

Численное моделирование возможного потока метана в атмосферу в результате субмаринной разгрузки флюидов

В.В. Малахова*

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

Поступила в редакцию 2.02.2009 г.

Один из возможных механизмов поступления метана в атмосферу из литосферных источников — периодические выбросы газа грязевыми вулканами и флюидными «сипами». Для количественной оценки масштаба возможного потока метана в атмосферу из литосферных источников, обусловленных субмаринной разгрузкой газа, используется трехмерная квазигеострофическая модель динамики Мирового океана, дополненная моделью переноса растворенного метана океаническими течениями. Задача решается в полигональной области Мирового океана с учетом реальной топографии дна на трехградусной сетке по широте и долготе с 24 вертикальными уровнями. Исследуется модельный перенос растворенного метана в акватории Мирового океана, и рассчитывается поток метана в атмосферу. Источники метана в модели задаются с учетом скорости фильтрационного выноса метана, растворенного в поровой воде. Получены сопоставимые с имеющимися оценками потоки метана в атмосферу от 9 до 20 Тг в год в зависимости от сценария эксперимента.

Ключевые слова: метан, газовые гидраты метана, численное моделирование, модель океана.

Введение

Увеличение содержания метана в атмосфере способствует усилению парникового эффекта, так как метан интенсивно поглощает тепловое излучение Земли. Учет вклада метана в парниковый эффект дает до 15% прироста средней температуры, что в 4 раза меньше аналогичной оценки для углекислого газа, соответствующей 61%, тем не менее потенциальный вклад метана в глобальное потепление в 20–27 раз больше, чем потенциал углекислого газа [1]. Увеличение концентрации метана в атмосфере составляет 1–2%/год, что превышает рост углекислого газа. Так, за последние 40 лет концентрация метана увеличилась примерно на 30% и в настоящее время составляет около 1750 ppb [2].

Вклад Мирового океана как источника глобального поступления метана в атмосферу оценивается разными авторами в пределах 5–50 Мт/год при его ежегодном бюджете 460–1665 Мт/год [1]. Как видно, океаны вносят незначительный вклад в общий баланс (всего 2–5%). По другим оценкам поток метана только из областей его постоянной разгрузки на континентальном шельфе может составлять от 8 до 65 Мт/год [3, 4]. Такое расхождение в оценках объясняется слабой изученностью потока abiогенного метана из литосферных источников, к которым относятся залежи газогидратов, гидротермальные системы COX, флюидные сипы, газовые вентры, грязевые вулканы и др. [1].

Полученные в последнее время данные измерений доказывают, что глобальный вынос газа из недр Земли активно происходит уже сегодня, и не только на суше, но и на огромной площади в океане. Так, ежегодный вклад морских геологических источников, который никогда не учитывался ранее в оценках глобального поступления метана в атмосферу, оценен как 16–40 Мт метана в год [5, 6].

Известно, что субмаринная разгрузка флюидов характерна для определенных участков дна Мирового океана, местоположение и размеры которых представлены в работах [7, 8]. Результаты многочисленных исследований показывают, что к местам подводной разгрузки газов приурочены газогидраты, расположенные непосредственно на поверхности морского дна. Такая связь подтверждает существование постоянного подтока метана для образования газогидратов [9]. Результаты исследования подводного грязевого вулкана Хаакон Мосби показывают, что существование газогидратов на поверхности осадков приводит к формированию холодного метанового плюма, распространяющегося по направлению донных течений. При этом поток метана в водную толщу может достигать примерно $50 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{год}$ [9].

Результаты экспедиционных исследований в Восточно-Сибирском море и море Лаптевых выявили шлейфы высокого содержания растворенного метана [10, 11]. Экспериментально установлено, что придонный слой вод в указанных районах перенасыщен метаном относительно его содержания в атмосфере высоких широт Северного полушария на 2200–3000%, а поверхностные воды — до 700–2000%,

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

что свидетельствует о существенном вкладе шельфовых вод Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых в качестве источника метана в атмосферу.

В целом, морская вода недонасыщена метаном по сравнению с его растворимостью от поверхности до самого дна, поэтому Мировой океан является практически бесконечным резервуаром для метана, который может поступать в воду в районах разгрузки глубинных флюидов. Метан, выделившийся в результате глубинной разгрузки, разносится океаническими течениями, как это наблюдалось на разрушающемся газогидратном поле в кальдере грязевого вулкана Хаакон Мосби в Норвежском море [9], и в результате достигает атмосферы. Так, в работе [11] выполнены одновременные измерения метана в приводном слое атмосферы и в поверхностном слое воды в районе восточно-сибирского шельфа. Полученные измерения показали, что области аномально высоких концентраций метана в воздухе (до 8 ppm) пространственно соответствуют пятнам высоких концентраций метана, растворенного в морской воде (до 500 нмоль) [11].

В данной статье представлена модель переноса метана от источников, обусловленных процессами подводной разгрузки глубинных флюидов.

Математическая постановка задачи

Для количественной оценки масштаба возможного потока метана в атмосферу из литосферных источников, обусловленных субмаринной разгрузкой газа, используется трехмерная квазигеострофическая модель динамики Мирового океана [12], дополненная моделью переноса растворенного метана океаническими течениями.

Климатическое состояние океана было получено из трехмерной линеаризованной модели динамики Мирового океана, включающей сезонную изменчивость, с учетом реальной топографии дна и Арктического бассейна.

Распределение растворенного метана получено как решение адвективно-диффузионного уравнения переноса метана. Характерной особенностью атмосферного распределения метана является межширотный градиент, направленный с севера на юг, с максимальными концентрациями метана в Северном полушарии. Поэтому было задано зависящее только от широты распределение растворенного метана на поверхности океана.

Далее исследуется перенос растворенного метана океаническими течениями от заданных на дне океана модельных источников в предполагаемых местах разгрузки газа и рассчитывается поток метана в атмосферу.

На первом этапе определяется начальное термохалинное состояние океана. Задача решалась в полигональной области Мирового океана от 76,5° ю.ш. до 88,5° с.ш. на равномерной сетке с шагом 3° по долготе и широте со смещением относительно экватора и боковой границы на 1,5°. В модельную область было добавлено Средиземное море. Для более

подробного описания слоя термоклина в вертикальном направлении вводим неравномерную сетку со сгущением узлов у поверхности. Наличие льдов учитывается неявно севернее 80° с.ш. и южнее 70° ю.ш., за счет нулевых напряжений трения ветра и сохраняющихся отрицательных температур поверхностной воды.

Зонально осредненные поля температуры и солёности, полученные в численном эксперименте, хорошо согласуются с данными наблюдений (рис. 1). Так, ярко выражено и соответствует данным наблюдений формирование промежуточной антарктической водной массы с пониженной солёностью.

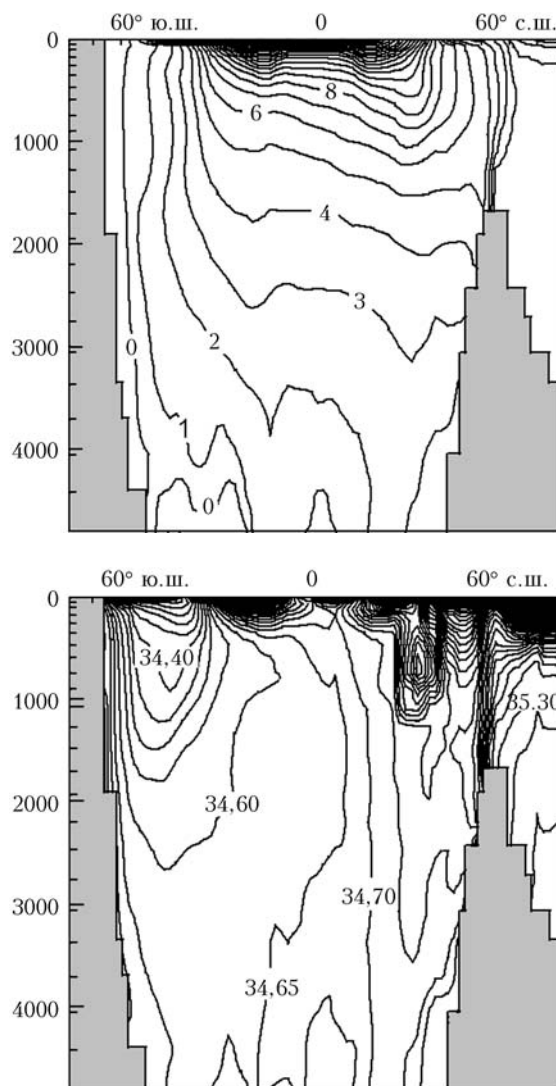


Рис. 1. Зонально-средние поля температуры и солёности в Мировом океане, полученные в численном эксперименте с моделью термохалинной циркуляции через 5000 лет интегрирования

Начиная с этого климатического состояния океана, система уравнений динамики океана интегрируется с временным шагом 10 сут. Одновременно решается трехмерное адвективно-диффузионное

уравнение переноса растворенного метана в морской воде [13]:

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

с граничными условиями:

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

$$\text{на боковой поверхности } \Gamma \quad \mu \frac{\partial C}{\partial n} = 0;$$

на дне океана $z = H(\lambda, \theta)$ (когда нет источника метана) $\kappa \frac{\partial C}{\partial z} = 0$.

Здесь $C(\lambda, \theta, z)$ — концентрация растворенного метана, $C^*(\lambda, \theta, 0)$ — 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 ($1 \text{ ppb} = 10^{-6} \text{ мл/л}$); u, v, w — компоненты вектора скорости по координатам λ, θ, z , где λ — долгота; θ — дополнение широты до 90° ; z направлена вертикально вниз; $\mu(z)$, $\kappa(z)$ — коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии; a — средний радиус Земли; t — время; $H(\lambda, \theta)$ — рельеф дна; Γ — боковая поверхность области.

Результаты численного моделирования

В результате геологических исследований Мирового океана в течение последнего десятилетия обнаружено более 100 участков подводной разгрузки метана, которые описаны в работах [7, 8]. В основном эти участки расположены в периферических районах океана, охватывающих шельфы, континентальные склоны и приконтинентальные глубоководные желоба. В модели источники метана задаются на дне океана, в соответствии с данными работ [7, 8], и представлены на рис. 2.

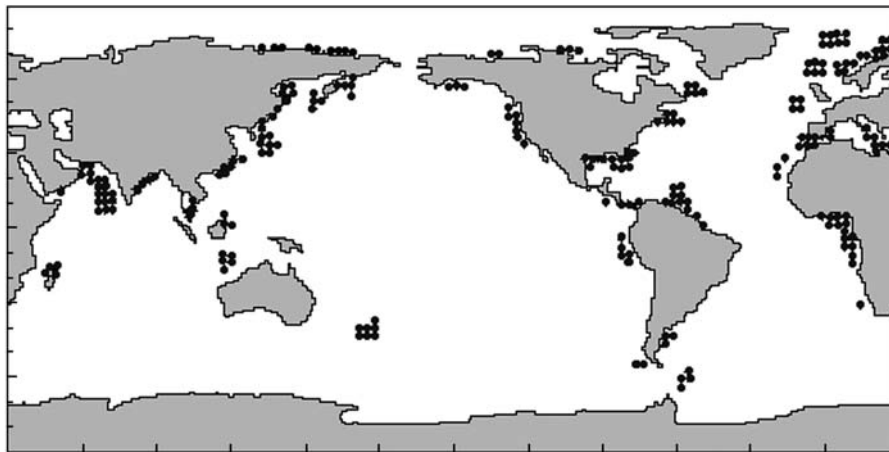


Рис. 2. Модельное распределение источников метана на дне океана в соответствии с данными [7, 8]

Начиная с установившегося климатического состояния Мирового океана (см. рис. 1), были проведены два эксперимента.

В первом эксперименте модельный источник метана задавался как увеличение концентрации метана в придонной расчетной точке, где предполагается разгрузка газа:

$$\text{при } z = H(\lambda, \theta): C = C_I.$$

Во втором эксперименте источник метана задавался с учетом скорости фильтрации метана через слой осадков:

$$\text{при } z = H(\lambda, \theta): \kappa \frac{\partial N}{\partial z} = q_C.$$

В придонных точках, где предполагается наличие источника, задается повышенная концентрация метана, в 100 раз превосходящая среднее фоновое значение, т.е. $C_I = 5000 \text{ ppb}$, или нл/л.

Такой подход подтверждается измеренными данными о концентрации метана в океанских водах. В монографии Обжирова [14] приводится пример впадины Дерюгина, где на станции 228 с выходом газа содержание метана в 100 раз больше, чем на соседней станции, где выход газа не обнаружен. Аномальные концентрации метана 5000–10000 и более 20000 нл/л были обнаружены в придонных слоях воды в районе выходов пузырей метана на северо-восточном Сахалинском склоне в Охотском море. Они превышают фоновые концентрации метана в придонной воде в 100–1000 раз и более. В районе потоков метана в керне верхних слоев (100–400 см) осадков концентрация метана превышала 500–1000 мл/л влажного осадка [15]. Поверхность дна в этом районе представлена округлыми структурами диаметром 500–700 м, в которых распространены многочисленные мелкие ямки и бугры, образованные газофлюидными потоками, поднимающимися из глубоких слоев осадочного чехла [15]. Результаты прямого геохимического опробования в районе грязевого вулкана Хаакон Мосби в Норвежском море дали аномально высокие значения концентраций метана на расстоянии 80 м над вулканом [9].

Исследование участков мелководного шельфа показало, что эмиссии метана из глубинных газовых депозитов обычно имеют форму факелов, что позволяет метану избегать окисления и достигать атмосферы [10]. При расположении газовых факелов глубже 100 м метан концентрируется в водной толще в некотором слое до глубины растворения газовых пузырьков. В процессе подъема газовых пузырьков происходит вертикальный перенос воды в самом газовом факеле, который сопровождается горизонтальным движением окружающих придонных вод к центру факела, компенсирующих вынос вод в вертикальном направлении. На вершине газового факела плотность газовой эмульсии становится равной плотности окружающей воды, в результате вертикальное движение прекращается, а область эмульсии начинает растекаться в горизонтальной плоскости, формируя слой с повышенным содержанием метана [14].

В дальнейшем исследуется модельный перенос растворенного метана океаническими течениями в акватории Мирового океана и рассчитывается поток метана в атмосферу. Поток метана через поверхность океана является функцией температуры поверхностной воды T и скорости ветра V [10]:

$$F = a^2 q \iint_{\Omega} 0,31 V^2 \left(\frac{Sc}{660} \right)^{-0,5} \left[\kappa \frac{\partial C}{\partial z} \right]_{z=0} d\Omega,$$

где $q = 0,7169 \cdot 10^{-3}$ – удельный вес метана; Sc – число Шмидта, определяемое по формуле

$$Sc = 2039,2 - 120,31T + 3,4209T^2 - 0,04043T^3.$$

При этом предполагается, что весь метан растворяется в морской воде и пузырьки метана непосредственно атмосферы не достигают.

Каждый эксперимент начинался с одних и тех же начальных рассчитанных климатических полей. Время интегрирования численной модели климата Мирового океана совместно с уравнением переноса метана составило порядка 500 лет. В каждом эксперименте находится диффузионный поток метана в атмосферу.

В первом эксперименте источники метана задавались косвенным образом в виде увеличения концентрации растворенного метана в 100 раз. Поток метана в атмосферу составил 9 Тг/год. Средняя концентрация растворенного метана в океане выросла от 50 до 650 нл/л. Растворенный метан переносится океаническими течениями от источников по всей акватории океана.

Во втором эксперименте проверяется влияние сценарного параметра – мощность источника. Источник метана в модели задается с учетом скорости фильтрационного выноса метана, растворенного в поровой воде. Для фильтрационного потока растворенного компонента предложено выражение [9]:

$$q_c = V_f (C_p - C), \quad V_f = D / \delta,$$

где C_p – растворимость метана в морской воде; V_f – скорость восходящей фильтрации; $\delta = 1$ см –

толщина диффузионного подслоя; $D = 10^{-5}$ см²/с – коэффициент молекулярной диффузии метана в воде.

Используется прием, когда вблизи дна выделяется узкий диффузионный подслой, в котором считают, что весь перенос осуществляется только молекулярной диффузией.

Для определения растворимости метана в морской воде использовалось выражение [16]:

$$C_p = 0,4342 \frac{\rho^{0,64}}{(T + 5,278)^{0,3882}}, \quad \text{см}^3/\text{г},$$

где ρ – давление, кг/см²; T – температура, °С.

В целом морская вода недонасыщена метаном. Так, равновесные с воздухом концентрации метана в поверхностных водах составляют 0,05–0,08 мкл/л. И с глубиной содержание метана лишь несколько возрастает [9]. В то же время растворимость метана уже в поверхностных водах составляет примерно 30–50 мл/л и быстро растет с глубиной, достигая 1200–2000 мл/л на дне (рис. 3).

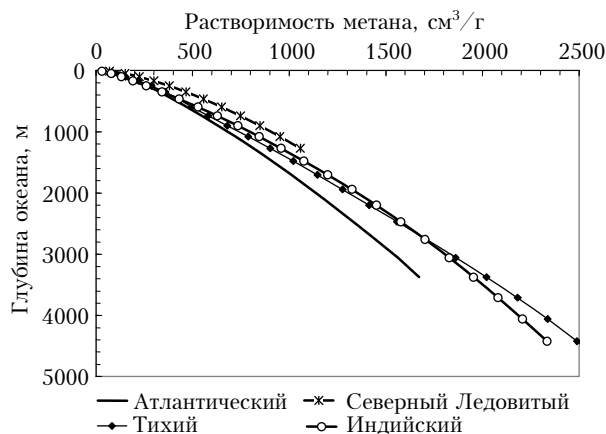


Рис. 3. Растворимость метана в морской воде, рассчитанная для каждого океана

Если содержание метана в воде меньше, чем предел растворимости, то метан будет выделяться в воду, пока его концентрация в воде не достигнет максимального значения при данных условиях на температуру и давление. Скорость растворения при этом связана с процессами перемешивания морских вод.

Мощность источника во втором эксперименте зависит от растворимости метана в морской воде и различна для всех модельных точек. Это привело к увеличению концентрации метана в зонах разгрузки газов, расположенных на больших глубинах, в то же время в мелководных районах мощность источника уменьшилась. Модель была проинтегрирована на срок 500 лет до установления климатического состояния Мирового океана. Максимальный поток метана в атмосферу во втором эксперименте увеличился и составил 21 Тг/год. Средняя концентрация растворенного метана в морской воде составила 1500 нл/л.

На рис. 4 показано горизонтальное распределение растворенного метана на глубине 250 м, полученное во втором эксперименте.

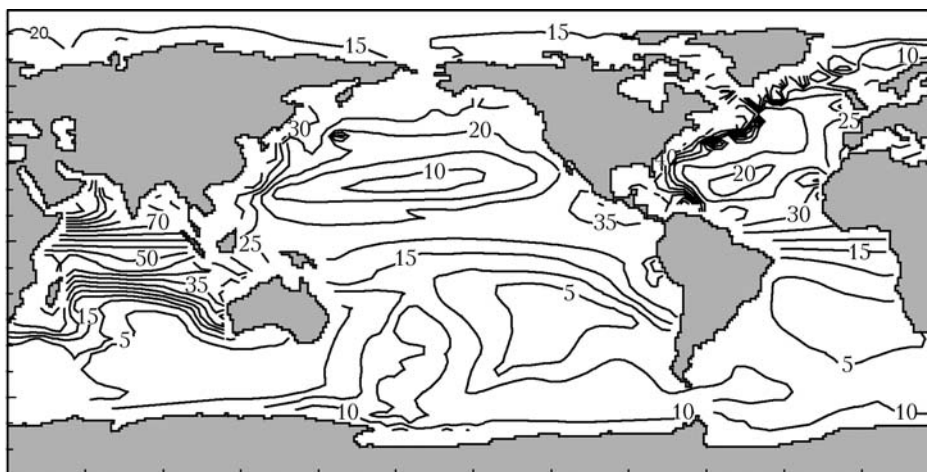


Рис. 4. Распределение растворенного метана в океане на глубине 250 м, полученное во втором численном эксперименте через 500 лет модельного времени. Значения на изолиниях в усл. ед. (1 усл. ед. = 50 нл/л)

Растворенный метан переносится океаническими течениями от источников по всей акватории океана. Сильное влияние на распределение метана оказывает горизонтальная циркуляция в океане. Так, большие значения концентраций в тропиках Тихого океана обусловлены течением западного направления. Заметен также адвективный перенос метана в области Курошио (см. рис. 4). Наиболее насыщенным метаном оказывается более проветриваемый системой течений Атлантический океан, за ним следует Индийский. При этом концентрация метана растет с глубиной и достигает своего максимума в зонах, где мощность источника выше. Так, максимальная концентрация растворенного метана на глубине 250 м составила 5300 нл/л, а на глубине 2000 м – 12000 нл/л.

Средние вертикальные профили растворенного метана для разных моментов времени приведены на рис. 5.



Рис. 5. Средние вертикальные профили растворенного метана, полученные во втором численном эксперименте через 50 лет (линия без маркера) и через 400 лет (маркированная линия) модельного времени

Здесь по максимальным концентрациям метана можно проследить глубины, на которых идет разгрузка метана. Так, максимальные концентрации метана расположены на глубине от 1000 до 2000 м.

Заключение

Представлены результаты исследования модельного переноса растворенного метана океаническими течениями в акватории Мирового океана от литосферных источников, обусловленных субмаринной разгрузкой газа. Источники в модели задаются как увеличение фоновых значений растворенного метана или с учетом скорости фильтрационного выноса метана, растворенного в поровой воде. Задача решается в полигональной области Мирового океана с учетом реальной топографии дна на трехградусной сетке с 24 вертикальными уровнями. В результате численного моделирования получены оценки потока метана в атмосферу от 9 до 20 Тг в год в зависимости от сценария эксперимента. Таким образом, модель дает значения потока метана в атмосферу в результате подводной разгрузки глубинных флюидов из газовых сипов, вентов, грязевых вулканов, сопоставимые с уже имеющимися в литературе оценками [3–5, 17].

1. 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.
2. Wuebbles D.J., Hayhoe K. Atmospheric methane and global change // Earth-Sci. Rev. 2002. V. 57. N 3–4. P. 177–210.
3. Hovland M., Judd A.G., Burke R.A. The global flux of methane from shallow submarine sediments // Chemosphere. 1993. V. 26. N 1–4. P. 559–578.
4. Damm E., Budeus G. Fate of vent-derived methane in seawater above the Hakon Mosby mud volcano (Norwegian Sea) // Mar. Chem. 2003. V. 82. N 1–2. P. 1–11.
5. Judd A.G., Hovland M., Dimitrov L.I., Garcia Gil S., Jukes V. The geological methane budget at continental margins and its influence on climate // Geofluids. 2002. V. 2. N 2. P. 109–126.
6. Judd A.G. Natural seabed gas seeps as sources of atmospheric methane // Environ. Geol. 2004. V. 46. N 8. P. 988–996.

7. *Milkov A.V.* Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates // *Mar. Geol.* 2000. V. 167. N 1–2. P. 29–42.
8. *Mazurenko L.L., Soloviev V.A.* Worldwide distribution of deep-water fluid venting and potential occurrences of gas hydrate accumulations // *Geo-Mar. Lett.* 2003. V. 23. N 3–4. P. 162–176.
9. *Егоров А.В.* Формирование и разложение газогидратов в осадках Арктического подводного грязевого вулкана Хаакон Мосби // *Опыт системных океанологических исследований в Арктике.* М.: Научный мир, 2001. С. 511–521.
10. *Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Бельчева Н.А.* Растворенный метан в шельфовых водах Арктических морей // *Докл. РАН.* 2005. Т. 402. № 4. С. 529–533.
11. *Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Салюк А.Н., Бельчева Н.Н., Космач Д.А.* Аномалии метана в приводном слое атмосферы на шельфе Восточно-Сибирской Арктики // *Докл. РАН.* 2007. Т. 414. № 6. С. 819–823.
12. *Sherbakov A.V., Malakhova V.V.* On the influence of the parametrization of horizontal viscosity on the thermohaline circulation in the ocean model // *Bull. Novosib. Comput. Cent. Ser. Numer. Model. Atmos., Ocean and Environ. Stud.* 2007. Iss. 11. P. 19–27.
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. *Обжиров А.И.* Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 1993. 139 с.
15. *Мониторинг метана в Охотском море.* Владивосток: Дальнаука, 2002. 250 с.
16. *Макогон Ю.Ф.* Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы // *Рос. хим. ж.* 2003. Т. XLVII. № 3. С. 70–79.
17. *Etioppe G., Milkov A.V.* A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere // *Environ. Geol.* 2004. V. 46. N 8. P. 997–1002.

***V.V. Malakhova.* Numerical modeling of a possible methane flux in the atmosphere as a result of submarine fluid venting.**

One of the mechanisms to release methane from the sediment to the ocean is through submarine mud volcanoes, hydrocarbon seeps, and vents. The three-dimensional mathematical model of the dissolved gas transport by the ocean currents is used for the quantitative estimation of the scale of a possible methane flux into the atmosphere from the submarine fluid venting. The climatic large-scale current field is obtained from the three-dimensional global model of the ocean dynamics. The problem was solved numerically on a spatial grid with a resolution of 3 degrees in latitude and in longitude with 24 levels by the vertical. A three-dimensional equation of transport of the dissolved methane from sources is simultaneously solved. Methane sources in model are set, taking into account the speed of the filtration methane flux. The calculated methane flux into the atmosphere exceeds 9–20 Tg/year, depending on the experiment scenario.