

ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ СЦЕНАРИЕВ НА ДИНАМИКУ СУБАКВАЛЬНОЙ МЕРЗЛОТЫ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

Валентина Владимировна Малахова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-64-50, e-mail: malax@sscc.ru

Алексей Викторович Елисеев

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1-2, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник; Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, 119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., 3, ведущий научный сотрудник; Казанский федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, профессор, тел. (495)959-37-93, e-mail: eliseev.alexey.v@gmail.com

Получены оценки чувствительности результатов численного моделирования термического состояния субаквальных многолетнемерзлых грунтов к неопределенности палеоклиматических реконструкций температуры воздуха и уровня океана с использованием модели теплофизических процессов в донных отложениях. Модель была дополнена сценариями изменения климата на арктическом шельфе за последние 400 тыс. лет, используя различные комбинации реконструкций температуры воздуха и уровня моря. Несмотря на заметные различия между используемыми наборами данных, коэффициент неопределенности отклика мощности многолетнемерзлого слоя составил менее 0,3 за исключением изолированных интервалов времени и/или наиболее глубоких областей шельфа.

Ключевые слова: арктический шельф, многолетнемерзлые породы, подводная мерзлота, ледниковые циклы.

INFLUENCE OF THE PALEOCLIMATIC RECONSTRUCTIONS UNCERTAINTY ON THE SUBMARINE PERMAFROST DYNAMICS

Valentina V. Malakhova

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Senior Scientist, phone: (383)330-64-50, e-mail: malax@sscc.ru

Alexey V. Eliseev

Lomonosov Moscow State University, 1-2, Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia, D. Sc., Leading Researcher; A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3, Pyzhevsky, Moscow, 119017, Russia, Leading Researcher; Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya, Kazan, 420097, Russia, Professor, phone: (495)959-37-93, e-mail: eliseev.alexey.v@gmail.com

The estimates of the subsea permafrost sensitivity to the uncertainty of paleoclimatic reconstructions of air temperature and ocean level have been obtained. This was done by using the model for thermophysical processes in the subsea sediments and the scenario for climate changes at the Arctic shelf for the last 400 kyr. This model was forced by four time series of temperature at the sediment top, by using different combinations of air temperature and sea level. The uncertainty co-

efficient of the response of the permafrost base depth is less than 0,3, with the exception of isolated time intervals and / or the deepest areas of the shelf.

Key words: Arctic Shelf, submarine permafrost, glacial cycles, response timescales.

Введение

Для анализа эволюции субаквальных многолетнемерзлых пород (СММП) арктического шельфа и оценки их современного состояния необходимо построение палеогеографических сценариев развития климатических условий в регионе [1-5]. Между имеющимися реконструкциями температуры для ледниковых циклов плейстоцена имеются значительные количественные различия. В соответствии с проектом MARGO [6] диапазон уменьшения среднегодовой температуры поверхности океана для последнего ледникового максимума по отношению к доиндустриальному периоду составляет $1,9 \pm 1,8$ К. В отдельных регионах подобная неопределенность существенно выше относительно глобальных оценок. Например, для шельфа восточной Евразии неопределенность для последнего ледникового максимума составила от 4 до 8 К на основе модельных данных [7]. В данном регионе, начиная с 2003 года, регистрируются выбросы метана из океана в атмосферу [8, 9]. Принято считать, что эти эмиссии метана обусловлены диссоциацией гидратов, которые образовались во время плейстоценовых оледенений при формировании СММП [1, 10]. Это согласуется с временным масштабом распространения теплового сигнала в донных отложениях мощностью несколько сотен метров, который составляет от 5 до 20 тысяч лет [1, 2].

Отметим, что такие временные масштабы в сочетании с ограниченными знаниями о теплофизическом состоянии донных отложений в плейстоцене требуют проводить численные расчеты на длинных временных периодах. В частности, по крайней мере, один полный ледниковый цикл (120 тыс. лет) необходим для изучения эволюции подводной мерзлоты и гидратов метана [2]. Это дополнительно увеличивает неопределенность в таких расчетах, потому что реконструкции для более отдаленных прошлых интервалов времени не менее неопределенны, чем реконструкции для последнего ледникового максимума.

Принимая во внимание вышеупомянутую неопределенность в отношении прошлых климатических изменений, важно изучить чувствительность отклика СММП к используемым изменениям температуры и уровня моря. В работе используется модель для распространения тепла в донных отложениях шельфа арктических морей с учетом фазовых переходов между талой и мерзлой зоной [2, 10, 11].

Методы и материалы

Для расчетов теплового поля в осадочном слое и определения нижней и верхней границ криолитозоны использовалась модель теплопереноса в грунте

с учетом фазовых переходов. В основе математической модели лежит формулировка задачи Стефана со смешанными краевыми условиями в одномерной постановке. Постановка задачи включает уравнения теплопроводности для талого и мерзлого слоев геологического разреза (при условии сопряжения их контактов) [2, 10-12].

Температура поверхности $T_B = T(z_0, t)$ в расчётах задаётся в виде $T_B = T_W$ в периоды океанических трансгрессий ($T_W = -1,8^\circ\text{C}$ – средняя температура придонной воды на шельфе моря Лаптевых). В период регрессии, когда шельф находится под воздействием атмосферы, эта температура вычисляется как $T_B = T_S + T_{A,k}$. При этом $T_S = -12^\circ\text{C}$ – это современная среднегодовая температура приземного воздуха в прибрежной зоне моря Лаптевых, а $T_{A,k}$ – изменяющаяся во времени аномалия, полученная из температурных реконструкций для плейстоцена (нижний индекс k указывает на различные такие реконструкции; см. таблица). На нижней границе расчётной области ($z = 1500$ м) задаётся геотермический поток, средний для данного региона, 60 мВт/м^2 [13].

Используемые при моделировании реконструкции температурных данных

Индекс, k	Название эксперимента	Температурные данные	Данные для уровня моря
1	ANTAR	EPICA Dome C [14]	Waelbroeck et al., 2002 [17]
2	GRNLD	NGRIP for last 123kyr, EPICA Dome C for earlier period [15]	Waelbroeck et al., 2002 [17]
3	CLB	Climber-2 [16]	Climber-2 [16]
4	CLBLO	Climber-2 [16]	Waelbroeck et al., 2002 [17]

Обсуждение результатов

Все численные эксперименты были выполнены для четырех значений современных изобат шельфа (H_B): 0 м, 10 м, 50 м и 100 м. В соответствии с рассматриваемой глубиной мы принимаем названия для областей шельфа: при $H_B = 0$ – прибрежная зона, $H_B = 10$ м – мелкий шельф, $H_B = 50$ м – средний и при $H_B = 100$ м – глубокий шельф.

В процессе расчета, время которого составило 400 тысяч лет, были использованы три набора данных палеотемпературных реконструкций (см. таблицу). Для реконструкции палеотемператур воздуха и пород использовать непрерывные записи из ледяных кернов Антарктиды [14] и Гренландии [15], а также модельные данные [16]. Для составления кривых изменений уровня морей восточно-сибирского шельфа использовались данные колебаний уровня Мирового океана [16, 17]. Отметим, что применяемые реконструкции температуры

и уровня моря тесно связаны друг с другом. Например, коэффициент корреляции между двумя временными рядами уровня моря [16, 17] составляет 0,93 для последних 123 тыс. лет и 0,87 для последних 250 тыс. лет. Температурные реконструкции (см. таблицу) также коррелируют друг с другом, однако их значения для определенных интервалов времени могут отличаться друг от друга на 8°C, особенно во время ледниковых максимумов, рис. 1.

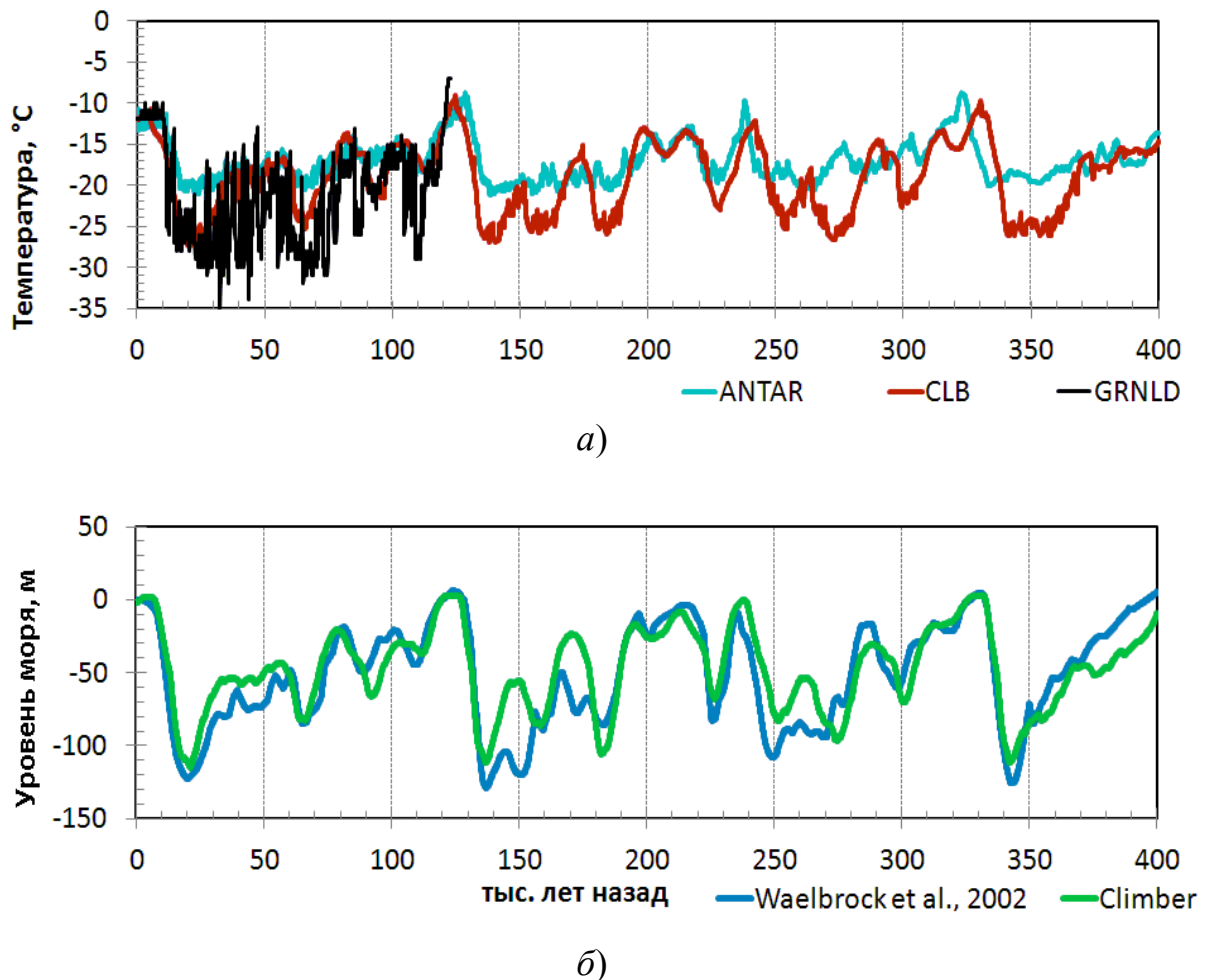


Рис. 1. Используемые данные палеореконовструкций:

а) изменения температуры воздуха за последние 400 тыс. лет; б) кривые колебания уровня моря

Для количественной оценки неопределенности мощности СММП (h_P) к выбору набора данных палеоклиматических изменений (см. таблицу), мы вводим соотношение для коэффициента неопределенности, R:

$$R = \left| \max_k h_P - \min_k h_P \right| / \left(\frac{1}{4} \sum_k h_P \right).$$

Высокая чувствительность h_p к используемым рядам данных по температуре и уровню характерна для временного периода около 130 тыс. лет назад для всего шельфа, рис.1. В этот промежуток времени различие в мощности СММП достигает 183 м и в основном определяется используемыми данными для уровня моря. Для $H_B = 0$ и $H_B = 10$ м в течение последних 250 тыс. лет коэффициент неопределенности $R \leq 0,2$, для среднего шельфа $R \leq 0,4$, за исключением некоторых временных интервалов (например, около 70 тыс. лет назад, когда он достигает 0,6). Результаты моделирования для глубокого шельфа сильно зависят от периода времени, и в этом случае коэффициент неопределенности иногда превышает 0,5.

Таким образом, реакция h_p при использовании ансамбля из четырех наборов данных климатических изменений в плейстоцене ограничена коэффициентом неопределенности $R \leq 0,3$.

Наибольший интерес представляют количественные оценки для современной мощности СММП, полученные в конце расчета. Рассмотрим диапазон полученных оценок для всех численных экспериментов. Для $H_B = 0$ м мощность мерзлого слоя наибольшая и составила $h_p = 702 - 832$ м ($R = 0,16$), для мелкого шельфа $h_p = 685 - 803$ м ($R = 0,16$), для среднего шельфа $h_p = 530 - 641$ м ($R = 0,19$) и для глубокого шельфа $h_p = 202 - 281$ м ($R = 0,3$).

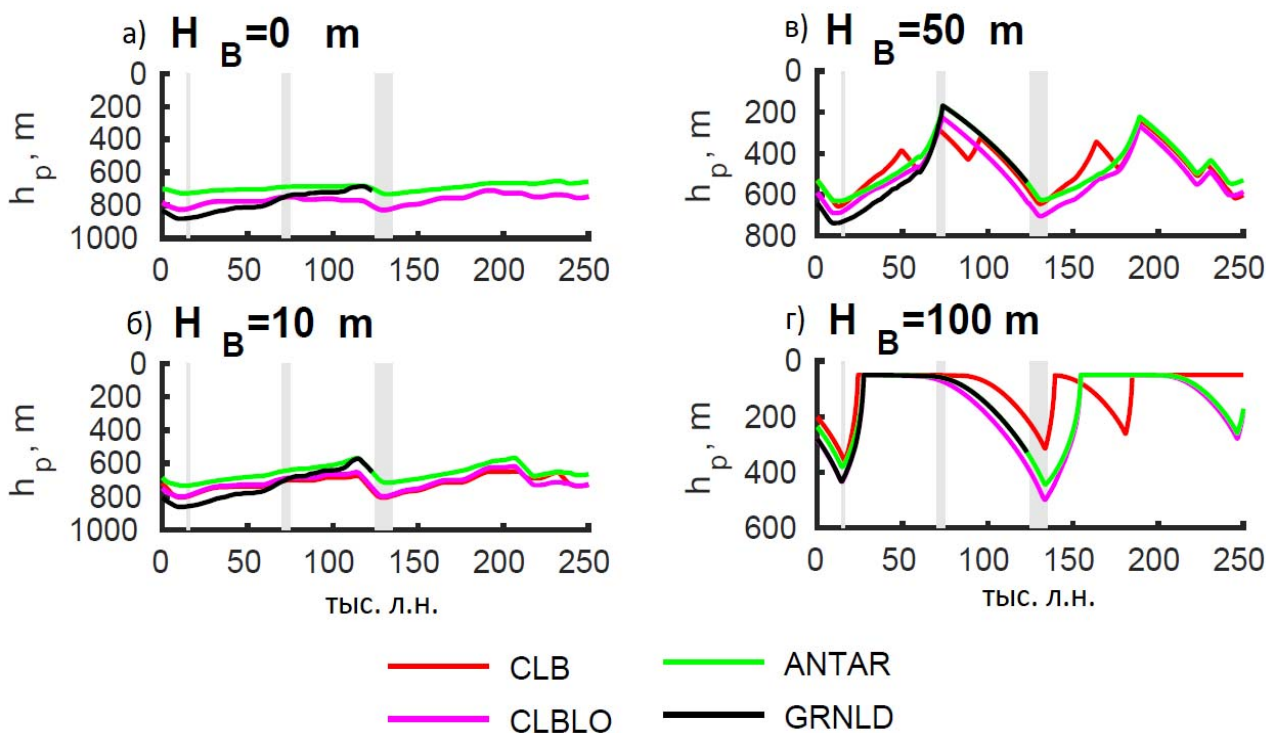


Рис. 2. Глубина основания зоны многолетнемерзлых пород шельфа с современной глубиной $H_B = 0$ (а), 10 (б), 50 (в) и 100 м (г), полученная в численных экспериментах CLB, CLBLO, ANTAR и GRNLD

Заключение

Существующие реконструкции палеотемпературных данных, эмпирические и модельные, характеризуются значительной неопределенностью, которая обусловлена пространственной и временной изменчивостью. Новизна данного исследования состоит в применении методов математического моделирования для определения неопределенности оценок чувствительности к используемым наборам данных при формировании палеогеографических сценариев развития событий.

Несмотря на заметные различия в данных температуры и уровня моря, мы получили ограничение отклика состояния субаквальных многолетних грунтов арктического шельфа. В частности, такой отклик является неопределенным с коэффициентом около 0,3, что снижает требования к временному разрешению наборов данных для рассматриваемой задачи.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты 17-05-00396, 18-05-00087, 18-05-60111, 19-05-00409).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Romanovskii N. N., Hubberten H. W., Gavrillov A. V., Eliseeva A. A., Tipenko G. S. Off-shore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // *Geo-Mar. Letters*. 2005. – V. 25. – № 2–3. – P. 167–182.
2. Malakhova V. V., Eliseev A. V. The role of heat transfer time scale in the evolution of the subsea permafrost and associated methane hydrates stability zone during glacial cycles // *Global Planetary Change*. – 2017. – V. 157. – P. 18–25.
3. Гаврилов А. В., Романовский Н. Н., Хуббертен Х.-В. Палеогеографический сценарий послеледниковой трансгрессии на шельфе моря Лаптевых // *Криосфера Земли*. 2006. – Т. X. – № 1. – С. 39–50.
4. Малахова В. В., Елисеев А. В. Влияние рифтовых зон и термокарстовых озер на формирование субаквальной мерзлоты и зоны стабильности метаногидратов шельфа моря Лаптевых в плейстоцене // *Лед и снег*. – 2018. – Т. 58. – № 2. – С. 231–242.
5. Аржанов М. М., Малахова В. В., Мохов И. И. Условия формирования и диссоциации метангидратов в течение последних 130 тысяч лет по модельным расчётам // *Доклады Академии наук*. – 2018. – Т. 480. – № 6. – С. 725–729.
6. MARGO Project Members. Constraints on the magnitude and patterns of ocean cooling at the Last Glacial Maximum // *Nature Geosci.* – 2009. – V. 2. – P. 127–132.
7. Annan J., Hargreaves J. A new global reconstruction of temperature changes at the Last Glacial Maximum // *Climate of the Past*. – 2013. – V. 9. – P. 367–376.
8. Шахова Н. Е., Никольский Д. Ю., Семилетов И. П. О современном состоянии подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском шельфе: тестирование результатов моделирования данными натурных наблюдений // *Доклады Академии наук*. – 2009. – Т. 429. – № 4. – С. 541–544.
9. Щербаков А. В., Малахова В. В. Моделирование пространственного распределения метангидратов мирового океана и потока метана в атмосферу // *Оптика атмосферы и океана*. – 2006. – Т. 19. – № 6. – С. 530–535.

10. Малахова В. В., Голубева Е. Н. Оценка устойчивости состояния мерзлоты на шельфе Восточной Арктики при экстремальном сценарии потепления в XXI в. // Лёд и Снег. – 2016. – Т. 56. – № 1. – С. 61–72.
11. Елисеев А. В., Малахова В. В., Аржанов М. М. и др. Изменение границ многолетне-мёрзлого слоя и зоны стабильности гидратов метана на арктическом шельфе Евразии в 1950–2100 гг. // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 465. – № 5. – С. 598–603.
12. Golubeva E., Platov G., Malakhova V., Kraineva M. and Iakshina, D. Modelling the Long-Term and Inter-Annual Variability in the Laptev Sea Hydrography and Subsea Permafrost State // Polarforschung, Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research. – 2018. V. 87. – № 2. – P. 195–210. doi: 10.2312/polarforschung.87.2.19.
13. Davies J. H. Global map of Solid Earth surface heat flow // *Geochem. Geophys. Geosyst.* – 2013. – V. 14. – № 10. – P. 4608–4622.
14. EPICA Community Members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core // *Nature.* – 2004. – V. 429. – P. 623–628.
15. Kindler P., Guillevic M., Baumgartner M., Schwander J., Landais A., Leuenberger M., Temperature reconstruction from 10 to 120 kyr b2k from the NGRIP ice core // *Climate of the Past.* – 2014. – V. 10. – P. 887–902. doi:10.5194/cp-10-887-2014.
16. Ganopolski A., Calov R. The role of orbital forcing, carbon dioxide and regolith in 100 kyr glacial cycles // *Climate of the Past.* – 2011. – V. 7. – P. 1415–1425.
17. Waelbroeck C., Labeyrie L., Michel E., Duplessy J., McManus J., Lambeck K., Balbon E., Labracherie M. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records // *Quat. Sci. Rev.* – 2002. – V. 21. – P. 295–305.

© В. В. Малахова, А. В. Елисеев, 2019