

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

## Моделирование разложения поддонных метангидратов в результате климатических изменений с масштабом несколько тысяч лет

<sup>1</sup> *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск*

<sup>2</sup> *Югорский НИИ информационных технологий, г. Ханты-Мансийск*

Поступила в редакцию 2.02.2008 г.

Глобальное присутствие газогидратов метана в поддонных областях океана и результаты исследования пузырьков воздуха из ледяных кернов Гренландии и Антарктиды натолкнули ряд исследователей на гипотезу о доминирующем влиянии разложения газогидратов метана на изменение климата Земли и на завершение последнего ледникового периода. На основе трехмерной квазигеострофической модели климата Мирового океана, дополненной моделью переноса растворенного метана океаническими течениями, построена модель, описывающая последствия возможной дестабилизации метангидратов. Изучена возможная дестабилизация поддонных метангидратов Мирового океана под действием изменений поверхностной температуры океана в течение нескольких тысячелетий. Проведенные эксперименты показали, что изменение концентрации метана в результате разрушения части залежей метангидратов может являться прямым следствием температурных изменений. При этом длительное потепление может привести к масштабной дестабилизации метангидратов осадочного слоя океана. Полученный максимальный поток метана в атмосферу составил 18 Тг/год.

### Введение

Газовые гидраты — твердые кристаллические соединения газа и воды, образующиеся при определенных термобарических условиях, в которых молекулы газа (обычно метана) размещаются внутри молекул воды. Природные газовые гидраты — это такой компонент геосферы, который может серьезно влиять на климат и экологическую ситуацию за счет неконтролируемых выбросов и утечек большого количества метана в атмосферу [1]. По различным оценкам [2] возможный выход метана в атмосферу из залежей газогидратов с учетом их термодинамического равновесия составляет 5–200 млн т/год.

Исследование газогидратов метана тесно связано с проблемами окружающей среды из-за способности метана вызывать парниковый эффект в атмосфере Земли. Рост концентрации метана в атмосфере вызывает немалое беспокойство. За последние два столетия она возросла в два раза, в то время как углекислого газа — только на четверть. Среднее содержание метана в современной атмосфере оценивается как 1,8 ppm (parts per million, частей на миллион) [2].

По результатам исследования керна, геофизическим и другим данным на акваториях морей и океанов было выделено свыше 100 районов распространения газовых гидратов в поддонных отложениях. В океанах и морях газогидраты обычно встречаются на глубинах от 200–400 до 3000 м. Они насыщают слой донных осадков, содержатся в поровом пространстве в виде прослоек, линз, в рассеянном состоянии и составляют 10–20% от общего объема осадков. Глобальное присутствие

газогидратов метана в поддонных областях Мирового океана и в вечной мерзлоте [3] и результаты исследования пузырьков воздуха из ледяных кернов Гренландии и Антарктиды [4] натолкнули ряд исследователей на гипотезу о доминирующем влиянии разложения газогидратов метана на изменение климата Земли и, в частности, на завершение последнего ледникового периода [5].

Анализ ледяных кернов говорит о том, что повышение температуры и рост концентрации метана и диоксида углерода в атмосфере шли в ту эпоху параллельно друг другу. Это первое прямое доказательство взаимосвязи содержания парниковых газов в атмосфере и изменений климата на протяжении всего климатического цикла [4]. В течение всего времени, доступного для изучения по кернам полярных льдов, отмечены значительные колебания концентрации метана. Так, 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 ppm в разгар оледенения до 0,6–0,7 ppm в межледниковые периоды) [4].

Подобная корреляция изменений температуры и содержания парниковых газов на протяжении всего ледниково-межледникового цикла, очевидно, свидетельствует о наличии причинно-следственной связи. К сожалению, точность таких определений недостаточна для установления последовательности событий: что возникло раньше — повышение температуры, вызвавшее разложение газогидратов, или наоборот. Многие специалисты [5] считают причиной изменение концентрации метана и углекислого газа.

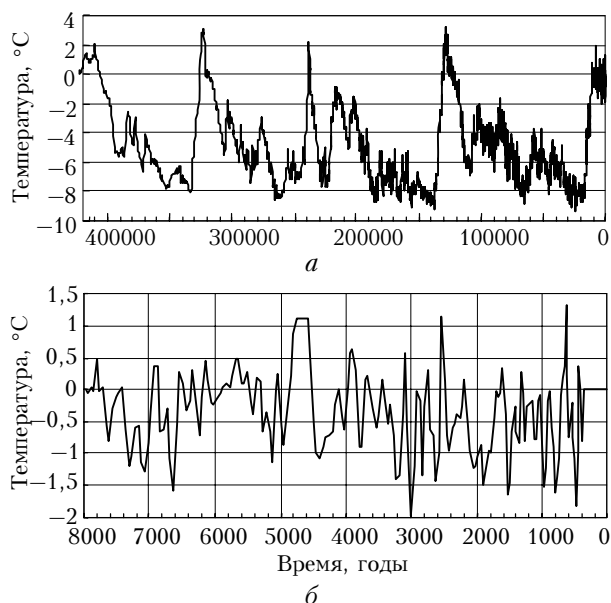


Рис. 1. Изменения температуры атмосферы в прошлом за 420 тыс. лет (а) и последние 8 тыс. лет (б) по данным анализа пузырьков воздуха во льду Антарктиды [4]

Наблюдаемые изменения концентраций парниковых газов в прошлом и в современную эпоху могут являться не причиной, а прямым следствием температурных изменений [6]. Например, даже небольшое повышение средней температуры поверхностного слоя океана приводит к эмиссии огромного объема диоксида углерода за счет изменения его растворимости в морской воде. Одновременно возможен резкий выброс в атмосферу гигантских количеств метана за счет теплового разложения неустойчивых газовых гидратов на морском шельфе и на суше. А сильная положительная обратная связь, реализуемая через механизм парникового эффекта, может многократно усиливать даже небольшие температурные колебания, вызванные любой из возможных причин. 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 порядка 800 Гт – 55,5 тыс. лет [7].

В данной статье на основе модели термогидродинамики океана рассмотрено моделирование потока метана в атмосферу при изменении поверхностной температуры океана масштаба нескольких тысячелетий.

### Описание модели

Климатическое состояние океана было получено из трехмерной модели динамики Мирового океана, включающей сезонную изменчивость, с учетом реальной топографии дна [8]. Модель основана на решении трехмерных уравнений переноса тепла и соли на равномерной 5-градусной широтно-долготной сетке и неравномерной, сгущающейся к поверхности сетке по вертикали. По горизонтальной

координате применяется консервативная 9-точечная разностная схема второго порядка аппроксимации, основанная на экстраполяции Ричардсона, по вертикальной координате используется вторая схема с разностями против потока, которая имеет первый порядок аппроксимации. Задача решалась в полигональной области Мирового океана на 5-градусной 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 (рис. 2, а).

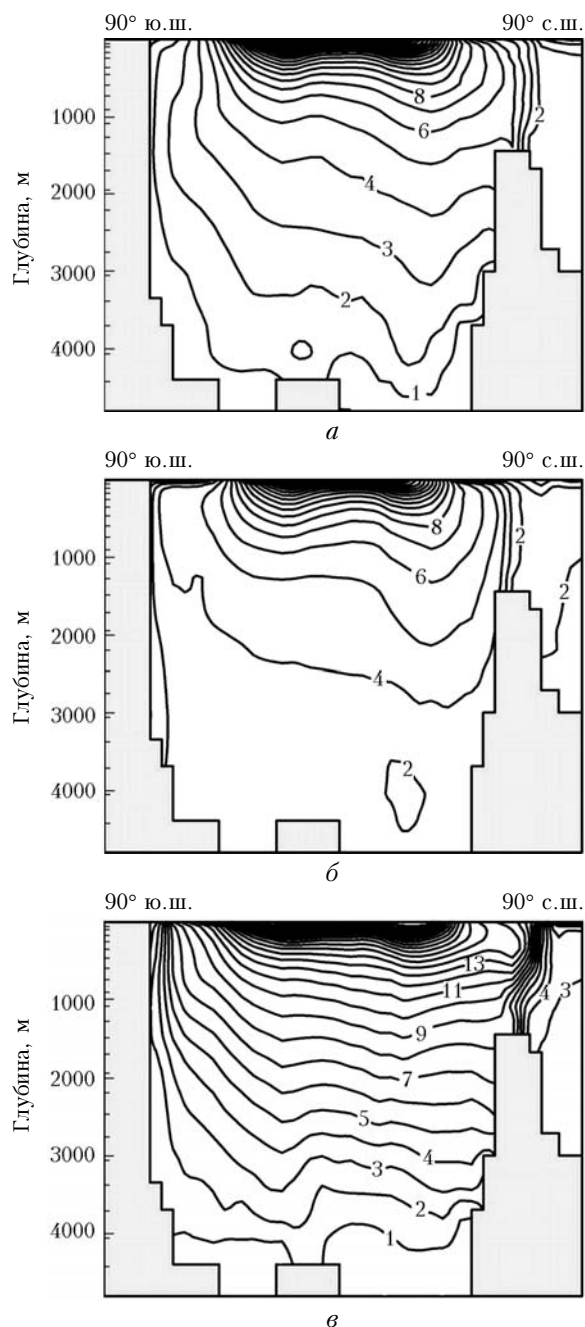


Рис. 2. Зонально-средние поля температуры и солёности в Мировом океане: а – численный эксперимент с моделью термохалинной циркуляции через 5000 лет интегрирования [8]; б – эксперимент «Похолодание» через 5000 лет; в – эксперимент «Потепление» через 10000 лет

Далее для каждой точки широтно-долготной сетки было рассчитано климатическое поле тепла в донном осадочном слое толщиной 1000 м с помощью уравнения теплопроводности [9]. В качестве граничных условий на верхней границе осадочного слоя, совпадающей с дном океана, задана температура придонной воды, которая получена из модели динамики океана, на нижней границе осадочного слоя задан геотермический поток тепла.

Климатическое распределение растворенного метана получено из трехмерной модели динамики Мирового океана, дополненной адвективно-диффузионным уравнением переноса метана [9]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{u}{a \sin \theta} \frac{\partial C}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial C}{\partial \theta} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \kappa \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\mu}{a^2} \Delta C,$$

с граничными условиями:

$$\text{на поверхности океана } z = 0 : C = C^*(\theta),$$

$$\text{на боковой поверхности } \Gamma : \frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

$$\text{на дне океана } z = H(\lambda, \theta) :$$

$$\begin{cases} \kappa \frac{\partial C}{\partial z} = 0, & \text{нетисточника,} \\ C = 5000 \text{ ppb,} & \text{источник.} \end{cases}$$

Здесь  $C(z, \lambda, \theta)$  — концентрация растворенного метана;  $C^*(\theta)$  — заданные значения концентраций метана на поверхности океана, которые изменяются зонально от 50 ppb в южных высокоширотных областях океана до 100 ppb в северных высокоширотных областях,  $1 \text{ ppb} = 10^{-6} \text{ мл/л}$ . Также использованы следующие обозначения:  $u, v, w$  — компоненты вектора скорости по координатам  $\lambda, \theta, z$ , где  $\lambda$  — долгота,  $\theta$  — дополнение широты до  $90^\circ$ ;  $z$  направлена вертикально вниз;  $\kappa, \mu$  — коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии;  $a$  — средний радиус Земли;  $t$  — время;  $H(\lambda, \theta)$  — рельеф дна;  $\Gamma$  — боковая поверхность области;  $n$  — нормаль к поверхности.

На следующем этапе мы определяем распределение газогидратов метана и глубину их залегания [10]. Зоной образования гидрата является толща пород, в которой давление и температура соответствуют термодинамическим условиям стабильности существования гидрата газа. Зона гидратообразования может быть определена математически путем совместного решения уравнения изменения термического градиента в разрезе пород и уравнения равновесного стабильного существования гидрата в данной пористой среде [11]. Предполагается, что метангидраты существуют в осадочном слое всюду, где выполняются термобарические условия их существования, которые рассчитываются по формуле [12]:

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

где  $T_{stab}$  — температура стабильности газогидрата, К;  $P_{stab}$  — давление, МПа.

Кривая равновесных условий гидратообразования метана накладывается на линию естественного распределения температур и давлений в исследуемой области. По точкам пересечения этих двух линий определяются верхняя и нижняя границы зоны стабильности гидрата (ЗСГ).

Данные о распределении океанских метангидратов свидетельствуют, что их выход на поверхность океанского дна хотя и существует, но достаточно редок, прямое бурение показывает, что, как правило, метангидраты залегают в осадочном слое на поддонных глубинах порядка сотен метров. Поэтому для оценки масштаба дестабилизации метангидратов важным является модельный параметр — глубина залегания гидрата в осадках Мирового океана. Поддонная глубина определяется с учетом толщины ЗСГ, геотермического градиента, пористости осадочного слоя и процента осадочных пород, в поровом пространстве которых содержатся газогидраты [13]. В данной статье геотермический градиент задается различным для 22 регионов на основании [10]: от  $30 \text{ }^\circ\text{C/км}$  в южной части Тихого океана до  $87 \text{ }^\circ\text{C/км}$  в северной. Мы принимаем простое уменьшение пористости с поддонной глубиной по экспоненте. Гидратонасыщенность отложений, т.е. процент порового пространства, занятого газогидратами, была принята равной 50% порового пространства непосредственно у подошвы зоны стабильности и плавно уменьшающейся до нуля в направлении морского дна [14].

В результате получено распределение глубины залегания метангидратов от 20 до 400 м в осадочном слое под океанским дном [15,16].

## Постановка численных экспериментов

На основе данных об изменении климата на протяжении последних 420 тыс. лет [4], полученных при изучении ледяных кернов из Антарктиды и Гренландии, по средним температурам атмосферы установлены четыре долговременных климатических цикла, состоящих из чередования периодов оледенения и потепления, которые происходили с интервалом 90–120 тыс. лет. Для всех четырех циклов характерным является быстрое потепление, когда средняя температура атмосферы сравнительно быстро за 10 тыс. лет практически монотонно увеличивается примерно на  $10^\circ$  и сравнительно долго (за время  $\sim 70$ – $100$  тыс. лет) немонотонно уменьшается на эту же величину (см. рис. 1). Это относится к периодам 322–332, 233–348, 124–134 и 18–8 тыс. лет до настоящего времени, за которое принимается 1950 г. Каждому периоду предшествовало длительное немонотонное похолодание, перемежаемое более короткопериодными потеплениями на несколько градусов.

Температурная кривая показывает, что за весь период в 420 тыс. лет средняя температура была ниже современной на  $4$ – $5^\circ$ .

Начиная с установившегося климатического состояния Мирового океана (см. рис. 2,а), были проведены три эксперимента.

«Похолодание» — сезонно изменяющаяся поверхностная температура океана в каждой точке широтно-долготной сетки, за исключением областей, покрытых льдом, уменьшается линейно со скоростью  $1^\circ$  в 1000 лет в течение 5000 лет. При этом отрицательные значения температуры ограничены  $-2^\circ$ .

«Потепление» — начинается с предыдущего эксперимента «Похолодание». Аналогичным образом температура поверхностных вод увеличивается линейно, с такой же скоростью на  $1^\circ$  в 1000 лет в течение 10000 лет.

«Палеоданные» — сезонно изменяющаяся поверхностная температура океана в каждой точке широтно-долготной сетки, за исключением областей, покрытых льдом. О колебаниях температуры свидетельствуют данные об изменении климата, полученные при изучении ледяных кернов на протяжении последних 8000 лет (см. рис. 1).

Наличие льдов учитывается неявно севернее  $80^\circ$  с.ш. и южнее  $70^\circ$  ю.ш. за счет нулевых напряжений трения ветра и сохраняющихся отрицательных температур поверхностной воды. В экспериментах с потеплением предполагается, что в областях со льдом температура поверхностных вод не подвержена увеличению, т.е. таяния льдов не происходит.

В каждом эксперименте находится время до начала дестабилизации метангидратов, определяется, какая часть дна содержит такие источники, находится диффузионный поток метана в атмосферу.

Тепловой сигнал от поверхности океана конвективным перемешиванием и течениями транспортируется в глубь океана до придонных слоев. Далее с помощью одномерного уравнения теплопроводности моделируется увеличение температуры осадочного слоя по сравнению с начальными климатическими значениями [9]. Как только это увеличение превысит некоторое допустимое значение —  $\Delta T_H$  [9] и произойдет это на поддонной глубине, где залегают метангидраты, предполагается, что начинается их разложение.

Это разложение поддерживает придонную концентрацию растворенного метана, равную 5000 ppb. При этом считается, что высвободившийся при разложении метан полностью растворяется в морской воде. Это значение далее берется как граничное условие в этой точке дна для решения уравнения переноса метана вместо использовавшегося при получении климатических данных граничного условия с нулевым потоком метана. Таким образом, в модели «включается» источник метана. Если же далее в процессе эксперимента приращение тепла в осадочном слое на глубине залегания метангидратов станет меньше заданного параметра  $\Delta T_H$ , то предполагается, что дестабилизация прекратилась и источник «выключается». Это значит, что опять происходит обратная замена граничного условия для уравнения переноса метана от заданного значения 5000 ppb на условие с нулевым потоком метана.

Поток метана через поверхность океана вычисляем по следующей формуле:

$$F = a^2 q \iint_{\Omega} \left[ \kappa \frac{\partial C}{\partial z} \right]_{z=0} d\Omega,$$

где  $q = 0,7169 \cdot 10^{-3}$  — удельный вес метана. Поток метана в Тераграммах равен  $10^{12}$ . При этом предполагается, что весь метан растворяется в морской воде и пузырьки метана непосредственно атмосфере не достигают.

## Результаты численного моделирования

В эксперименте «Похолодание» первые 2900 лет средняя температура океана монотонно уменьшалась (рис. 3), а в остальные 2100 лет она изменялась немонотонно и после 3670 лет даже стала увеличиваться.

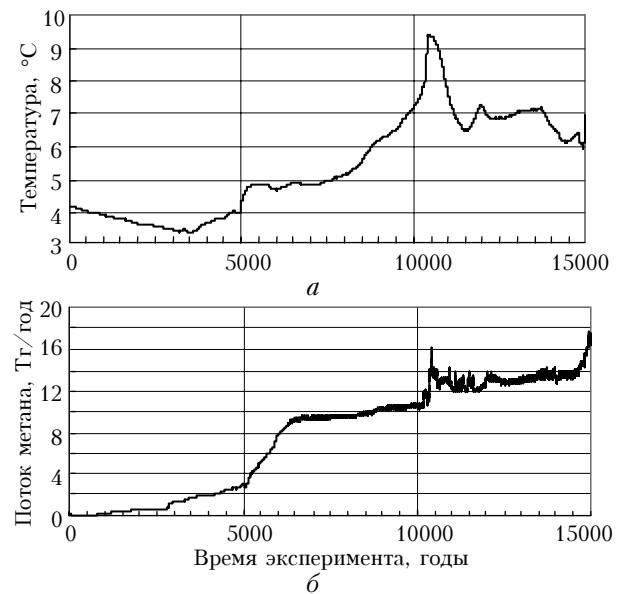


Рис. 3. Изменение средней температуры океана (а) и поток метана в атмосферу от разлагающихся метангидратов (б), полученные в экспериментах «Похолодание» + «Потепление»

Это объясняется вовлечением в процесс осенне-зимнего конвективного перемешивания поверхностных вод субтропических широт, температура которых уменьшилась на  $3-5^\circ$ . Эти более теплые поверхностные воды за счет глубокой конвекции заполняют глубинную часть Мирового океана и в итоге повышают среднюю температуру. То есть в результате охлаждения поверхностных вод уменьшается температура вод только в главном термоядерном клине, а температура промежуточных слоев и глубокого океана повышается (см. рис. 2, б).

Это, в свою очередь, привело к дестабилизации поддонных метангидратов. Действительно, из рис. 3 видно, что через время порядка 2500 лет похолодания поток метана в атмосферу составил 1 Тг/год

и увеличился до 4 Тг/год к концу эксперимента через 5000 лет. Средняя концентрация растворенного метана в океане увеличилась примерно в 14 раз и составила 700 ppb.

Эксперимент «Потепление» привел к существенному потеплению всей толщи океана, особенно в высоких широтах, где сосредоточены источники метана в виде газогидратов, увеличилась толщина и температура главного термоклина. Температура глубокого океана изменилась незначительно (см. рис. 2, в). В результате увеличилась на 28% площадь океанского дна, под которым дестабилизируются метангидраты, и это привело к росту потока метана в атмосферу до 18 Тг/год (см. рис. 3, б). Средняя концентрация растворенного метана увеличилась до 2050 ppb. При этом источники метана включились на всех глубинах, где возможно существование газогидратов метана, увеличивая концентрацию метана во всех океанах.

Данные о палеоклимате говорят о том, что климатические изменения носят периодический характер. Потепления сменяются похолоданиями, и периоды этих колебаний изменяются от десятков до тысяч лет (см. рис. 1). Рассмотрим реакцию модели климата Мирового океана на колебания поверхностной температуры океана векового масштаба. В эксперименте «Палеоданные» изменения поверхностной температуры океана задавались на основе данных об изменении климата, полученных при изучении ледяных кернов на протяжении последних 8000 лет (см. рис. 1). Существенное отличие этого эксперимента заключается в скорости охлаждения и нагревания поверхностных вод. Как видно из рис. 4, изменчивость температуры поверхностных вод векового масштаба не привела к масштабной дестабилизации метангидратов, поток метана увеличился незначительно и составил 1–3 Тг/год.

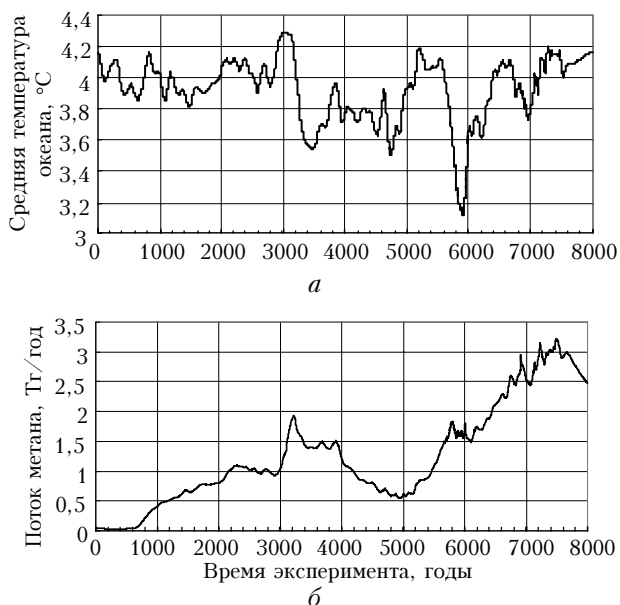


Рис. 4. Изменение средней температуры океана (а) и поток метана в атмосферу от разлагающихся метангидратов (б), полученные в эксперименте «Палеоданные»

## Заключение

Проведенные эксперименты показали, что изменение концентрации метана в результате разрушения части залежей метангидратов может являться как причиной, так и прямым следствием температурных изменений.

Так, поскольку температура глубокого океана на протяжении длительного похолодания через 5000 лет увеличивается более чем на 1–2°, это может привести к существенному нагреву донных слоев и массовой дестабилизации поддонных метангидратов, а следовательно, к выбросу метана в атмосферу. Кроме того, за счет уменьшения растворимости углекислого газа в более теплой воде может произойти выброс растворенного в морской воде углекислого газа в атмосферу. Разогрев атмосферы из-за такого выброса парниковых газов метана и углекислого газа может являться одним из механизмов, который блокирует ледниковый период и возвращает климатическое состояние в исходное. При этом длительное потепление может привести к более масштабной дестабилизации метангидратов, существующих в осадочном слое Мирового океана. Полученный максимальный поток метана в атмосферу составил 18 Тг/год.

1. *Kvenvolden K.A.* Potential effects of gas hydrate on human welfare // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 1999. V. 96. N 7. P. 3420–3426.
2. *Адушкин В.В., Соловьев С.П., Турунтаев С.Б.* Соотношение антропогенной и природной составляющей в потоке газов в атмосферу // *Глобальные изменения природной среды – 2001.* Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. С. 249–265.
3. *Ginsburg G.D., Kvenvolden K.A., Soloviev V.A.* Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates // *Geo-Marine Lett.* 1993. V. 13. N 1. P. 32–40.
4. *Котляков В.М.* Четыре климатических цикла по данным ледяного керна из глубокой скважины «Восток» в Антарктиде // *Изв. РАН. Сер. geogr.* 2000. № 1. С. 7–19.
5. *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. P. 128–133.
6. *Maslin M.A., Thomas E.* Balancing the deglacial global carbon budget: the hydrate factor // *Quatern. Sci. Rev.* 2003. V. 22. Iss. 15–17. P. 1729–1736.
7. *Glasby G.P.* Potential impact on climate of the exploitation of methane hydrate deposits offshore // *Mar. and Petrol. Geol.* 2003. V. 20. P. 163–175.
8. *Scherbakov A.V., Malakhova V.V.* On the deep water formation in the World Ocean model // *Bull. Novosib. Comput. Cent. Ser. Numer. Model. Atmos., Ocean and Environ. Stud.* 2000. Iss. 6. P. 73–78.
9. *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.
10. *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.* B. 1992. V. 97. N 5. P. 7025–7041.

11. *Harvey L.D.D., Huang Z.* Evaluation of the potential impact of methane clathrate destabilization on future global warming // *J. Geophys. Res. D.* 1995. V. 100. N 2. P. 2905–2926.
12. *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.
13. *Соловьев В.А.* Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое // *Рос. хим. ж.* 2003. V. XLVII. № 3. С. 59–69.
14. *Gornitz V., Fung I.* Potential distribution of methane hydrates in the world's oceans // *Global Biogeochem. Cycles.* 1994. V. 8. N 3. P. 335–347.
15. *Malakhova V.V., Scherbakov A.V.* Simulation of spatial distribution of the sea bottom methane-hydrates and estimates of the methane fluxes into the atmosphere // *Bull. Novosib. Comput. Cent. Ser. Numer. Model. Atmos., Ocean and Environ. Stud.* 2005. Iss. 10. P. 29–38.
16. *Щербakov А.В., Малахова В.В.* Моделирование пространственного распределения метангидратов Мирового океана и потока метана в атмосферу // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19. № 6. С. 530–535.

*V.V. Malakhova, A.V. Scherbakov.* **Modeling of decomposition of subbottom methanehydrates under climatic changes at time scale of a few thousand years.**

The observed synchronicity between temperature and methane concentrations in Greenland and Antarctica ice cores has raised the question of the role of methane in glacial–interglacial climate change. The release of methane from hydrate has been invoked to explain abrupt increases in the atmospheric concentration of methane during the last glacial cycle. The three-dimensional mathematical model of the dissolved gas transport by the ocean currents is used for the quantitative evaluation of the scale of a possible methane flux into the atmosphere from the decomposed subbottom methanehydrates. The climatic model of the ocean has been integrated for the period of 5000–10000 years and simulates penetrations of warming from the surface into the deep ocean. A three-dimensional equation of transport of dissolved methane from sources has been simultaneously solved. A few scenario experiments with different scales of the surface ocean temperature changes were carried out. The experiments have shown that changes of concentration of methane as a result of decomposition subbottom methanehydrates can be the consequence of temperature changes. Thus, long warming can result in destabilization of hydrates in a sedimentary layer of the ocean. The calculated methane flux into the atmosphere exceeded 18 Tg/year.