

Метангидраты как возможный источник метана в период ледниково-межледникового цикла

В.В. Малахова*

*Институт вычислительной математики и математической геофизики, СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6*

Поступила в редакцию 6.10.2010 г.

Анализ ледяных кернов говорит о том, что повышение температуры и рост концентрации метана в атмосфере шли на протяжении ледниково-межледниковых циклов параллельно друг другу. Подобная корреляция изменений температуры и содержания парниковых газов свидетельствует о наличии причинно-следственной связи. На основе трехмерной квазигеострофической модели термогидродинамики Мирового океана оценивается количество метана, которое могло содержаться в поддонных газогидратах в период последнего оледенения и при современном состоянии климата. Согласно математическому моделированию получено, что порядка 270 Гт метана могло выделиться в атмосферу в результате дестабилизации поддонных газогидратов как следствие нарушения термобарических условий в период последнего ледниково-межледникового цикла.

Ключевые слова: поддонные метангидраты, зона стабильности газогидратов, термохалинная циркуляция океана, последний ледниковый период; subbottom methane hydrate, hydrate stability zone, termohaline ocean circulation, last glacial episode.

Причинно-следственная связь долговременных изменений в атмосфере температуры и концентрации парниковых газов является важным вопросом в проблеме изменения климата [1]. Палеоклиматические данные, полученные в результате анализа ледяных кернов, показывают, что температура воздуха убывала и росла на протяжении ледниково-межледниковых эпох в фазе с изменением концентрации метана в атмосфере. В течение всего времени, доступного для изучения по кернам полярных льдов, отмечены значительные колебания концентрации метана. Резкие изменения концентрации метана приходятся на оба ледниково-межледниковых перехода: 150–135 тыс. и 18–9 тыс. лет назад (рис. 1). В эти периоды она резко возрастала от 0,35 до 0,7 ppm [2].

Огромные запасы метана в газогидратах глубоководных поддонных областей океана и на континентальном шельфе [3] и тесная взаимосвязь содержания метана в атмосфере и изменения климата на протяжении всего климатического цикла [2] привели к существованию гипотезы о влиянии разложения газогидратов метана на завершение последнего ледникового периода [4]. Газовые метангидраты — твердые кристаллические соединения газа и воды, образующиеся при определенных термобарических условиях. Так, в 1 м³ гидрата может содержаться 170 м³ метана при нормальных условиях, при этом объем, занимаемый газом в гидрате, не превышает 20% [5].

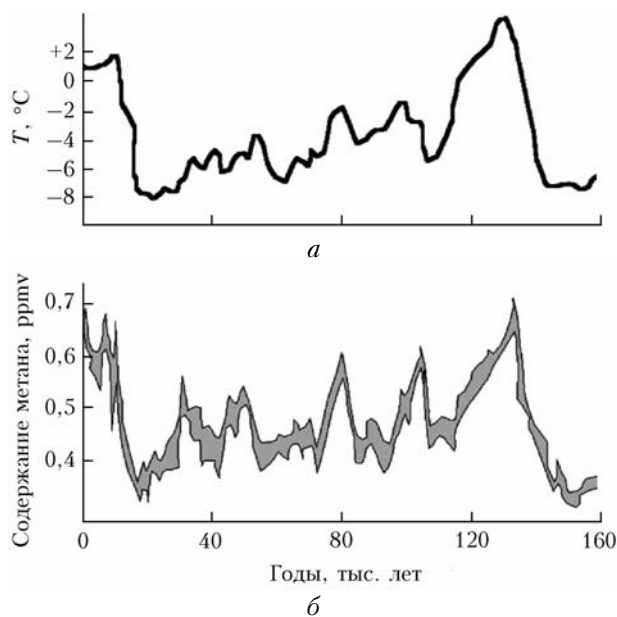


Рис. 1. Изменения температуры атмосферы (а) и атмосферного метана (б) в прошлом по результатам исследования ледяного керна [2]

Запасы метана в газогидратном виде в океане сегодня оцениваются в среднем $2 \cdot 10^{16}$ м³ [6]. Освобождение этого парникового потенциала могло бы значительно повлиять на процессы, приводящие к глобальным климатическим изменениям.

Повышение средней температуры поверхностно-го слоя океана может привести к выбросу в атмосферу

* Валентина Владимировна Малахова (malax@sscc.ru, malaxv@list.ru).

гигантских количеств метана за счет теплового разложения неустойчивых газовых гидратов на морском шельфе и на суше [7, 8]. Оценки возможного поступления метана в атмосферу в периоды ледниково-межледникового цикла различны. Так, по результатам моделирования получено, что 1500–2700 Гт метана могло поступить в атмосферу в результате разложения газогидратов 120 тыс. лет назад и примерно 800 Гт — 55,5 тыс. лет назад [9]. В работе [7] получено, что как минимум 120 Гт углерода могло выделиться в результате разрушения части газогидратов в период с 18 до 8 тыс. лет назад, и это составило только 30% суммарного выброса метана. Ранее, в работе [8], была изучена возможная дестабилизация поддонных метангидратов под действием изменений поверхностной температуры океана в течение нескольких тысячелетий. На основе сценарных экспериментов получено, что длительное потепление может привести к масштабной дестабилизации метангидратов, существующих в осадочном слое океана, при этом поток метана в атмосферу может составить 18 Тг/год.

Газовые гидраты могут образовываться в земной коре при определенных термодинамических условиях. При этом под термином «зона стабильности газогидратов» (ЗСГ) принято понимать часть литосферы и гидросферы Земли, термобарический и геохимический режим которой соответствует условиям устойчивого существования гидратов газа определенного состава. Чтобы понять, какое количество метана могло поступить из газогидратов во время ледниково-межледникового цикла, необходимо оценить термобарические условия, зону стабильности и потенциально возможный объем газогидратов для каждой из климатических стадий цикла. Такая попытка рассмотрена в данной статье.

На основе трехмерной квазигеострофической модели термогидродинамики океана моделируются два климатических состояния океана: первое — современная термохалинная циркуляция, второе — термохалинная циркуляция последнего ледникового периода. Далее оценивается количество метана, которое могло поступить в атмосферу в результате разложения газогидратов в конце последнего ледникового периода 20 тыс. лет назад.

Используемая квазигеострофическая численная модель климата Мирового океана, включающая сезонную изменчивость, с учетом реальной топографии дна и Арктического бассейна, подробно описана в работе [10]. Модель основана на решении трехмерных уравнений переноса тепла и соли на равномерной пятиградусной широтно-долготной сетке и неравномерной, сгущающейся к поверхности сетке по вертикали. Задача решалась в полигональной области Мирового океана на пятиградусной сетке от 72,5° ю.ш. до 87,5° с.ш. с 24 вертикальными уровнями до достижения квазистационарного состояния через время порядка нескольких тысяч лет [10].

Были проведены два численных эксперимента. В первом численном эксперименте «Climate», начиная с горизонтально однородной температуры и солености под действием заданных сезонно изменяющихся на поверхности океана температуры, солено-

сти из атласа Levitus [11] (рис. 2) и напряжений трения ветра, было рассчитано термохалинное состояние Мирового океана (рис. 3, а).

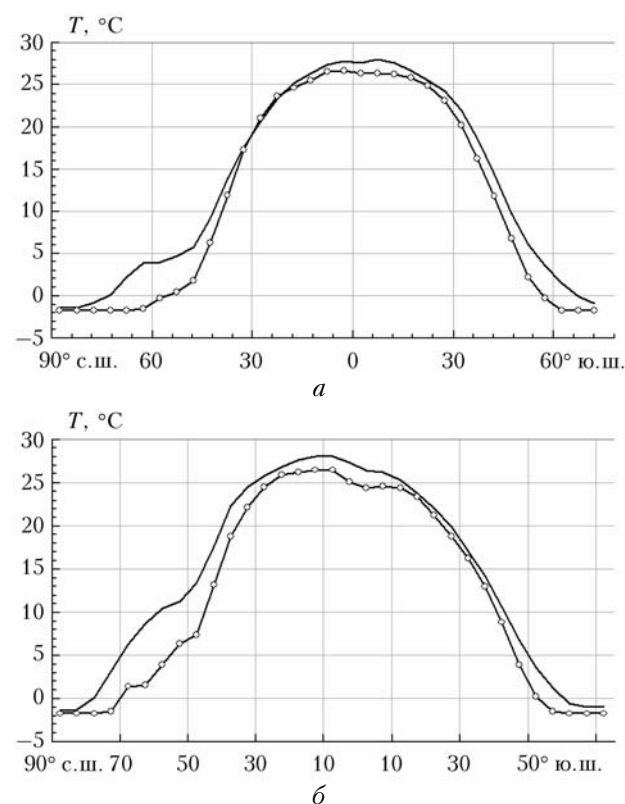


Рис. 2. Зонально-средняя температура поверхности океана из данных [11] (немаркированная линия) и из палеоклиматических данных [12] (маркированная): а — для зимы и б — для лета Северного полушария

Во втором эксперименте («Paleo-Climat») в граничных условиях на поверхности океана задавались зимние и летние значения температуры и солености поверхности океана из данных по реконструкции температуры и солености поверхности Мирового океана в период последнего ледникового периода [12] (рис. 2).

Видно, что похолодание поверхности океана имеет преимущественно зональный характер. При этом температура поверхности океана в высоких широтах уменьшается на 5–7 °С, а в тропиках всего на 1–3 °С. В численном эксперименте предполагается, что если температура в поверхностной расчетной точке опускается ниже –2°, то в этой точке появляется ледяной покров и температура поверхностной воды фиксируется на величине –2° и напряжения трения ветра обнуляются.

Во втором эксперименте также было определено климатическое состояние океана в результате интегрирования модели до установления на срок 5000 лет (рис. 3, б). На зонально-средних полях температуры на меридиональной плоскости видно, что в эксперименте «Paleo-Climat» уменьшились толщина и температура главного термоклина, а также в высоких широтах, в то время как температура промежуточных слоев и глубокого океана стала даже больше.

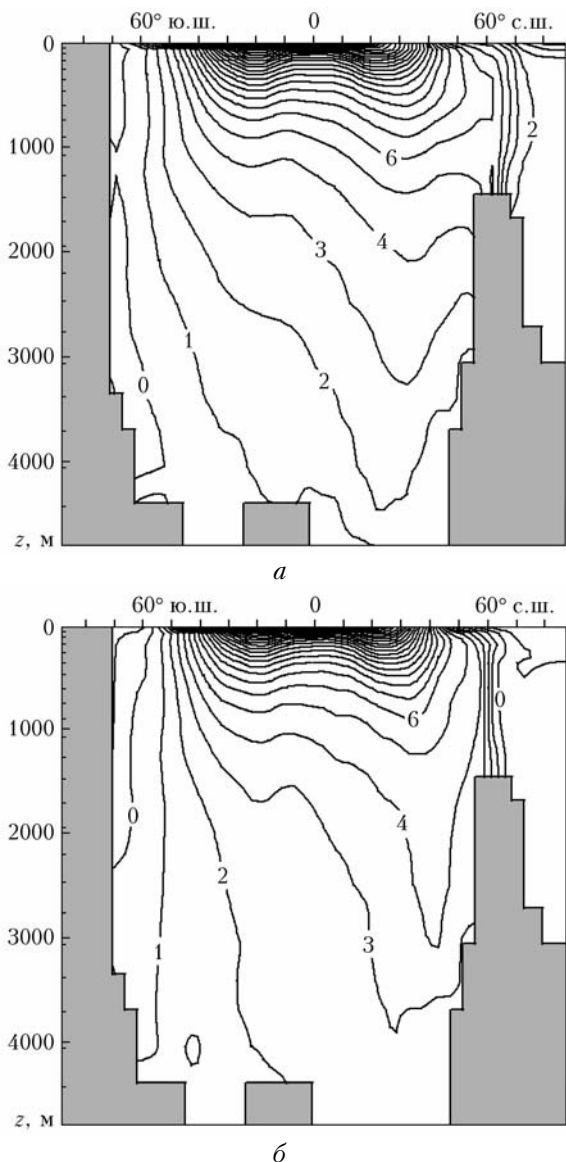


Рис. 3. Зонально-средняя температура в Мировом океане: *a* – в эксперименте «Climate»; *б* – «Paleo-Climate»

Для оценки теплового режима осадочного слоя океанская модель была дополнена одномерной термической моделью донного слоя осадков [13]. В качестве граничных условий на верхней границе осадочного слоя, совпадающей с дном океана, задана температура придонной воды $T_{s,b}$, которая получена из модели динамики океана, на нижней границе осадочного слоя задан геотермический поток тепла Q_t :

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_s \frac{\partial T_s}{\partial z}, \quad (1)$$

$$z = H: T_s = T_{s,b}, \quad (2)$$

$$z = H + d: k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = Q_t, \quad (3)$$

$$t = 0: T_s = T_{s,cl}(z). \quad (4)$$

Здесь $k_s = 10^{-2}$ см/с – коэффициент теплопроводности осадочного слоя; $H = H(\lambda, \theta)$ – рельеф дна океана (λ – долгота, θ – широта, т.е. дополнение широты до 90°); Q_t – геотермический поток тепла в осадках; $T_s(z)$ – температура в осадочном слое, $T_{s,cl}(z)$ – решение стационарного уравнения (1); d – толщина осадочного слоя.

Далее, была выделена акватория с достаточными для гидратообразования термобарическими условиями с учетом климатических состояний, полученных в обоих численных экспериментах. Пространственное распределение газогидратов метана и глубина их залегания в осадочном слое океана моделируются с учетом геотермического градиента и пористости осадочного слоя океанского дна. Зона гидратообразования определялась математически путем совместного решения уравнения изменения термического градиента в разрезе пород и уравнения равновесного существования гидрата в данной пористой среде. Предполагается, что метангидраты существуют в осадочном слое всюду, где выполняются термобарические условия их существования, которые рассчитываются по формуле

$$T_{stab}^{-1} = 3,79 \cdot 10^{-3} - 2,83 \cdot 10^{-4} \lg P_{stab}, \quad (5)$$

где T_{stab} и P_{stab} – температура и давление стабильности газогидратов [14].

Кривая равновесных условий гидратообразования метана (5) накладывается на линию естественного распределения температур и давлений в исследуемой области. По точкам пересечения этих двух линий была определена верхняя и нижняя границы зоны стабильности газогидрата. Фазовая диаграмма получена для всех точек океана. Условием газонакопления в отложениях является значительное содержание органического вещества при высокой скорости седиментации. Исходя из этого, к негидратоносным отнесены акватории, где нет достаточного для гидратообразования количества газа, где глубина океана более 3000 м [15].

Толщина газогидратной зоны сильно зависит от вертикального температурного градиента в осадках, который задавался различным для 22 регионов океана: от 30 до 87 °С/км. Было принято простое уменьшение пористости Pr с поддонной глубиной по экспоненте, полученное из эмпирических данных. Гидратонасыщенность отложений G (процент порового пространства, занятого газогидратами) задана равной 50% порового пространства непосредственно у подошвы зоны стабильности и плавно уменьшающейся до нуля в направлении морского дна [16]. Общее количество метана, которое может быть заключено в поддонных метангидратах, определялось по следующей формуле [5]: $V = \Delta z \cdot S \cdot Pr \cdot G \cdot C$. Здесь Δz и S – вычисленные толщина и площадь зоны стабильности; C – объемный множитель, показывающий содержание метана в 1 м^3 газогидрата ($C = 168$).

Оценки потенциального объема метана, содержащегося в зоне стабильности газогидратов, были получены для обоих экспериментов (таблица).

**Потенциальный объем метана, содержащийся
в зоне стабильности газогидратов, полученный
для обоих экспериментов**

Широта	Объем метана · 10 ¹⁵ м ³	
	«Climate»	«Paleo-Climatе»
90–70° с.ш.	1,631	1,754
70–50° с.ш.	0,700	0,819
50–30° с.ш.	0,971	0,978
30–10° с.ш.	2,518	2,602
10° с.ш. – 10° ю.ш.	2,611	2,615
10–30° ю.ш.	2,054	2,048
30–50° ю.ш.	1,193	1,211
50–70° ю.ш.	2,683	2,704
<i>Всего</i>	14,36	14,74

Результаты математического моделирования показывают, что количество метана, которое может быть заключено в газогидратах дна океана в условиях современного климата, составило $14,36 \cdot 10^{15}$ м³, что сопоставимо с оценками, полученными в работах [5, 6, 17], тогда как в условиях моделирования последнего ледникового периода с использованием палеоклиматических данных получено $14,74 \cdot 10^{15}$ м³ метана. При этом увеличение зоны стабильности газогидратов и, соответственно, объема метана в них для ледникового периода получено в высоких широтах обоих полушарий на глубине океана порядка 500–1000 м (см. таблицу). Это объясняется уменьшением в высоких широтах температуры этих слоев океана.

Итак, в конце последнего ледникового периода в результате климатических изменений могли произойти нарушение термобарических условий существования газогидратов метана и изменение зоны их стабильности в осадочном слое океана. В результате математического моделирования получено, что при разрушении этой части метангидратов, оказавшихся в зоне своей неустойчивости, могло выделиться порядка $380 \cdot 10^{12}$ м³ или $273 \cdot 10^3$ Мт метана. Если бы реализация соответствующего объема метана происходила равномерно в период ледниково-межледникового перехода (18–9 тыс. лет назад), это было бы эквивалентно потоку метана в атмосферу порядка 27 Тг/год. Основной выброс метана происходил бы в высоких широтах обоих полушарий.

Работа выполнена в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, при поддержке РФФИ (проекты № 08-05-00457 и 08-05-00708).

1. Монин А.С., Сонечкин Д.М. Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы. М.: Наука, 2005. 191 с.

V. V. Malakhova. Methane hydrates as a possible source of methane in a glacial-interglacial cycle.

The analysis of ice cores suggests that temperature rise and growth of the methane concentration of the atmosphere went in the glacial-interglacial cycle in parallel to each other. Similar correlation of changes of temperature and the concentration of greenhouse gases testifies to the presence of a relationship of cause and effect. In this work, on the basis of the three-dimensional mathematical climatic model of the ocean, the methane amount, containig in subbottom methane hydrates in last glacial maximum and under modern climate conditions is estimated. According to mathematical modeling, it is found, that about 270 Gt methane could be released into the ocean/atmosphere system as the result of the instability in the subbottom methane hydrate reservoir in the last glacial episode.

2. 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.
3. Ginsburg G.D., Kvenvolden K.A., Soloviev V.A. World-wide distribution of subaquatic gas hydrates // Geo-Mar. Lett. 1993. V. 13, N 1. P. 32–40.
4. Judd A.G., Hovland M., Dimitrov L.I., Garcia Gil, Jukes V. The geological methane budget at Continental Margins and its influence on climate change // Geofluids. 2002. V. 2, N 2. P. 109–126.
5. Gornitz V., Fung I. Potential distribution of methane hydrates in the world's oceans // Global Biogeochem. Cycles. 1994. N 8. P. 335–347.
6. Kvenvolden K.A. Potential effects of gas hydrate on human welfare // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1999. V. 96, N 7. P. 3420–3426.
7. Maslin M.A., Thomas E. Balancing the deglacial global carbon budget: the hydrate factor // Quatern. Sci. Rev. 2003. N 22. P. 1729–1736.
8. Малахова В.В., Щербаков А.В. Моделирование разложения поддонных метангидратов в результате климатических изменений с масштабом несколько тысяч лет // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 540–545.
9. Glasby G.P. Potential impact on climate of the exploitation of methane hydrate deposits offshore // Mar. and Petrol. Geol. 2003. V. 20, Iss. 2. P. 163–175.
10. Щербаков А.В., Малахова В.В. Численное моделирование глобального климата океана. Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ СО РАН, 2008. 159 с.
11. Levitus S. World Ocean Atlas 1994. CD-ROM Data Set: U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite Data and Information Service, National Oceanographic Data Center, Ocean Climate Laboratory, 1994.
12. Paul A., Schafer-Neth C. Modeling the water masses of the Atlantic Ocean at the Last Glacial Maximum // Paleooceanogr. 2003. V. 18, N 3. 1058. doi: 10.1029/2002PA000783.
13. 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.
14. Mienert J., Andreassen K. Changes of the Hydrate Stability zone of the Norwegian margin from glacial to interglacial times // Annals of the New York Academy of Science / Gas Hydrates challenges for the future. 2000. V. 912. P. 200–210.
15. Buffett B., Archer D. Global inventory of methane clathrate sensitivity to changes in the deep ocean // Earth and Planet. Sci. Lett. 2004. V. 227, Iss. 3–4. P. 185–199.
16. Hyndman R.D., Davis E.E. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom-simulating reflectors by vertical fluid expulsion // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. B5, doi: 10.1029/91JB03061.
17. Соловьев В.А. Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое // Рос. хим. ж. 2003. Т. XLVII, № 3. С. 59–69.