

## Моделирование отклика океана на изменение термохалинного состояния поверхностных вод с временным масштабом ледникового периода

А.В. Щербаков<sup>1</sup>, В.В. Малахова<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Югорский НИИ информационных технологий  
628011, г. Ханты-Мансийск, Тюменской обл., ул. Мира, 151

<sup>2</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН  
630090, г. Новосибирск, ул. Лаврентьева, 6

Поступила в редакцию 22.01.2011 г.

Трехмерная математическая модель глобального океанского климата с пространственным разрешением 5° вместе с моделью переноса растворенного газа океанскими течениями используется для количественной оценки масштаба возможного потока метана в атмосферу от разлагающихся поддонных метангидратов. Результаты экспериментов дают разумные значения потока метана в атмосферу, сопоставимые с имеющимися оценками. Максимальный расчетный поток метана в атмосферу равен примерно 8–13 Тг/год.

*Ключевые слова:* термохалинная циркуляция океана, ледниковый период, источники метана, поток метана, поддонные газогидраты, зона стабильности газогидратов; termohaline ocean circulation, glacial age, methane sources, methane flux, subbottom gas hydrates, hydrate stability zone.

### Введение

Анализ данных, полученных при изучении ледяных кернов из Антарктиды и Гренландии [1–6], образовавшихся в период, охватывающий 400–800 тыс. лет до нашей эры, показал тесную взаимосвязь изменений средней температуры и концентраций парниковых газов углекислого газа и метана. При снижении средней температуры атмосферы на 8–10 °С во время длительных ледниковых похолоданий на протяжении каждых 80–90 тыс. лет происходит синхронное уменьшение концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, а во время быстрого потепления на те же 8–10 °С, но всего лишь за 10 тыс. лет, растет и концентрация этих парниковых газов. Оказалось, что на четко выделяющихся восьми ледниковых периодах продолжительностью около 100 тыс. лет при выходе климата из максимумов ледниковых похолоданий изменения концентрации CO<sub>2</sub> следуют с отставанием за изменениями температуры [7], а увеличение концентрации метана опережает увеличение температуры [8]. Это дало основание предположить, что выход климата из максимальных ледниковых похолоданий связан в первую очередь с повышением концентрации метана в атмосфере за счет разложения поддонных газовых гидратов метана Мирового океана [9–11].

Потенциально опасный источник метана, который может включиться при повышении температуры

и падении давления в придонных водах Мирового океана, — это газогидраты метана, которые обнаружены в большом количестве в донных осадках морей и океанов. По результатам глубоководного бурения, геофизическим и другим данным на акваториях морей и океанов было выделено свыше 60 районов распространения газовых гидратов в поддонных отложениях [12]. Как показывают исследования, газовые гидраты в морских условиях могут залегать практически в любых породах, заполняя поровое пространство на глубинах от 300–400 до 3000 м. Они содержатся в поровом пространстве в виде прослоек, линз, в рассеянном состоянии и составляют 10–20% от общего объема осадков [13]. По различным оценкам [14, 15] возможный выход метана в атмосферу из залежей газогидратов составляет 5–20 Тг/год.

Для того чтобы газогидраты начали разлагаться, требуется либо понижение давления, либо повышение температуры. Во времена максимума ледниковых похолоданий уровень океана опускался на 120 м и температура поверхностных вод уменьшалась в зависимости от широты на 2–12 °С, а при выходе из этих максимумов на такую же величину увеличивалась температура и поднимался уровень океана. То есть давление и температура действовали разнонаправленно на условие стабильности газогидратов.

Потенциально большой вклад газогидратов метана в повышение атмосферной концентрации метана был подтвержден в последние годы на примере разложения газогидратов арктических морей Восточно-Сибирского мелководного шельфа [16, 17]. На основе измерений концентрации метана в 2003–2007 гг. в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море было

\* Александр Валентинович Щербаков (scherbak@urii.ru);  
Валентина Владимировна Малахова (malax@sscc.ru, malaxv@list.ru).

установлено, что за счет таяния подводной вечной мерзлоты и дестабилизации газогидратов метана мощность современной эмиссии метана из акватории морей Восточной Сибири составляет примерно 8 Тг —  $\text{CH}_4$  в год, что соизмеримо с ежегодной суммарной эмиссией  $\text{CH}_4$  из всех окраинных морей Мирового океана, которая, по разным оценкам, составляет от 5 до 20 Тг/год [14, 18].

В работе авторов [19] описываются результаты численных экспериментов с моделью климата Мирового океана с временным масштабом ледникового периода 100–120 тыс. лет. Эксперименты начинаются с установившегося климатического состояния океана, полученного с сезонно изменяющимися данными по температуре, солености [20] и напряжению трения ветра на поверхности океана.

Предполагается, что изменения температуры поверхностных вод океана следуют за изменениями температуры атмосферы всюду, кроме полярных областей, покрытых льдом. Поверхностная соленость и напряжение трения ветра на протяжении всего эксперимента совпадают с современными данными. Температура поверхности океана меняется следующим образом:

$$T^*(t, \lambda, \vartheta) = \frac{1}{2} \left[ (T_w^* - T_s^*) \cos\left(\frac{2\pi t}{360}\right) + (T_w^* + T_s^*) \sin\left(\frac{2\pi t}{360}\right) \right],$$

$$T_w^*(t, \lambda, \vartheta) = T_w(\lambda, \vartheta) + dT_{LGM} F(t),$$

$$T_s^*(t, \lambda, \vartheta) = T_s(\lambda, \vartheta) + dT_{LGM} F(t),$$

где  $t$  — время, дни;  $\lambda, \vartheta$  — долгота и широта расчетной точки, град;  $T_w(\lambda, \vartheta), T_s(\lambda, \vartheta)$  — заданные на поверхности океана современные зимняя и летняя температуры [20];  $T_w^*(t, \lambda, \vartheta), T_s^*(t, \lambda, \vartheta)$  — зимняя и летняя температуры поверхности океана на протяжении 120 тыс. лет ледникового периода;  $dT_{LGM}$  — масштаб ледникового похолодания;  $F(t)$  — сплайновая интерполирующая кривая, нормированная на единицу, которая строится по 25 точкам данных, снятых с шагом 10 000 лет (рис. 1).

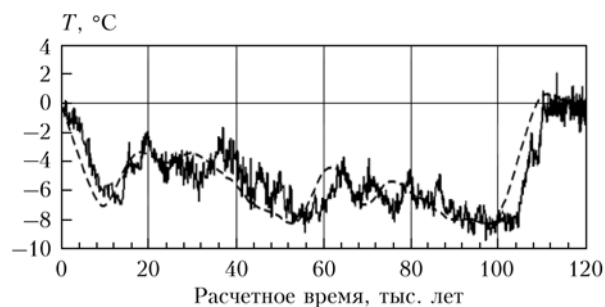


Рис. 1. Изменение температуры атмосферы по ледяным кернам Антарктики и Гренландии за последний ледниковый период [1, 4] (сплошная линия). Параметризация изменения температуры во время ледникового периода с периодом 120 тыс. лет  $dT_{LGM}F(t)$  (штриховая линия)

Предполагается, что на протяжении всего периода интегрирования соленость поверхностных вод изменяется в зависимости от нормального годового хода в соответствии с атласом Levitus [20]:

$$S^*(t, \lambda, \vartheta) = \frac{1}{2} \left[ (S_w - S_s) \cos\left(\frac{2\pi t}{360}\right) + (S_w + S_s) \sin\left(\frac{2\pi t}{360}\right) \right].$$

К модели гидротермодинамики океана присоединяются уравнение переноса растворенного метана и термическая модель донного осадочного слоя [21], которая позволяет рассчитать перенос растворенного метана течениями и найти диффузионный поток метана в атмосферу.

Проведены три эксперимента. В первом эксперименте с масштабом ледникового похолодания  $dT_{LGM} = -8^\circ\text{C}$  температура поверхности океана всюду к моменту максимума ледникового похолодания уменьшается на  $8^\circ\text{C}$ , за исключением высоких широт, где уменьшение температуры ограничено значением  $-2^\circ\text{C}$ .

На рис. 2, а приведены изменение средней температуры океана и рассчитанный поток метана в атмосферу.

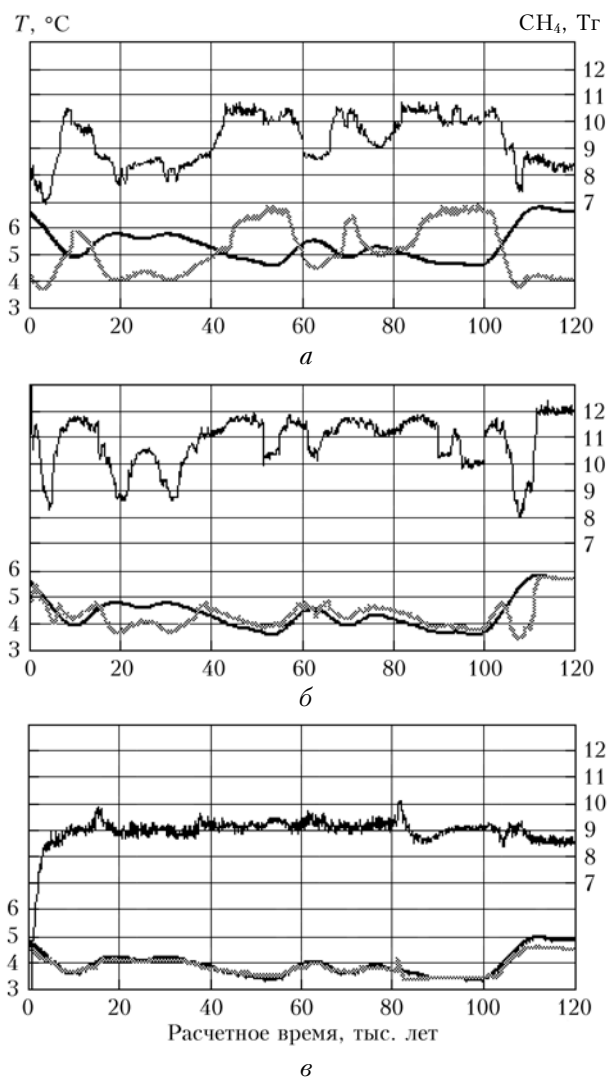


Рис. 2. Изменение по времени средней температуры океана — толстая серая линия, изменение температуры поверхностных вод — жирная линия; поток метана в атмосферу (справа) — тонкая линия, в экспериментах 1, 2 и 3 соответственно рисунки а, б и в

В этом эксперименте изменения средней температуры океана находятся в противофазе к изменениям поверхностных значений. Во время охлаждения поверхностных вод средняя температура океана увеличивается, а во время нагревания поверхностных вод средняя температура океана, наоборот, уменьшается. Это происходит потому, что при охлаждении поверхностных вод области, охваченные глубокой конвекцией, или области формирования донных вод увеличиваются в сторону более низких широт вплоть до 40–45° северной и южной широты. Во время длительного немоного похолодания поверхностных вод за 80–90 тыс. лет средняя температура океана и температуры придонных вод увеличилась на 4–8° [19]. Более подробное рассмотрение изменений средней температуры Мирового океана показывает, что тепловая инерция вод Мирового океана, т.е. время достижения промежуточных экстремумов, отстает от соответствующих экстремумов в изменчивости поверхностных значений на 500–1100 лет.

Поток метана в атмосферу синхронно следует за изменениями поверхностной температуры, его величина находится в пределах 7–11 Тг/год.

Анализ результатов численного моделирования изменения климата Мирового океана за время ледникового цикла при изменении температуры поверхностных вод на протяжении 100–120 тыс. лет [19] показал, что одним из ключевых параметров является масштаб изменения температуры поверхностных вод в тропиках [22]. Поэтому во втором эксперименте предполагалось, что температура поверхностных вод в тропиках всех океанов во время максимума ледникового похолодания была меньше современной на 5 °С. В остальном параметры эксперимента аналогичны предыдущему эксперименту. На рис. 2, б приведены средняя температура и поток метана в атмосферу. Поскольку в этом эксперименте области глубокой конвекции сосредоточены в высоких широтах, а в сторону субтропиков не распространяются, то изменение средней температуры океана в основном следует за изменениями поверхностной температуры. Поток метана увеличился незначительно и находился в пределах 8–13 Тг/год.

В третьем эксперименте в момент максимума ледникового похолодания на поверхности океана в каждой расчетной точке были заданы результаты палеореконструкции поверхностной температуры и солености [23]. В этих данных температура поверхностных вод в тропиках всего лишь на 1–2° была ниже современных значений. В этом эксперименте изменения средней температуры океана синхронны изменениям поверхностной температуры (рис. 2, в), а поток метана в атмосферу уменьшился и не превышает 10 Тг/год.

Полученные оценки параметров потока метана следует считать завышенными, так как в модели не учтен процесс микробного окисления метана [24], в результате которого до 95–99% диффузионного метана окисляется и не попадут в атмосферу [25]. И хотя перенос метана в атмосферу в виде пузырьков может составлять до 95% по сравнению с рас-

творенным метаном [26], но это можно отнести только к мелководным шельфовым областям океана с глубиной менее 100 м, так как с больших глубин пузырьки метана поверхности не достигают, а полностью растворяются [27].

1. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pe'pin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature (Gr. Brit.). 1999. V. 399, N 6735. P. 429–436.
2. Котляков В.М. Глобальные изменения природы в «зеркале» ледяного керна // Природа. 1992. № 7. С. 59–68.
3. Котляков В.М. Скважина на станции Восток рассказывает о прошлом климате Земли. ГНТИ // Глобальные изменения природной среды и климата. М., 1997. С. 281–291.
4. Котляков В.М. Четыре климатических цикла по данным ледяного керна из глубокой скважины «Восток» в Антарктиде // Изв. РАН. Сер. геогр. 2000. № 1. С. 7–19.
5. Luthi D., Le Floch M., Bereiter B., Blunier T., Barnola J., Siegenthaler U., Raynaud D., Jouzel J., Fischer H., Kawamura K., Stocker T.F. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present // Nature (Gr. Brit.). 2008. V. 453, N 7193. P. 379–382.
6. Louergue L., Schilt A., Spahni R., Masson-Delmotte V., Blunier T., Lemieux B., Barnola J., Raynaud D., Stocker T.F., Chappellaz J. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH<sub>4</sub> over the past 800,000 years // Nature (Gr. Brit.). 2008. V. 453, N 7193. P. 383–386.
7. Монин А.С., Сонечкин Д.М. Колебания климата по данным наблюдений. Тройной солнечный цикл и другие циклы. М.: Наука, 2005. 192 с.
8. Бялко А.В. Палеоклимат: дополнение к теории Миланковича // Природа. 2009. № 12. С. 18–28.
9. Nisbet E.G. Sources of atmospheric CH<sub>4</sub> in early post-glacial time // J. Geophys. Res. D. 1992. V. 97, N 12. P. 12859–12867.
10. Kennett J., Cannariato K.G., Hendy I.L., Behl R.J. Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary interstadials // Science. 2000. V. 288, N 5463. P. 128–133.
11. Kennett J.P., Cannariato K.G., Hendy I.L., Behl R.J. Methane hydrates in Quaternary Climate Change. Washington, D.C.: AGU, 2003. 216 p.
12. Ginsburg G.D., Kvenvolden K.A., Soloviev V.A. Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates // Geomarine Lett. 1993. V. 13, N 1. P. 32–40.
13. Davie M.K., Buffett B.A. A numerical model for the formation of gas hydrate below the sea floor // J. Geophys. Res. B. 2001. V. 106, N 1. P. 497–514.
14. IPCC 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. USA: Cambridge University Press, Cambridge. United Kingdom and New York. 2001.
15. Бажин Н.М. Метан в атмосфере // Сорос. образ. ж. 2000. Т. 6, № 3. С. 52–57.
16. Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестн. РАН. 2009. Т. 79, № 6. С. 507–518.
17. Шахова Н.Е. Метан в морях Восточной Арктики: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. ДВО РАН: Дальнаука, 2010. 35 с.

18. *Reeburgh W.S.* Oceanic methane biogeochemistry // *Chem. Rev.* 2007. V. 107, iss. 2. P. 486.
19. *Щербаков А.В., Малахова В.В.* Численное моделирование глобального климата океана. Новосибирск: Изд. ИВМиМГ СО РАН, 2008. 159 с.
20. *Levitus S.* Climatological Atlas of the World Ocean // NOAA Prof. Paper. 1982. U.S. Govt. Printing Office, 173 p.
21. *Щербаков А.В., Малахова В.В.* Математическое моделирование потока метана в атмосферу в результате разложения метангидратов Мирового океана // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 5–6. С. 485–489.
22. *Bush A.B.G., Philander S.G.H.* The climate of the Last Glacial Maximum: Results from a coupled atmosphere-ocean general circulation model // *J. Geophys. Res. D.* 1999. V. 104, N 20. P. 24509–24525.
23. *Paul A., Schafer-Neth C.* Modeling the water masses of the Atlantic Ocean at the Last Glacial Maximum // *Paleoceanography.* 2003. V. 18, N 3. 1058. doi: 10.1029/2002PA000783.
24. *Леун А.Ю.* Резервуар метана и скорость метанотрофии в водной толще и осадках арктических морей // *Геология морей и океанов: Материалы XVII Междунар. научн. конф. по морской геологии.* Т. 3. М.: ГЕОС, 2007. С. 144–146.
25. *Cranston R.E.* Marine sediments as a source of atmospheric methane // *Bull. Geol. Soc. Denmark.* 1994. V. 41, N 1. P. 101–109.
26. *Chanton J.P., Martens C.S., Kelley C.A.* Gas transport from methane-saturated tidal freshwater and wetland sediments // *Limnol. and Oceanogr.* 1989. V. 34, N 5. P. 807–819.
27. *McGinnis D.F., Greinert J., Artemov Y., Beaubien S.E., Wuest A.* Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. C09007. doi: 10.1029/2005JC003183.

*A.V. Scherbakov, V.V. Malakhova.* **Modeling of the ocean response to the termohaline ocean circulation change of the surface waters with time scale of the glacial age.**

The three-dimensional mathematical model of global ocean climate with a spatial resolution of five degrees together with model of the dissolved gas transport by ocean currents is used for a quantitative estimation of scale of a possible methane flux in atmosphere from melting subbottom methane hydrates. Results of experiments give reasonable values of the methane flux to the atmosphere comparable to available estimations. The maximum calculated methane flux to the atmosphere of an order of 8–13 Tg per a year is received.