

УДК 551.324

## БУДУЩИЙ ЛЕДНИКОВЫЙ ЦИКЛ И ЕГО ОТРАЖЕНИЕ В ЛЕДНИКОВЫХ ЦИКЛАХ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА

© 2025 г. Н. В. Вакуленко\*, Д. М. Сонечкин

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

*\*e-mail: vanava139@yandex.ru*

Поступила в редакцию 07.11.2024 г.

После доработки 16.02.2025 г.

Принята к публикации 18.04.2025 г.

В результате применения к ледниковым циклам позднего плейстоцена принципа симметрии и свойства подобия была обнаружена аналогия в динамике климата ледниковых циклов Миланковича. Это сделало возможным в общих чертах изобразить будущий ледниковый цикл, определить его конфигурацию и продолжительность.

**Ключевые слова:** поздний плейстоцен, ледниковые циклы Миланковича, будущий ледниковый цикл, принципы симметрии и подобия. вейвлетный анализ

DOI: 10.31857/S2076673425020095, EDN: FOKHSX

### ВВЕДЕНИЕ

Теория Миланковича о плиоценовых/плейстоценовых ледниковых циклах (1920 г.) относит закономерное чередование холодных (ледниковых) и тёплых (межледниковых) климатических условий на счёт широтных и сезонных перераспределений приходящей на Землю солнечной радиации. Эти перераспределения управляются квазипериодическими изменениями прецессии, нутации и наклона земной оси. В современном прочтении теории Миланковича основной причиной чередования ледниковых и межледниковых условий является 41-тысячелетний цикл наклона, который объясняет синхронное чередование климатических ледниковых циклов в обоих полушариях. Но эта теория не объясняет причин перехода климатических циклов от 41-тыс. к 100-тыс. в плейстоцене. Второй внешний фактор – общий тренд похолодания. Установлено, что реконструированные значения  $\text{CO}_2$  в период от 15 до 0.3 млн лет неуклонно снижались с 650 до 280 ppm, что отражает снижение глобальной температуры (Witkowski et al., 2024). Реконструкция глобальной температуры за последние 2 млн лет показала постепенное её снижение примерно до 1.2 млн лет, а затем замедление похолодания к началу переходного периода в середине плейстоцена (Snyder, 2016). Многочисленные

палеоклиматические данные подтверждают, что климат плиоцена/плейстоцена как нелинейной динамической системы управляется периодическими внешними силами.

За долгие годы изучения симметрии В.И. Вернадским был выведен принцип симметрии, который заключается во всеобщности для всего окружающего мира, и в перечень объектов, охваченных симметрией, входит фактически всё реальное пространство мира, причём не исключаются случаи нарушения симметрии (диссимметрии) и её отсутствия (асимметрии). Идея симметрии ледниковых циклов впервые была высказана А.С. Мониным при изучении ледниковых кернов позднего плейстоцена с антарктических станций «Восток» и «Купол С» (Вакуленко и др., 2005). Симметрия была обнаружена между формами позднеплейстоценовых ледниковых циклов относительно максимума межледниковья IV ледникового цикла (морская изотопная стадия MIS11c) примерно 400 тыс. лет до настоящего времени (далее – н.в.), и высказано предположение, что симметрия форм ледниковых циклов вызвана амплитудными и частотными модуляциями реакции климата на изменения орбитальной инсоляции (Вакуленко и др., 2005). Несовпадение максимумов оледенений отдельных климатических ледниковых циклов позднего

плейстоцена можно объяснить нестабильностью ледниковых щитов, которые сокращаются быстрее, чем растут, что усиливает динамическую асимметрию (Imbrie, Imbrie, 1980). Особенность ледниковых 100-тыс. колебаний позднего плейстоцена заключается в асимметрии между временными рамками оледенения и дегляциации, так как пилообразная форма достигается за счёт быстрой дегляциации и медленной стадии оледенения (Tziperman, Gildor, 2003).

Возникновение 100-тысячелетней цикличности ледниковых циклов позднего плейстоцена объясняется повышенной чувствительностью крупных ледниковых щитов к интенсивности инсоляции, обусловленной прецессией в сочетании с эксцентриситетной модуляцией амплитуды прецессии (Hobart et al., 2023). Отмечено резкое возрастание изменчивости климата примерно за 400 тыс. лет до н.в., которое произошло в диапазоне масштабов прецессии земной оси, и было ещё более усилено колебаниями в масштабах наклона. В этом интервале (0–350 тыс. лет) период главного пика энергетического спектра стал равен 117 тыс. лет, примерно утроенному периоду инсоляционного воздействия (123 тыс. лет) (Вакуленко и др., 2014). Переходный период среднего Брюнеса около 430 тыс. лет до н.в. начался с увеличения амплитуд климатических циклов продолжительностью 100 тыс. лет с более тёплыми межледниковьями и высокими концентрациями  $\text{CO}_2$  в атмосфере (Barth et al., 2018).

При помощи статистической модели на основе летней инсоляции на  $65^\circ$  с.ш. был сделан прогноз пиков инсоляции, которые могли приводить к наступлению межледниковья за весь четвертичный период, и установлено, что за последний миллион лет энергетический порог дегляциации повысился, что привело к удлинению ледниковых периодов (Tzedakis et al., 2017). Высказана гипотеза, что воздействие циклов Миланковича влияет на фазу (например, время окончания) 100-тысячелетних ледниковых циклов и этот механизм известен как нелинейная фазовая синхронизация, которая также может привести к наблюдаемому разделению ледникового периода на кратные периоды наклона или прецессии (Tziperman et al., 2006).

Среднеплейстоценовый переход, заключающийся в смене климатических ледниковых циклов от 41-тыс. к 100-тыс. периодичности, который сопровождался увеличением среднего объёма льда на планете и большим размахом колебаний уровня Мирового океана в ледниковых циклах, произошёл около 1 млн 240 тыс.

лет назад (Большаков, 2013). В начале плейстоцена произошла бифуркация аттрактора климатической системы, в результате чего сменилась длительность ледниковых циклов, причинами этой смены стали общий тренд похолодания в плейстоцене и вынуждающая сила 40-тысячелетних колебаний инсоляции, которая оказалась слишком велика для сохранения устойчивости отклика климатической системы на эту силу (Вакуленко и др., 2011).

Продолжаются попытки учёных определить длительность настоящего межледниковья. Были найдены прошлые аналоги для современного межледниковья – это аналоги *IV* и *VIII* ледниковых циклов позднего плейстоцена, которые происходили при слабом воздействии инсоляции. Межледниковье в пределах *MIS11* (*MIS11c* 426–396 тыс. лет до н.в.) было самым необычным, длительностью около 30 тыс. лет, охватывающим два прецессионных цикла, с высокими показателями уровня моря и концентраций  $\text{CO}_2$  в атмосфере (Tzedakis et al., 2022). Высказано предположение, что период 405–340 тыс. лет до н.в. является хорошим аналогом настоящего межледниковья и будущего климата, которые будут сопровождаться малыми амплитудами колебаний инсоляции на протяжении следующих примерно 50 тыс. лет (McManus et al., 2003). С помощью климатической модели выявлено, что и *MIS11c*, и настоящее межледниковье характеризуются небольшим количеством континентального льда (Loutre, Berger, 2003).

Прогноз естественной продолжительности текущего межледниковья при отсутствии антропогенного воздействия зависит от выбора аналога и хронологического выравнивания двух интервалов, причём синхронизация сигнала прецессии предполагает, что голоцен приближается к концу, а синхронизация сигнала наклона предполагает, что его продолжительность увеличивается ещё на 12 тыс. лет (Tzedakis, 2010). Сравнение современного межледниковья с близким аналогом – межледниковьем *MIS19*, и, предполагая, что изменение объёма льда в основном зависит от инсоляции и концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, позволило определить окончание современного межледниковья, которое наступит в течение следующих 1500 лет при значениях  $\text{CO}_2$ , не превышающих  $240 \pm 5$  ppmv (Tzedakis et al., 2012a). Установлено, что на сохранение межледниковых условий в течение одного или двух пиков инсоляции влияет фазировка прецессии и наклона. Тогда межледниковья могут быть классифицированы как короткие (примерно в половину цикла

прецессии) и более продолжительные (примерно 28 тыс. лет) (Tzedakis et al., 2012b).

Прогнозирование будущего ледникового цикла в недавних статьях основывается на моделях прогнозирования. Например, в статье (Talento, Ganopolski, 2021) предлагается упрощенная модель, основанная на прогнозировании объёма ледников, концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере и средней глобальной температуры, внешними факторами в которой выступают орбитальное воздействие и антропогенные выбросы  $\text{CO}_2$ . Наиболее вероятный путь возможного будущего сценария, который поддерживается большинством реализаций модели, показывает, что планета останется в длительном межледниковом состоянии в течение следующих 50 тыс. лет, в течение которых не ожидается большого роста льда, а полномасштабное оледенение наступит примерно 90 тыс. лет после нашего времени. Модель показывает, что уже достигнутый уровень совокупных выбросов  $\text{CO}_2$  способен повлиять на эволюцию климата, а увеличение роста антропогенных выбросов в ближайшие 2–3 столетия потенциально может привести к тому, что в течение следующего полумиллиона лет в Северном полушарии не будет льда на суше, что отодвинет естественное наступление следующего ледникового периода на 600 тыс. лет или более (Talento, Ganopolski, 2021).

Используя точную возрастную модель, построенную с помощью метода влажной экстракции воздуха и со средним временным разрешением около 1.1 тыс. лет ледяного керна Dome Fuji в Антарктиде, в сочетании с моделью общей циркуляции атмосфера–океан, управляемой орбитальным воздействием и воздействием парниковых газов, было установлено, что продолжительность между началом потепления и первым холодным пиком после межледниковых периодов для последних трёх межледниковий составляет 20–25 тыс. лет (примерно один прецессионный цикл), а продолжительность антарктической тёплой фазы для *MIS11* составляет ~20 тыс. лет, что короче, чем сообщается для ледяного керна EPICA Dome C, на ~10 тыс. лет (Kawamura et al., 2010).

Известны около десяти теорий изменения климата Земли. Первая и главная из них — это теория антропогенного глобального потепления, которая основывается на парниковом эффекте. По этой теории многочисленные модели, где основными внешними факторами являются орбитальное воздействие и парниковые газы, показывают, что при продолжающихся антропогенных

выбросах  $\text{CO}_2$  в атмосферу следующий ледниковый период может не наступить в течение нескольких сотен тысяч лет. Шестая теория о многотысячелетнем влиянии на климат, связанном с движением планет, была предложена М. Миланковичем. В данной статье конфигурация и длительность будущего ледникового цикла определяется по палеоклиматическим записям хронологии LR04, которая включает в себя сочетание орбитальной инсоляции и сложных обратных связей климатической системы. Предполагая, что климат прошлого является ключом к будущему климату, при исследовании климатических ледниковых циклов за последние 900 тыс. лет были применены методы автокорреляции и сравнения для нахождения аналогии между ледниковыми циклами с помощью принципа симметрии и подобия. Используемые методы имеют ограниченную применимость, но они позволяют представить графически будущий ледниковый цикл, согласно астрономической теории Миланковича.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД

В данной работе используется хорошо известный набор данных LR04 (Lisiecki, Raymo, 2005), созданный американскими учёными в 2004 г. Временной ряд содержит данные изотопов кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  (косвенной характеристики объёма льда на Земле и температуры океана), полученные в результате бурения 57 скважин в Тихом, Атлантическом и Индийском океанах. Это первый временной ряд продолжительностью 5.3 млн лет, имеющий разрешение от 1 тыс. лет до 5 тыс. лет и покрывающий весь период плиоцена/плейстоцена. Хронология LR04 демонстрирует значительную согласованность с инсоляцией в диапазонах масштабов прецессии и наклона земной оси, и была создана на основе модели оледенений (Imbrie, Imbrie, 1980). В данной работе будет рассматриваться период позднего плейстоцена от 900 тыс. лет до н.в. При выполнении вейвлетного преобразования (далее — ВП) исходный временной ряд LR04 был центрирован и нормирован для уменьшения краевых искажений картин ВП из-за конечности временных рядов. За границы ледниковых циклов приняты главные максимумы межледниковий, шкала  $\delta^{18}\text{O}$  перевернута, чтобы максимумы соответствовали наиболее тёплому климату.

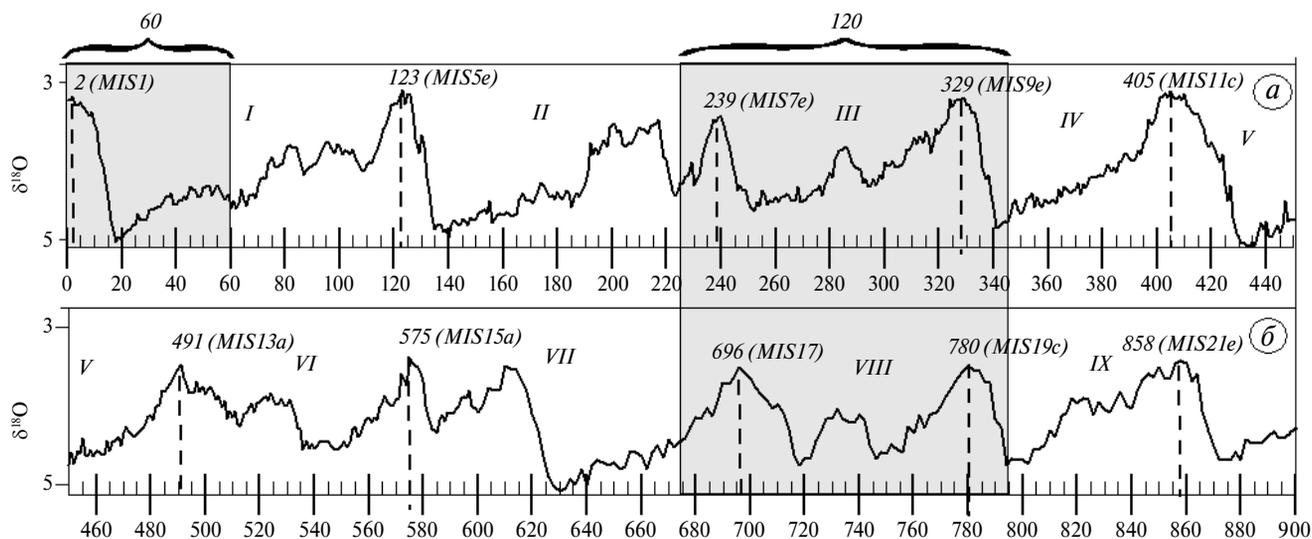
Метод исследования динамики климата ледниковых циклов позднего плейстоцена основывался на прямом и обратном ВП. Было

выполнено ВП с использованием комплексной вейвлетной функции Морле для  $I-0$  и  $V-IV$  пар ледниковых циклов. Для анализа качественных изменений внутри ледниковых циклов построены картины амплитуд ВП. Чтобы выделить отклик климатической системы на квазипериодические вариации прецессии и наклона оси вращения Земли внутри рассматриваемых пар ледниковых циклов, было вычислено обратное ВП палеоклиматических колебаний в диапазоне масштабов от 16 до 64 тыс. лет. Комплексная реконструкция исходных данных не только по вещественной компоненте ВП, но и преобразование Гильберта (Ivashchenko et al., 2013) по мнимой компоненте, позволяет представить графически рассматриваемые палеоклиматические колебания в двумерном пространстве состояний климатической системы. Для наглядного представления динамики климата вышеуказанных пар ледниковых циклов были построены фазовые траектории с использованием трёхмерной графики, где в качестве координатных осей использовались компонента времени, вещественная и мнимая компоненты обратного ВП.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для хронологии LR04 построена автокорреляционная функция в масштабах от н.в. до 1 млн лет для исследования характера колебаний климата в позднем плейстоцене (см. рис. 4 в статье Ivashchenko et al., 2014). Климатической автокорреляции этого периода присуще свойство самоподобия – были обнаружены два временных интервала по 120 тыс. лет, имеющих подобную конфигурацию, и один интервал в 60 тыс. лет, который будет иметь продолжение в будущем ледниковом цикле – 60 тыс. лет после н.в. На рис. 1 эти интервалы обозначены серыми прямоугольниками: 60–0 тыс. лет до н.в., 345–225 тыс. лет до н.в. и 795–675 тыс. лет до н.в. Нулевое время соответствует 1950 г. нашей эры.

Установлено, что большие климатические изменения в плейстоцене произошли при минимальном внешнем воздействии циклов Миланковича в середине Брюнеса около 450 тыс. лет до н.в. (Berger, Wefer, 2003). Сравнение длительностей позднеплейстоценовых ледниковых циклов хронологии LR04 было сделано для двух временных отрезков по 450 тыс. лет. Для сравнения через главные максимумы межледниковий



**Рис. 1.** Временной ряд LR04 вариаций содержания  $\delta^{18}\text{O}$  в океанических отложениях бентосных фораминифер для последних 900 тыс. лет разделён на 2 части по 450 тыс. лет (а–б). Показаны два подобных интервала длиной 120 тыс. лет и один интервал длиной 60 тыс. лет (серые прямоугольники). Числами (тыс. лет) указаны главные максимумы межледниковий, рядом в скобках обозначены соответствующие морские изотопные стадии (Tzedakis et al., 2017). Вертикальные чёрные пунктирные линии, проведённые через главные максимумы межледниковий, разделяют 9 ледниковых циклов, обозначенных римскими цифрами. Ось Y перевернута

**Fig. 1.** The LR04 time series of variations in the  $\delta^{18}\text{O}$  content in oceanic sediments of benthic foraminifera over the last 900 kyr is divided into two parts of 450 kyr (a–b). Two similar intervals with a length of 120 kyr and one interval with a length of 60 kyr years are shown (gray rectangles); the numbers (kyr) indicate the maxima of interglacial periods; the corresponding marine isotopic stages are indicated in brackets (Tzedakis et al., 2017); the vertical black dotted lines drawn through the main interglacial maxima separate the 9 glacial cycles, indicated by Roman numerals. The Y-axis is inverted

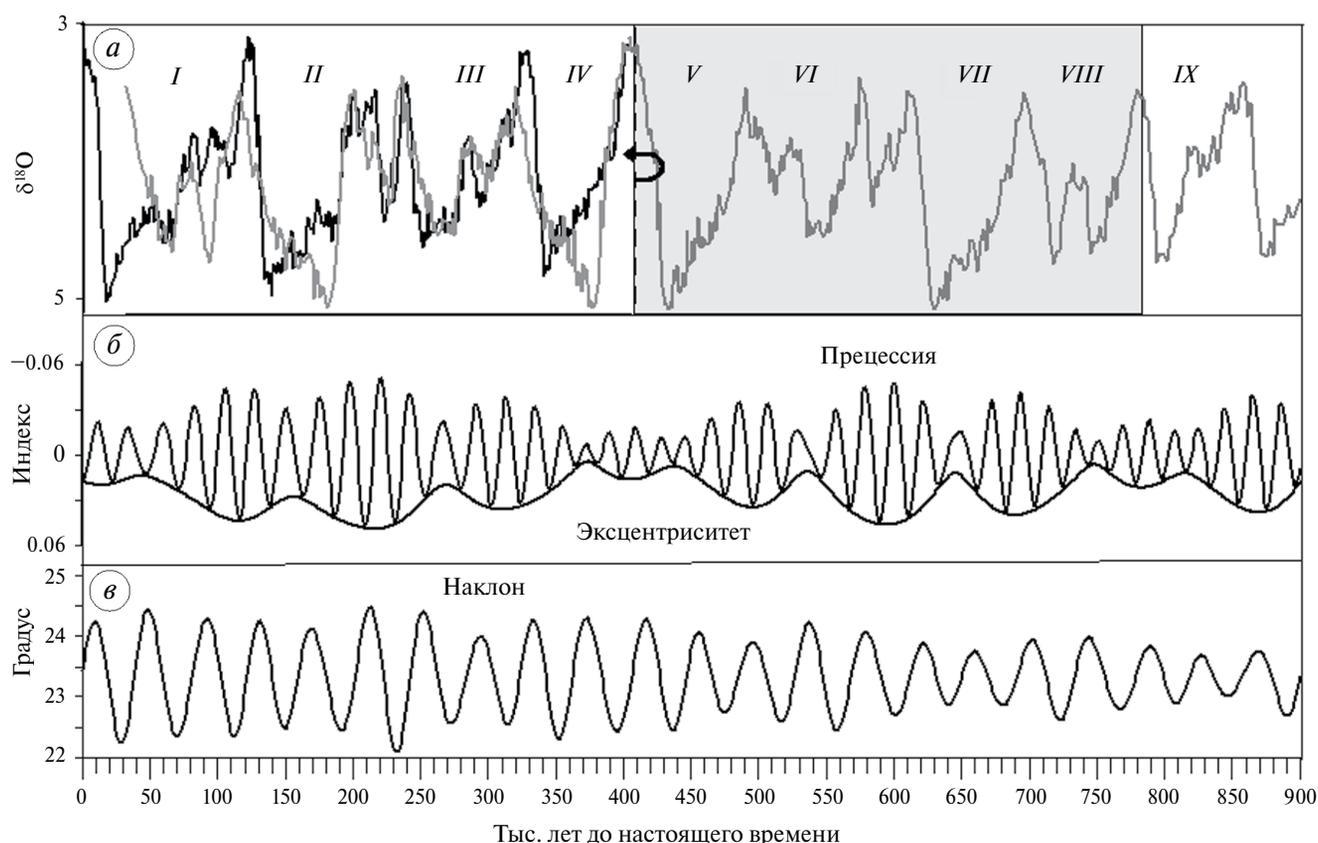
были проведены вертикальные пунктирные линии. На рисунке можно увидеть сходство длительностей климатических ледниковых циклов *II–VII*, *III–VIII*, *IV–IX*. Это правило не относится к длительностям ледниковых циклов *V* и *I*.

Сходство длительностей позднплейстоценовых ледниковых циклов можно объяснить существованием частотной модуляции палеоклиматических колебаний в полосе масштабов эксцентриситета орбитального движения Земли вокруг Солнца (Вакуленко и др., 2007). Это подтверждается моделью частотной модуляции, где несущими частотами были периоды эксцентриситета 95, 100, 125 тыс. лет, а главный пик на периоде 413 тыс. лет и его субгармоника 826 тыс. лет были модулирующими (Rial, 1999).

На рис. 2, *a* изображены девять ледниковых циклов позднего плейстоцена хронологии LR04. Сделан горизонтальный поворот ледниковых

циклов относительно максимума межледниковья *MIS11c* – 405 тыс. лет до н.в. Этот пик не сопровождался вторичными потеплениями ни до, ни после и лишён пилообразной формы, поэтому может рассматриваться как центр симметрии. Сравнение климатических ледниковых циклов относительно пика *MIS11c* выявило симметрию между длительностями и формами этих циклов за последние 900 тыс. лет. На рисунке (см. рис. 2, *a*) видны совпадения максимумов пиков межледниковий и оледенений *VI* и *III*, *VII* и *II*, кроме *VIII* и *I*, которые принадлежат к парам климатических циклов, подобных паре *V–IV*. Несовпадение максимумов оледенений *VII* и *II* ледниковых циклов можно объяснить асимметрией между временем оледенения и временем дегляциации.

Наличие симметрии длительностей, свойственное климатическим ледниковым циклам позднего плейстоцена относительно центра



**Рис. 2.** Сравнение ледниковых циклов до и после отражения относительно момента времени 405 тыс. лет до н.в. Серым прямоугольником отмечен интервал времени для отражения; ось Y перевёрнута. Девять ледниковых циклов с IX по I хронологии LR04 (*a*); изменения орбитальных параметров (Laskar et al., 2004): эксцентриситета и параметра прецессии (*б*), параметра наклона оси вращения Земли (*в*)

**Fig. 2.** Comparison of glacial cycles before and after reflection relative to the time point 405 ka; a gray rectangle marks the time interval for reflection. The Y-axis is inverted. Nine glacial cycles from IX to I (*a*); variations of orbital parameters (Laskar et al., 2004): eccentricity and precession parameter (*б*), obliquity parameter (*в*)

симметрии *MIS11c*, можно отнести на счёт частотной модуляции в полосе масштабов эксцентриситета орбитального движения Земли. На симметрию форм, скорее всего, влияют палеоклиматические отклики на изменения орбитальной инсоляции, вызванные колебаниями прецессии и наклона земной оси (см. рис. 2, б–в) (Вакуленко и др., 2007).

Три пары климатических ледниковых циклов (*I–0*, *V–IV* и *IX–VIII*) позднего плейстоцена (рис. 3) – максимумы общего межледниковья которых приходятся на минимальные амплитуды колебаний прецессии оси вращения Земли, модулированные колебаниями эксцентриситета земной орбиты (см. рис. 2, б) (Laskar et al., 2004). Видно сходство конфигураций между ледниковыми циклами каждой пары. Обнаружение свойства подобия в ледниковых циклах *V–IV* (см. рис. 3, б) и частично в *IX–VIII* (см. рис. 3, в) позволило графически представить будущий ледниковый цикл (см. рис. 3, а), форма которого имеет сходство с указанными выше ледниковыми циклами, несмотря на увеличение продолжительности цикла. Девятый и восьмой (*IX–VIII*) ледниковые циклы частично нарушают подобие из-за того, что они являются переходными от наблюдавшихся ранее примерно 40-тысячелетних к 100-тысячелетним циклам, а также максимум общего межледниковья приходится на 780 тыс. лет, что совпадает с событием Брюнеса–Матуямы – последней инверсией магнитного поля Земли.

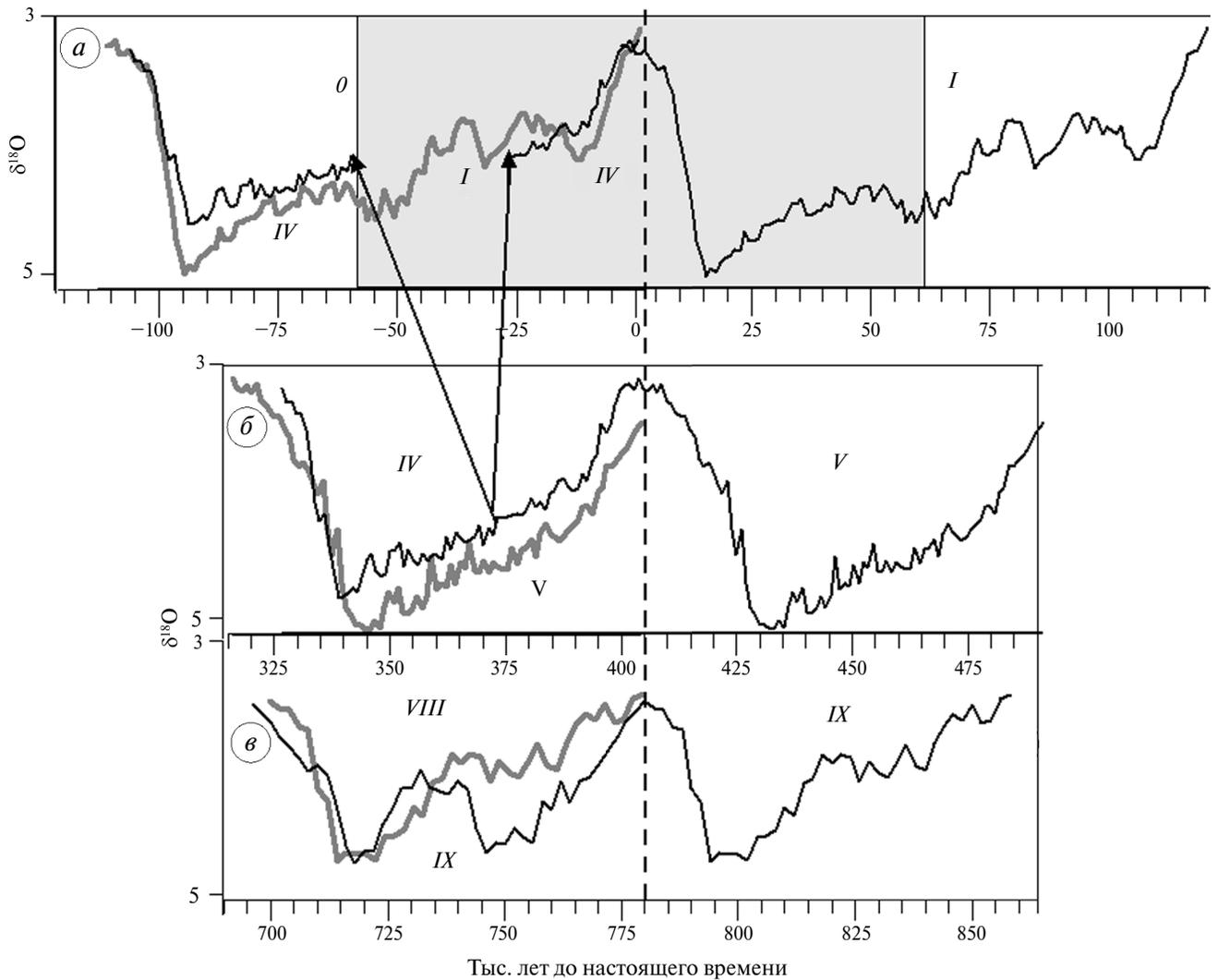
Будущий климатический ледниковый цикл *0* повторяет конфигурацию ледникового цикла *I* и, следовательно, будет иметь такую же продолжительность – примерно 120 тыс. лет. Отмечено, что оба климатических цикла не имеют ярко выраженной пилообразной формы, которая свойственна ледниковым циклам позднего плейстоцена. Конфигурация будущего ледникового цикла в начале и в конце имеет сходство с климатическим циклом *IV*, длительность которого составляет 76 тыс. лет (см. рис. 3, а). Здесь же показан 120-тыс. интервал ( $\pm 60$  тыс. лет), который подтверждается свойством самоподобия автокорреляционной функции хронологии LR04 за 1 млн лет (Ivashchenko et al., 2014).

На рис. 4 изображены пары климатических ледниковых циклов *I–0* и *V–IV*, которые совмещены по максимумам общих межледниковий. На обеих картинах амплитуд ВП (см. рис. 4, б, в) видны области повышенных значений амплитуд, которые соответствуют потеплениям межледниковий в вейвлетном масштабе 41 тыс. лет. Отсутствие таковых на протяжении всей полосы

масштабов прецессии в 23 тыс. лет, не считая краевых областей, объясняется слабыми циклами прецессии земной оси, связанными с минимумом эксцентриситета в эти периоды времени (см. рис. 2, б). При исследовании влияния на климат изменений орбитальных параметров Земли была обнаружена аналогия между временными интервалами 430–350 тыс. лет до н.в. и  $-30 \cdot 0 \cdot 50$  тыс. лет до н.в., которые являются частью *V–IV* и *I–0* ледниковых циклов, рассматриваемых выше. Эти интервалы считаются аналогичными из-за минимального эксцентриситета и сходных фаз колебаний прецессии земной оси (Crucifix et al., 2007).

С помощью обратного ВП построены комплексные реконструкции ряда LR04 по гармоникам циклов прецессии и наклона земной оси в вейвлетных масштабах от 16 до 64 тыс. лет (на картинах амплитуд, отмеченных фигурными скобками) для пар ледниковых циклов *I–0* и *V–IV*. Графики вещественной компоненты реконструкций (см. рис. 4, а, в) повторяют, хотя с уменьшенной амплитудой (примерно на четверть), в сглаженном виде все основные черты вышеуказанных ледниковых циклов. Это можно интерпретировать как климатическую значимость цикла наклона, и в меньшей мере цикла прецессии для рассматриваемых пар ледниковых циклов.

Комплексная реконструкция климатических колебаний хронологии LR04 в диапазоне вейвлетных масштабов 16–64 тыс. лет с применением обратного ВП была выполнена не только по вещественной компоненте, но и по мнимой (см. раздел Методы). Полученные реконструкции используются в качестве фазовых координат. Это позволяет графически, наглядно (рис. 5) представить динамику климата *V–IV* и *I–0* ледниковых циклов в двумерном пространстве состояний климатической системы. За границы циклов приняты максимумы вещественной компоненты обратного ВП, совпадающие с моментами главных максимумов межледниковий. В начале, середине и в конце сравниваемых пар ледниковых циклов можно заметить подобие формы, за исключением двух дополнительных витков колебаний в последнем (*I*) и будущем (*0*) ледниковых циклах из-за увеличения длительности ледниковых циклов после климатического сдвига в середине Брюнеса. Рисунок показывает динамическую аналогию сравниваемых пар ледниковых циклов.



**Рис. 3.** Сравнение трёх пар ледниковых циклов по данным  $\delta^{18}\text{O}$  хронологии LR04. Вертикальная пунктирная линия проведена через максимумы общих межледниковий каждой пары ледниковых циклов. Римскими цифрами указаны номера ледниковых циклов от настоящего времени. Ось Y перевёрнута. Серым прямоугольником отмечен временной интервал  $0 \pm 60$  тыс. лет. Чёрными линиями изображены пары ледниковых циклов I–0, V–IV, IX–VIII, в левых половинах серым цветом изображены I, V и IX ледниковые циклы соответственно (a, б, в). Стрелки указывают на IV ледниковый цикл (чёрная линия), наложенный на будущий (0) ледниковый цикл (a)

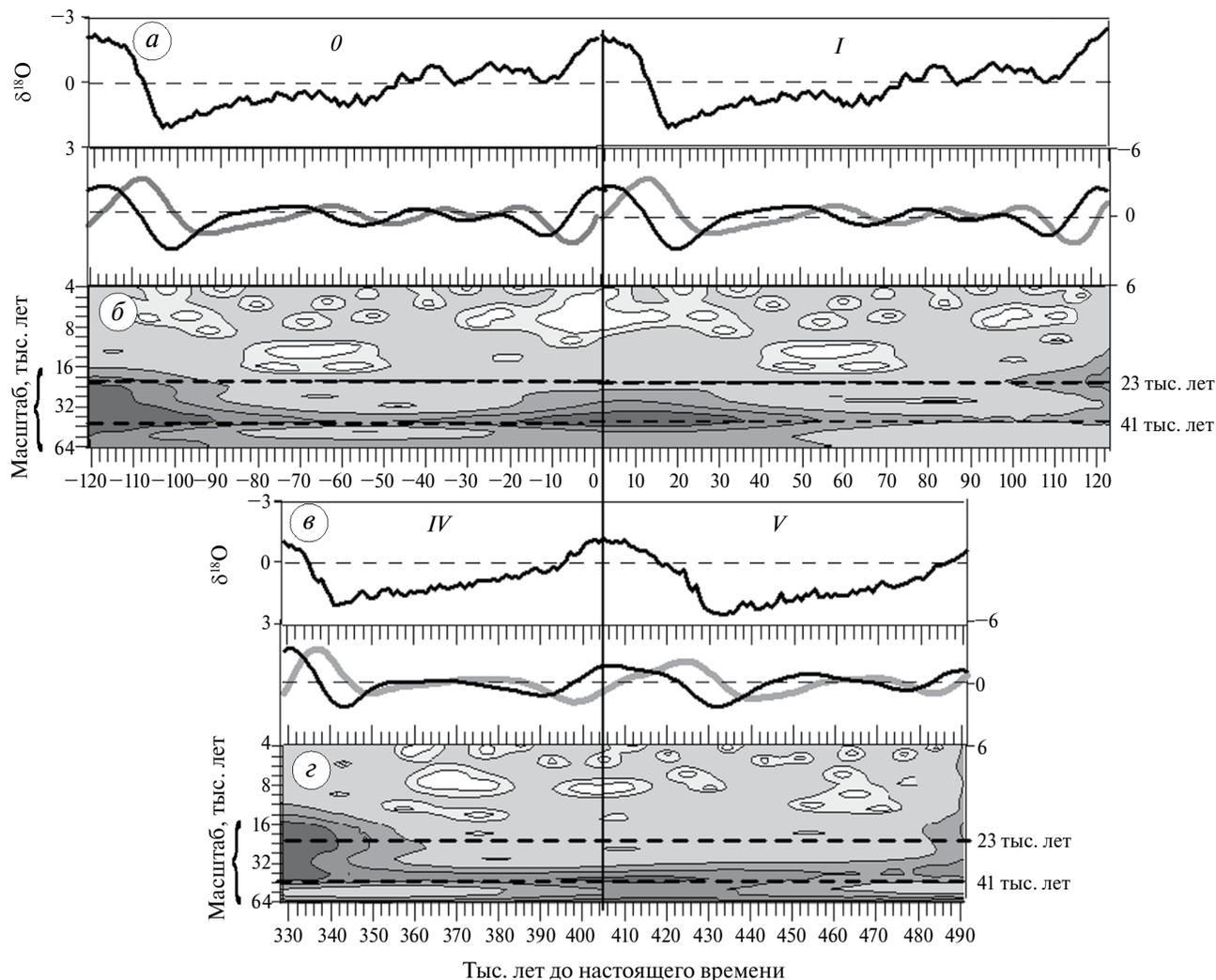
**Fig. 3.** Comparison of three pairs of glacial cycles according to the  $\delta^{18}\text{O}$  data of the LR04 chronology. A vertical dotted line is drawn through the maxima of the common interglacial periods of each pair of glacial cycles. Roman numerals indicate the numbers of glacial cycles from the present time. The Y-axis is inverted. The gray rectangle marks the temporal interval  $0 \pm 60$  kyr. The black lines depict pairs of glacial cycle I–0, V–IV, IX–VIII, in the left halves of the graphs, the I, V and IX glacial cycles are depicted in gray, respectively (a, б, в). The arrows point to the IV glacial cycle (black line) superimposed on the future (0) glacial cycle (a)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе конфигураций и длительностей ледниковых циклов позднего плейстоцена выявлены характерные свойства палеоклиматических записей в диапазоне масштабов от 900 тыс. лет до н.в., такие, как симметрия, подобие и гармония, проявляющаяся в закономерности и согласованности всех элементов климатической

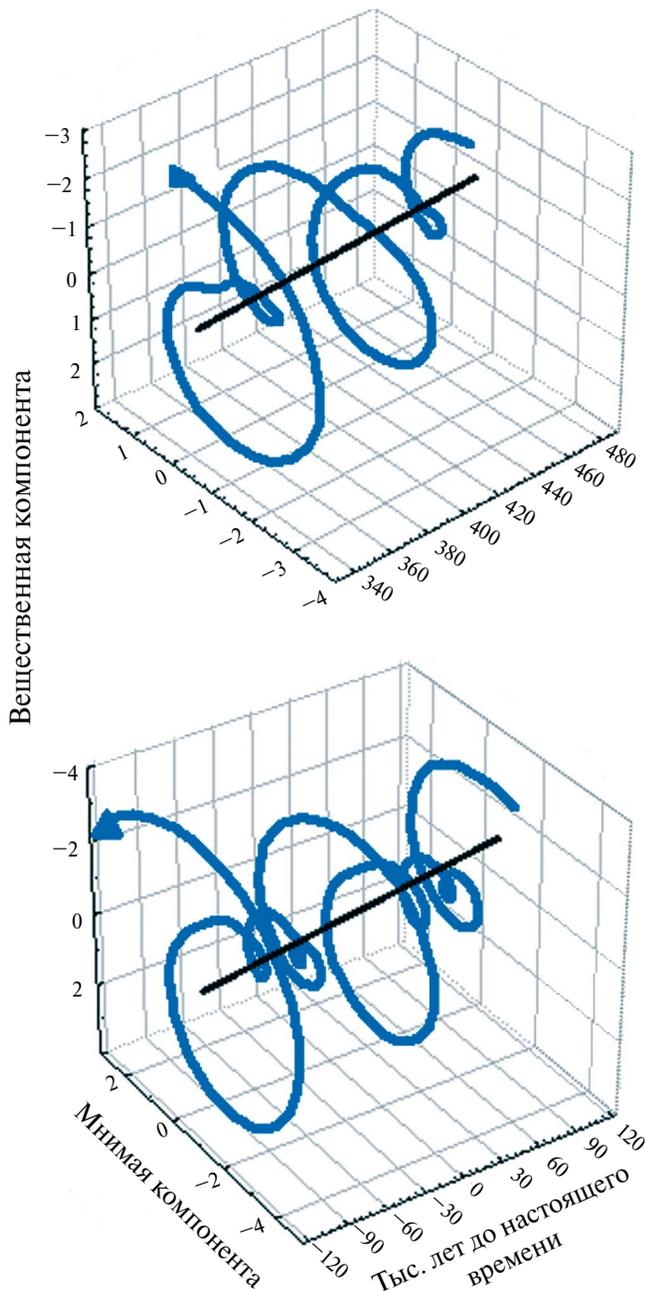
системы. Заключение о том, что мир стал более упорядоченным и предсказуемым около 450 тыс. лет до н.в., когда внутренние колебания в климатической системе стали равными воздействию циклов Миланковича (Berger, Wefer, 2003), хорошо согласуется с вышесказанным.

Проведённый анализ позволил в общих чертах изобразить будущий ледниковый цикл,



**Рис. 4.** Сравнение двух пар ледниковых циклов  $I-0$  и  $V-IV$  хронологии LR04. Вертикальная черная линия проведена через главные максимумы межледниковий  $IV$  и  $0$  ледниковых циклов – 405 тыс. лет до н.в. и 2 тыс. лет до н.в. соответственно; ось  $Y$  перевернута; фигурной скобкой обозначены масштабы реконструкции, горизонтальные пунктирные линии в картинах амплитуд вейвлетного преобразования проведены через вейвлетные масштабы 23 и 41 тыс. лет. Ледниковые циклы  $I-0$  (–119–0–123 тыс. лет до н.в.) и их комплексная реконструкция, полученная с помощью обратного ВП в диапазоне масштабов от 16 до 64 тыс. лет, вещественная компонента реконструкции – черная линия, мнимая компонента – серая ( $a$ ); картина амплитуд ВП с использованием вейвлетной функции Морле; области увеличенных значений амплитуд зачернены ( $b$ ); то же, что ( $a-b$ ), но для  $V-IV$  ледниковых циклов (491–329 тыс. лет до н.в.) ( $b-z$ )

**Fig. 4.** Comparison of two pairs of glacial cycles  $I-0$  and  $V-IV$  of the LR04 chronology. The vertical black line is drawn through the main maxima of the interglacial periods of glacial cycles  $IV$  and  $0$  – 405 ka and 2 ka, respectively; the  $Y$ -axis is inverted; the curly brackets indicate the scales of the reconstruction, the horizontal dotted lines in the wavelet transform amplitude patterns are drawn through the wavelet scales of 23 and 41 kyr. Glacial cycles  $I-0$  (–119–0–123 ka) and their complex reconstruction, obtained using the inverse wavelet transform in the scale range from 16 to 64 kyr, the real component of the reconstruction is a black line, the imaginary component is gray ( $a$ ); the amplitude pattern of the wavelet transform using the Morlet wavelet function; the areas of increased amplitude values are blackened ( $b$ ); the same as ( $a-b$ ), but for  $V-IV$  glacial cycles (491–329 ka) ( $b-z$ )



**Рис. 5.** Фазовые траектории динамики климата для V–IV ледниковых циклов (вверху) и для последнего и будущего (I–0) ледниковых циклов (внизу), полученные по компонентам комплексной реконструкции колебаний содержания  $\delta^{18}\text{O}$  в ряду LR04 в диапазоне вейвлетных масштабов от 16 до 64 тыс. лет

**Fig. 5.** Phase trajectories of climate dynamics for V–IV glacial cycles (above) and for the last and future (I–0) glacial cycles (below), obtained from components of the complex reconstruction of  $\delta^{18}\text{O}$  content variations in the LR04 series in the range of wavelet scales from 16 to 64 kyr

определить его конфигурацию, которая повторяет форму последнего I климатического ледникового цикла, и длительность – примерно 120 тыс. лет. Максимум оледенения приходится на 95 тыс. лет после н.в. Текущее межледниковье аналогично межледниковью MIS11 (продолжительностью 27 тыс. лет) (Tzedakis et al., 2012b) и будет иметь длительность примерно равную периоду цикла прецессии земной оси – 23 тыс. лет. Эти выводы не учитывают высокие антропогенные выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу, которые могут надолго отсрочить естественное наступление следующего ледникового периода.

Проявление упорядоченности и согласованности колебаний климата позднего плейстоцена обусловлено астрономическим происхождением климатических колебаний.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Госзадания № FMWE 2024-0015.

**Acknowledgements.** The work was carried out with the support of State Task No. FMWE 2024-0015.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большаков В.А. Исследование характеристик “среднеплейстоценового перехода” с помощью сопоставления изотопно-кислородной записи LR04 с орбитально-климатической диаграммой // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449. № 3. С. 338–341.
- Вакуленко Н.В., Иващенко Н.Н., Котляков В.М., Сонечкин Д.М. О бифуркации умножения периода ледниковых циклов в начале плейстоцена // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436. № 4. С. 1541–1544.
- Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Монин А.С., Сонечкин Д.М. Особенности календаря ледниковых циклов позднего плейстоцена // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 6. С. 773–782.
- Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Монин А.С., Сонечкин Д.М. Симметрия ледниковых циклов позднего плейстоцена по данным станций «Восток» и «Купол С» в Антарктике // Доклады Академии наук. 2005. Т. 407. № 1. С. 111–114.
- Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Сонечкин Д.М. Об увеличении изменчивости глобального климата примерно за 400 тыс. лет до настоящего времени // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. № 5. С. 600–603.  
<https://doi.org/10.7868/S0869565214170277>
- Barth A.M., Clark P.U., Bill N.S., He F., Piasias N.G. Climate evolution across the Mid-Brunhes Transition // Climate of the Past. 2018. V. 14. P. 2071–2087.  
<https://doi.org/10.5194/cp-14-2071-2018>

- Berger W.H., Wefer G.* On the dynamics of the ice ages: stage-11 paradox, mid-Brunhes climate shift, and 100-kyr cycle // *Earth's Climate and Orbital Eccentricity: the Marine Isotope Stage 11 Question*. 2003. V. 137. P. 41–59. <https://doi.org/10.1029/137GM04>
- Crucifix M., Loutre F., Berger A.* The Climate Response to the Astronomical Forcing // *Space Science Reviews*. 2007. V. 125 (1–4). P. 213–226. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-48341-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-0-387-48341-2_17)
- Hobart B., Lisiecki L.E., Rand D., Lee T., Lawrence C.E.* Late Pleistocene 100-kyr glacial cycles paced by precession forcing of summer insolation // *Nature Geoscience*. 2023. V. 16. P. 717–722. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01235-x>
- Imbrie J., Imbrie J.Z.* Modelling the climatic response to orbital variations // *Science*. 1980. V. 207. P. 943–953.
- Ivashchenko N.N., Kotlyakov V.M., Sonechkin D.M., Vakulenko N.V.* On bifurcations inducing glacial cycle lengthening during pliocene/pleistocene epoch // *International Journ. of Bifurcation and Chaos*. 2014. V. 24. № 8. 1440018. <https://doi.org/10.1142/S0218127414400185>
- Ivashchenko N.N., Kotlyakov V.M., Sonechkin D.M., Vakulenko N.V.* On the nature of the Pliocene / Pleistocene glacial cycle lengthening // *Global Perspectives on Geography*. 2013. V. 1. P. 9–20.
- Kawamura K, Aoki S., Nakazawa T., Abe-Ouchi A., Saito F.* Timing and duration of the last five interglacial periods from an accurate age model of the Dome Fuji Antarctic ice core // *American Geophysical Union, Fall Meeting*. 2010. Abstract ID PP43D-04.
- Laskar J., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B.* A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // *Astronomy and Astrophysics*. 2004. V. 428. P. 261–285.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E.* A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records // *Paleoceanology*. 2005. V. 20. PA1003. <https://doi.org/10.1029/2004PA001071>
- Loutre M.F., Berger A.* Marine Isotope Stage 11 as an analogue for the present interglacial // *Global and Planetary Change*. 2003. V. 36. № 3. P. 209–217. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(02\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(02)00186-8)
- McManus J.F., Oppo D.W., Cullen J.L.* Marine isotope stage 11 (MIS 11): analog for Holocene and future climate? In: A.W. Droxler, R.Z. Poore, L.H. Burckle. *Earth's Climate and Orbital Eccentricity: the Marine Isotope Stage 11. Question*. 2003. V. 137. P. 69–85.
- Rial J.A.* Pacemaking the ice ages by frequency modulation of Earth's orbital eccentricity // *Science*. 1999. V. 285. P. 564–568.
- Snyder C.* Evolution of global temperature over the past two million years // *Nature*. 2016. V. 38. P. 226–228. <https://doi.org/10.1038/nature19798>
- Talento S., Ganopolski A.* Reduced-complexity model for the impact of anthropogenic  $\text{CO}_2$  emissions on future glacial cycles // *Earth System Dynamics*. 2021. V. 12. P. 1275–1293. <https://doi.org/10.5194/esd-12-1275-2021>
- Tzedakis P.C., Channell J.E.T., Hodell D.A., Kleiven H.F., Skinner L.C.* Determining the natural length of the current interglacial // *Nature Geoscience. Letters*. 2012a. V. 5. Is. 2. P. 138–141. <https://doi.org/10.1038/NNGEO1358>
- Tzedakis P.C., Crucifix M., Mitsui T., Wolff E.W.* A simple rule to determine which insolation cycles lead to interglacials // *Nature*. 2017. V. 542. Is. 7642. P. 427–432. <https://doi.org/10.1038/nature21364>
- Tzedakis P.C., Hodell D.A., Nehrbass-Ahles C., Mitsui T., Wolff E.W.* Marine Isotope Stage 11c: An unusual // *Quaternary Science Reviews*. 2022. V. 284. 107493. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107493>
- Tzedakis P.C.* The MIS 11 – MIS 1 analogy, southern European vegetation, atmospheric methane and the “early anthropogenic hypothesis” // *Climate of the Past*. 2010. V. 6. P. 131–144. <https://doi.org/10.5194/cp-6-131-2010>
- Tzedakis P.C., Wolff E.W., Skinner L.C., Brovkin V., Hodell D.A., McManus J.F., Raynaud D.* Can we predict the duration of an interglacial? // *Climate of the Past*. 2012b. V. 8. P. 1473–1485. <https://doi.org/10.5194/cp-8-1473-2012>
- Tziperman E., Gildor H.* On the mid-Pleistocene transition to 100-kyr glacial cycles and the asymmetry between glaciation and deglaciation times // *Paleoceanography*. 2003. V. 18. № 1. 1001. <https://doi.org/10.1029/2001PA000627>
- Tziperman E., Raymo M.E., Huybers P., Wunsch C.* Consequences of pacing the Pleistocene 100-kyr ice ages by nonlinear phase locking to Milankovitch forcing // *Paleoceanography*. 2006. V. 21. PA4206. <https://doi.org/10.1029/2005PA0012415>
- Witkowski C.R., von der Heydt A.S., Valdes P.J., van der Meer M.T.J., Schouten S., Sinninghe Damsté J.S.* Continuous sterane and phytane  $\delta^{13}\text{C}$  record reveals a substantial  $\text{pCO}_2$  decline since the mid-Miocene // *Nature Communications*. 2024. V. 15. № 1. 5192. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47676-9>

Citation: *Vakulenko N.V., Sonechkin D.M. The future glacial cycle and its reflection in the glacial cycles of the Late Pleistocene. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (2): 315–326. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425020095*

## The Future Glacial Cycle and Its Reflection in the Glacial Cycles of the Late Pleistocene

© 2025 N. V. Vakulenko<sup>#</sup>, D. M. Sonechkin

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: vanava139@yandex.ru*

Received November 7, 2024; Revised February 16, 2025; Accepted April 18, 2025

As a result of applying the principle of symmetry and the similarity property to the glacial cycles of the Late Pleistocene, an analogy was found in the climate dynamics of the Milankovich glacial cycles. This made it possible to outline the future glacial cycle, determine its configuration and duration.

**Keywords:** Late Pleistocene, Milankovich glacial cycles, future glacial cycle, principles of symmetry and similarity, wavelet analysis

### REFERENCES

- Bolshakov V.A.* Study of parameters of the middle Pleistocene transition by comparison of the isotope-oxygen record LR04 with the orbital-climatic diagram. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2013, 449 (1): 338–341 [In Russian].
- Vakulenko N.V., Sonechkin D.M., Ivashchenko N.N., Kotlyakov V.M.* On periods of multiplying bifurcation of early Pleistocene glacial cycles. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2011, 436 (4): 1541–1544 [In Russian].
- Vakulenko N.V., Kotlyakov V.M., Monin A.S., Sonechkin D.M.* Significant features of the calendar of the late Pleistocene glacial cycles. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of the RAS. Physics of the atmosphere and ocean. 2007, 43 (6): 773–782 [In Russian].
- Vakulenko N.V., Kotlyakov V.M., Monin A.S., Sonechkin D.M.* Symmetry of Late Pleistocene glacial cycles in records of the Antarctic Vostok and DOME C stations. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2005, 407 (1): 111–114 [In Russian].
- Vakulenko N.V., Sonechkin D.M., Kotlyakov V.M.* Increase in the global climate variability from about 400 ka BP until present. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2014, 456 (5): 600–603. <https://doi.org/10.7868/S0869565214170277> [In Russian].
- Barth A.M., Clark P.U., Bill N.S., He F., Pisias N.G.* Climate evolution across the Mid-Brunhes Transition. *Climate of the Past*. 2018, 14: 2071–2087. <https://doi.org/10.5194/cp-14-2071-2018>
- Berger W.H., Wefer G.* On the dynamics of the ice ages: stage-11 paradox, mid-Brunhes climate shift, and 100-kyr cycle. *Earth's Climate and Orbital Eccentricity: the Marine Isotope Stage 11 Question*. 2003, 137: 41–59. <https://doi.org/10.1029/137GM04>
- Crucifix M., Loutre F., Berger A.* The Climate Response to the Astronomical Forcing. *Space Science Reviews*. 2007, 125 (1–4): 213–226. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-48341-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-0-387-48341-2_17)
- Hobart B., Lisiecki L.E., Rand D., Lee T., Lawrence C.E.* Late Pleistocene 100-kyr glacial cycles paced by precession forcing of summer insolation. *Nature Geoscience*. 2023, 16: 717–722. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01235-x>
- Imbrie J., Imbrie J.Z.* Modelling the climatic response to orbital variations. *Science*. 1980, 207: 943–953.
- Ivashchenko N.N., Kotlyakov V.M., Sonechkin D.M., Vakulenko N.V.* On bifurcations inducing glacial cycle lengthening during pliocene/pleistocene epoch. *International Journ. of Bifurcation and Chaos*. 2014, 24 (8): 1440018. <https://doi.org/10.1142/S0218127414400185>
- Ivashchenko N.N., Kotlyakov V.M., Sonechkin D.M., Vakulenko N.V.* On the nature of the Pliocene/Pleistocene glacial cycle lengthening. *Global Perspectives on Geography*. 2013, 1: 9–20.
- Kawamura K., Aoki S., Nakazawa T., Abe-Ouchi A., Saito F.* Timing and duration of the last five interglacial periods from an accurate age model of the Dome Fuji Antarctic ice core. *American Geophysical Union, Fall Meeting*. 2010: PP43D-04.

- Laskar J., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Laskar B.* A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy and Astrophysics*. 2004, 428: 261–285.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E.* A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. *Paleoceanology*. 2005, 20: PA1003.  
<https://doi.org/10.1029/2004PA001071>
- Loutre M.F., Berger A.* Marine Isotope Stage 11 as an analogue for the present interglacial. *Global and Planetary Change*. 2003, 36 (3): 209–217.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(02\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(02)00186-8)
- McManus J.F., Oppo D.W., Cullen J.L.* Marine isotope stage 11 (MIS 11): analog for Holocene and future climate? In: A.W. Droxler, R.Z. Poore, L.H. Burckle. *Earth's Climate and Orbital Eccentricity: the Marine Isotope Stage 11. Question*. 2003, 137: 69–85.
- Rial J.A.* Pacemaking the ice ages by frequency modulation of Earth's orbital eccentricity. *Science*. 1999, 285: 564–568.
- Snyder C.* Evolution of global temperature over the past two million years. *Nature*. 2016, 38: 226–228.  
<https://doi.org/10.1038/nature19798>
- Talento S., Ganopolski A.* Reduced-complexity model for the impact of anthropogenic  $\text{CO}_2$  emissions on future glacial cycles. *Earth System Dynamics*. 2021, 12: 1275–1293.  
<https://doi.org/10.5194/esd-12-1275-2021>
- Tzedakis P.C., Channell J.E.T., Hodell D.A., Kleiven H.F., Skinner L.C.* Determining the natural length of the current interglacial. *Nature Geoscience. Letters*. 2012a, 5 (2): 138–141.  
<https://doi.org/10.1038/NNGEO1358>
- Tzedakis P.C., Crucifix M., Mitsui T., Wolff E.W.* A simple rule to determine which insolation cycles lead to interglacials. *Nature*. 2017, 542 (7642): 427–432.  
<https://doi.org/10.1038/nature21364>
- Tzedakis P.C., Hodell D.A., Nehrbass-Ahles C., Mitsui T., Wolff E.W.* Marine Isotope Stage 11c: An unusual. *Quaternary Science Reviews*. 2022, 284: 107493.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107493>
- Tzedakis P.C.* The MIS 11 – MIS 1 analogy, southern European vegetation, atmospheric methane and the “early anthropogenic hypothesis”. *Climate of the Past*. 2010, 6: 131–144.  
<https://doi.org/10.5194/cp-6-131-2010>
- Tzedakis P.C., Wolff E.W., Skinner L.C., Brovkin V., Hodell D.A., McManus J.F., Raynaud D.* Can we predict the duration of an interglacial? *Climate of the Past*. 2012b, 8: 1473–1485.  
<https://doi.org/10.5194/cp-8-1473-2012>
- Tziperman E., Gildor H.* On the mid-Pleistocene transition to 100-kyr glacial cycles and the asymmetry between glaciation and deglaciation times. *Paleoceanography*. 2003, 18 (1): 1001.  
<https://doi.org/10.1029/2001PA000627>
- Tziperman E., Raymo M.E., Huybers P., Wunsch C.* Consequences of pacing the Pleistocene 100-kyr ice ages by nonlinear phase locking to Milankovitch forcing. *Paleoceanography*. 2006, 21: PA4206.  
<https://doi.org/10.1029/2005PA001241>
- Witkowski C.R., von der Heydt A.S., Valdes P.J., van der Meer M.T.J., Schouten S., Sinninghe Damsté J.S.* Continuous sterane and phytane  $\delta^{13}\text{C}$  record reveals a substantial  $\text{pCO}_2$  decline since the mid-Miocene. *Nature Communications*. 2024, 15 (1): 5192.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-024-47676-9>