

## ПРИЧИНЫ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В НЕОПЛЕЙСТОЦЕНЕ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

В.М. Фёдоров\*

Проведена модернизация астрономической теории изменений климата, основу которой составили результаты расчётов инсоляции Земли, выполненные с высоким пространственным и временным разрешением. В качестве основы для определения причин неоплейстоценовых оледенений принималось облучение всего Северного полушария. Вариации приходящей солнечной радиации, рассчитываемые в астрономической теории климата, были дополнены расчётами вариаций характеристик переноса радиационного тепла. На основе усовершенствованной астрономической теории найдены причины глобальных климатических изменений в неоплейстоцене. Определено, что ледниковые эпохи связаны с периодами положительной средней аномалии зимнего меридионального переноса тепла и влаги и отрицательной средней аномалии интенсивности летнего облучения в Северном полушарии. Межледниковые эпохи связаны с периодами положительных средних аномалий летней интенсивности облучения и отрицательных средних аномалий зимнего меридионального переноса и межполушарного переноса тепла и влаги из летнего Южного в зимнее Северное полушарие. Различие в интенсивности летнего облучения тёплых и холодных настроенных климатических эпох в 100-тысячелетних циклах в среднем составляет  $4,91 \text{ Вт/м}^2$  (или 1,151 % от среднего для неоплейстоцена значения летней интенсивности облучения Северного полушария). Таким образом, смена палеоклиматических эпох связана в основном с динамикой характеристик летнего облучения и зимнего переноса радиационного тепла и влаги, определяемой астрономическими факторами.

**Ключевые слова:** астрономическая теория климата, ледниковые эпохи, межледниковые эпохи, цикличность, неоплейстоцен, инсоляция, перенос радиационного тепла и влаги.

**Ссылка для цитирования:** Фёдоров В.М. Причины палеоклиматических изменений в неоплейстоцене Северной Евразии // Жизнь Земли. 2025. Т. 47, № 3. С. 348–358. DOI: 10.29003/m4740.0514-7468.2025\_47\_3/348-358.

Поступила 05.08.2025 / Принята к публикации 03.09.2025

## CAUSES OF PALEOCLIMATIC CHANGES IN THE LATE PLEISTOCENE OF NORTHERN EURASIA

V.M. Fedorov, PhD

Lomonosov Moscow State University (Faculty of Geology)

The astronomical theory of climate changes (oscillations), created more than 100 years ago by the Serbian mathematician Milutin Milanković, in its current form does not explain global fluctuations of the natural environment in the Late Pleistocene, and therefore requires further refinement and development. And this theory has been modernized. Our revision is based on the results of calculations of the Earth's insolation, performed with a high spatio-temporal resolution. The irradiation of the entire Northern Hemisphere was taken as the basis for determining the causes of the glaciations in Late Pleistocene. Variations in incoming solar

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

*radiation, calculated within the astronomical theory of climate, were supplemented by calculations of variations in the characteristics of radiative heat transfer. Based on the improved astronomical theory, the causes of global climate changes in the Late Pleistocene were found. The effect of dividing seasonal irradiation by phases of annual irradiation of the hemispheres was determined, and on this basis 7 warm and 9 cold solar epochs are distinguished in the solar climate of the Late Pleistocene. It has been determined that the glacial epochs in the Late Pleistocene of Northern Eurasia are associated with periods of positive average anomaly of winter meridional heat and moisture transfer and negative average anomaly of summer irradiation intensity in the Northern Hemisphere. Also, positive average anomalies of radiative heat transfer from the summer Southern Hemisphere to the winter Northern Hemisphere, as well as negative average anomalies of insolation seasonality in the Northern Hemisphere, correspond to glacial periods in the Late Pleistocene.*

*Interglacial epochs are associated with periods of positive average anomalies of summer radiation intensity and negative average anomalies of winter meridional transfer, and inter-hemispheric transfer of heat and moisture from the summer Southern Hemisphere to the winter Northern Hemisphere. Also, interglacial periods in the Late Pleistocene correspond to negative average anomalies of radiative heat transfer from the summer Southern Hemisphere to the winter Northern Hemisphere, as well as positive average anomalies of insolation seasonality in the Northern Hemisphere. The difference in the intensity of summer irradiation of warm and cold climate epochs in 100-thousand-year cycles averages 4.91 W/m<sup>2</sup> (or 1.151% of the average Late Pleistocene value of summer irradiation intensity for the Northern Hemisphere). Therefore, the change of paleoclimatic epochs is associated mainly with the dynamics of the characteristics of summer radiation, and with the winter transfer of radiative heat and moisture determined by astronomical factors.*

**Keywords:** *astronomical theory of climate, glacial epochs, interglacial epochs, cyclicity, Late Pleistocene, insolation, transfer of radiative heat and moisture.*

**For citation:** Fedorov, V.M., "Causes of paleoclimatic changes in the late Pleistocene of Northern Eurasia", *Zhizn Zemli [Life of the Earth]* 47, no 3, 348–358 (2025) (in Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29003/m4740.0514-7468.2025\_47\_3/348-358.

**Введение.** Более 100 лет назад для объяснения причин ледниковых эпох в четвертичном периоде сербским математиком Милутином Миланковичем на основе представлений Адемара [12], Кролля [16] и других исследователей и выполненных им расчётов инсоляции была разработана астрономическая теория изменений климата [24]. В первое время эта теория достаточно хорошо согласовывалась с разработанной немецкими геоморфологами А. Пенком и Э. Брикнером для альпийского региона схемой четвертичных оледенений (гюнц, миндель, рисс и вюрм). Однако в дальнейшем, с появлением новой геолого-географической, палеогеографической информации и методов абсолютного датирования четвертичных отложений, найденные ранее соответствия стали нарушаться. Тем не менее, астрономическая теория изменений климата, основу которой составляют два известных в макромире фундаментальные физические взаимодействия (гравитационное и электромагнитное), продолжала развиваться. Это развитие происходило по двум основным направлениям. Одно направление включало повторные расчёты облучения Земли в связи с появлением новых данных о массе и движении небесных тел Солнечной системы [9, 14, 15, 20, 27]. При этом в качестве палеоклиматического индикатора принималась инсоляция на 65° с. ш. (без доказательства её климатической репрезентативности). Другое направление, орбитальный тюнинг (orbital tuning), включало настройку данных изотопно-кислородного анализа донных фораминифер [13, 18, 22, 23] или ледовых кернов Антарктиды [26] под инсоляционные или орбитальные кривые или наоборот [2]. Несмотря на развитие, астроно-

мическая теория изменений (колебаний) климата в существующем виде не объясняет глобальные изменения природной среды в неоплейстоцене и поэтому нуждается в модернизации и развитии.

**Модернизация астрономической теории климата.** Проведённая модернизация включала ряд изменений, важнейшими из которых, являются следующие:

1) В выполненных автором совместно с А.А. Костиным (мехмат МГУ) расчётах инсоляции увеличено разрешение во времени (шаг разрешения составляет 500 лет). Оно превышает разрешение в расчётах М. Миланковича, Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой более чем в 5 раз, и вдвое превышает разрешение в расчётах последователей Миланковича [14, 20, 27].

2) По-иному выполнялась оценка облучения в пространстве. Наши предшественники рассчитывали облучение для отдельных параллелей (линий – характеристик пространства первого порядка). В наших расчётах определялось облучение всех одноградусных широтных зон (площади – характеристики пространства второго порядка). Земля аппроксимировалась эллипсоидом и выполнялась оценка влияния формы Земли на характер её облучения [7].

3) В качестве основы для определения причин неоплейстоценовых оледенений нами принималось облучение всего Северного полушария – арены возникновения и развития покровных оледенений [8], а не облучение отдельной параллели ( $65^\circ$  с. ш., как нашими предшественниками).

4) Вариации приходящей солнечной радиации, рассчитываемые в астрономической теории климата, были дополнены расчётами вариаций характеристик переноса радиационного тепла – ИК, ИС и ИСЗ [5, 8]

Годовая инсоляционная контрастность (ИК) для полушарий рассчитывалась как разность годовой интенсивности облучения (ИО) в области источника ( $00^\circ$ – $45^\circ$ ) и в области стока радиационного тепла. Годовая ИК, таким образом, обобщённо по областям источника и стока радиационного тепла отражает динамику меридионального градиента инсоляции (МГИ). МГИ и ИК регулируется интенсивность работы «тепловой машины первого рода», с которой в атмосфере связан перенос радиационного тепла и влаги из низких в высокие [10]. Летняя и зимняя ИК для полушария рассчитывались с учётом сезонных смещений областей источника и стока радиационного тепла.

Инсоляционная сезонность (ИС) рассчитывается как разность летней и зимней интенсивности облучения в полушарии [3]. Этим параметром регулируется теплообмен в системе океан–материк (интенсивность работы «тепловой машины второго рода»). Отрицательные аномалии ИС характеризуют более морской (влажный) климат, положительные аномалии – более континентальный (сухой). ИСЗ регулирует межполушарный теплообмен, перенос радиационного тепла из летнего полушария в зимнее, что приводит к сглаживанию сезонных различий в полушариях [4]. ИСЗ (инсоляционная сезонность Земли) рассчитывается из соотношения:  $ИСЗ = (ИО \text{ летняя в Южном полушарии} - ИО \text{ зимняя в Северном полушарии}) - (ИО \text{ летняя в Северном полушарии} - ИО \text{ зимняя в Южном полушарии})$ . В этом случае положительные значения ИСЗ означают преобладающий перенос радиационного тепла из летнего Южного полушария в зимнее Северное полушарие.

**Метод расчётов облучения.** Исходными данными при расчётах облучения на верхней границе атмосферы (ВГА) были:

1) эксцентриситет земной орбиты, угол наклона земной оси к плоскости орбиты и долгота перигелия в диапазоне от – 800 тыс. юлианских лет относительно 2000 календарного года с шагом 1000 юлианских лет, размещённые на электронном ресурсе [11];

2) использованная в модели Ж. Ласкара с коллегами аппроксимация смещения точки весеннего равноденствия [21].

Основные этапы вычислений:

1) пересчёт исходных данных с шагом 1000 юлианских лет в набор данных с шагом 500 юлианских лет путём интерполирования;

2) построение эллипсов, соответствующих идеализированной орбите Земли в выбранных тропических годах, и разметка движения Земли согласно второму закону Кеплера по каждому эллипсу от точки, противоположной точке весеннего равноденствия (ТВР), с вычислением длительности и дроблением каждых тропических суток на 24 части с учётом непрерывного смещения ТВР;

3) вычисление для каждого разметочного момента, разделяющего тропические сутки на части, расстояния Солнце–Земля и склонения Солнца;

4) расчёт энергий облучения широтных зон земной поверхности во всех тропических сутках по значениям расстояния Солнце–Земля и склонения Солнца;

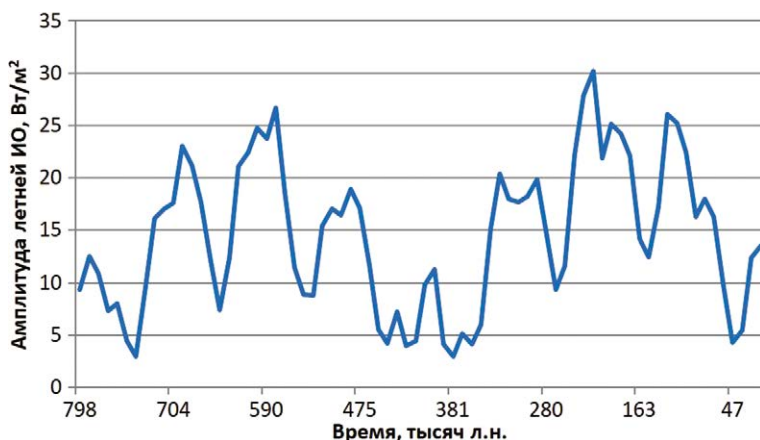
5) вычисление площадей широтных зон и расчёт интенсивностей облучения Земли и полушарий в выбранных частях тропических лет по энергиям облучения, длительностям тропических суток и площадям широтных зон.

Продолжительность сидерического года считалась равной 365,256363 юлианским суткам по 86 400 секунд. Большая полуось орбиты Земли принималась равной 149 598 022 950 м. Расчёт энергий облучения широтных зон по расстояниям Солнце–Земля и склонениям Солнца выполнялся в соответствии с ранее разработанной методикой [17]. Влияние атмосферы и изменение активности Солнца не учитывались. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI – Total Solar Irradiance) принималось равным 1361 Вт/м<sup>2</sup> [19]. 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 с точностью до метра соответствует параметрам земного эллипсоида из Geodetic Reference System 1980 (GRS80).

**Результаты и их обсуждение.** На основе вычислений приходящей на ВГА солнечной радиации и характеристик переноса радиационного тепла были получены более полные данные о динамике солярного климата Земли в неоплейстоцене и солярный инструментарий для анализа существующих схем геохронологии и климатостратиграфии неоплейстоцена. Определена структура 400-тысячелетнего цикла в годовом и сезонном облучении, включающая стадию высокоамплитудных (ВАК) и стадию низкоамплитудных (НАК) колебаний. Средний размах годовой интенсивности облучения Земли и полушарий в стадиях ВАК в 5 раз превосходит средний размах колебаний интенсивности облучения в стадиях НАК. Размах интенсивности летнего облучения в стадиях ВАК в среднем в 2 раза превышает размах интенсивности облучения в стадиях НАК. Стадия ВАК включает три 100-тысячелетних цикла. Продолжительность стадии НАК около 100 тыс. лет.

Обнаружен эффект разделения сезонного облучения по фазам увеличения и уменьшения годового облучения полушарий [6]. Эффект заключается в том, что летняя ИО Северного полушария в фазы увеличения годовой ИО Земли превышает летнюю ИО в фазах её уменьшения (прямой эффект). Зимняя ИО в Северном полушарии в фазы увеличения годовой ИО уступает зимней ИО в фазах уменьшения годовой интенсивности облучения (обратный эффект). В Южном полушарии в зимнее полугодие проявляется прямой эффект фазового разделения (ЭФР), в летнее полугодие – обратный. Обнаруженный эффект фазового разделения объясняет механизм проявления

100-тысячелетнего цикла в природной системе Земли. ЭФР возникает в связи с тем, что динамикой эксцентриситета земной орбиты регулируется интенсивность годового облучения Земли и полушарий (коэффициент корреляции 0,977) и модулируется амплитуда колебаний интенсивности сезонного облучения [6] (рис. 1).

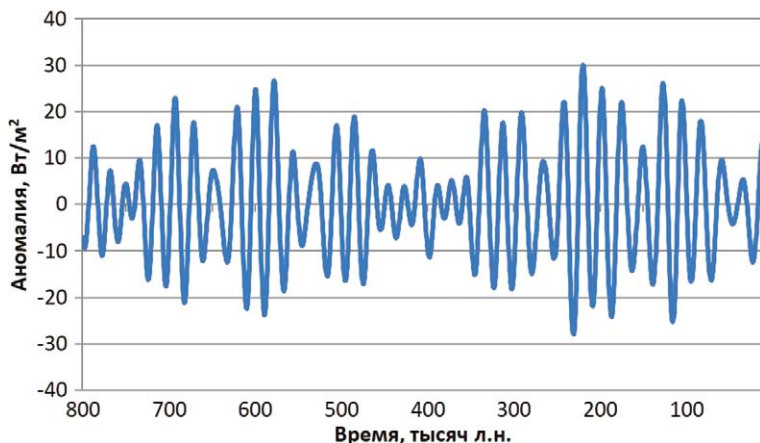


**Рис. 1.** Амплитуда летней интенсивности облучения в экстремумах климатической прецессии в Северном полушарии.

**Fig. 1.** Amplitude of summer radiation intensity at the extremes of climatic precession in the Northern Hemisphere.

На основе ЭФР в динамике солярного климата Земли в неоплейстоцене выделяются 7 тёплых и 9 холодных солярных эпох (со средней продолжительностью около 50 тыс. лет).

Основная дисперсия приходящей на ВГА солнечной радиации связана с циклом климатической прецессии, определяемым длиной перигелия (рис. 2). Максимумы летней интенсивности облучения для Северного полушария в цикле климатической



**Рис. 2.** Аномалия летней интенсивности облучения Северного полушария в неоплейстоцене.

**Fig. 2.** Anomaly of summer radiation intensity of the Northern Hemisphere in the Neopleistocene.

прецессии связаны с положением Земли вблизи перигелия её орбиты в периоды летнего солнцестояния. Минимумы интенсивности облучения приходятся на положение Земли вблизи афелия в периоды летнего солнцестояния. Период климатической прецессии составляет в среднем около 22 тыс. лет.

Тёплые фазы климатической прецессии (ФКП) характеризуются значениями аномалии летней ИО  $\geq 0$ , холодные ФКП – значениями  $< 0$ .

В качестве объекта анализа для определения причин возникновения и развития покровных оледенений была принята схема геохронологии и климатостратиграфии неоплейстоцена Северной Евразии, составленная на основе результатов многолетних исследований спорово-пыльцевого состава четвертичных отложений и ЭПР метода (электронный параметрический резонанс) абсолютного датирования [1]. Эта схема была проверена на прямое энергетическое соответствие тёплых и холодных палеоклиматических эпох средним для соответствующих климатических эпох значениям аномалии летней интенсивности облучения (табл. 1).

Сравнение не выявило прямых (линейных) соответствий, что может объясняться как неизбежными погрешностями при стратиграфическом расчленении отдельных разрезов и их стратиграфической корреляции, так и нелинейным откликом многоком-

**Таблица 1.** Климатические эпохи и соответствующие им средние значения летней интенсивности облучения и её аномалии

**Table 1.** Climatic epochs and the corresponding average values of summer radiation intensity and its anomalies

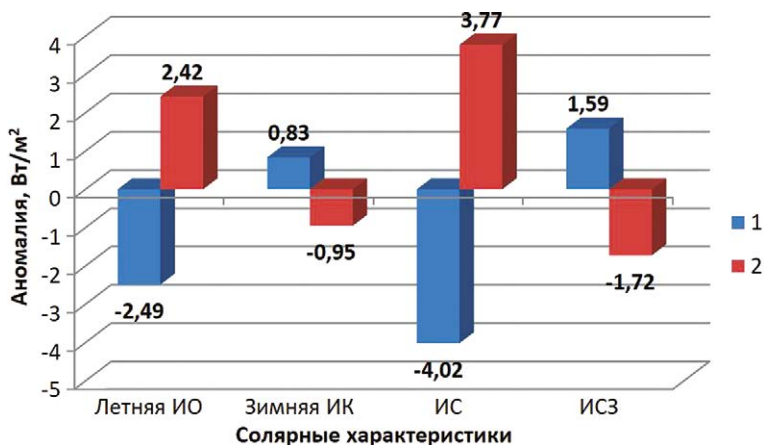
Климатические эпохи (межледниковье / оледенение)	Возрастной интервал, тыс. л. н. (по ЭПР)	Средняя летняя ИО, Вт/м <sup>2</sup>	Средняя аномалия летней ИО, Вт/м <sup>2</sup>	Возрастной интервал, тыс. л. н. (настройка)	Средняя летняя ИО, Вт/м <sup>2</sup>	Средняя аномалия летней ИО, Вт/м <sup>2</sup>
Гремячевское	759–787**	425,603	-0,811	764,0–793,0	428,160	1,746
Девичкое	712–759**	426,918	0,503	698,5–763,5	424,872	-1,542
Семилукское	659–712**	425,808	-0,606	666,0–698,0	430,322	3,908
Донское	610–659*	426,494	0,079	605,0–665,5	424,340	-2,074
Мучапское	535–610*	426,422	0,008	523,5–604,5	428,215	1,795
Окское	455–535*	426,803	0,389	469,5–523,0	424,449	-1,990
Лихвинское	360–455*	425,918	-0,496	360,0–469,0	426,542	0,127
Калужское	340–360*	422,570	-3,844	340,5–359,5	422,432	-3,982
Чекалинское	280–340*	428,127	1,713	285,5–340,0	429,210	2,796
Жиздринское	235–280*	427,709	1,295	248,5–285,0	422,848	-3,566
Черепетьское	200–235*	424,197	-2,217	193,0–248,0	429,786	3,372
Днепровское	145/140 – 200*	428,006 426,962	1,592 0,548	133,5–192,5	423,600	-2,815
Микулинское	70–145/140*	425,845 426,254	-0,569 -0,160	78,0–133,0	427,930	3,223
Валдайское	10–70*	426,431	0,017	11,0 – 77,5	424,960	-1,454

\*По [25].

\*\*По [13].

Примечание: тёмной заливкой выделены ледниковые эпохи.

понтентной природной системы на динамику внешнего энергетического сигнала (радиационного фактора – основного источника тепла на Земле). Для определения солярных условий и причин палеоклиматических изменений выполнялась хронологическая настройка (солярный тюнинг) палеоклиматических эпох на динамику входящего энергетического сигнала. При этом в качестве критериев настройки принимались простые (и логичные для предположения о линейной связи, хотя в природе и анализируемой схеме это не так) предположения о том, что тёплая палеоклиматическая эпоха должна начинаться и заканчиваться тёплой фазой климатической прецессии (которая определяется динамикой долготы перигелия). Холодная палеоклиматическая эпоха должна начинаться и заканчиваться холодными фазами климатической прецессии (см. рис. 2). Таким образом, границы палеоклиматических эпох смещались до границ ближайших соответствующих (тёплых или холодных) фаз климатической прецессии. В результате такой настройки достигнуто полное энергетическое соответствие тёплых палеоклиматических эпох периодам средних положительных аномалий интенсивности летнего облучения, а холодных палеоклиматических эпох – периодам со средней отрицательной аномалией. Средняя продолжительность палеоклиматических эпох при этом практически не изменилась (около 50 тыс. лет), смещение границ палеоклиматических эпох в среднем составило около 7 тыс. лет (что, вероятно, является отражением нелинейного отклика природной системы на внешний энергетический сигнал). Различие в интенсивности облучения тёплых и холодных настроенных климатических эпох в 100-тысячелетних циклах в среднем составляет 4,91 Вт/м<sup>2</sup> (или 1,151% от среднего для неоплейстоцена значения летней интенсивности облучения Северного полушария) (рис. 3).



**Рис. 3.** Средние значения аномалии солярных характеристик в настроенных палеоклиматических эпохах в неоплейстоцене Северной Евразии (1 – ледниковые эпохи, 2 – межледниковые эпохи).

**Fig. 3.** Average values of the anomaly of solar characteristics in the tuned paleoclimatic epochs in the Neopleistocene of Northern Eurasia (1 – glacial epochs, 2 – interglacial epochs).

Для настроенных таким образом (по интенсивности летнего облучения Северного полушария) палеоклиматических эпох рассчитывались средние аномалии характеристик переноса радиационного тепла (см. рис. 3). Полученные результаты позволили определить радиационные факторы – причины палеоклиматических изменений в неоплейстоцене Северной Евразии.

Ледниковые эпохи в неоплейстоцене возникают и развиваются в условиях отрицательных значений средней аномалии интенсивности летнего облучения и ИС в Северном полушарии, положительных средних аномалий зимней ИК и ИСЗ. Иными словами, в определяемых астрономическими факторами солярных условиях, при которых зимний меридиональный перенос радиационного тепла и влаги из низких широт в высокие широты наибольший. Атмосферные осадки, выпадающее в зимнее полугодие (в умеренных и высоких широтах) в твёрдом виде, накапливаются и не успевают полностью растаять в течение холодного лета. Это приводит к увеличению мощности и площади снежного покрова, продолжительности его залегания. Увеличивается альbedo поверхности, и за счёт положительных обратных связей образуется механизм усиления похолодания. Следует иметь в виду, что характеристика зимнего меридионального переноса радиационного тепла (зимняя ИК) в среднем приблизительно в 3 раза [5] превосходит характеристику летнего переноса (летнюю ИК). Кроме того, максимальные значения переноса радиационного тепла и влаги из летнего Южного полушария в зимнее Северное полушарие (за счёт смещения в летнее полушарие циркуляционной ячейки Хэдди) усиливают этот эффект. Также для ледниковых эпох характерны отрицательные значения средней аномалии инсоляционной сезонности (сглаженные сезонные контрасты). Межледниковые эпохи приходятся на периоды с положительными средними аномалиями летней интенсивности облучения Северного полушария и инсоляционной сезонности, отрицательной средней аномалии зимней ИК и ИСЗ (ослабленного зимнего меридионального переноса тепла и влаги). В эти периоды также возникает механизм усиления потепления, определяемый положительными обратными связями.

**Заключение.** Определено, что смена климатических эпох в неоплейстоцене Северной Евразии связана с динамикой характеристик облучения и переноса радиационного тепла, определяемой астрономическими факторами. Ледниковые эпохи связаны с периодами положительной средней аномалии зимнего меридионального переноса тепла и влаги и отрицательной средней аномалии интенсивности летнего облучения в Северном полушарии. Также ледниковым периодам соответствуют положительные средние для эпохи аномалии переноса радиационного тепла из Южного летнего полушария в зимнее Северное полушарие и отрицательные средние аномалии инсоляционной сезонности в Северном полушарии. Межледниковые эпохи связаны с периодами положительных средних аномалий летней интенсивности облучения и отрицательных средних аномалий зимнего меридионального переноса и межполушарного переноса тепла и влаги из летнего Южного в зимнее Северное полушарие. Также межледниковым периодам соответствуют отрицательные средние для эпохи аномалии переноса радиационного тепла из Южного летнего полушария в зимнее Северное полушарие, а также положительные средние аномалии инсоляционной сезонности в Северном полушарии.

Таким образом, усовершенствованной астрономической теории климата объясняются причины изменений природной среды в неоплейстоцене Северной Евразии.

**Источники финансирования.** Работа подготовлена в соответствии с госбюджетной темой «Палеогеографические реконструкции природных геосистем и прогнозирование их изменений» (121051100135-0).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Болиховская Н.С. Пространственно-временные закономерности развития растительности и климата Северной Евразии в неоплейстоцене // Археология, этнография и антропология Евразии. 2007. № 4 (32). С. 2–28.

2. *Большаков В.А.* Новая концепция орбитальной теории климата. М.: Московский университет, 2003. 256 с.
3. *Монин А.С.* Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 246 с.
4. *Сидоренков Н.С.* Атмосферные процессы и вращение Земли. СПб: Гидрометеоздат, 2002. 366 с.
5. *Федоров В.М.* Проблемы параметризации радиационного блока в физико-математических моделях климата и возможности их решения // *Успехи физических наук.* 2023. Т. 193, № 9. С. 971–988. DOI: 10.3367/UFNr.2023.03.039339.
6. *Фёдоров В.М., Фролов Д.М.* Особенности годового и месячного облучения Земли в неоплейстоцене // *Геофизические процессы и биосфера.* 2024. Т. 23, № 4. С. 19–27. DOI: 10.21455/GPB2024.4-2.
7. *Фёдоров В.М., Костин А.А., Фролов Д.М.* Влияние формы Земли на характеристики облучения земной поверхности // *Геофизические процессы и биосфера.* 2020. Т. 19, № 3. С. 119–130. DOI: 10.21455/GPB2020.3-7.
8. *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.
9. *Шараф Ш.Г., Будникова Н.А.* О вековых изменениях элементов орбиты Земли, влияющих на климаты геологического прошлого // *Бюлл. Института теоретической астрономии АН СССР.* 1967. Т. 11, № 4 (127). С. 231–261.
10. *Шулейкин В.В.* Физика моря. М.: АН СССР, 1953. 990 с.
11. Электронный ресурс Ж. Ласкара (<https://vo.imcce.fr/insola/earth/online/earth/La2004/index.html>).
12. *Adhémar J.A.* *Revolutions de la mer: déluges périodiques.* Paris.: Carilian-Goeury et V. Dalmont, 1842. 184 p.
13. *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. V. 126. P. 91–108.
14. *Berger A.* Long-term variation of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements // *Quaternary Research.* 1978. V. 9. P. 139–167.
15. *Brouwer D., Van Woerkom A.J.J.* The secular variation of the orbital elements of the principal planets // *Astronomical Papers.* 1950. V. 13. P. 81–107.
16. *Croll J.* *Climate and time in their geological relations: a theory of secular changes of the Earth's climate.* London: Edward Stanford, 1875. 577 p.
17. *Fedorov V.M., Kostin A.A.* The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC - AD 2999 // *Springer Geology.* 2020. V. I. P. 181–192. DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6\_20.
18. *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  $d^{18O}$  record. // *Milanković and Climate. Part 1.* Ed. by A. Berger. New York: Springer, 1984. P. 269–305.
19. *Kopp G., Lean J.* A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophysical Research Letters.* 2011. V. 37. L01706. DOI: 10.1029/2010GL045777.
20. *Laskar J., Joutel F., Boudin F.* Orbital, precessional and insolation quantities for the Earth from – 20 Myr to + 10 Myr // *Astronomy & Astrophysics.* 1993. V. 287. P. 522–533.
21. *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.* 2004. V. 428, 1. P. 261–285. DOI: 10.1051/0004-6361:20041335.
22. *Lisiecki L.E., Raymo M.E.* A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $d^{18O}$  records // *Paleoceanography.* 2005. V. 20. PA1003. P. 1–17. DOI: 10.1029/2004PA001071.
23. *Martinson D.G., Pisias N.G., Hays J.D., Imbrie J., Moore T.C., Shackleton N.J.* Age Dating and the Orbital Theory of the Ice Ages: Development of a High-Resolution 0 to 300,000-Year Chronostratigraphy // *Quaternary Research.* 1987. V. 27. P. 1–29.
24. *Milanković M.* *Theorie mathématique des phénomènes thermique produits par la radiation solaire.* Paris: Gauthier-Villars, 1920. 399 p.
25. *Molodkov A., Bolikhovskaya N.* Eustatic sea-level and climate changes over the last 600 ka as derived from mollusc-based ESR-chronostratigraphy and pollen evidence in Northern Eurasia // *Sedimentary Geology.* 2002. V. 150. P. 185–201.

26. Petit J. R., Jouzel J., D. Raynaud D., Barkov N. I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davisk M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V. M., Legrand M., Lipenkov V. Y., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. 1999. V. 399. P. 429–436.

27. Vernekar A. Long-period global variations of incoming solar radiation // *Series: Meteorological Monographs*. American Meteorological Society, 1972. V. 12, № 34. 128 p.

## REFERENCES

1. Bolikhovskaya, N.S., “Spatiotemporal peculiarities of the development of vegetation and climate of Northern Eurasia in the Late Pleistocene”, *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia* **4** (32), 2–28 (2007) (in Russian).
2. Bolshakov, V.A., *New concept of the orbital theory of climate* (Moscow: Moscow University Press, 2003) (in Russian).
3. Monin, A.S., *Introduction to the theory of climate* (Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982) (in Russian).
4. Sidorenkov, N.S., *Atmospheric processes and the Earth rotation* (St-Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002) (in Russian).
5. Fedorov, V.M., “Problems of parameterization of the radiation block in physical and mathematical climate models and the possibility of their solution”, *Achievements of physical sciences* **193** (9), 971–988 (2023). DOI: 10.3367/UFNR.2023.03.039339 (in Russian).
6. Fedorov, V.M., Frolov, D.M., “Features of annual and monthly irradiation of the Earth in the Late Pleistocene”, *Geophysical processes and the biosphere* **23** (4), 19–27 (2024). DOI: 10.21455/GPB2024.4-2 (in Russian).
7. Fedorov, V.M., Kostin, A.A., Frolov, D.M., “Influence of the Shape of the Earth on the Characteristics of the Irradiation of the Earth”, *Geophysical processes and the biosphere* **19** (3), 119–130 (2020). DOI: 10.21455/GPB2020.3-7 (in Russian).
8. Fyodorov, V.M., Frolov, D.M., Zalihanov, A.M., “The Solar Climate of the Arctic in the Neopleistocene”, *Zhizn Zemli* **47** (1), 34–45 (2025). DOI: 10.29003/m4377.0514-7468.2025\_47\_1/34-45 (in Russian).
9. Sharaf, Sh.G., Budnikova, N.A., “About the secular changes of the Earth orbital elements which influence the climates of the geological past”, *Bull. of the Institute of Theoretical Astronomy, USSR Academy of Sciences* **11** (4) (127), 231–261 (1967) (in Russian).
10. Shuleykin, V.V., *Physics of the sea* (Moscow: USSR Academy of Sciences, 1953) (in Russian).
11. *Electronic resource of J. Laskar* (<https://vo.imcce.fr/insola/earth/online/earth/La2004/index.html>) (in Russian).
12. Adhémar, J.A., *Revolutions de la mer: déluges périodiques* (Paris: Carilian-Goeury et V. Dalmont, 1842).
13. 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).
14. Berger, A., “Long-term variation of caloric insolation resulting from the Earth’s orbital elements”, *Quaternary Research* **9**, 139–167 (1978).
15. Brouwer, D., Van Woerkom, A.J.J., “The secular variation of the orbital elements of the principal planets”, *Astronomical Papers* **13**, 81–107 (1950).
16. Croll, J., *Climate and time in their geological relations: a theory of secular changes of the Earth’s climate* (London: Edward Stanford, 1875).
17. 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.
18. 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  $d^{18}O$  record”, *Milanković and Climate, Part 1*. Ed. by A. Berger (New York: Springer, 1984).
19. Kopp, G., Lean, J., “A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance”, *Geophysical Research Letters* **37**. L01706 (2011). DOI: 10.1029/2010GL045777.
20. Laskar, J., Joutel, F., Boudin, F., “Orbital, precessional and insolation quantities for the Earth from – 20 Myr to + 10 Myr”, *Astronomy & Astrophysics* **287**, 522–533 (1993).

21. 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.
22. Lisiecki, L.E., Raymo, M.E., “A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $d^{18O}$  records”, *Paleoceanography* **20**. PA1003, 1–17 (2005). DOI:10.1029/2004PA001071.
23. Martinson, D.G., Pisias, N.G., Hays, J.D., Imbrie, J., Moore, T.C., Shackleton, N.J., “Age Dating and the Orbital Theory of the Ice Ages: Development of a High-Resolution 0 to 300,000-Year Chronostratigraphy”, *Quaternary Research* **27**, 1–29 (1987).
24. Milanković, M., *Theorie mathematique des phenomenes thermique produits par la radiation solaire* (Paris: Gauthier-Villars, 1920).
25. Molodkov, A., Bolikhovskaya, N., “Eustatic sea-level and climate changes over the last 600 ka as derived from mollusc-based ESR-chronostratigraphy and pollen evidence in Northern Eurasia”, *Sedimentary Geology* **150**, 185–201 (2002).
26. Petit, J.R., Jouzel, J.D., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.-M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davisk, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius, C., Pepin, L., Ritz, C., Saltzmann, E., Stievenard, M., *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, Nature* **399**, 429–436 (1999).
27. Vernekar, A. “Long-period global variations of incoming solar radiation”, *Series: Meteorological Monographs. American Meteorological Society* **12** (34), 128 p. (1972).