

ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ ЩИТОВ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В БУДУЩИЕ 100 ТЫС. ЛЕТ

© 2026 г. А. Н. Плосков^{1,*}, А. В. Елисеев^{1,2}, И. И. Мохов^{1,2}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: ploskovanton92@mail.ru

Поступила в редакцию 26.06.2025 г.

После доработки 01.11.2025 г.

Принята к публикации 29.12.2025 г.

Проведены численные эксперименты с использованием модификации двумерной изотермической по вертикали модели ледниковых щитов IceBern2D Северного полушария. Современное состояние задавалось по данным реанализа ERA5. Для будущих 100 тыс. лет применялись расчеты с моделью земной системы Climber-2.3 при учете вариаций параметров орбиты Земли и антропогенных эмиссий CO₂ в атмосферу. В части экспериментов к вышеупомянутому детерминированному воздействию добавляются стохастические слагаемые со временем декорреляции до 1 тыс. лет в зависимости от эксперимента. В будущие 100 тыс. лет во всех экспериментах изменения параметров орбиты не приводят к сильному оледенению — соответствующие вариации уровня океана не превышают нескольких метров. Этому способствует антропогенное потепление климата, поскольку, несмотря на прекращение антропогенных выбросов спустя несколько столетий, климат остается теплее, чем в доиндустриальном состоянии, даже после 100 тыс. лет моделирования. Стохастическое воздействие может привести к сильным отклонениям траектории состояния ледникового щита от детерминированной.

Ключевые слова: климатические изменения, модель ледниковых щитов, будущие изменения климата

DOI: 10.7868/S2412376526010037

ВВЕДЕНИЕ

Ледниковые щиты (ЛЩ) — одна из наиболее инерционных компонент Земной системы (ЗС) с временем отклика от нескольких тысячелетий (Calov, Ganopolski, 2005; Berger, Loutre, 2010; Viscaino, 2014; Рыбак, Володин, 2015). Кроме того, их динамика характеризуется значительной нелинейностью. Как следствие, динамика ЛЩ может приводить к формированию новых обратных связей (Fuке et al., 2018), а также к появлению множественных положений равновесия (мультистабильности) Земной климатической системы (ЗКС) (Calov, Ganopolski, 2005). На меньших временных масштабах изменение состояния ЛЩ является значимым индикатором критического уровня изменений климата (Мохов, Малышкин, 2011). Например, таяние ЛЩ привело к росту уровня океана на 21 ± 2 мм в

1992–2020 гг., а к 2150 г. вклад их таяния в изменение уровня океана может превысить 5 м (Climate ...,2022). Распределение Мирового океана в регионах формирования глубоководной конвекции при таянии ЛЩ способствует ослаблению океанического конвейера с потенциально катастрофическими последствиями для Земной системы (Climate ...,2022; Rahmstorf et al., 2005). Связанные с формированием и таянием ЛЩ региональные последствия в ЗКС могут проявляться даже через десятки тысяч лет. К таким последствиям могут относиться тектоническая активность при таянии (накоплении) ледников (Iain, 2000), образование воронок (кратеров) на Ямале и в сопредельных регионах (Аржанов, Мохов, 2017).

В настоящее время продолжается дискуссия о времени наступления следующего цикла оледенения — от его наступления через 10 тыс. лет

от современности (Barker et al., 2025) до практически полной его невозможности в последующие 100 тыс. лет (Ganopolski et al., 2016). В связи с последним целесообразно проведение расчетов с моделями динамики ледниковых щитов (или даже с моделями Земной системы) и для будущего периода.

Цель данной работы — анализ результатов проведенных ансамблевых расчетов с моделью динамики ЛЩ для будущих 100 тыс. лет с оценкой влияния сценариев будущих изменений климата на динамику ледниковых щитов Северного полушария (СП).

Вклад ледового покрова Южного полушария в работе не учитывается.

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

С двумерной изотермической по вертикали моделью ледниковых щитов IceBern2D (Neff et al., 2016; Плосков и др., 2023) проведены численные эксперименты по эволюции ледниковых щитов в Северном полушарии в будущие 100 тыс. лет. Современный режим характеризовался средними многолетними значениями по данным реанализа ERA5 (Hersbach et al., 2020). Для будущих 100 тыс. лет климат задавался по результатам расчетов со стандартной версией климатической модели Climber-2.3 при учёте изменений параметров орбиты Земли (в соответствии с (Berger, Loutre, 2010) и антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу с суммарными по времени выбросами E (в единицах массы углерода). В отдельных экспериментах $E = 1000$ или 3000 ГтС топлива (Ganopolski et al., 2016). Оба сценария идеализированы: в них “индустриальный период” с ненулевыми антропогенными эмиссиями начинается в 1950 г., интенсивность эмиссий постоянна и равна 10 ГтС/год в течение 100 и 300 лет соответственно. После этого модельный расчёт продолжается с нулевой интенсивностью антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу, но с интерактивным углеродным циклом, позволяющим океану и наземным экосистемам поглощать диоксид углерода из атмосферы. При этом даже к концу численного эксперимента (через 100 тыс. лет от момента начала антропогенного выделения диоксида углерода в атмосферу) концентрация CO_2 в атмосфере не возвращается к модельному “доиндустриальному” значению (285 ppmv), составляя 310 и 383 ppmv соответственно. Соответствующие значения приповерхностной температуры в расчётном домене модели

при этом выше “доиндустриального” значения на 0.3 и 1.8 °C, а осадков — на 4 и 10% . Возможные изменения значения солнечной постоянной в расчётах с Climber не учитываются.

Отмечено, что время отклика ледниковых щитов на изменения климата больше длины интервала времени с эмиссиями как минимум на порядок величины, так что отклик земной системы на антропогенное воздействие (в случае его аддитивности эффектам изменения параметров орбиты Земли) стационарен и пропорционален общему количеству сожжённого топлива (Zickfeld et al., 2009; Veenhof et al., 2024). Как следствие, детальная траектория антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу для рассматриваемой задачи не принципиальна, и полученные в работе результаты оказываются достаточно общими.

Проведён численный эксперимент только с изменением параметров орбиты Земли (т.е. с $E = 0$). Ввиду недоступности соответствующих расчётов с Climber-2.3, соответствующий климатический сценарий получен в предположении аддитивности отклика земной системы на отдельные воздействия с использованием данных для расчётов с $E \neq 0$ (см. Приложение П1). Поскольку использованное в данной работе восстановление влияния изменения параметров орбиты характеризуется значимой неопределённостью, наряду с центральной оценкой для этого влияния были также проведены расчёты с изменением чувствительности климата к радиационному форсингу CO_2 (см. Приложение П1).

В дальнейшем такие эксперименты названы как контрольные и обозначаются в соответствии с суммарной интенсивностью антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу $E(S0_0, S1000_0, S3000_0)$; ноль после символа подчёркивания указывает на то, что эксперимент является контрольным). Расчёты с изменением чувствительности климата к радиационному форсингу CO_2 обозначаются $S0+_0$ и $S0-_0$ (см. Приложение П1).

Наряду с контрольными численными экспериментами с моделью проведены численные расчёты с возмущением температуры и осадков в соответствии с авторегрессионной моделью первого порядка. В них температура и осадки на временном шаге k являются суммой восстановления в контрольном эксперименте $Y_{\text{ctrl},k}$ и случайного возмущения X_k (нормально распределённого с нулевым средним и единичной дисперсией):

$$Y_k = Y_{ctrl,k} + A \times X_k$$

$$X_{k+1} = R \times X_k + \varepsilon_k,$$

где R — коэффициент автокорреляции $0 \leq R \leq 1$, ε — нормально распределённый белый шум с нулевым средним и единичным стандартным отклонением, амплитуда A составляет 20% от максимальной среднеглобальной разности температуры (осадков) между современным периодом и ПЛМ ($Y_{LGM} - Y_0$), что соответствует 2°C для температуры. При дискретизации входных данных с шагом по времени в Δt коэффициенту автокорреляции R соответствует временной масштаб декорреляции $\tau = \Delta t / (1 - R)$. При использованном в данной работе значении $\Delta t = 100$ лет, при $R = 0.5$ $\tau = 200$ лет, а при $R = 0.9$ $\tau = 1000$ лет. В работе использовались значения R из набора $\{0.5; 0.8; 0.9\}$. В дальнейшем эти эксперименты обозначаются SE_R , где E указывает на величину суммарных эмиссий, а R — на значение коэффициента автокорреляции в формуле (например, $S3000_0.5$ при $E = 3000$ ГтС и $R = 0.5$). Все численные эксперименты типа SE_R были поставлены с 2 разными реализациями белого шума. Отмечено, что эти возмущения

отличаются от использованных в (Плосков и др., 2023), где к контрольным сценариям добавлены синусоидальные вариации температуры и осадков. Как следствие, результаты данной работы дополняют результаты (Плосков и др., 2023). Начальным условием (соответствующим началу “индустриального периода”) для каждого расчёта SE_R является состояние модели, достигаемое к концу последних 100 тыс. лет при том же значении R . Более того, для каждого из значений R были использованы две выборки для ε . В связи с этим состояние климата между различными R и между отдельными реализациями при одном и том же R различны между собой.

Краткое описание поставленных численных экспериментов доступно в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В численных экспериментах $S0_0$, $S1000_0$ и $S3000_0$ для будущих 100 тыс. лет сильного оледенения Земли или, наоборот, значительного таяния Гренландского ледникового щита

Таблица 1. Численные эксперименты для будущих 100 тыс. лет с моделью ледниковых щитов

Table 1. Simulations with ice sheet models for the next 100 kyr

Эксперимент	Влияние изменения параметров орбиты Земли	Суммарные антропогенные эмиссии CO_2 в атмосферу [ГтС]	Случайные возмущения
$S1000_0$	Воспроизведено Climber	1000	нет
$S3000_0$	Воспроизведено Climber	3000	нет
$S0_0$	Центральная оценка (Приложение 1)	0	нет
$S0+_0$	Сумма центральной оценки и утреннего внутриансамблевого СКО (Приложение 1)	0	нет
$S0-_0$	Разность центральной оценки и утреннего внутриансамблевого СКО (Приложение 1)	0	нет
$S1000_R$ ($R \in \{0.5; 0.8; 0.9\}$)	Подобно $S1000_0$	Подобно $S1000_0$	(2) с $R \in \{0.5; 0.8; 0.9\}$ в зависимости от эксперимента
$S3000_R$ ($R \in \{0.5; 0.8; 0.9\}$)	Подобно $S3000_0$	Подобно $S3000_0$	(2) с $R \in \{0.5; 0.8; 0.9\}$ в зависимости от эксперимента
$S0_R$ ($R \in \{0.5; 0.8; 0.9\}$)	Подобно $S0_0$	Подобно $S0_0$	(2) с $R \in \{0.5; 0.8; 0.9\}$ в зависимости от эксперимента
$S0+_R$ ($R \in \{0.5; 0.8; 0.9\}$)	Подобно $S0+_0$	Подобно $S0+_0$	(2) с $R \in \{0.5; 0.8; 0.9\}$ в зависимости от эксперимента
$S0-_R$ ($R \in \{0.5; 0.8; 0.9\}$)	Подобно $S0-_0$	Подобно $S0-_0$	(2) с $R \in \{0.5; 0.8; 0.9\}$ в зависимости от эксперимента

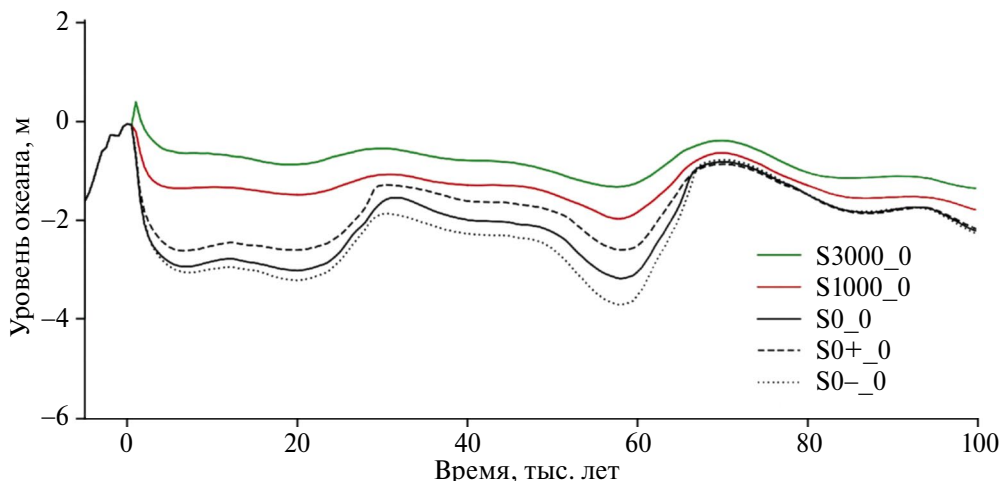


Рис. 1. Изменение уровня мирового океана в будующие 100 тыс. лет при сценариях с различными значениями суммарной интенсивности антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу

Fig. 1 Sea level changes in the next 100 kyr under scenarios with different cumulative anthropogenic CO_2 emissions into the atmosphere

не происходит (рис. 1) — во всех случаях и во все моменты времени максимальные вариации уровня океана не превышают нескольких метров и в отрицательную, и в положительную стороны.

Это согласуется с результатами (Ganopolski et al., 2016), где при использовании другой модели ледниковых щитов (интерактивно взаимодействующей с моделью земной системы Climber) вариации уровня океана не превышают нескольких метров (даже при изменении в ряде экспериментов одного из параметров модели Climber, определяющего чувствительность климата к внешнему воздействию).

Отсутствие значимого оледенения в будующие 100 тыс. лет связано, во-первых, с особенностями изменения параметров орбиты Земли в расчётах Берге (Berger, Loutre, 2010), а также в других подобных расчётах, например (Шараф, Будникова, 1969; Laskar et al., 2011), они не приводят к оледенению Земли в течение по крайней мере 50 тыс. лет. Это можно наглядно представить для средней инсоляции июля на широте 60° с.ш. (это один из стандартных подходов к представлению влияния параметров орбиты на климатические изменения в плейстоцене (Berger, 1988)). Несмотря на современный минимум этой характеристики, она увеличивается в течение по крайней мере 30 тыс. лет при отсутствии индикаторов начала оледенения в современный период (Kemp et al., 2011).

Другой причиной отсутствия значимого оледенения в будующие 100 тыс. лет — более тёплый

и влажный по сравнению с “доиндустриальным” климат в численных экспериментах S1000_0 и S3000_0 (см. Приложение П1 и рис. П2). Однако эта причина, хотя и дополнительно уменьшает размах отрицательных (соответствующих оледенениям) вариаций уровня моря, не является основной, так как значимого оледенения нет и в численном эксперименте S0_0.

По результатам модельных расчётов при сценарии 3000 ГтС в первую тысячу лет происходит повышение уровня моря на 0.5 м относительно современного. Увеличение уровня океана обусловлено, в первую очередь, таянием малых островных ледников. В частности, происходит полное таяние островных ледников в Восточном полушарии (Российской Арктике) и частичное таяние в Западном полушарии в следующие 2 тыс. лет после начала “индустриального периода”. Общая площадь островных ледников уменьшается на 500 тыс. км². Однако это сопровождается увеличением высоты купола Гренландского ледникового щита до 3.8 км без значимого изменения площади этого щита (рис. 2, а, б, в). В следующие 50 тыс. лет картина распространения ледникового щита не меняется. Это можно объяснить уровнем инсоляции, недостаточно высоким для интенсивного таяния ледников, но и недостаточно низким для их роста. Максимальное уменьшение уровня мирового океана в этот период составляет 1.3 м. Через 55 тыс. лет наступает следующий минимум инсоляции, который способствует росту как Гренландского ледникового щита, так и островных ледников. Максимальная толщина Гренландского ледникового щита увели-

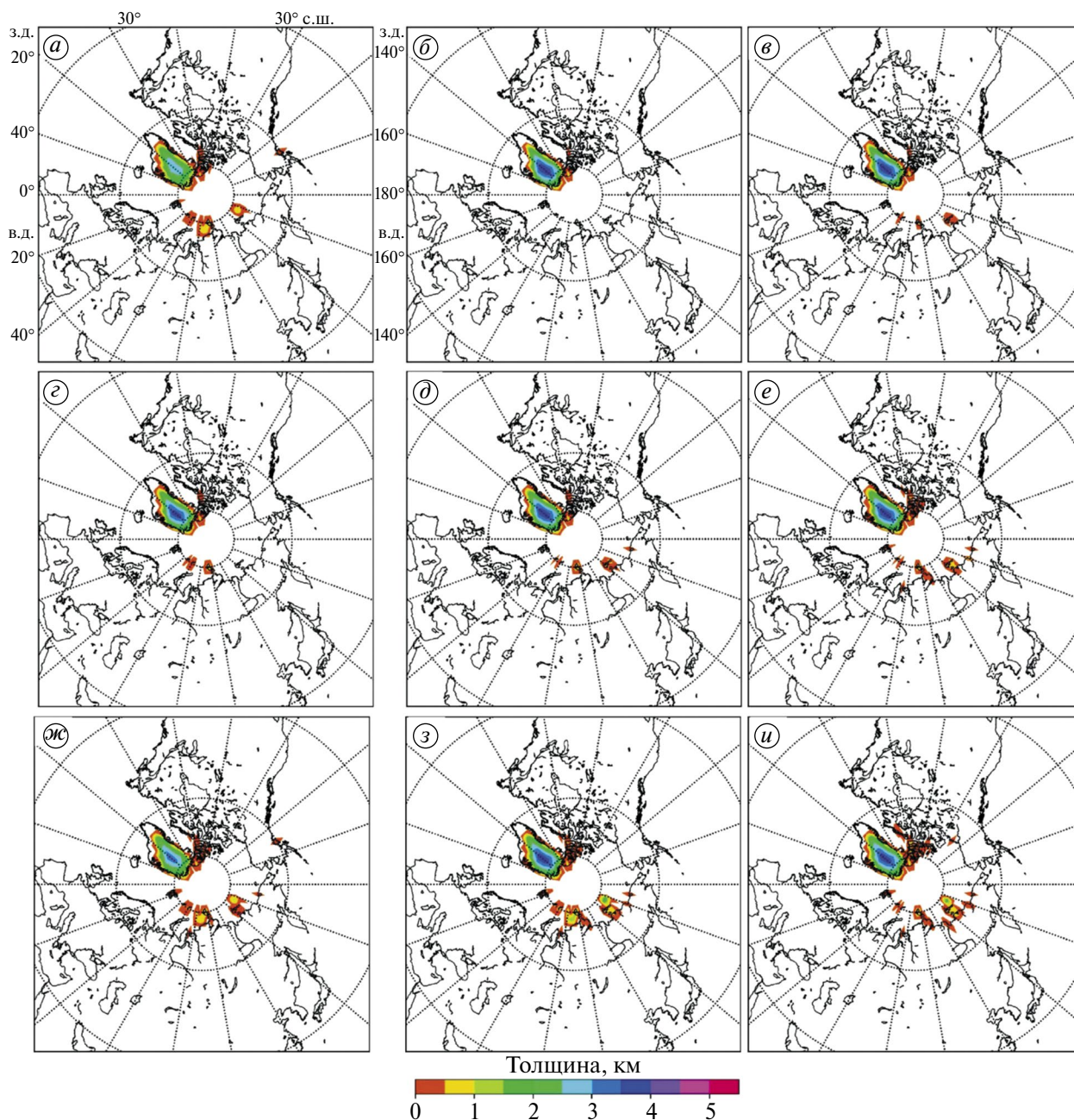


Рис. 2. Толщина ледниковых щитов в расчётах S3000_0 (а–в), S1000_0 (г–е) и S0_0 (ж–и) через 1 тыс лет (а, г, ж), 20 тыс. лет (б, д, з) и 60 тыс. лет (в, е, и) после начала антропогенных эмиссий CO₂ в атмосферу

Fig. 2. Ice sheet thickness in simulations S3000_0 (a–в), S1000_0 (г–е), and S0_0 (ж–и) after 1 kyr (a, г, ж), 20 kyr (б, д, з) and 60 kyr (в, е, и) from the onset of the anthropogenic CO₂ emissions into the atmosphere

чивается до 4 км, а его площадь — на 100 тыс. км². Также появляются островные ледники площадью 150 тыс. км² и средней толщиной в 250 м.

По результатам расчётов при сценарии 1000 ГтС в Восточном полушарии в первые 5 тыс. лет идёт таяние островных ледников, их площадь уменьшается с 500 до 135 тыс. км², а средняя толщина

уменьшается с 500 до 400 м (см. рис. 2, г, д, е). В Западном полушарии происходит увеличение максимальной высоты Гренландского ледникового щита до 3.9 км, при этом его площадь уменьшается на 100 тыс. км². В следующие 55 тыс. лет начинается рост островных ледников, что приводит к увеличению их площади до 450 тыс. км² в Восточном полушарии. Площадь Гренландского ледникового

щита в этот период также увеличивается и возвращается к современным значениям при максимальной толщине щита в 3.9 км. Максимальное уменьшение уровня Мирового океана в этот период составляет 2 м.

При сценарии $S0_0$ через 500 лет начинается прирост как Гренландского щита, так и островных ледников — в следующие 20 тыс. лет его площадь увеличивается на 50 тыс. км² относительно современного значения, площадь островных ледников в Западном полушарии увеличивается на 100 тыс. км², а в Восточном — на 250 тыс. км², их средняя толщина увеличивается до 670 м (см. рис. 2, ж, з, и). Максимальная толщина Гренландского щита при этом достигает 3.9 км, приводя к снижению уровня Мирового океана на 3 м. Пик летней инсоляции через 30 тыс. лет приводит к уменьшению площади ледниковых щитов в Северном полушарии до современных значений с их последующим восстановлением при уменьшении инсоляции. Максимальная толщина Гренландского ледникового щита сохраняется около 3.9 км на протяжении всех последующих 60 тыс. лет. Это может быть связано с изотермичностью модели по вертикали и избыточным количеством осадков в модельных сценариях.

Для учёта неопределённости восстановления данных для сценария 0 ГтС проведены эксперименты $S0+_0$ и $S0-_0$ (см. Приложение П1). Мак-

симальное отклонение уровня Мирового океана на протяжении каждого из расчётов от значений в тот же момент времени в эксперименте $S0_0$ не превышает 0.53 м. Однако при этом соответствующее различие толщины Гренландского щита достигает сотен метров (см. Приложение П1 и рис. П3) и может привести к образованию или полному таянию малых островных ледников.

Отмечено, что полученные в расчётах $S0_0$, $S0+_0$ и $S0-_0$ небольшое (до нескольких метров) изменение уровня Мирового океана в будущие 100 тыс. лет согласуется с полученным в модели Climber (Ganopolski et al., 2016), в которой использовалась другая модель динамики ледниковых щитов.

ВЛИЯНИЕ НАЛОЖЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ДИНАМИКУ ЛЕДНИКОВЫХ ЩИТОВ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

Вариации с временем декорреляции менее 500 лет приводят к уменьшению площади ледниковых щитов и увеличению уровня мирового океана на 1–2 м (рис. 3). В вариациях с большими периодами может происходить накопление отрицательных вариаций, способных приводить к существенному росту ледниковых щитов в отдельных регионах (рис. 4) Максимальное уменьшение уровня Мирового океана составляет 4 м.

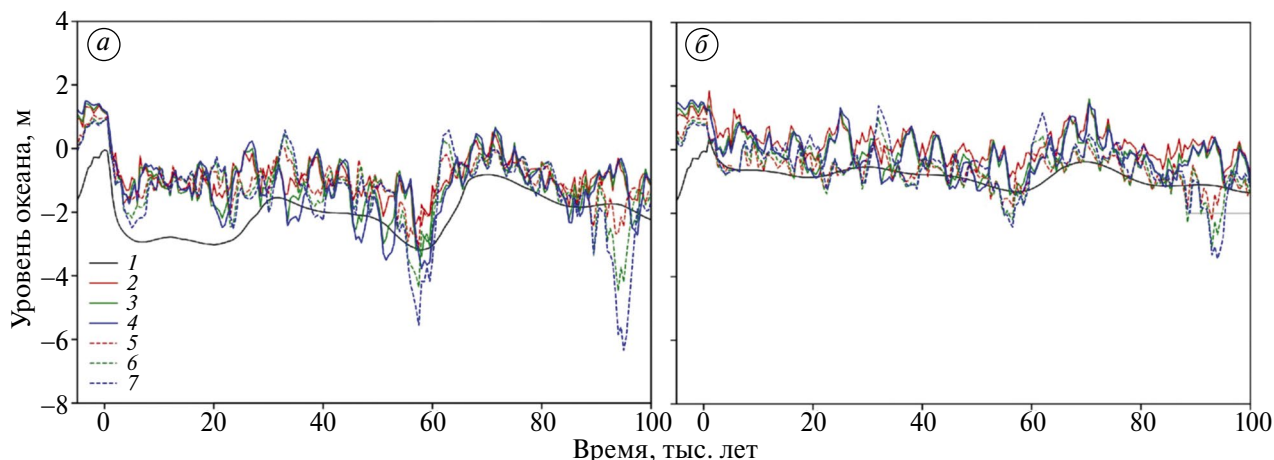


Рис. 3. Изменение уровня Мирового океана в реализациях экспериментов $S0_R$ (а) и $S300_R$ (б) при различных временах декорреляции τ .

Линии на рисунке: 1 — без возмущения, 2 и 5 — $\tau = 200$ лет, 3 и 6 — $\tau = 500$ лет, 4 и 7 — $\tau = 1000$ лет, 2–4 — реализация 1 белого шума ϵ в (2), 5–7 — реализация 2 соответственно

Fig. 3. Sea level changes in $S0_R$ (a) and $S300_R$ (b) simulations with different noise decorrelation timescale τ .

Shown are simulations without noise (1) and simulations with $\tau = 200$ yr (2 and 5), $\tau = 500$ yr (3 and 6) and $\tau = 1000$ yr (4 and 7). Lines 2 to 4 correspond to the noise sample 1 in eq. (2), lines 5 to 7 — to the respective sample 2

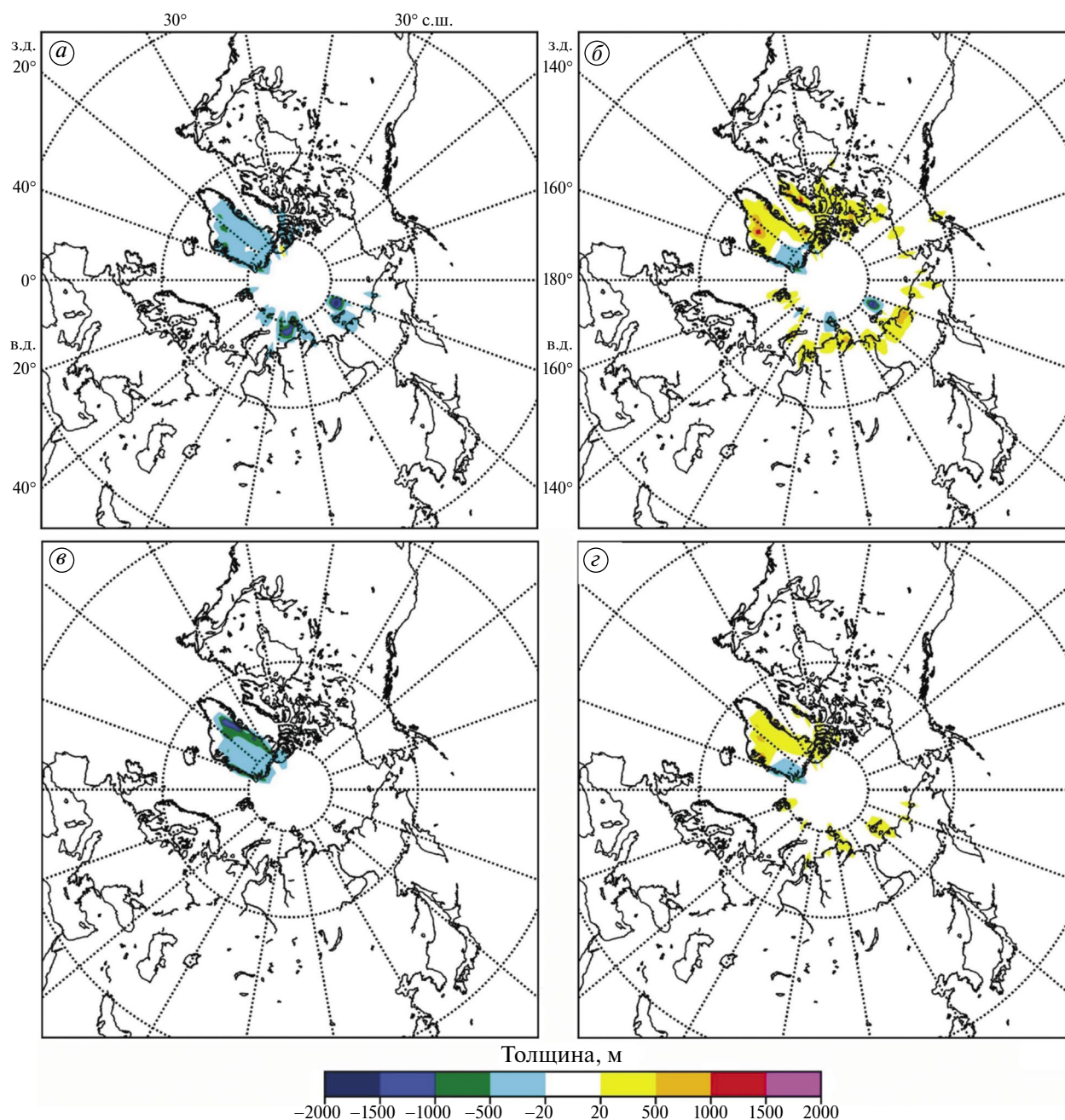


Рис. 4. Отличие (относительно расчёта $S0_0$) изменения толщины ледников и щитов в эксперименте $S0_0.9$ ($a-b$) и $S3000_0.9$ ($в-г$) при времени декорреляции белого шума $\tau = 1000$ лет с первой его реализацией через 20 тыс. лет ($a, в$) и 55 тыс. лет ($б, г$) после начала антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу

Fig. 4. Difference of ice sheets and glaciers thickness in simulations $S0_0.9$ ($a-b$) and $S3000_0.9$ ($в-г$) relative to their counterpart in simulation $S0_0$ with the first noise sample after 20 kyr ($a, в$) and 55 kyr ($б, г$) from the onset of the anthropogenic CO_2 emissions into the atmosphere

В экспериментах с возмущением в сценарии $S0_0$ без антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу такое возмущение может приводить к относительно небольшому усилению или ослаблению развития ледников в Северном Ледовитом океане, а также к соответствующим

изменениям Гренландского ледникового щита (см. рис. 4). Однако для островных ледников Северного Ледовитого океана различие толщины льда между экспериментами $S0_0$, с одной стороны, и $S0_R$ при разных R , с другой, как правило, не превышает нескольких десятков

метров. Подобное утверждение справедливо и для большей части Гренландского щита, хотя для небольшой его части подобные различия могут достигать 1 км. Соответствующие различия вариаций уровня Мирового океана не превышают 2 м, указывая на отсутствие значимого оледенения Северного полушария в течение последующих 100 тыс. лет.

Подобное также справедливо для экспериментов с ненулевыми антропогенными эмиссиями CO_2 в атмосферу и с наложением возмущений на климатические поля — Гренландский ледниковый щит может становиться тоньше при накоплении положительных температурных вариаций или толще при накоплении соответствующих отрицательных вариаций (см. рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены численные эксперименты для будущих 100 тыс. лет модификации двумерной изотермической по вертикали модели ледниковых щитов IceBern2D Северного полушария. Климатические вариации при этом были заданы для будущего периода по расчётам с моделью земной системы Climber при учёте вариаций параметров орбиты Земли и идеализированных сценариев антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу.

В будущие 100 тыс. лет изменения параметров орбиты не приводят к значимому оледенению — соответствующие вариации уровня Мирового океана не превышают нескольких метров даже в численных экспериментах без учёта антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу. Прирост массы в этот период отмечается только для Гренландского ледникового щита и для островных ледников в Северном Ледовитом океане. Учёт климатических вариаций из-за таких эмиссий тем более затрудняет развитие значимого оледенения и дополнительно уменьшает абсолютные значения падения уровня океана при накоплении льда. Эти результаты в целом согласуются с полученными в (Ganopolski et al., 2016). Тем не менее в отдельных узлах сетки изменения параметров орбиты приводят к увеличению толщины Гренландского ледникового щита на величину до нескольких сотен метров.

Несмотря на применение в работе идеализированных временных зависимостей для интенсивности антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу, результаты для будущих 100 тыс. лет

оказываются достаточно общими (см. обсуждение в разделе “Численные эксперименты”). Однако они могут зависеть от климатической чувствительности модели, использованной при подготовке климатических сценариев в будущем. Среднеглобальная равновесная чувствительность $\Delta T_{2^* \text{CO}_2}$ приповерхностной температуры к удвоению содержания CO_2 в атмосфере для используемой версии модели Climber составляет 2.8°C (MacDougall et al., 2020) и находится ниже середин интервалов, характерных для последних поколений детальных моделей земной системы (модели ансамблей CMIP5 — Coupled Models Intercomparison Project, phase 5 и CMIP6 — Coupled Models Intercomparison Project, phase 6; 3.2 и 3.7°C соответственно (Meehl et al., 2020), но близка к центральной оценке Шестого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (см. табл. 1.2 из (Climate..., 2022)). При подготовке сценариев с моделями, характеризующимися большей климатической чувствительностью, выводы данной работы дополнительно усилятся, тогда как при соответствующем использовании моделей с меньшими значениями $\Delta T_{2^* \text{CO}_2}$ они не изменятся принципиальным образом (поскольку они справедливы даже для сценария S0-0, в котором влияние изменения параметров орбиты максимално среди всех использованных).

При учёте климатических вариаций с временными масштабами от 200 до 1000 лет выявляется заметная чувствительность результатов моделирования ледниковых щитов Северного полушария. При достаточно большом времени декорреляции ($\tau \geq 1000$ лет) накопление влияния климатических вариаций одного знака может привести к принципиальному изменению динамики системы. В период устойчивого межледниковья — например, для современности и для будущих 100 тыс. лет — подобные климатические вариации не приводят к значительному (сопоставимому с ПЛМ) изменению состояния ледниковых щитов Северного полушария, но могут значительно повлиять на малые островные полярные ледники. Кроме того, при использованных временах декорреляции белого шума ($\tau < 1000$ лет) климатические возмущения приводят в большей мере к таянию ледников, чем к их росту.

Вклад ледников и щитов Южного полушария в работе не учитывается, как не учитываются и такие процессы динамической нестабильности как MISI (Marine Ice Sheet Instability) и MICI

(Marine Ice Cliff Instability) (Abram et al., 2025). Это, конечно, недостаток работы. Однако в расчётах с Climber-2 антропогенное потепление характеризуется длительностью не более нескольких тысяч лет, после чего изменения глобального климата за счёт изменения параметров орбиты невелики. Как следствие, можно надеяться, что учёт влияния ледникового покрова Южного полушария не изменит принципиальным образом результатов данной работы. Это не противоречит оценкам вклада ледниковых щитов Антарктиды в изменение уровня Мирового океана в последний ледниковый цикл, составляющего около 10% от полного изменения уровня Мирового океана (Simms et al., 2019).

Обсудим в заключении также недостатки данной работы. В использованной модели ледниковых щитов отсутствует блок термофизики, так что профиль температуры в них однороден по вертикали. Учёт вертикального профиля температуры внутри щита (и интерактивное его вычисление в модели) способен повлиять на полученные в данной работе количественные оценки, в том числе для верхнего предела неопределённости реконструкций температуры в плейстоцене. В дальнейшем планируется расширение модели блоком термофизических процессов в толще льда с соответствующей возможностью уточнения полученных оценок.

Расчёты работы используют климатические сценарии (Ganopolski et al., 2016) и, несмотря на другую модель динамики ледниковых щитов, не являются полностью независимыми от результатов данной работы. Как следствие, в будущем целесообразно провести численные эксперименты с климатическими сценариями, полученными из других моделей. Однако общее подобие пространственной структуры изменений температуры и осадков между климатическими моделями при единичном изменении среднеглобальной среднегодовой приповерхностной температуры (Climate..., 2022) позволяет утверждать, что, хотя такие расчёты и позволят уточнить и расширить результаты данной работы, они не изменят их принципиальным образом.

Благодарности. Оценка влияния возмущений с различными временными масштабами на результаты получена при поддержке проекта РНФ 25-17-00015. Подготовка данных об изменениях климата в будущем была выполнена в рамках проекта РНФ 24-17-00211. Модификация модели ледниковых щитов в рамках госзаданий Ин-

ститута физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (регистрационный номер проекта FMWR-2025-0006) и МГУ им. М.В. Ломоносова (тема 122091200042-5).

Acknowledgments. The impact of disturbances with different time scales on the results was assessed with the support of the Russian Science Foundation project 25-17-00015. The curation of data on future climate changes is done in the framework of the RSF project 24-17-00211. Modification of an ice sheet model within the state assignments of the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences (project registration number FMWR-2022-0014) and Lomonosov Moscow State University (theme 122091200042-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аржанов М.М., Мохов И.И. Оценки степени устойчивости континентальных реликтовых метангидратов в оптимуме голоцена и при современных климатических условиях // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476 № 4. С. 456–460.
<https://doi.org/10.7868/S0869565217280222>
- Мохов И.И., Малышкин А.В. Аналитическая оценка критического уровня глобального потепления для перехода от роста к уменьшению массы Антарктического ледового щита // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436. № 3. С. 155–158.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X11010284>
- Плосков А.Н, Елисеев А.В., Мохов И.И. Ансамблевое моделирование динамики ледовых щитов в последнем ледниковом цикле // Доклады Академии наук. 2023. Т. 510 № 1. С. 323–328.
<https://doi.org/10.31857/S2686739722602873>
- Рыбак О.О., Володин Е.М. Использование энергобалансовой модели для включения криосферного компонента в климатическую модель. Часть I. Описание модели и расчеты климатических полей приземной температуры воздуха и осадков // Метеорология и гидрология. 2015. № 40. С. 731–740.
- Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. Вековые изменения орбиты Земли и астрономическая теория колебаний климата // Труды Института теоретической астрономии АН СССР. 1969. Вып. 14. С. 48–84.
- Abram N.J., Purich A., England M.H., McCormack F.S., Strugnell J.M., Bergstrom D.M., Vance T.R., Stål T., Wienecke B., Heil P., Doddridge E.W., Sallée J.-B., Williams T.J., Reading A.M., Mackintosh A., Reese R., Winkelmann R., Klose A.K., Boyd P.W., Chown S.L., Robinson S.A. Emerging Evidence of Abrupt Changes in the Antarctic Environment // Nature. 2025. V. 644. P. 621–633.
<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09349-5>

- Barker S., Lisiecki L., Knorr G., Nuber S., Tzedakis P.* Distinct Roles for Precession, Obliquity, and Eccentricity in Pleistocene 100-kyr Glacial Cycles // *Science* 2025. V. 387 № 6737. <https://www.doi.org/10.1126/science.adp3491>
- Berger A., Loutre M.F.* Modeling the 100-kyr Glacial-Interglacial Cycles // *Global Planetary Change*. 2010. V. 72 (4). P. 275–281. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.01.003>
- Berger A.* Milankovitch Theory and climate // *Review Geophysics*. 1988. V. 26 (4). P. 624–657. <https://doi.org/10.1029/RG026i004p00624>
- Calov R., Ganopolski A.* Multistability and Hysteresis in the Climate-Cryosphere System Under Orbital Forcing // *Geophys. Research Letters*. 2005. V. 32 (21). L21717. <https://doi.org/10.1029/2005GL024518>
- 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., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Pèan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekei O., Yu R., Zhou B.* Cambridge: Cambridge University Press. 2022. 2406 p.
- Fyke J., Sergienko O., Löfverström M., Price S., Lenaerts J.T.M.* An Overview of Interactions and Feedbacks Between Ice Sheets and the Earth System // *Review Geophysics*. 2018. V. 56 (2). P. 361–408. <https://doi.org/10.1029/2018RG000600>
- Ganopolski A., Winkelmann R., Schellnhuber H.* Critical Insolation–CO₂ Relation for Diagnosing Past and Future Glacial Inception // *Nature* 2016. V. 529. P. 200–203. <https://doi.org/10.1038/nature16494>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.* The ERA5 Global Reanalysis // *Quaternary Journal of Royal Meteorological Society*. 2020. V. 146. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Kemp A.C., Horton B.P., Donnelly J.P., Mann M.E., Vermeer M., Rahmstorf S.* Climate Related Sea-Level Variations over the Past Two Millennia // *Proc. of the U.S.A. National Academy of Science*. 2011. V. 108 (27). P. 11017–11022. <https://doi.org/10.1073/pnas.1015619108>
- Laskar J., Fienga A., Gastineau M., Manche H.* La2010: A New Orbital Solution for the Long-Term Motion of the Earth // *A&A* 2011. V. 532 A89. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116836>
- MacDougall A.H., Frölicher T.L., Jones C.D., Rogelj J., Matthews H.D., Zickfeld K., Arora V.K., Barrett N.J., Brovkin V., Burger F.A., Eby M., Eliseev A.V., Hajima T., Holden P.B., Jeltsch-Thömmes A., Koven C., Mengis N., Menviel L., Michou M., Mokhov I.I., Oka A., Schwinger J., Séférian R., Shaffer G., Sokolov A., Tachiiri K., Tjiputra J., Wiltshire A., Ziehn T.* Is there Warming in the Pipeline? A Multi-Model Analysis of the Zero Emissions Commitment from CO₂ // *Biogeosciences*. 2020. V. 17. P. 2987–3016. <https://doi.org/10.5194/bg-17-2987-2020>
- Meehl G.A., Senior C.A., Eyring V., Flato G., Lamarque J., Stouffer R.J., Taylor K.E., Schlund M.* Context for Interpreting Equilibrium Climate Sensitivity and Transient Climate Response from the CMIP6 Earth System Models // *Sci. Adv.* 2020. V. 6. № 26. <https://www.doi.org/10.1126/sciadv.aba1981>
- Neff B., Born A., Stocker T.F.* An Ice Sheet Model of Reduced Complexity for Paleoclimate Studies // *Earth System Dynamics*. 2016. V. 7 (2). P. 397–418. <https://doi.org/10.5194/esd-7-397-2016>
- Rahmstorf S., Crucifix M., Ganopolski A., Goosse H., Kamenkovich I., Knutti R., Lohmann G., Marsh R., Mysak L.A., Wang Z., Weaver A.J.* Thermohaline Circulation Hysteresis: A Model Intercomparison // *Geophys. Research Letters*. 2005. V. 32 (23). L23605. <https://doi.org/10.1029/2005GL023655>
- Simms A.R., Lisiecki L., Gebbie G., Whitehouse P.L., Clark J.F.* Balancing the Last Glacial Maximum (LGM) Sea-Level Budget // *Quaternary Science Review*. 2019. V. 205. P. 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.12.018>
- Veenhof R.J., Burrows M T., Hughes A.D., Michalek K., Ross M.E., Thomson A.I., Fedenko J., Stanley M.S.* Sustainable Seaweed Aquaculture and Climate Change in the North Atlantic: Challenges and Opportunities // *Frontiers in Marine Science*. 2024. V. 11. <https://www.doi.org/10.3389/fmars.2024.1483330>
- Zickfeld K., Eby M., Matthews H.D., Weaver A.J.* Setting Cumulative Emissions Targets to Reduce the Risk of Dangerous Climate Change // *Proc. of National Academy of Science. U.S.A.* 2009. V. 106 (38). P. 16129–16134. <https://doi.org/10.1073/pnas.080580010>

Citation: Ploskov A.N., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Estimates of Changes in the State of the Ice Sheets of the Northern Hemisphere During Future 100 kyr. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (1): 33–44. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526010037

Estimates of Changes in the State of The Ice Sheets of the Northern Hemisphere During Future 100 kyr

© 2026 A. N. Ploskov^{a,#}, A. V. Eliseev^{a,b}, I. I. Mokhov^{a,b}

^aA.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

^bLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

[#]e-mail: ploskovanton92@mail.ru

Received June 26, 2025; revised November 1, 2025; accepted December 29, 2025

Ensemble simulations are performed with a modified version of the two-dimensional vertically isothermal ice sheets model IceBern2D of the Northern Hemisphere. The computation domain is limited to the Northern Hemisphere. The ERA5 reanalysis data used for the present-day state. Future atmospheric forcing is adopted from the simulations with the Climber-2.3 climate model, which is forced by the anthropogenic CO₂ emissions into the atmosphere and by the changes of the parameters of the Earth orbit. In the subset of the simulations, stochastic terms with experiment-dependent decorrelation length up to 1 kyr are added to the above-mentioned deterministic forcing. In all simulations, changes of orbital parameters during next 100 kyr do not lead to strong glaciations, and the global sea level variations are limited to several meters. This is even enforced by anthropogenically induced climate warming, because, despite anthropogenic emissions ceasing after several centuries, climate is warmer than the preindustrial state even after 100 kyr of simulations. Stochastic forcing may lead to strong deviations of the ice sheet state trajectory from the deterministic one.

Keywords: climate changes, ice sheet models, future climate changes

REFERENCES

- Arzhanov M.M., Mokhov I.I.* Stability of Continental Relic Methane Hydrates for the Holocene Climatic Optimum and for Contemporary Conditions. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2017, 476 (4): 456–460.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X17100026> [In Russian].
- Mokhov I.I., Malyshkin A.V.* Analytical Estimate of the Critical Global-Warming Level for the Antarctic Ice Sheet Mass Gain-to-Loss Transition. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2011, 436 (3): 155–158.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X11010284> [In Russian].
- Ploskov A.N., Eliseev A.V., Mokhov I.I.* Ensemble Modeling of Ice Sheet Dynamics in the Last Glacial Cycle. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2023, 510 (1): 323–328.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X23600172> [In Russian].
- Rybak O.O., Volodin E.M.* Applying the Energy- and Water Balance Model for Incorporation of the Cryospheric Component into a Climate Model. Part I. Description of the Model and Computed Climatic Fields of Surface Air Temperature and Precipitation Rate. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2015, 40: 731–740.
<https://doi.org/10.3103/S1068373915110035> [In Russian].
- Sharaf S.G., Budnikova N.A.* Secular Changes in the Earth's Orbit and the Astronomical Theory of Climate Fluctuations. *Trudy Instituta teoreticheskoy astronomii AN SSSR*. Proceedings of the Institute of Theoretical Astronomy of the USSR Academy of Sciences, 1969, 14: 48–84. [In Russian].
- Abram N.J., Purich A., England M.H., McCormack F.S., Strugnell J.M., Bergstrom D.M., Vance T.R., Stål T., Wienecke B., Heil P., Doddridge E.W., Sallée J.-B., Williams T.J., Reading A.M., Mackintosh A., Reese R., Winkelmann R., Klose A.K., Boyd P.W., Chown S.L., Robinson S.A.* Emerging Evidence of Abrupt Changes in the Antarctic Environment. *Nature*. 2025, 644: 621–633
<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09349-5>
- Barker S., Lisiecki L., Knorr G., Nuber S., Tzedakis P.* Distinct Roles for Precession, Obliquity, and Eccentricity in Pleistocene 100-kyr Glacial Cycles. *Science* 2025, 387: 6737.
<https://www.doi.org/10.1126/science.adp3491>
- Berger A., Loutre M.F.* Modeling the 100-kyr Glacial-Interglacial Cycles. *Global Planetary Change*. 2010, 72 (4): 275–281
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.01.003>
- Berger A.* Milankovitch Theory and Climate. *Review Geophysics*. 1988, 26 (4): 624–657.
<https://doi.org/10.1029/RG026i004p00624>
- Calov R., Ganopolski A.* Multistability and Hysteresis in the Climate-Cryosphere System Under Orbital Forcing. *Geophys. Research Letters*. 2005, 32 (21): L21717.
<https://doi.org/10.1029/2005GL024518>

- 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., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Pèan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekei O., Yu R., Zhou B.* Cambridge: Cambridge University Press, 2022: 2406.
- Fyke J., Sergienko O., Löfverström M., Price S., Lenaerts J.T.M.* An Overview of Interactions and Feedbacks Between Ice Sheets and the Earth System. *Review Geophysics*. 2018, 56 (2): 361–408. <https://doi.org/10.1029/2018RG000600>
- Ganopolski A., Winkelmann R., Schellnhuber H.* Critical Insolation–CO₂ Relation for Diagnosing Past and Future Glacial Inception. *Nature* 2016, 529: 200–203 <https://doi.org/10.1038/nature16494>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Keeley S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.* The ERA5 Global Reanalysis. *Quaternary Journal of Royal Meteorological Society*. 2020. V. 146. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Kemp A.C., Horton B.P., Donnelly J.P., Mann M.E., Vermeer M., Rahmstorf S.* Climate Related Sea-Level Variations over the Past Two Millennia. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2011, 108 (27): 11017–11022 <https://doi.org/10.1073/pnas.1015619108>
- Laskar J., Fienga A., Gastineau M., Manche H.* La2010: A New Orbital Solution for the Long-Term Motion of the Earth. *A&A* 2011, 532: A89 <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116836>
- MacDougall A.H., Frölicher T.L., Jones C.D., Rogelj J., Matthews H.D., Zickfeld K., Arora V.K., Barrett N.J., Brovkin V., Burger F.A., Eby M., Eliseev A.V., Hajima T., Holden P.B., Jeltsch-Thömmes A., Koven C., Mengis N., Menviel L., Michou M., Mokhov I.I., Oka A., Schwinger J., Séférian R., Shaffer G., Sokolov A., Tachiiri K., Tjiputra J., Wiltshire A., Ziehn T.* Is There Warming in the Pipeline? A Multi-Model Analysis of the Zero Emissions Commitment from CO₂. *Biogeosciences* 2020, 17: 2987–3016. <https://doi.org/10.5194/bg-17-2987-2020>
- Meehl G.A., Senior C.A., Eyring V., Flato G., Lamarque J., Stouffer R.J., Taylor K.E., Schlund M.* Context for Interpreting Equilibrium Climate Sensitivity and Transient Climate Response from the CMIP6 Earth System Models. *Sci. Adv.* 2020, 6. 26. <https://www.doi.org/10.1126/sciadv.aba1981>
- Neff B., Born A., Stocker T.F.* An Ice Sheet Model of Reduced Complexity for Paleoclimate Studies // *Earth System Dynamics*. 2016, 7 (2): 397–418. <https://doi.org/10.5194/esd-7-397-2016>
- Rahmstorf S., Crucifix M., Ganopolski A., Goosse H., Kamenskovich I., Knutti R., Lohmann G., Marsh R., Mysak L.A., Wang Z., Weaver A.J.* Thermohaline Circulation Hysteresis: A Model Intercomparison. *Geophys. Research Letters* 2005, 32 (23): L23605. <https://doi.org/10.1029/2005GL023655>
- Simms A.R., Lisiecki L., Gebbie G., Whitehouse P.L., Clark J.F.* Balancing the Last Glacial Maximum (LGM) Sea-Level Budget. *Quaternary Science Review*. 2019, 205: 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.12.018>
- Veenhof R.J., Burrows M T., Hughes A.D., Michalek K., Ross M.E., Thomson A.I., Fedenko J., Stanley M.S.* Sustainable Seaweed Aquaculture and Climate Change in the North Atlantic: Challenges and Opportunities. *Frontiers in Marine Science* 2024. 11. <https://www.doi.org/10.3389/fmars.2024.1483330>
- Zickfeld K., Eby M., Matthews H.D., Weaver A.J.* Setting Cumulative Emissions Targets to Reduce the Risk of Dangerous Climate Change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2009, 106 (38): 16129–16134 <https://doi.org/10.1073/pnas.080580010>