

ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ GEOMORPHOLOGY AND EVOLUTIONARY GEOGRAPHY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-489-499>

УДК 551.89



О закономерностях изменения глобального уровня моря в позднем четвертичном периоде

А.А. Екайкин^{1,2✉}, Н.Д. Дятлова³

¹ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² Институт географии РАН, Москва, Россия

³ Высшая школа экономики, Москва, Россия

✉ ekaykin@aari.ru

AAE, 0000-0001-9819-2802

Аннотация. Исследование посвящено анализу некоторых закономерностей изменения среднего глобального уровня Мирового океана в позднем четвертичном периоде (последние 800 тыс. лет). В качестве фактического материала были использованы недавно опубликованные наиболее детальные и надежные сводные ряды уровня моря и средней глобальной приземной температуры за интересующий нас интервал времени. В масштабе 100-тысячелетнего цикла между двумя параметрами наблюдается простая линейная зависимость (ниже температура — ниже уровень моря), однако при более детальном рассмотрении выявляются необычные особенности: 1) максимумы и минимумы уровня моря запаздывают относительно максимумов и минимумов температуры на, соответственно, $4,7 \pm 1,1$ и $7,8 \pm 2,1$ тыс. лет; 2) минимальные стояния океана наблюдаются при приблизительно одинаковых аномалиях глобальной температуры ($-4,7 \pm 0,2$ °C относительно доиндустриального уровня), при этом никакой корреляции с самим значением уровня моря не наблюдается. Аналогична и ситуация с максимальными стояниями океана. Согласно нашей гипотезе, кажущееся запаздывание уровня моря объясняется тем фактом, что максимальные (минимальные) уровни океана связаны не с температурой как таковой, а с накопленной суммой положительных (отрицательных) аномалий температуры за предшествующий теплый (холодный) период. Иными словами, ряд уровня моря является функцией интегрально-разностной кривой (ИРК) температуры. Для иллюстрации этой гипотезы мы построили ИРК температуры для интервала 460–360 тыс. л. н., которая удовлетворительно объясняет основные тенденции изменения уровня моря во время морских изотопных стадий 12 и 11.

Ключевые слова: плейстоцен, уровень моря, оледенение, глобальная температура, интегрально-разностные кривые

Для цитирования: Екайкин А.А., Дятлова Н.Д. О закономерностях изменения глобального уровня моря в позднем четвертичном периоде. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(4):489–499. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-489-499>

Поступила 25.08.2025

После переработки 20.11.2025

Принята 24.11.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

On the global sea level change during the Late Quaternary


Alexey A. Ekaykin^{1,2✉}, Natalia D. Dyatlova³

¹ State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

³ Higher School of Economics, Moscow, Russia

✉ekaykin@aari.ru

 AAE, 0000-0001-9819-2802

Abstract. The study is aimed at identifying the most general patterns of changes in the average global sea level in the Late Quaternary (the last 800 thousand years). The factual material used included recently published most detailed and reliable stacked series of the Global Sea Level (GSL) and Global Mean Surface Temperature (GMST) for the given time interval. On the scale of a 100-ka cycle, a simple linear relationship is observed between the two parameters (lower temperature – lower sea level), but upon closer examination, unusual features are revealed: 1) sea level maxima and minima are delayed relative to temperature maxima and minima by 4.7 ± 1.1 and 7.8 ± 2.1 thousand years, respectively; 2) ocean low stands are observed at approximately the same GMST anomalies (-4.7 ± 0.2 °C relative to the pre-industrial), while there is no correlation with the sea level value itself. The situation with the ocean high stands is similar. According to our hypothesis, the apparent delay in the sea level is explained by the fact that the maximum (minimum) ocean levels are not related to temperature *per se*, but to the accumulated sum of positive (negative) temperature anomalies over the previous warm (cold) period. In other words, the sea level series is a function of the integral-difference curve (IDC) of temperature. To illustrate this hypothesis, we have constructed a temperature IDC for the time interval between 460 and 360 thousand years ago, which satisfactorily explains the main trends in sea level change during marine isotope stages 12 and 11.

Keywords: Pleistocene, sea level, glaciation, global temperature, integral-difference curves

For citation: Ekaykin A.A., Dyatlova N.D. On the global sea level change during the Late Quaternary. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):489–499. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-489-499>

Received 25.08.2025

Revised 20.11.2025

Accepted 24.11.2025

Введение

Рост уровня моря является одним из наиболее зримых и очевидных проявлений современных климатических изменений. Между 2006 и 2018 гг. уровень океана рос со скоростью 3,6 мм/год, причем 44 % этой величины обеспечивается таянием ледников и ледниковых щитов, а 56 % — тепловым расширением воды и изменением объема вод суши [1]. В предстоящие десятилетия рост уровня моря будет идти с ускорением, и прогнозы итогового повышения подъема уровня океана к концу XXI в. имеют очень большой разброс — от 28–55 см при низких выбросах парниковых газов (ПГ) до 63–110 см при высоких выбросах [2]. Одной из основных причин этой неопределенности прогнозов является недостаточное понимание будущего поведения Антарктического ледникового щита, который может быть подвержен динамически нестабильным процессам, способным относительно быстро (в пределах первых сотен лет) разрушить значительную часть ледника [1].

В этом контексте внимание исследователей привлекают палеогеографические данные, поскольку известно, что во время некоторых прошлых неоплейстоценовых межледниковий уровень моря был существенно выше, чем в голоцене. В качестве примера можно привести оптимум 5-й морской изотопной стадии (МИС) около 130–125 тыс. л. н. (рис. 1), когда уровень моря поднимался на 6–9 м выше со-

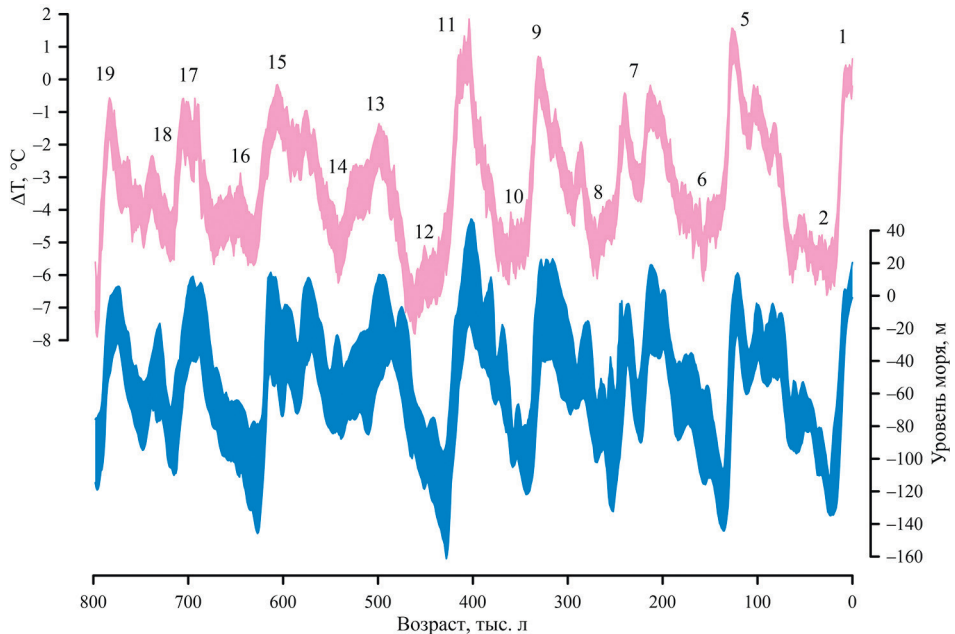


Рис. 1. Ряды уровня моря и средней глобальной приземной температуры воздуха в позднем четвертичном периоде (последние 800 тыс. лет) по данным [9] и [10]. Цифрами обозначены номера морских изотопных стадий, заливкой — пределы погрешности значений (доверительные интервалы). Температура представлена в виде отклонения от среднего значения за 2000 лет, предшествующих началу индустриального периода

Fig. 1. The time-series of the global mean sea level and global mean surface air temperature in the Late Quaternary (the last 800 ka) based on data from [9] and [10]. The numbers denote Marine Isotope Stages, the shading is the error limits (confident intervals). The temperature is presented as a deviation from the average value over the 2,000 years preceding the beginning of the industrial period

временного [3] при том, что средняя глобальная температура воздуха была выше доиндустриальной лишь на $0,7 \pm 0,6$ °C, а уровень CO_2 в атмосфере был на уровне доиндустриальных значений [4].

В данной работе мы используем недавно опубликованные наиболее надежные реконструкции средней глобальной приземной температуры воздуха и среднего уровня океана для позднего четвертичного периода (неоплейстоцен и голоцен, последние 800 тыс. лет) для того, чтобы исследовать основные закономерности изменения уровня Мирового океана в рамках ледниково-межледниковых циклов.

Материалы и методы

Одним из основных источников информации об уровне моря и глобальной температуре являются морские донные осадки. Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) раковин фораминифер в этих осадках зависит от двух параметров — от температуры и изотопного состава морской воды. Первый параметр определяет коэффициент фракционирования при образовании морских карбонатов [5], а второй — объем воды в океане, в свою очередь связанный с объемом континентального льда [6]. Чем больше льда (обедненного тяжелыми изотопами кислорода) — тем больше концентрация кислорода 18 в морской воде. Разделить эти два фактора можно с помощью

дополнительных палеотемпературных индикаторов — например, по соотношению Mg/Ca в раковинах фораминифер в донных осадках [7]. Определение возраста слоев в индивидуальных кернх морских донных осадков выполняется с помощью различных методов, включающих радиоизотопное датирование, использование хроностратиграфических маркеров и т. д. [6]. При построении сводных рядов индивидуальные ряды совмещаются друг с другом с помощью методов графической корреляции [8].

Наиболее надежный и полный сводный ряд уровня моря опубликован в работе [9] и охватывает последние 798 тыс. лет с разрешением 1 тыс. лет. Ряд построен по 7 отдельным временным сериям, выполненным разными методами (по изотопному составу планктонных и бентосных видов фораминифер в морских донных осадках, по другим независимым прокси-данным (морским кораллам), по модели объема континентального льда и др.). Для выделения общего сигнала был использован метод главных компонент, и для построения сводного ряда индивидуальные ряды были приведены к общей хроностратиграфической шкале LR04 [8].

Ряд температуры за тот же период времени опубликован в работе [10], его разрешение также составляет 1 тыс. лет. По данным кернов морских донных осадков реконструируется температура поверхности океана, по которой с помощью моделей общей циркуляции атмосферы рассчитывается средняя глобальная приземная температура воздуха.

Погрешность датировки палеоклиматических рядов по морским донным осадкам довольно велика и достигает 4 тыс. лет [9, 10]. Однако это не оказывает существенного влияния на выводы данной работы, поскольку оба ряда (уровень моря и температура) построены с использованием одной и той же хроностратиграфической шкалы LR04 и относительная погрешность датировки между двумя рядами минимальна.

Ряд уровня моря по [9] и ряд температуры по [10] представлены на рис. 1. Погрешности значений рядов, показанные на рисунке, взяты из цитируемых работ.

Уже после того, как данная статья была подана в редакцию, был опубликован новый сводный ряд глобального уровня Мирового океана, охватывающий последние 4,5 млн лет [11]. Однако в своей наиболее молодой части (неоплейстоцен и голоцен, последние 800 тыс. лет) этот ряд мало отличается от предыдущего сводного [9], поэтому выводы данной работы не зависят от того, какие ряды будут использованы в расчетах.

В данной работе к указанным рядам были применены такие статистические методы, как расчет парной линейной корреляции, выражаемой коэффициентом корреляции Пирсона, а также линейной регрессии, выражаемой угловым коэффициентом линейного уравнения, связывающего два исследуемых параметра. Значимость коэффициента корреляции оценивается с помощью критерия Стьюдента и выражается p -значением, которое представляет собой вероятность того, что нулевая гипотеза об отсутствии корреляции между изучаемыми параметрами является верной.

В работе также рассчитываются интегрально-разностные кривые (ИРК) изучаемых характеристик. В общем виде ИРК представляет собой сумму аномалий значений ряда: $\sum(x_i - x_{кр})$, где $x_{кр}$ — некое критическое значение параметра.

Результаты и обсуждение

Прежде всего привлекает внимание относительно большая погрешность значений. Для ряда температуры она составляет $\pm 0,65$ °C, для ряда уровня моря ± 23 метра (доверительные интервалы).

Несмотря на эти погрешности, связь между двумя параметрами очевидна: в холодные эпохи уровень моря ниже за счет разрастания ледяных щитов (в основном в Северном полушарии) и увеличения плотности воды, а в межледниковья он выше. Этот вывод подтверждается и коэффициентом корреляции между двумя рядами, который равен $0,77 \pm 0,02$ ($p < 0,0001$), рис. 2. Линейная регрессия показывает, что при увеличении глобальной температуры на 1°C средний глобальный уровень моря растет почти на 15 м.

При более пристальном рассмотрении выясняется, что эта зависимость сложнее, чем кажется на первый взгляд. Так, на нисходящей фазе климатического цикла (при похолодании) уровень моря, как правило, заметно выше, чем на восходящей фазе (при переходе от максимума оледенения к межледниковью) при тех же значениях температуры, а экстремумы уровня моря не синхронны экстремумам температуры (рис. 2). Уровень моря во время теплых фаз МИС 1, МИС 5, МИС 7 и МИС 9 приблизительно одинаков (в пределах погрешности значений), при том что температура этих межледниковий существенно различается (рис. 1).

Максимальный уровень моря (+18,5 м) наблюдался во время МИС 11, хотя максимальная температура этой теплой стадии несущественно отличается от температуры МИС 5 (рис. 1). Наконец, уровень моря во время холодной стадии МИС 16 существенно ниже, чем во время МИС 10, при том что МИС 16 была теплее (рис. 1).

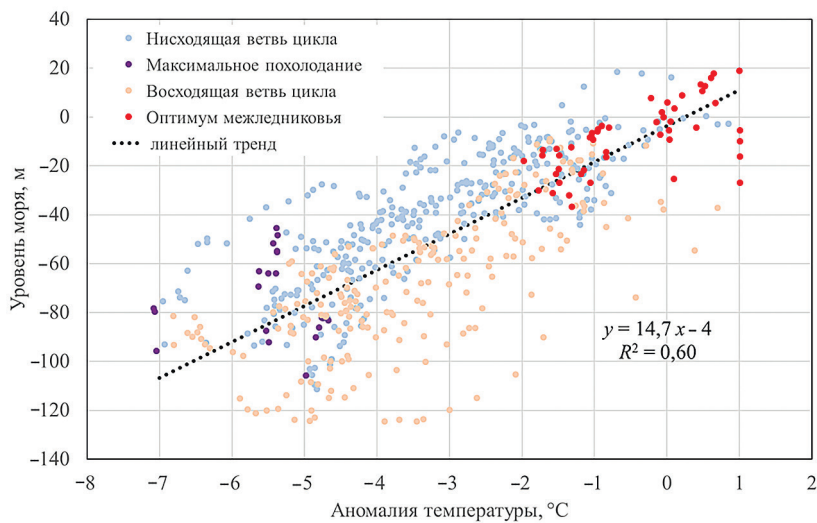


Рис. 2. Поле корреляции между уровнем моря и аномалией приземной температуры для позднего четвертичного периода.

Цветом обозначены различные фазы климатического цикла: нисходящая ветвь (похолодание) — светло-голубой, максимальное понижение температуры — синий, восходящая ветвь — светло-оранжевый, оптимумы межледниковий — красный. Пунктирная линия и уравнение относятся ко всей совокупности точек поля корреляции

Fig. 2. The correlation field between the sea level and surface temperature anomaly for the Late Quaternary.

The color denotes different phases of climatic cycles: light blue is downward part (cooling), blue is maximum of cooling, light orange is upward part (warming), red is interglacial optimum

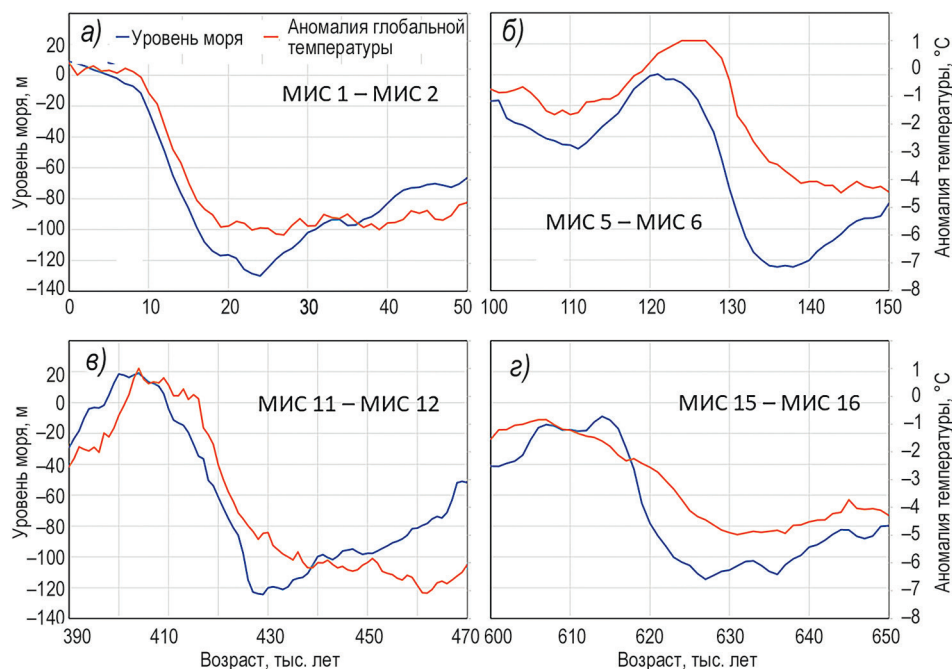


Рис. 3. Сопоставление хода уровня моря и температуры во время некоторых переходов от холодных к теплым стадиям: а) от максимума последнего оледенения (МИС 2) к голоцену (МИС 1); б) от предпоследнего ледникового максимума (МИС 6) к предыдущему межледниковью (МИС 5); в) от МИС 12 к МИС 11 и г) от МИС 16 к МИС 15. Шкала времени направлена справа налево

Fig. 3. Comparison of the sea level and temperature during several climatic transitions: а) from the Last Glacial Maximum (MIS 2) to Holocene (MIS 1); б) from the Previous Glacial Maximum (MIS 6) to the Penultimate Interglacial (MIS 5); в) from MIS 12 to MIS 11 and г) from MIS 16 to MIS 15. The time on the X axis goes from right to left

При более детальном рассмотрении некоторых из наиболее ярких климатических событий позднего четвертичного периода (рис. 3) видно, что экстремумы уровня моря имеют тенденцию к запаздыванию относительно экстремумов температуры, при этом минимумы уровня моря запаздывают относительно минимума температуры в среднем на $7,8 \pm 2,1$ тыс. лет (от 0 до 18 тыс. лет), а максимумы — на $4,7 \pm 1,1$ тыс. лет (от 0 до 9 тыс. лет).

Впрочем, для минимальных уровней моря время запаздывания определить не просто, поскольку во время наиболее холодных стадий цикла температура часто долго держится на одном уровне и точку экстремума бывает определить сложно (рис. 3а и 3б).

Рассмотрим ситуацию с другой стороны: определим, при каких температурах имеют место максимумы и минимумы уровня моря (рис. 4а и 4б).

Выясняется, что независимо от того, какова была минимальная температура воздуха во время холодных стадий, минимальные уровни моря практически всегда наблюдаются при очень схожих значениях температуры, $-4,7 \pm 0,2$ °C (обозначим ее как $t^{\circ+}$, поскольку это температура, при которой происходит переход от снижения уровня моря к его росту). Погрешность этого значения существенно меньше погрешности значений температурного ряда, которая, как указано выше, составляет

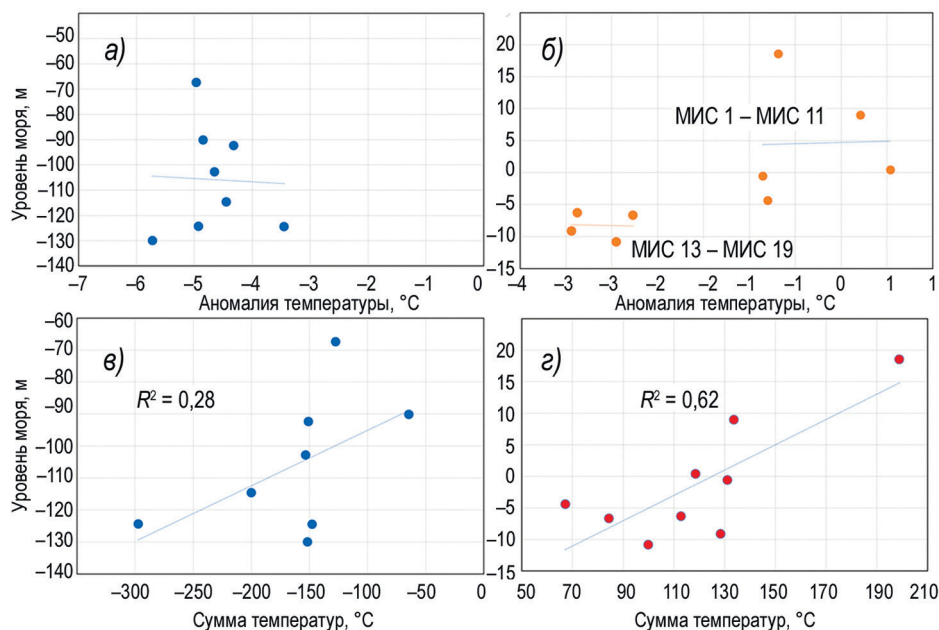


Рис. 4. Температура во время минимумов (а) и максимумов (б) уровня моря в неоплейстоцене; в) и г) — минимальные (в) и максимальные (г) значения уровня моря как функция накопленных сумм температурных аномалий во время предшествующих холодных (в) и теплых (г) стадий Fig. 4. The temperature during minima (а) and maxima (б) of the sea level in the Late Quaternary. в) and г) are the minimal (в) and maximal (г) values of the sea level as a function of accumulated sums of temperature anomalies during the preceding cold (в) and warm (г) stages

0,65 °C — иными словами, с учетом погрешности температура $t^{\circ+}$, при которой имеют место минимальные уровни океана, одинакова. Сами же значения уровня моря при этом могут меняться в широких пределах, от -67 до -130 м, не обнаруживая никакой корреляции с температурой. В качестве примера можно привести МИС 12, которая была экстремально холодной, но при этом уровень моря был примерно такой же, как во время МИС 2 и МИС 6 (рис. 3).

Схожая картина наблюдается и для максимумов уровня моря (рис. 4б), но при этом точки четко разбиваются на 2 кластера, соответствующих более древним (МИС 13 — МИС 19, 800–500 тыс. л. н.) и более молодым (МИС 1 — МИС 11, 400–0 тыс. л. н.) межледниковьям. Внутри этих кластеров корреляции не наблюдаются, но для древних межледниковий характерен более низкий уровень моря (от -11 до -6 м) при значениях температуры (обозначим ее $t^{\circ+}$) $-2,6 \pm 0,2$ °C, а для молодых межледниковий — более высокий уровень моря (от -4 до +19 м) при значениях $t^{\circ+}$, равных $-0,3 \pm 0,3$ °C.

Необходимо отметить, что довольно сложно объяснить наблюдаемое запаздывание уровня моря относительно температуры. Безусловно, ледниковые щиты — самый инерционный компонент земной системы, с отставанием реагирующий на изменения климата, но едва ли время запаздывания может достигать 10–18 тыс. лет. Кроме того, в этом случае непросто обосновать тот факт, что время запаздывания так сильно различается для разных климатических циклов. Наконец, эта концепция не объясняет постоянство значений $t^{\circ+}$ и $t^{\circ+}$ для разных циклов.

В качестве рабочей гипотезы предположим, что существуют критические значения температур ($t^{\circ+}$ и $t^{\circ*}$), выше (ниже) которых ледниковый щит теряет (накапливает) массу независимо от того, какой тренд температуры наблюдается в этот период. В этом случае максимальный (минимальный) уровень моря должен быть функцией длительности предшествующей теплой (холодной) стадии. Проверка этой гипотезы показала, что минимальный уровень моря обнаруживает слабую отрицательную корреляцию с длиной предшествующего холодного периода ($r = -0,41 \pm 0,37$), но эта корреляция не значима. Для максимального уровня моря корреляция с длительностью предшествующей теплой стадии составляет $0,59 \pm 0,30$ ($p = 0,1$).

Далее, можно предположить, что имеет значение не только длительность холодных и теплых периодов, но и сопутствующие им температуры. Действительно, чем выше температура в теплую эпоху — тем интенсивнее тает лед и тем выше уровень моря при одной и той же длине теплой стадии; аналогично, чем ниже температура, тем ниже ожидаемый уровень моря в конце холодной стадии. В этом случае минимальный уровень моря является функцией накопленной суммы температур во время предшествующего холодного периода, а максимальный уровень моря является функцией накопленной суммы температур во время предшествующего теплого периода. Поскольку максимальные аномалии температуры межледниковий могут быть как выше, так и ниже нуля, то для расчета накопленной суммы мы использовали не сами значения температур, а положительные разности ($t^{\circ}_{\max} - t^{\circ}$), где t°_{\max} — референсная температура, значение которой должно быть выше самого высокого значения ряда температур за 800 тыс. лет ($+1,01$ °C). Корреляция минимальных значений уровня моря с накопленной суммой температур составляет $0,53 \pm 0,35$ ($p = 0,18$) (рис. 4б), а корреляция максимальных значений уровня с накопленной суммой ($t^{\circ}_{\max} - t^{\circ}$) равна $0,79 \pm 0,23$ ($p = 0,02$) (рис. 4з). Таким образом, можно с большой долей вероятности утверждать, что максимальные уровни моря во время межледниковий действительно зависят от накопленной суммы температур, тогда как для минимумов связь не так очевидна. Плохая корреляция минимальных значений уровня с суммой температур может объясняться сложностью в определении начальной точки холодной стадии. Другим объяснением может служить существование физического предела роста объема ледниковых щитов, например, при достижении ими края континентального шельфа и т. д. — в этом случае дальнейшее накопление экстремально низких температур не приведет к дополнительному снижению уровня моря.

Таким образом, можно сформулировать, что уровень моря является функцией интегрально-разностной кривой (ИРК) температуры воздуха. Для иллюстрации этого вывода в качестве примера построим ИРК температуры для стадий МИС 12 — МИС 11 и сравним ее с уровнем моря.

Во время холодной стадии МИС 12 рост температуры начинается 461 тыс. л. н. при аномалии температуры $-7,1$ °C (рис. 5) — это одно из самых низких значений температуры Земли на протяжении всего неоплейстоцена (рис. 1). Снижение уровня моря продолжается после этого еще на протяжении примерно 30 тыс. лет до тех пор, пока температура не достигнет значения $t^{\circ+}$ ($-4,9$ °C), и в этот момент снижение уровня сменяется резким ростом.

ИРК для этого участка строится по формуле $\sum(t^{\circ} - t^{\circ+})k$, где k — масштабирующий коэффициент для перевода накопленной суммы температур в уровень моря. По мере приближения к $t^{\circ+}$ разность температур уменьшается, что и обуславливает уменьшение скорости понижения уровня моря.

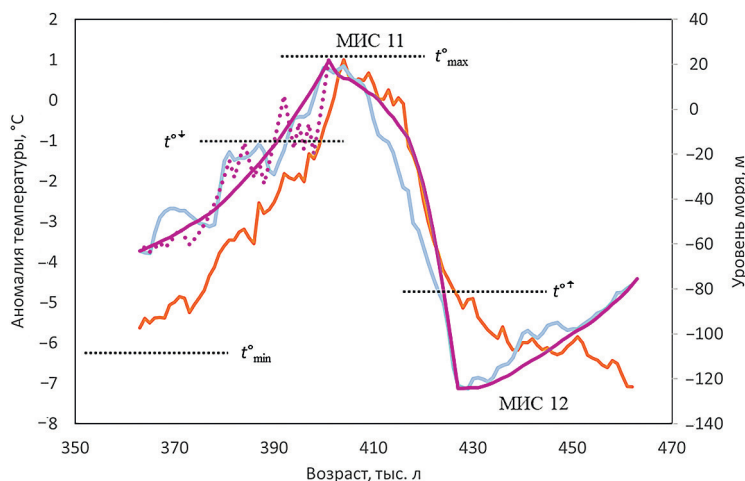


Рис. 5. Уровень моря (голубой) и температура (красный) во время МИС 12 и МИС 11. Фиолетовые линии — интегрально-разностные кривые (ИРК) температуры. $t^{\circ+}$ и $t^{\circ+}$ — температуры, при которых имеют место, соответственно, максимум и минимум уровня моря. t°_{\min} и t°_{\max} — вспомогательные температуры, используемые для расчета ИРК. Шкала времени направлена справа налево

Fig. 5. The sea level (blue) and temperature (red) during MIS 12 and MIS 11. The magenta lines are the integral-difference curves (IDC) of the temperature. $t^{\circ+}$ and $t^{\circ+}$ are the temperatures corresponding to, relatively, maximal and minimal sea levels. t°_{\min} and t°_{\max} are the auxiliary temperatures used to calculate the IDC. The time on the X axis goes from right to left

Следующий этап — резкий переход от ледниковых условий к межледниковым, который длится на протяжении 10 тыс. лет. Начиная с 416 тыс. л. н. скорость потепления резко замедляется, а 404 тыс. л. н. температура достигает максимума на отметке $+1,0^{\circ}\text{C}$. На протяжении всего этого периода уровень моря растет (хотя скорость роста замедляется 407 тыс. л. н.), и рост продолжается и при снижении температуры, пока последняя не достигнет значения $t^{\circ+}$ ($-0,35^{\circ}\text{C}$) около 401 тыс. л. н. На протяжении этого этапа ИРК рассчитывается по формуле $\sum(t^{\circ}_{\max} - t^{\circ})k$. Значение t°_{\max} ($+1,1^{\circ}\text{C}$) выступает в качестве настроечного параметра и подбирается таким образом, чтобы ИРК максимально близко воспроизвела кривую уровня моря. Отметим, впрочем, что t°_{\max} оказалась практически равна действительной максимальной температуре во время МИС 11.

На заключительном этапе температура и уровень моря снижаются в сторону минимальных значений МИС 10, которые остаются за пределами данного эксперимента. На фоне общего похолодания наблюдаются относительно короткопериодные колебания температуры, которые проявляются и в ряде уровня моря. ИРК рассчитывается по формуле $\sum(t^{\circ}_{\min} - t^{\circ})k$, где t°_{\min} — очередной настроечный параметр. Его значение равно $-6,2^{\circ}\text{C}$, что близко минимальной температуре МИС 10 ($-5,64^{\circ}\text{C}$), которая имела место 362 тыс. л. н. При такой схеме построения ИРК модель не может воспроизвести мелкомасштабные колебания уровня моря, но если разность $(t^{\circ}_{\min} - t^{\circ})$ брать с тем знаком, который соответствует знаку тренда температуры (минус для похолодания и плюс для потепления), то ИРК в какой-то степени воспроизводит и эти колебания (пунктирная линия на рис. 5).

Если бы мы продолжили эксперимент дальше, то для заключительной стадии МИС 10 мы бы использовали ту же схему расчета ИРК, что и для стадии МИС 12 ($\Sigma(t^\circ - t^{\circ*})k$), для МИС 9 — ту же схему, что и для МИС 11, и т. д.

Выводы

Таким образом, кажущееся «запаздывание» уровня моря относительно температуры может быть объяснено тем, что объем льда является функцией интегрально-разностной кривой средней глобальной приземной температуры воздуха. Минимальные и максимальные уровни океана связаны с накопленной суммой температур во время предшествующих холодных и теплых стадий. Именно этим объясняется аномально высокий уровень океана во время МИС 11, которая была необычайно длинной и при этом довольно теплой. В разгар холодных эпох наблюдается снижение уровня моря даже при росте температуры, если значения последней ниже критической отметки $t^{\circ*}$. Аналогично, в оптимумы межледниковий уровень моря растет даже при похолодании, если температура выше критического значения $t^{\circ*}$. Следует учесть, что эта схема выражает лишь общую концепцию, которая не учитывает различия в динамике отдельных ледяных щитов (Скандинавского, Лаврентийского, Гренландского, Антарктического).

Отметим, что выводы этой работы с большой осторожностью следует переносить на современную ситуацию, поскольку разрешение использованных рядов (1 тыс. лет) не позволяет исследовать события длиной в десятки и сотни лет.

Тем не менее если для уровня моря действительно важна накопленная сумма температур, то даже нынешнее потепление, которое уже почти достигло $+1,5^\circ\text{C}$ относительно доиндустриального уровня (а к концу века может достичь $3\text{--}4^\circ\text{C}$), все еще оставляет человечеству время для принятия мер по снижению выбросов ПГ, изъятию ПГ из атмосферы и снижению глобальной температуры ниже критического порога.

С другой стороны, даже выполнение условий Парижского соглашения 2015 г. (ограничение потепления отметкой $+1,5^\circ\text{C}$) в долгосрочной перспективе не обеспечит решения проблем, связанных с ростом уровня моря, из-за огромной чувствительности этого параметра к глобальной температуре, которая составляет почти $15\text{ м} / 1^\circ\text{C}$ (рис. 2). Если эта чувствительность будет актуальна для земной системы и в будущем, то повышение температуры на $1,5^\circ\text{C}$ спустя несколько тысяч лет обернется ростом уровня моря на 22 м.

Еще одно обстоятельство заключается в том, что нынешняя скорость роста температуры (порядка $1,5^\circ\text{C} / 100\text{ лет}$ с дальнейшим ускорением) беспрецедентна для позднего четвертичного периода, и как этот факт влияет на чувствительность уровня моря к температуре — неизвестно.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Благодарности. Авторы благодарны трем рецензентам за ценные замечания, которые позволили существенно улучшить работу.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 25-17-00172.

Competing interests. The authors declare no competing interests.

Acknowledgements. The authors thank three reviewers whose valuable comments allowed us to significantly improve the manuscript.

Funding. This study was supported by Russian Science Foundation grant 25-17-00172.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Fricker H.A., Galton-Fenzi B.K., Walker C.C., Freer B.I.D., Padman L., DeConto R. Antarctica in 2025: Drivers of deep uncertainty in projected ice loss. *Science*. 2025;387: 601–609. <https://doi.org/10.1126/science.adt9619>
2. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; 2021. P. 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
3. Iizuka M., Seki O., Wilson D.J., Suganuma Y., Horikawa K., Van de Flierdt T., Ikehara M., Itaki T., Irino T., Yamamoto M., Hirabayashi M., Matsuzaki H., Sugisaki S. Multiple episodes of ice loss from the Wilkes Subglacial Basin during the Last Interglacial. *Nature Communications*. 2023;14(2129):1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37325-y>
4. Noble T.L., Rohling E.J., Aitken A.R.A., Bostock H.C., Chase Z., Gomez N., Jong L.M., King M.A., Mackintosh A.N., McCormack F.S., McKay R.M., Menviel L., Phipps S.J., Weber M.E., Fogwill C.J., Gayen B., Golledge N.R., Gwyther D.E., Hogg A.M., Martos Y.M., Pena-Molino B., Roberts J., Van de Flierdt T., Williams T. The sensitivity of the Antarctic Ice Sheet to a changing climate: past, present, and future. *Reviews of Geophysics*. 2020;58:e2019RG000663. <https://doi.org/10.1029/2019RG000663>
5. Hoefs J. *Stable Isotope Geochemistry*. Berlin: Springer; 2004. 244 p.
6. Ramstein G., Landais A., Bouttes N., Sepulchre P., Govin A. (eds.) *Paleoclimatology*. Springer Int. Publ.; 2021. 478 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-24982-3>
7. Westerhold T., Marwan N., Drury A.J., Liebrand D., Agnini C., Anagnostou E., Barnet J.S.K., Bohaty S.M., Vleschouwer D.D., Florindo F., Frederichs T., Hodel D.A., Holbourn A.E., Kroon D., Lauretano V., Littler K., Lourens L.J., Lyle M., Pälike H., Röhl U., Tian J., Wilkens R.H., Wilson P.A., Zachos J.C. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*. 2020;369:1383–1387. <https://doi.org/10.1126/science.aba6853>
8. Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *Paleoceanography*. 2005;20:PA1003. <https://doi.org/10.1029/2004PA001071>
9. Spratt R.M., Lisiecki L.E. A Late Pleistocene sea level stack. *Clim. Past*. 2016;12:1079–1092. <https://doi.org/10.5194/cp-12-1079-2016>
10. Clark P.U., Shakun J.D., Rosenthal Y., Köhler P., Bartlein P.J. Global and regional temperature change over the past 4.5 million years. *Science*. 2024;383:884–890. <https://doi.org/10.1126/science.adi1908>
11. Clark P.U., Shakun J.D., Rosenthal Y., Pollard D., Hostetler S.W., Köhler P., Bartlein P.J., Gregory J.M., Zhu C., Schrag D.P., Liu Z., Pislak N.G. Global mean sea level over the past 4.5 million years. *Science*. 2025;390:1–10. <https://doi.org/10.1126/science.adv8389>