в пределах от 0,004 до 0,05, в среднем составляя 0,027.

Связь изменений годовой и сезонной интенсивности облучения в широтных зонах Арктики с эксцентриситетом не обнаружена. Однако динамикой эксцентриситета регулируется интенсивность годового облучения Земли и полушарий, а также модулируется амплитуда интенсивности сезонного облучения. Следствием этого является эффект разделения интенсивности сезонного облучения в полушариях по фазам годового облучения Земли и полушарий, который заключается в том, что летнее облучение Северного полушария в фазы увеличения годового облучения превышает летнее облучение в фазах её уменьшения (прямой эффект). Зимнее облучение в Северном полушарии в фазы увеличения годового облучения уступает зимнему облучению в фазах уменьшения годового облучения (обратный эффект). В Южном полушарии в зимнее полугодие проявляется прямой эффект фазового разделения, в летнее полугодие – обратный. Обнаруженный эффект фазового разделения объясняет механизм проявления 100-тысячелетнего цикла в природной системе Земли. На основе эффекта фазового разделения в неоплейстоцене выделяются 7 тёплых и 9 холодных солярных эпох, которые могут составить основу солярной геохронологии и климатостратиграфии неоплейстоцена [5]. Это представляется особенно актуальным в связи с крайне слабым откликом показателя изотопно-кислородного состава донных фораминифер ($\delta^{18}\text{O}$). Максимальный размах изменений $\delta^{18}\text{O}$ в неоплейстоцене ограничен 2 %, или 0,2 %. Кроме того, изотопные кривые настраиваются по облучению параллели 65° с.ш. [7, 9, 10, 13], климатическая репрезентативность которого для климата полушарий и Земли не доказана.

Составляющие в настоящее время основу геохронологии и климатостратиграфии плейстоцена изотопно-кислородные (ИК) шкалы настраиваются по летним инсоляционным кривым (рассчитанным для 65° с.ш.) или по регулирующим облучение Земли астрономическим характеристикам (эксцентриситет, долгота перигелия, угол наклона оси вращения). ИК шкалы, таким образом, являются результатом технологии, называемой орбитальным тюнингом (orbital tuning) [14]. Под инсоляционной или орбитальной настройкой понимается процесс согласования осадочных циклов с орбитальной перио-

дичностью, которой определяются долгопериодные вариации инсоляции для оценки времени и продолжительности глобальных ключевых событий в геологической истории [14]. Орбитальная настройка представляет собой обычно математическую технологию корректировки временного масштаба геологической или климатической записи для достижения максимальной синхронизации с циклами характеристик орбитального движения (или инсоляции), представленными в астрономической теории климата.

Несмотря на солярную или орбитальную настройку, отмечается крайне слабая чувствительность $\delta^{18}\text{O}$ к глобальным климатическим изменениям в неоплейстоцене (смена ледниковых и межледниковых эпох, формирование мощных толщ многолетне-мёрзлых пород, изменение уровня Мирового океана на 100 и более метров). Также узкий диапазон изменений $\delta^{18}\text{O}$, как показано в работе, не отражает размах колебаний годовой и сезонной интенсивности облучения в арктических широтных зонах. При этом солнечная радиация является основным источником энергии (и фактором) гидрометеорологических, криолитологических, почвенно-биологических и многих других природных процессов. Таким образом, показатель $\delta^{18}\text{O}$ в донных фораминиферах не отражает динамику внешнего энергетического сигнала на верхней границе атмосферы, которая является поверхностью отсчёта радиационного и теплового баланса Земли, её поверхности и атмосферы.

Максимальный размах колебаний годовой ИО на ВГА в Арктике изменяется в пределах от 4,617% (от среднего многолетнего значения годовой ИО в неоплейстоцене) в широтной зоне 65°–70° с.ш. до 9,538% в широтной зоне 85°–90° с.ш. (значения в процентах рассчитываются по данным табл. 1, 4 и 7). Максимальный размах летней ИО ограничивается значениями от 16,92% (65°–70° с.ш.) до 19,122% (85°–90° с.ш.). Максимальный размах зимней ИО в неоплейстоцене изменяется в пределах от 22,625% (65°–70° с.ш.) до 19,874% (85°–90° с.ш.). То есть максимальный размах колебаний годовой и сезонной интенсивности облучения в рассматриваемых широтных зонах на 1–2 порядка превышает максимальный размах изменений показателя изотопно-кислородного состава донных фораминифер (0,2%). Таким образом, использование показателя $\delta^{18}\text{O}$ донных фораминифер (настраиваемого по облучению 65° с.ш.) для геохронологии и климатостратиграфии (морские изотопные стадии – МИС) не представляется обоснованным. Следовательно, логичным и естественным представляется исследование возможностей солярной геохронологии и климатостратиграфии неоплейстоцена, основу которой составляют периодичности в изменении солярного климата Земли и её отдельных регионов (астрономическая теория изменений климата) и которые могут быть причиной глобальных изменений природной среды (ледниковых и межледниковых эпох) в неоплейстоцене.

Оценка и значимость линейного коэффициента корреляции при выполнении корреляционного анализа в работе определялась в соответствии с существующими методиками [2, 6]. Стандартная ошибка коэффициента корреляции определяется по формуле:

$$m_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}},$$

где r – выборочный коэффициент корреляции, n – объём выборки.

Статистическая значимость линейного коэффициента корреляции определяется с использованием критерия Стьюдента, фактическое значение которого находится по формуле:

$$t_{\text{факт}} = \frac{|r|}{m_r}.$$

Выводы о существенности делаются на основе сопоставления $t_{\text{факт}}$ и $t_{\text{кр}}(\alpha; n - 2)$ – критического (табличного) значения t – распределения, здесь α – уровень значимости, $(n - 2)$ – число степеней свободы. Коэффициент корреляции признаётся статистически значимым, если выполняется $t_{\text{факт}} > t_{\text{кр}}$. В противном случае он статистически незначим.

Все приведённые в работе значения R статистически значимы с вероятностью 0,99 (в связи с большим объёмом выборки).

Заключение. Получены статистические характеристики изменений интенсивности годового и сезонного облучения на ВГА широтных зон Арктического региона в неоплейстоцене. Не выявлена связь интенсивности годового и сезонного облучения широтных зон с эксцентриситетом земной орбиты. Выявлена положительная заметная связь интенсивности летнего облучения и отрицательная интенсивности зимнего облучения с изменением наклона оси и долготы перигелия.

В динамике интенсивности годового облучения арктических широтных зон выделяются два интервала (от 800 до 550 тысяч л.н. и от 550 до 11,5 тысяч л.н.), максимальный размах колебаний летней ИО в которых различается приблизительно в 1,45 раза.

Отмечается, что максимальный размах колебаний зимней ИО с географической широтой заметно (на $10,211 \text{ Вт/м}^2$) уменьшается, в то время как максимальный размах колебаний летней ИО с географической широтой слабо (на $4,3 \text{ Вт/м}^2$) увеличивается. Коэффициент корреляции летней ИО и долготы перигелия с географической широтой уменьшается, а с наклоном оси вращения – увеличивается. Модуль коэффициента корреляции зимней ИО с долготой перигелия уменьшается, а с углом наклона оси – увеличивается.

Максимальный размах изменений интенсивности годового и сезонного облучения 5-ти градусных широтных зон на 1–2 порядка в неоплейстоцене превышает максимальные вариации показателя $\delta^{18}\text{O}$ изотопно-кислородного анализа донных фораминифер, что показывает необоснованность использования его значений для решения задач геохронологии и климатостратиграфии неоплейстоцена.

Источники финансирования. Работа выполнена в соответствии с госбюджетными темами «Палеогеографические реконструкции природных геосистем и прогнозирование их изменений» (121051100135-0) и «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. М.: Наука, 1983. 560 с.
2. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
3. Фёдоров В.М. Астрономическая климатология. М.: Московский университет, 2002. 236 с.
4. Фёдоров В.М., Фролов Д.М., Веласко Эррера Н.М., Сун В.Х.В, Сионко Р.Г. Роль радиационного фактора в глобальных климатических событиях позднего голоцена // Геофизические процессы и биосфера, 2021. Т. 20. № 3. С. 5–19. DOI: 10.21455/GPB2021.3-1
5. Фёдоров В.М. Изотопная и соляная геохронология и климатостратиграфия неоплейстоцена и голоцена // Труды XXVIII ежегодной Всероссийской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика – 2024», СПб: ГАО РАН, 2024. С. 323–326. DOI: 10.31725/0552-5829-2024-319-322.
6. Цымбаленко Т.Т., Байдаков А.Н., Цымбаленко О.С., Гладилин А.В. Методы математической статистики в обработке экономической информации. М.: Финансы и статистика, 2007. 200 с.
7. Bassinot F.C., Labeyrie L.D., Vincent E., Quidelleur X., Shackleton N.J., Lancelot Y. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal // Earth Planet. Sci. Lett. 1994. Vol. 126. P. 91–108.
8. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC–AD 2999 // Springer Geology. 2020. V. 1. P. 181–192. DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6_20.
9. 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.

10. Imbrie J., Hays J.D., Martinson D.G., McIntyre A., Mix A.C., Morley J.J., Pisias N.G., Prell W.L., Shackleton N.J. The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology, of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record // *Milankovitch and Climate, Part 1* / Ed. by A. Berger. New York: Springer, 1984. P. 269–305.
11. Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C. M. and Levrard B. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // *Astronomy & Astrophysics*. 2004. V. 428(1). P. 261–285. DOI: 10.1051/0004-6361:20041335.
12. Laskar J., Fienga A., Gastineau M. and Manche H. La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth // *Astronomy & Astrophysics* 2011. V. 532, A89. DOI: 10.1051/0004-6361/2011116836.
13. Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records // *Paleoceanography*. 2005. V. 20. PA1003. P. 1–17. DOI: 10.1029/2004PA001071.
14. Malinverno A., Erba E., Herbert T.D. Orbital tuning an inverse problem: Chronology of the early Aptian oceanic anoxic event 1a (Selli Level) in the Gismont APTICORE // *Paleoceanography and Paleoclimatology*. 2010. V. 25. PA2203. DOI: 10.1029/2009PA001769.
15. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. 1999. V. 399. P. 429–437.

REFERENCES

1. Bakulin, P.I., Kononovich, E.V., Moroz, V.I., *Course of General Astronomy* (Moscow: Nauka, 1983) (in Russian).
2. Sachs, L., *Statistische Auswertungsmethoden* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972).
3. Fyodorov, V.M., *Astronomical climatology* (Moscow: Moscow University, 2002) (in Russian).
4. Fyodorov, V.M., Frolov, D.M., Velasco Herrera, N.M., Sun, V.H.V., Sionko, R.G., "Role of the radiation factor in global climatic events of the late Holocene", *Geofizicheskie protsessy i biosfera* [Geophysical processes and biosphere] **20** (3), 5–19 (2021). DOI: 10.21455/ GPB 2021.3-1.
5. Fyodorov, V.M., "Isotopic and solar geochronology and climatostratigraphy of Neopleistocene and Holocene", *Proc. of the XXVIII annual All-Russian conf. "Solar and solar-terrestrial physics - 2024"*, 323–326 (St. Petersburg: GAO RAS, 2024), DOI: 10.31725/0552-5829-2024-319-322 (in Russian).
6. Tsybalenko, T.T., Baydakov, A.N., Tsybalenko, O.S., Gladilin, A.V., *Methods of mathematical statistics in processing economic information* (Moscow: Finances and statistics, 2007) (in Russian).
7. Bassinot, F.C., Labeyrie, L.D., Vincent, E., Quidelleur, X., Shackleton, N.J., Lancelot, Y., "The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal", *Earth Planet. Sci. Lett.* **126**, 91–108 (1994).
8. Fedorov, V.M., Kostin, A.A., "The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC – AD 2999", *Springer Geology* **1**, 181–192 (2020) DOI:10.1007/978-3-030-38177-6_20.
9. Hays, J.D., Imbrie, J., Shackleton, N., "Variation in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages", *Science* **194**, 1121–1132 (1976).
10. Imbrie, J., Hays, J.D., Martinson, D.G., McIntyre, A., Mix, A.C., Morley, J.J., Pisias, N.G., Prell, W.L., Shackleton, N.J., "The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology, of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record", *Milankovitch and Climate* **1**, 269–305 (New York: Springer, 1984).
11. Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A.C.M., Levrard, B., "A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth", *Astronomy & Astrophysics* **428** (1), 261–285 (2004), DOI: 10.1051/0004-6361:20041335.
12. Laskar, J., Fienga, A., Gastineau, M., Manche, H., "La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth", *Astronomy & Astrophysics* **532** A89 (2011), DOI: 10.1051/0004-6361/2011116836.
13. Lisiecki, L.E., Raymo, M.E., "A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records", *Paleoceanography* **20**, PA1003, 1–17 (2005), DOI: 10.1029/2004PA001071.
14. Malinverno, A., Erba, E., Herbert, T.D., "Orbital tuning an inverse problem: Chronology of the early Aptian oceanic anoxic event 1a (Selli Level) in the Gismont APTICORE", *Paleoceanography and Paleoclimatology* **25**, PA2203 (2010), DOI: 10.1029/2009PA001769.
15. Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., "Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica", *Nature* **399**, 429–437 (1999).