

## Колебания уровня океана, океаническая седиментация и климатическая прецессия за последние 130 тысяч лет

В.М. Фёдоров, Д.М. Фролов, Е.В. Фёдорова\*

На основе выполненных ранее расчётов интенсивности облучения Земли на верхней границе атмосферы с высоким пространственным и временным разрешением подтверждено, что повышение уровня Мирового океана в течение, по крайней мере, последних 130 тыс. лет (в микулинскую/эмскую межледниковую эпоху и в позднплейстоцен-голоценовое время) связано с тёплыми фазами климатической прецессии. На основе расчётов экстремумов интенсивности летнего/зимнего облучения в фазах климатической прецессии в Северном полушарии уточнены даты причин формирования дробстоунов (слоёв Хейнриха), которые соотносятся с экстремумами климатической прецессии и отмечаются в океанических осадках как в межледниковые, так и в ледниковые эпохи. Эволюция уровня океана и океаническая седиментация в интервале последних 130 тыс. лет определяется, прежде всего, гляциоэвстатическими колебаниями, связанными с изменением температурного режима, который в основном регулируется вариациями интенсивности облучения Северного полушария в цикле климатической прецессии. В то же время отмечается требующая решения проблема слабого присутствия прецессионного цикла в бентосном  $\delta^{18}\text{O}$  по стеке орбитально настроенной схемы/модели LR04, составляющей в настоящее время основу геохронологии и климатостратиграфии неоплейстоцена и голоцена. Начало ближайшей тёплой фазы климатической прецессии ожидается около 5,5 тыс. лет н. э. Максимум этой фазы будет приходиться на 11,5 тыс. лет н. э., когда ожидается очередное значительное повышение уровня океана.

**Ключевые слова:** климатическая прецессия, уровень Мирового океана, слою Хейнриха, поздний плейстоцен, голоцен.

**Ссылка для цитирования:** Фёдоров В.М., Фролов Д.М., Фёдорова Е.В. Колебания уровня океана, океаническая седиментация и климатическая прецессия в интервале последних 130 тысяч лет // Жизнь Земли. 2026. Т. 48, № 1. С. 11–20. DOI: 10.29003/m5043.0514-7468.2026\_48\_1/11-20.

Поступила 19.12.2025 / Принята к публикации 11.03.2026

## Sea Level Fluctuations, Oceanic Sedimentation, and Climate Precession for the Last 130 Thousand Years

V.M. Fedorov, PhD, D.M. Frolov, E.V. Fedorova

Lomonosov Moscow State University (Faculty of Geography)

Based on our previously performed calculations of the intensity of Earth's irradiation at the top of the atmosphere with high spatial and temporal resolution, it has been confirmed that the sea level rise over at least the last 130,000 years (during the Eemian / Mikulino interglacial and the late Pleistocene – Holocene) is associated with warm phases

\* Фёдоров Валерий Михайлович – в.н.с., к.г.н., [fedorov.msu@mail.ru](mailto:fedorov.msu@mail.ru), ORCID: 0000-0003-2305-7408; Фролов Денис Максимович – н.с., [denisfrolov@mail.ru](mailto:denisfrolov@mail.ru), ORCID: 0000-0002-0307-8175; Фёдорова Екатерина Валерьевна – студентка, ORCID: 0000-0001-8054-2763, [fkate1007@mail.ru](mailto:fkate1007@mail.ru); географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова.

*of climate precession. Based on our calculations of summer/winter irradiation intensity extremes during climate precession phases in the Northern Hemisphere, the formation dates of dropstones (Heinrich layers) have been refined. These dropstones are correlated with climate precession extremes and are recorded in ocean sediments during both interglacial and glacial periods. Sea level evolution and ocean sedimentation over the past 130,000 years are primarily determined by glacioeustatic fluctuations associated with temperature changes, which are primarily controlled by variations in the intensity of Northern Hemisphere irradiation within the climatic precession cycle. At the same time, the weak presence of a precessional cycle is noted in the benthic  $\delta^{18}O$  stack of the orbitally tuned LR04 scheme/model, which currently forms the basis of geochronology and climatostratigraphy of Late Pleistocene and Holocene. The beginning of the next warm phase of climate precession is expected around 5,500 years AD. This phase will peak around 11.5 kyr AD, when the next significant sea level rise is expected.*

**Key words:** climatic precession, sea level, Heinrich layers, late Pleistocene, Holocene.

**For citation:** Fedorov, V.M., Frolov, D.M., Fedorova, E.V., "Sea Level Fluctuations, Oceanic Sedimentation, and Climate Precession for the Last 130 Thousand Years", *Zhizn Zemli [Life of the Earth]* 48, no 1, 11–20 (2026) (in Engl., abstr. in Russ.). DOI: 10.29003/m5043.0514-7468.2026\_48\_1/11-20.

**Введение.** Роль прецессии в изменении климата и объёма ледниковых покровов в настоящее время является предметом научных дискуссий [9, 16, 19, 23, 26]. Николай Коперник называл прецессию третьим периодическим движением Земли после суточного и годового циклов [2]. В работе рассматривается климатическая прецессия, которая определяется движением долготы перигелия с периодом в среднем около 22 тыс. лет. Напомним, что под долготой перигелия понимается угол между направлением из центра Солнца на восходящий узел (точку весеннего равноденствия – ТВР) и перигелием. Долгота перигелия или угловое расстояние перигелия от ТВР отсчитывается от ТВР в направлении орбитального движения Земли.

С уровнем Мирового океана, во-первых, связано положение береговой линии и, во-вторых, соотношение площади суши и океана на планете, которым определяется участие морского и континентального типов климата в глобальном климате Земли. Уровень океана подвержен вековым изменениям, которые определяются как динамикой геометрии (ёмкости) океана (связанной, в основном, с тектоническим движением дна и континентальных блоков), так и с колебаниями массы воды в океане (обычно называемыми эвстатическими).

Колебания уровня Мирового океана (УМО) приводят к изменению планетарных геодезических параметров (скорости вращения Земли, её полярного сжатия и др.), что, в свою очередь, сказывается на общей циркуляции атмосферы и океана, а следовательно, и климате Земли. Современный уровень океана является результатом трансгрессии, связанной с таянием последнего (валдайского, висконсинского) ледникового покрова, развивавшегося в основном на территории Европы и Северной Америки. Определение причин изменений уровня океана за последние 130 тыс. лет представляется актуальной научной и прикладной задачей, поскольку знание причин позволяет прогнозировать как изменение уровня океана, положения его береговой линии, так и климата [3].

Целью работы является исследование данных о колебаниях уровня океана и формировании друпстоунов за последние 130 тыс. лет в связи с фазами цикла климатической прецессии, которой регулируется динамика интенсивности сезонного (летнего и

зимнего) облучения в полушариях. Для решения этой задачи ранее были выполнены расчёты инсоляции (интенсивности облучения на верхней границе атмосферы – ВГА) Земли. По интерполированным данным Ж. Ласкара и его оценкам смещения точки весеннего равноденствия были выполнены расчёты инсоляции Земли для неоплейстоцена [4]. По результатам расчётов была составлена таблица, а также подготовлены рис. 1, 3 и 4.

В **таблице** представлены даты начала и окончания тёплых и холодных фаз климатической прецессии (ФКП) за последние 133 тыс. лет. Тёплые и холодные ФКП определялись по аномалии интенсивности летнего облучения Северного полушария (отклонения от среднего для неоплейстоцена значения летней интенсивности облучения в Северном полушарии). Положительные аномалии летней интенсивности облучения (ИО) принимались за тёплые фазы климатической прецессии (ФКП), отрицательные – за холодные. Также приведены значения средних для ФКП значений аномалии летней ИО (в Вт/м<sup>2</sup> и в % от среднего для неоплейстоцена значения – 426,414 Вт/м<sup>2</sup>) и даты экстремумов климатической прецессии.

**Таблица.** Продолжительность и даты экстремумов ФКП в Северном полушарии  
**Table.** Duration and dates of the Northern Hemisphere phases of climatic precession

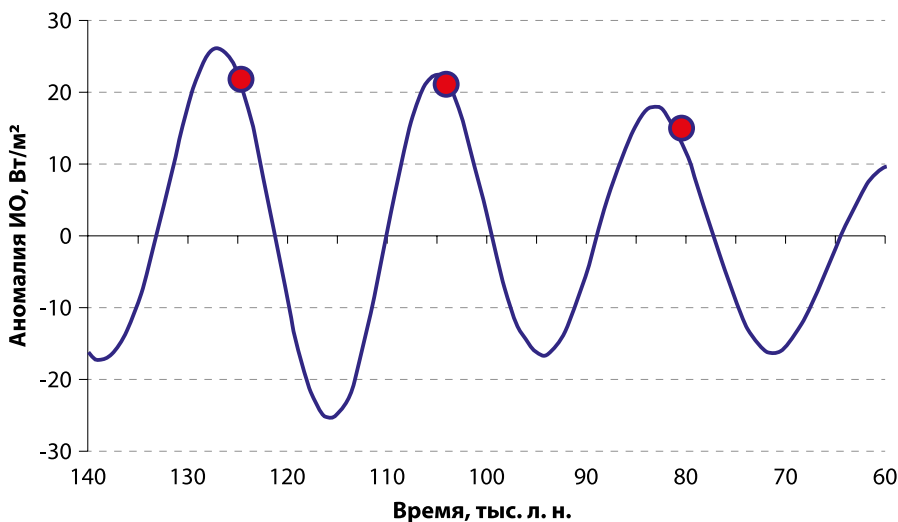
ФКП, тыс. л.н.	Средняя аномалия летней ИО		Даты экстремумов, тыс. л.н.	События Хейнриха (уточнённые)
	Вт/м <sup>2</sup>	%		
133,0–122,0	16,865	3,955	127	XI
121,5–110,5	-15,797	-3,705	115	X
110,0–100,0	14,185	3,327	105,5	IX
99,5–89,5	-10,842	-2,543	94,5	VIII
89,0–78,0	11,435	2,682	83,5	VII
77,5–65,0	-10,118	-2,373	71,5	VI
64,5–52,5	6,072	1,424	59,5	V
52,0–41,0	-2,752	-0,645	47	IV
40,5–30,0	3,346	0,785	34,5	III
29,5–17,5	-7,837	-1,839	23	II
17,0–11,0	8,625	2,023	11,5	I

*Примечание:* тёплые ФКП и летние максимумы / зимние минимумы выделены красным цветом; холодные ФКП и летние минимумы / зимние максимумы выделены, синим цветом.

Далее рассмотрим некоторые известные факты.

**Изменение уровня океана.** В 1956 г. Джон Бэрнс с коллегами из Лос-Аламосской лаборатории разработали ториевый метод датирования, пригодный для получения точного возраста коралловых рифов – при условии, что они не древнее 150 тыс. лет. Этот метод оказался особенно перспективным для датирования береговых линий океана. В середине прошлого века Уолесом Брёкером были получены датировки террас на атолле Эниветок, островах Флорида-Кис и Багамских. Полученные им результаты свидетельствовали о том, что около 120 тыс. л.н. уровень океана поднимался на 6 м выше современного. Ещё одно такое повышение имело место 80 тыс. л.н. [8].

Позднее также были получены датировки террас острова Барбадос, Багамских островов, Новой Гвинеи, Гавайских островов. Все полученные датировки (82, 105 и 125 тыс. л.н.) относятся к микулинскому (эмскому, сангамоновскому) времени. Более того, все три датировки (стадии бореальной трансгрессии) приходятся на тёплые фазы летней интенсивности облучения в цикле климатической прецессии (рис. 1, табл.). В работе [1] также отмечается, что 125–120 тыс. л.н. (тёплая ФКП) по геологическим данным мир был теплее, чем в настоящее время. В работе [11] приводятся сведения о том, что период от 129 до 118 тыс. л.н. был немного теплее, чем сегодня, а уровень моря был на 4–6 м выше современного.



**Рис. 1.** Аномалии летней интенсивности облучения (ИО) в Северном полушарии за последние 140 тыс. лет (кружками обозначены датировки морских террас).

**Fig. 1.** Anomalies of summer irradiation intensity (II) in the Northern Hemisphere over the past 140 thousand years (circles indicate the dates of marine terraces).

За тёплые и холодные фазы климатической прецессии (ФКП), как отмечалось выше, принимаются периоды положительных и отрицательных (соответственно) аномалий летней ИО в Северном полушарии относительно среднего для неоплейстоцена (за последние 800 тыс. л.н.) значения. Максимумы аномалии летней ИО отмечаются 127, 105,5 и 83,5 тыс. л.н. Т. е. максимумы аномалии летней ИО древнее террасовых датировок или опережают их по фазе на 2, 0,5 и 1,5 тыс. лет соответственно.

Гю Хеннинг с коллегами проанализировали по возрасту 583 поднятых плейстоценовых берегов, датированных по изотопам уранового ряда [18]. Подавляющее число датировок по результатам их анализа приходится на интервалы времени вблизи 126, 110–100, 86–78, 64–56 и 46–38 тыс. л.н. В этом случае все группы датировок, за исключением диапазона 46–38 тыс. л.н., в точности совпадают с тёплыми ФКП (см. табл.). Диапазон 46–38 тыс. л.н. совпадает частично (тёплая ФКП – 40,5–30,0). А. Селиванов [3] проанализировал 1700 опубликованных датировок морских плейстоценовых террас в интервале от 30 до 400 тыс. л.н. Во внимание принимались только конечные датировки по изотопам уранового ряда, калий-аргоновые, трековые, аминокислотные,

ЭПР, а также наиболее надёжные радиоуглеродные датировки. В результате такой оценки было отобрано 900 датировок (55 %), которые использовались в дальнейшем анализе. После статистической обработки датировок автором отмечается, что высокий уровень океана отмечался в период 40–30 тыс. л.н. Этот период совпадает с тёплой фазой климатической прецессии – 40,5–30,0 тыс. л.н. (см. табл.). Также А. Селивановым отмечается, что древние берега, сопоставляемые с заключительными фазами первого позднеледникового межледниковья, датируются чаще всего диапазоном 90–80 тыс. л.н., что хорошо согласуется с тёплой ФКП (89,0–78,0 тыс. л.н.).

С середины прошлого века детально известен характер повышения уровня океана за последние 20 тыс. лет (рис. 2).

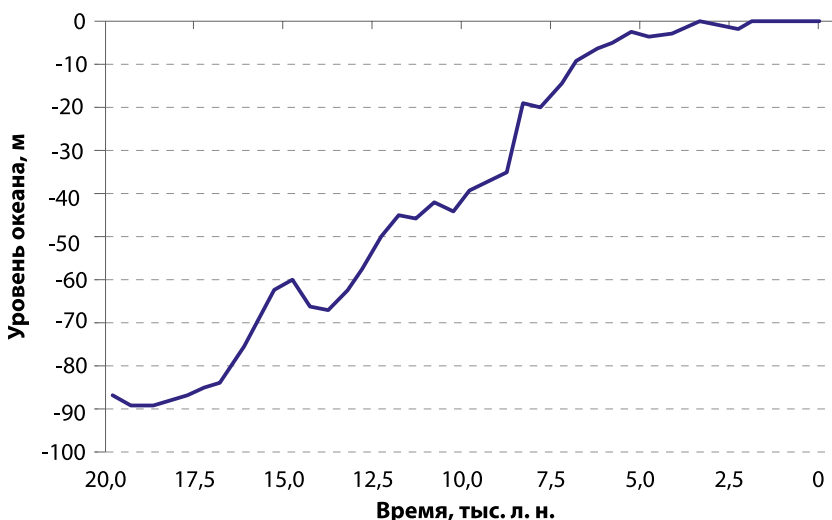


Рис. 2. Изменение уровня океана за последние 20 тыс. лет, по [22].

Fig. 2. Sea level change over the last 20 thousand years, according to Ref. [22].

Повышение уровня океана связывают с деградацией валдайского (висконсинского) оледенения. Отступление Европейского ледникового щита началось, по данным радиоуглеродных датировок конечных морен на территории Германии, около 18 тыс. л.н. Примерно в это же время, по свидетельству Р. Флинта, в районе Великих озёр отмечено отступление Лаврентьевского ледникового щита [6]. Согласно Д. Эриксону, повышение температуры воды в океане также началось около 18 тыс. л.н. [12].

В литературе часто ссылаются на данные, приводимые Р. Фейрбриджем [13] или Ф. Шепардом [24]. Оба исследователя основывали свои выводы на радиоуглеродных определениях возраста образцов, отобранных в различных районах побережий Мирового океана. Р. Фейрбридж и Ф. Шепард подтверждают, что послеледниковая трансгрессия океана активно развивалась, начиная с 17–18 тыс. л.н. и что 5–6 тыс. л.н. произошло резкое снижение скорости подъёма уровня. При этом Фейрбридж пытался сопоставить изменение уровня океана с кривой Миланковича.

Не вызывает сомнения факт резкого замедления скорости повышения уровня океана 7–6 тыс. л.н. Этот перегиб кривой подъёма уровня обоснован многочисленными радиоуглеродными датировками и соответствует периоду, когда ледники повсюду сократились примерно до современных размеров. Спратт и Лисеcki [25] приходят к

выводу о том, что 24 тыс. л.н. уровень океана был на 130 м ниже современного. Кларк с коллегами на основе радиоуглеродного датирования береговой линии по кораллам приходит к выводу о том, что 5 тыс. л.н. уровень океана соответствовал современному [10]. Однако в работе [25] в спектральном анализе модельных кривых изменения уровня океана цикл климатической прецессии выражен слабо. Спектральный анализ показывает выраженные пики с характерными периодами 100 и 41 тыс. лет как в бентосном  $\delta^{18}\text{O}$  стеке орбитально настроенной климатостратиграфической схемы/модели LR04, так и в стеке уровня моря. Стек уровня моря и бентосный  $\delta^{18}\text{O}$  стек LR04 сильно коррелируют ( $r = 0,90$ ). В стеке уровня моря 47 % спектральной плотности определяется 100-тысячелетним циклом эксцентриситета (полоса частот 0,009–0,013 тыс. лет) и 37 % спектральной плотности определяется циклом наклона оси с периодом 41 тыс. лет (полоса частот 0,024–0,026 тыс. лет). Это вызывает определённые сомнения в корректности орбитально настроенной схемы LR04 и в достоверности предлагаемой авторами реконструкции уровня океана в позднем плейстоцене. Слабое присутствие прецессионного цикла в бентосном  $\delta^{18}\text{O}$  стеке LR04 при его сильном инсоляционном воздействии представляется требующей решения проблемой в схеме геохронологии и климатостратиграфии плейстоцена, основанной на модели LR04 (морские изотопные стадии – МИС) [21].

Руддман подробно исследовал фазовые отклики  $\delta^{18}\text{O}$  в ледяных кернах и бентосных фораминиферах на прецессию (наклон оси и эксцентриситет) [23]. Автор признаёт климатическую прецессию одним из основных факторов климатических изменений в неоплейстоцене. Однако им также отмечается проблема слабой выраженности этого цикла в ледяных  $\delta^{18}\text{O}$  стеках и  $\delta^{18}\text{O}$  стеках морских отложений. Значимость климатической прецессии отмечается и Чангом в исследованиях интенсивности муссонов по  $\delta^{18}\text{O}$  составу сталагмитов [9].

В общем же считается установленным, что начало повышения уровня океана приходится на время около 17 тыс. л.н. Уровень океана достиг современных отметок приблизительно 5–6 тыс. л.н. По рассчитанным нами данным летней интенсивности облучения Северного полушария [4, 5, 14] начало тёплой фазы климатической прецессии также приходится на время около 17 тыс. л.н., а завершение – на время около 5 тыс. л.н. (рис. 3).

Из этого следует, что повышение уровня океана регулируется циклом климатической прецессии, по крайней мере, в микулинскую (эмскую) межледниковую эпоху и в позднплейстоцен-голоценовое время. Ближайшая тёплая ФКП в будущем начнётся около 5,5 тыс. лет н. э. и завершится около 17 тыс. лет н. э. Максимум этой тёплой фазы климатической прецессии будет приходиться на 11,5 тыс. лет н. э. В это время ожидается очередное значительное повышение уровня океана.

**Океаническая седиментация и слои Хейнриха.** С климатической прецессией также связана седиментационная ритмика в океане. Как показано в работе [17], климатической прецессией регулируется айсберговый разнос в Северной Атлантике. Хейнрихом были исследованы керны глубоководных осадков, поднятые из северо-восточной части Атлантического океана с целью выяснения влияния параметров орбиты Земли на основной ледовый разнос. Анализ крупнозернистых обломков, разнесённых льдом, и планктонных фораминифер выявил сильную реакцию на сигнал климатической прецессии. Начиная от 130 тыс. л.н., слои друпстоуна отлагались каждую половину периода прецессионного цикла (в среднем  $11\,000 \pm 1000$  лет). Ледовый разнос, по мнению Хейнриха, происходит в периоды зимнего минимума / летнего максиму-

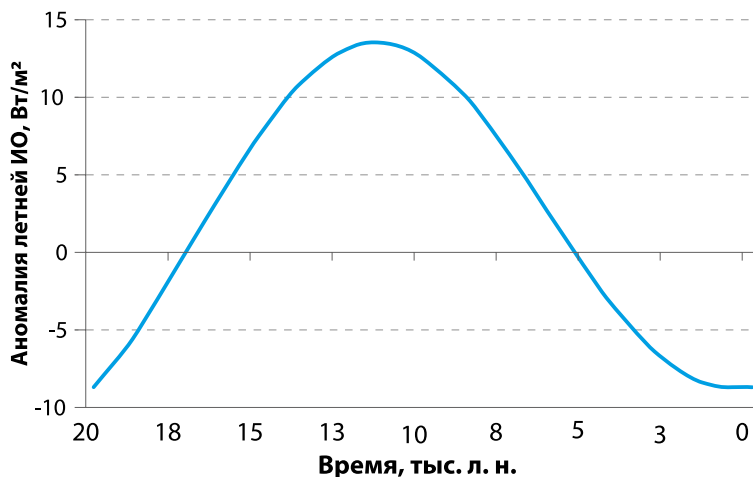


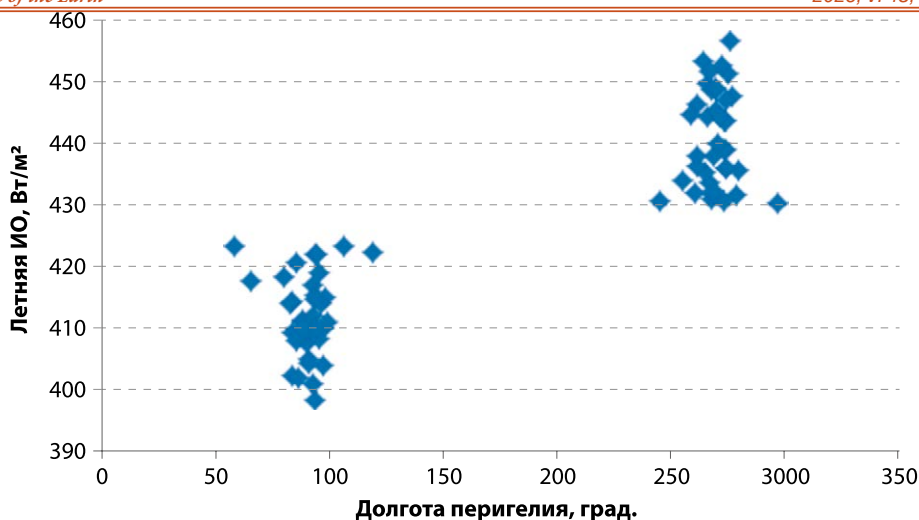
Рис. 3. Аномалия летней интенсивности облучения в Северном полушарии за последние 20 тыс. лет.

Fig. 3. Anomaly of summer irradiation intensity in the Northern Hemisphere over the last 20 thousand years.

ма инсоляции и летнего минимума / зимнего максимума инсоляции. В первом случае высокая летняя инсоляция вызывает сброс талой воды с ледяных щитов в полярные моря, что впоследствии ускоряет образование морского льда зимой. Во втором случае рост континентального льда усиливает образование айсбергов, что также приводит к снижению солёности поверхностной морской воды. Обе ситуации приводят к проникновению полярных вод на юг. Таким образом, морские данные о друпстоунах документируют движение льда не только во время вейхзелевских стадий (стадий Валдайского оледенения), но и во время похолоданий в межстадиальных интервалах. На основе полученных результатов Хейнрих отмечает, что регулярность движения льда даёт полезную основу для калибровки и объяснения климатических изменений не только в регионе Северной Атлантики, но и в таких отдалённых районах, как Тихий океан и Антарктика [17].

В своей работе Хейнрих сопоставлял хронологию образования слоёв друпстоунов с долготой перигелия ( $90^\circ$  и  $270^\circ$ ), которой регулируется климатическая прецессия и которая рассматривается Хейнрихом в качестве причины ледового разнота и формирования друпстоунов. Теоретически долготы перигелия  $90^\circ$  и  $270^\circ$  и даты экстремумов летней интенсивности облучения Северного полушария в цикле климатической прецессии совпадают. Однако при сопоставлении дат долгот перигелия  $90^\circ$  и  $270^\circ$  с датами рассчитанных экстремумов интенсивности летнего облучения возникают несовпадения (рис. 4). Несовпадение связано с временным разрешением в расчётах инсоляции. В наших расчётах расхождения в датах долгот перигелия  $90^\circ$  и  $270^\circ$  с минимумами и максимумами летней интенсивности облучения Северного полушария находятся в пределах шага разрешения (500 лет).

Минимальные значения летней ИО (максимальные зимней ИО) в Северном полушарии расположены вблизи долготы перигелия, равной  $90^\circ$  (в период летнего солнцестояния Земля находится в афелии), максимальные значения летней ИО и минимальные зимней ИО – вблизи  $270^\circ$  (в летнее солнцестояние Земля находится в пе-



**Рис. 4.** Зависимость экстремальных значений летней ИО в Северном полушарии от долготы перигелия.

**Fig. 4.** Dependence of the extreme values of summer irradiation intensity (II) in the Northern Hemisphere on the perihelion longitude.

ригелии). По выполненным нами ранее расчётам летней и зимней интенсивности облучения Северного полушария можно уточнить (в пределах 500-летнего разрешения) хронологию (см. табл.) формирования в глубоководных осадках слоёв с друпстоунами (слоёв Хейнриха – Heinrich layers) [15]. Такое уточнение представляется оправданным в связи с тем, что расчёты наших предшественников [7, 20] выполнялись с разрешением 1000 лет. Слои с друпстоунами формируются, вероятно, с некоторым колебанием относительно экстремумов летней ИО в фазах климатической прецессии.

**Заключение.** Влияние цикла климатической прецессии в течение, по крайней мере, последних 130 тыс. лет со всей очевидностью проявляется в изменениях уровня Мирового океана. Максимальные поднятия уровня океана отмечаются с некоторым запозданием (0,5–2 тыс. лет) вблизи максимумов летней интенсивности облучения Северного полушария. Таким образом, климатической прецессией регулируется уровень океана, по крайней мере, на интервале последних 130 тыс. лет.

С экстремумами климатической прецессии также связана седиментационная ритмика (слои диамиктона – слои Хейнриха) в океанических осадках в Северной Атлантике. Кроме того, сигнал прецессии доминирует в спектрах изотопно-кислородного состава сталагмитов, что является основанием для признания прецессии фактором, регулирующим интенсивность развития муссонов в юго-восточной Азии [9]. Всё это свидетельствует о значимости цикла климатической прецессии в изменениях природы Земли и необходимости его учёта в палеоклиматических моделях и реконструкциях, а также при долгосрочном географическом прогнозе.

**Источники финансирования.** Исследование выполнено в рамках государственных заданий МГУ им. М.В. Ломоносова («Лавины, сели и смежные опасные природные процессы: оценка, моделирование и управление рисками», «Проблемы освоения Арктической зоны РФ: опасные экзогенные процессы и риски природопользования»).

### Литература

1. Джон Б., Дербишир Э., Янг Г., Фейрбридж Р., Эндрюс Дж. Зимы нашей планеты. М.: Мир, 1982. 356 с.
2. Коперник Н. О вращениях небесных сфер. СПб: Амфора, 2009. 580 с.
3. Селиванов А.О. Изменения уровня Мирового океана в плейстоцене – голоцене и развитие морских берегов. М.: Институт водных проблем РАН, 1998. 268 с.
4. Фёдоров В.М. Изотопная и соляная геохронология и климатостратиграфия неоплейстоцена северной Евразии // Геоматематизм и аэрономия, 2025. Т. 65, № 4. С. 553–563.
5. Фёдоров В.М. Причины палеоклиматических изменений в неоплейстоцене Северной Евразии // Жизнь Земли, 2025. Т. 47, № 3. С. 348–358.
6. Флинт Р.Ф. Ледники и палеогеография плейстоцена. М.: ИЛ, 1963. 576 с.
7. Berger A., Loutre M.F. Astronomical solutions for paleoclimate studies over the last 3 million years // Earth Planet. Sci. Lett., 1992. Vol. 111. P. 369–382.
8. Broecker W., Ku T. Caribbean cores P6304-8 and P6304-9 new analysis of absolute chronology // Science, 1969. Vol. 166. P. 404–406.
9. Cheng H., Springer G.S., Sinha A., Hardt B.F., Yi L., Li H., Tian Y., Li X., Rowe H.D., Kathayat G., Ning Y., Edwards R.L. Eastern North American climate in phase with fall insolation throughout the last three glacial-interglacial cycles // Earth and Planetary Science Letters, 2019. 522. P. 125–134.
10. Clark P.U., Dyke A.S., Shakun J.D., Carlson A.E., Clark J., Wohlfarth B., Mitrovica J.X., Hostetler S.W., Mc-Cabe A.M. The Last Glacial Maximum // Science, 2009. Vol. 325. P. 710–714. DOI: 10.1126/science.1172873.
11. Duplessy J.C., Charbit S., Kageyama V., Masson-Delmotte V. Insolation and sea level variations during Quaternary interglacial periods: A review of recent results with special emphasis on the last interglaciation // Geoscience, 2008. Vol. 340. P. 701–710.
12. Ericson B.W., Ewing M., Soiling G. The Pleistocene epoch in deep sea sediments // Science, 1964. Vol. 146 (3645). P. 723–732.
13. Fairbridge R.W. Eustatic changes in sea level // Physics and Chemistry of the Earth, 1961. Vol. 4. P. 99–185.
14. Fedorov, V.M., Frolov, D.M., Velasco Herrera, V.M. et al. Role of the Radiation Factor in Global Climatic Events of the Late Holocene // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2021. V. 57. P. 1239–1253. <https://doi.org/10.1134/S0001433821100030/>
15. Harrison S.P., Sanchez-Goñi M.F. Global patterns of vegetation response to millennial-scale variability and rapid climate change during the last glacial period // Quaternary Science Reviews, 2010. Vol. 29. P. 2957–2980.
16. He F., Shakun P.U., Carlson A.E., Liu Z., Otto-Bliesner B.L., Kutzbach J.T. Northern Hemisphere forcing of Southern Hemisphere climate during the last deglaciation // Nature, 2013. 494. P. 81–85.
17. Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years // Quaternary Research, 1988. Vol. 29. P. 142–152.
18. Hennig G.J., Grün R., Brunacker K. Speleothems, travertines, and paleoclimates // Quaternary Research, 1983. Vol. 20 (1). P. 1–29. DOI: 10.1016/0033-5894(83)90063-7.
19. Huybers P. Antarctica's orbital beat // Science, 2009. 325. P. 1085–1086.
20. Laskar J., Joutel F., Boudin F. Orbital, precessional and insolation quantities for the Earth from – 20 Myr to + 10 Myr // Astronomy & Astrophysics, 1993. Vol. 287. P. 522–533.
21. 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.
22. Mörner N.-A. The Fennoscandian uplift and late Cenozoic Geodynamics: geological evidence // Geojournal, 1973. N 3. P. 287–318.
23. Ruddiman W.F. Orbital changes and climate // Quaternary Science Reviews, 2006. Vol. 25. P. 3092–3112.
24. Shepard F.P. Sea level rise during the past 20,000 years // Zeitschrift für Geomorphologie, 1961. Vol. 3. P. 30–35.
25. Spratt R.M., Lisiecki L.E. A Late Pleistocene sea level stack // Clim. Past, 2016. Vol. 12. P. 1079–1092.
26. Tigchelaar M., Timmermann A., Pollard D., Friedrich T., Heinemann M. Local insolation changes enhance Antarctic interglacials: Insights from an 800,000-year ice sheet simulation with transient climate forcing // Earth and Planetary Science Letters, 2018. Vol. 495. P. 69–78.

## References

1. *The winters of the world: Earth under the Ice Ages*. Ed. by Brian S. John, David and Charles, Newton Abbot, Wiley. 1979.
2. Copernicus, Nicolaus. *De Revolutionibus Orbium Coelestium [On the Revolutions of the Heavenly Spheres]*. Norimbergae: apud Ioh. Petreium, Nürnberg, 1543.
3. Selivanov, A.O., *Changes in the World Ocean Level in the Pleistocene–Holocene and the Development of Sea Coasts* (Moscow: Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, 1998) (in Russian).
4. Fedorov, V.M., “Isotopic and Solar Geochronology and Climatostratigraphy of the Late Pleistocene of Northern Eurasia”, *Geomagnetism and Aeronomy* **65** (4), 553–563 (2025). DOI: 10.31857/S0016794025040133 (in Russian).
5. Fedorov, V.M., “Causes of paleoclimatic changes in the Neopleistocene of Northern Eurasia”, *Zhizn Zemli [Life of the Earth]* **47** (3), 348–358 (2025). DOI: 10.29003/m4740.0514-7468.2025\_47\_3/348-358 (in Russian).
6. Flint, R.F., *Glacial and Pleistocene Geology*. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1957. 553 p.
7. Berger, A., Loutre, M.F., “Astronomical solutions for paleoclimate studies over the last 3 million years”, *Earth Planet. Sci. Lett.* **111**, 369–382 (1992).
8. Broecker, W., Ku, T., “Caribbean cores P6304-8 and P6304-9 new analysis of absolute chronology”, *Science* **166**, 404–406 (1969).
9. Cheng, H., Springer, G.S., Sinha, A., Hardt, B.F., Yi, L., Li, H., Tian, Y., Li, X., Rowe, H.D., Kathayat, G., Ning, Y., Edwards, R.L., “Eastern North American climate in phase with fall insolation throughout the last three glacial-interglacial cycles”, *Earth and Planetary Science Letters* **522**, 125–134 (2019).
10. Clark, P.U., Dyke, A.S., Shakun, J.D., Carlson, A.E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J.X., Hostetler, S.W., Mc-Cabe, A.M., “The Last Glacial Maximum”, *Science* **325**, 710–714 (2009). DOI: 10.1126/science.1172873.
11. Duplessy, J.C., Charbit, S., Kageyama, V., Masson-Delmotte, V., “Insolation and sea level variations during Quaternary interglacial periods: A review of recent results with special emphasis on the last interglaciation”, *Geoscience* **340**, 701–710 (2008).
12. Ericson, B.W., Ewing, M., Soiling, G., “The Pleistocene epoch in deep sea sediments”, *Science* **146** (3645), 723–732 (1964).
13. Fairbridge, R.W., “Eustatic changes in sea level”, *Physics and Chemistry of the Earth* **4**, 99–185 (1961).
14. Fedorov, V.M., Frolov, D.M., Velasco Herrera, V.M. *et al.*, “Role of the Radiation Factor in Global Climatic Events of the Late Holocene”, *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* **57**, 1239–1253 (2021). <https://doi.org/10.1134/S0001433821100030/>
15. Harrison, S.P., Sanchez-Goñi, M.F., “Global patterns of vegetation response to millennial-scale variability and rapid climate change during the last glacial period”, *Quaternary Science Reviews* **29**, 2957–2980 (2010).
16. He, F., Shakun, P.U., Carlson, A.E., Liu, Z., Otto-Bliesner, B.L., Kutzbach, J.T., “Northern Hemisphere forcing of Southern Hemisphere climate during the last deglaciation”, *Nature* **494**, 81–85 (2013).
17. Heinrich, H., “Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years”, *Quaternary Research* **29**, 142–152 (1988).
18. Hennig, G.J., Grün, R., Brunnacker, K., “Speleothems, travertines, and paleoclimates”, *Quaternary Research* **20** (1), 1–29 (1983). DOI: 10.1016/0033-5894(83)90063-7.
19. Huybers, P., “Antarctica’s orbital beat”, *Science* **325**, 1085–1086 (2009).
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. 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.
22. Mörrner, N.-A., “The Fennoscandian uplift and late Cenozoic Geodynamics: geological evidence”, *Geojournal* **3**, 287–318 (1973).
23. Ruddiman, W.F., “Orbital changes and climate”, *Quaternary Science Reviews* **25**, 3092–3112 (2006).
24. Shepard, F.P., “Sea level rise during the past 20,000 years”, *Zeitschrift für Geomorphologie* **3**, 30–35 (1961).
25. Spratt, R.M., Lisiecki, L.E., “A Late Pleistocene sea level stack”, *Clim. Past* **12**, 1079–1092 (2016).
26. Tigchelaar, M., Timmermann, A., Pollard, D., Friedrich, T., Heinemann, M. “Local insolation changes enhance Antarctic interglacials: Insights from an 800,000-year ice sheet simulation with transient climate forcing”, *Earth and Planetary Science Letters* **495**, 69–78 (2018).