

## Роль сибирских рек в увеличении концентрации растворенного метана в водах Восточно-Сибирского шельфа

В.В. Малахова, Е.Н. Голубева\*

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

Поступила в редакцию 30.01.2012 г.

На основе полученной климатической картины циркуляции рассматривается модельная задача о выносе растворенного метана в Арктический океан со стоком сибирских рек. В качестве океанического блока используется региональная крупномасштабная модель гидротермодинамики океана, разработанная в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Распределение растворенного метана в морской воде получено как решение адвективно-диффузионного уравнения, в которое дополнительно включен процесс окисления метана. В результате численного моделирования воспроизведены процессы накопления и устойчивость по времени высоких концентраций растворенного метана в море Лаптевых, известные на основе данных наблюдения. Получено, что сток реки Лены может вносить весомый вклад в формирование anomalно высоких концентраций метана в воде в проливе Дмитрия Лаптева. Показано, что окисление метана обеспечивает его эффективный сток в пределах зоны распространения растворенного газа, что может уменьшать его поступление в атмосферу.

*Ключевые слова:* перенос метана, поток метана, окисление метана, Восточно-Сибирский шельф; methane transport, methane flux, methane oxidation, East Siberian shelf.

### Введение

Интерес к изучению цикла углерода в Арктике вызван климатическими изменениями, которые происходят в северных широтах и выражаются в повышении среднегодовой температуры воздуха, таянии вечной мерзлоты, увеличении стока рек. Последние исследования показали, что рост температуры воздуха в северных широтах с 1985 г. в среднем составил 0,68 °С в десятилетие [1]. Шельф Северного Ледовитого океана (СЛО) играет роль эстуария сибирских рек, водосборы которых находятся на территории, хранящей многолетние запасы мерзлотных пород, и доступны для прямой разгрузки метана. При этом увеличилась и пресноводная разгрузка в течение прошлого столетия для некоторых сибирских рек [2, 3]. Разрушение мерзлоты и изменение гидрологических условий, в частности рост речного стока, увеличивают роль Арктического бассейна в глобальном цикле метана.

В ряде работ показано, что роль СЛО в глобальном цикле метана существенно занижена [4–7]. Так, в результате экспедиционных исследований 2003–2008 гг. в Восточно-Сибирском море и море Лаптевых были выявлены шлейфы высокого содержания

растворенного метана [6, 7]. Экспериментально установлено, что придонный слой вод в указанных районах перенасыщен метаном относительно его содержания в атмосфере высоких широт Северного полушария на 2 200–3 000%, а поверхностные воды – до 700–2 000%. Концентрации растворенного метана в поверхностном слое воды в эстуариях сибирских рек колебались в пределах 7–700 нмоль/л [8].

Данные, полученные при измерении концентрации метана в приводном слое атмосферы, показали, что области anomalно высоких значений метана в воздухе (до 8 ppm) пространственно совмещены с пятнами anomalно высоких концентраций метана в воде (до 500 нмоль/л) [6].

Часть этих anomalий ассоциирует с наземными источниками, поставляющими метан с помощью речного стока [8]. Действительно, водосборы сибирских рек находятся на территории с наличием многолетней мерзлоты, хранящей огромные запасы органического углерода. Обогащенные метаном озера Кольмо-Индибирской низменности также соединены с реками многочисленными протоками. С другой стороны, сибирский шельф доступен для прямой разгрузки метана посредством подмерзлотного стока. Также исследователи допускают наличие морского источника, а именно возможность разгрузки метана из газогидратных структур [7]. В этой связи становится актуальным выявление вклада пресноводных и морских арктических экосистем как источников метана на Арктическом шельфе.

\* Валентина Владимировна Малахова (malaxv@ssc.ru, malaxv@list.ru); Елена Николаевна Голубева (elen@ommfa.sssc.ru).

## Описание эксперимента

Исследование распространения растворенного метана, поступающего со стоком сибирских рек в воды шельфовой зоны СЛО, проводится на основе численных экспериментов с региональной моделью СЛО – Северная Атлантика, разработанной в Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Численная модель крупномасштабной динамики океана основана на формулировке уравнений в криволинейной ортогональной системе координат, исключаяющей проблему полюса. Используются приближения Буссинеска, гидростатики и дополнительное условие равенства нулю вертикальной скорости на поверхности океана, получившее в литературе название «приближение твердой крышки». При построении численных схем используется ступенчатая аппроксимация рельефа дна океана. Узлы численной сетки для области СЛО расположены на расстоянии от 35 до 50 км, в области Северной Атлантики используется одноградусное разбиение. По вертикали в численную модель включены 33 горизонта, минимальная глубина в шельфовой зоне 50 м. Описание модели можно найти в работах [9, 10]. В качестве модели морского льда используется распространяемая в свободном доступе в Интернете модель CICE-3.11 (The Los Alamos Sea Ice Model, <http://oceans11.lanl.gov/trac/CICE>) [11–13].

В результате работы численной модели с использованием данных реанализа NCEP/NCAR была восстановлена система взаимодействия водных масс Северной Атлантики и СЛО, включая циркуляцию вод в морях Сибирского шельфа [14]. На основе полученной климатической картины циркуляции рассматривалась модельная задача о выносе растворенного метана в Арктический океан со стоком сибирских рек. Распределение растворенного метана  $C$  в морской воде получено как решение адвективно-диффузионного уравнения для примеси:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \nabla C = \text{Diffusion} + C_{ox},$$

где  $u$  – скорость морских течений; Diffusion – описывает процесс горизонтальной и вертикальной диффузии метана на основе операторов второго порядка;  $C_{ox}$  – описывает сток метана, в частности за счет его окисления.

На боковой границе области в точках, соответствующих дельтам рр. Обь, Енисей, Лена, Яна, Колыма, Индигирка, задавались значения концентрации растворенного метана, соответствующие данным измерений. На участках боковых границ, соответствующих местам впадения рек, используются данные о среднеклиматическом сезонном изменении стока рек Арктического региона (информация доступна на сайте Международного проекта АОМIP <http://www.whoi.edu/page.do?pid=29836>). Задание расхода рек сопровождается заданием притока пресной воды (с нулевой соленостью) и концентрации метана с помощью следующего граничного условия:

$$-\mu_s \frac{dC}{dn} + (u \cdot n)C = Q,$$

где  $Q = -CT_r/A$ ;  $n$  – нормаль к границе, через которую осуществляется приток;  $u_n = (u \cdot n)$  – скорость в этом направлении;  $T_r$  – величина расхода реки;  $A$  – площадь боковой поверхности, равная произведению длины участка границы и глубины бассейна на этом участке;  $\mu_s$  – коэффициент горизонтальной диффузии.

## Результаты моделирования

В рамках описанной численной модели было реализовано три численных эксперимента для временного интервала с 2001 по 2009 г. Во всех экспериментах источники растворенного метана задавались в эстуариях сибирских рек в пределах от 30 до 300 нмоль/л в соответствии с данными измерений [8]. При этом для эстуария Оби было принято значение 30, Енисея – 70, Лены – 300, Индигирки, Колымы и Яны – 200 нмоль/л.

### Эксперимент 1

В эксперименте 1 не учитывался процесс окисления метана ( $C_{ox} = 0$ ). Пространственное распределение концентраций растворенного метана, поступающего из водосборов рек в поверхностном слое океана, полученное в эксперименте 1 для 2008 г., показано на рис. 1.

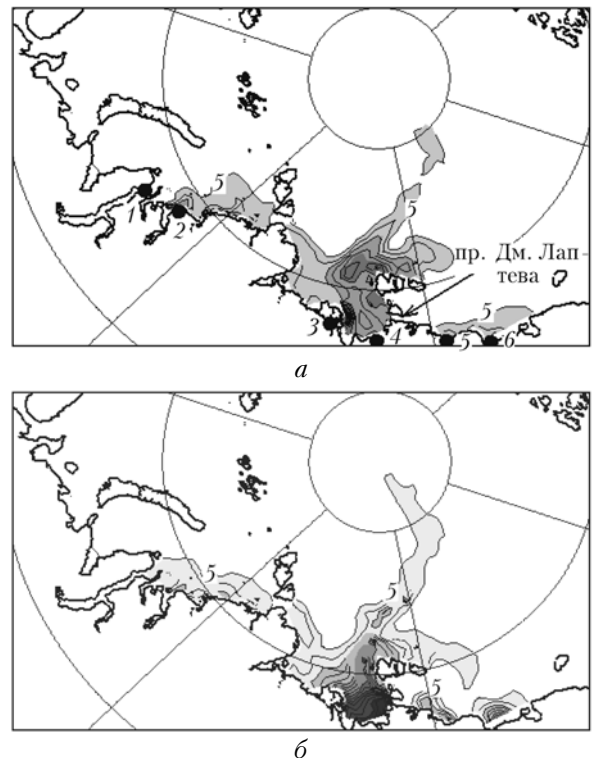


Рис. 1. Пространственное распределение растворенного метана (нмоль/л), полученное в эксперименте 1 для 2008 г.: а – май (максимальная концентрация 90 нмоль/л), б – сентябрь (90 нмоль/л). Шаг между изолиниями 5 нмоль/л. Промаркированы места задания источников в соответствии со стоком рек (1 – Обь, 2 – Енисей, 3 – Лена, 4 – Яна, 5 – Индигирка, 6 – Колыма)

Сток р. Лены вносит весомый вклад в формирование anomalно высоких концентраций метана в шельфовых водах моря Лаптевых. В соответствии с динамикой речного стока максимальные концентрации (до 90 нмоль/л) появляются в мае. Дальнейшее распространение происходит в соответствии с системой течений в циклоническом направлении, определяемой действующей системой ветров и отклоняющим вправо эффектом силы Кориолиса. К сентябрю высокие значения (до 90 нмоль/л) определяются у пролива Дмитрия Лаптева, что соответствует данным измерений [6]. В модели происходит вынос растворенного метана в центральную часть Арктики и накопление его в водной толще, что, по-видимому, объясняется отсутствием в модели процессов окисления метана.

В морских водах при наличии кислорода имеет место дополнительный биохимический процесс – окисление метана, что обеспечивает его эффективный сток. Различные параметризации этого процесса в настоящее время обсуждаются в литературе [15–17]. В настоящей статье используются два способа учета окисления метана.

## Эксперимент 2

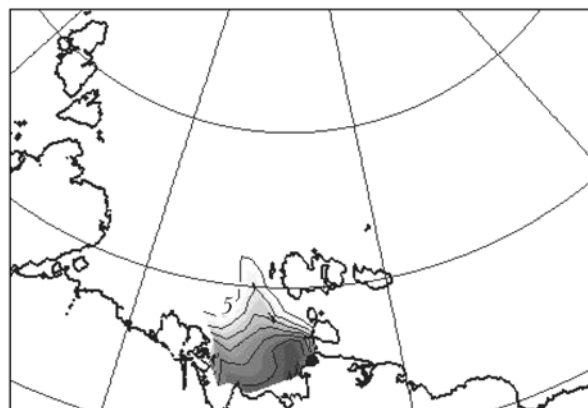
Во втором эксперименте скорости окисления метана соответствовали данным измерений, проведенным для Берингова моря [17]. Многочисленные измерения показали, что скорость окисления метана зависит от глубины океана и сезона. В соответствии с приведенными данными скорость окисления  $C_{ox}$  (нанолитр( $CH_4$ )/литр в день) задавалась следующим образом: с декабря по март – 0,8 нл/л в день, с апреля по июль – 1,3 нл/л в день и с августа по ноябрь – 2 нл/л в день.

Полученное распределение метана для 2008 г. представлено на рис. 2, а.

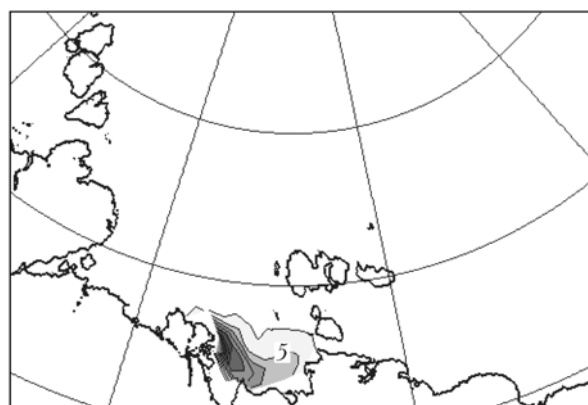
Как и в предыдущем эксперименте, максимальные значения метана появляются в мае, при этом максимальная концентрация уменьшилась по сравнению с первым экспериментом на 17% и составила 75 нмоль/л. Дальнейшее распространение метана происходит в соответствии с системой течений в циклоническом направлении, и к сентябрю максимальные значения 65 нмоль/л определяются у пролива Дмитрия Лаптева, рис. 2, а. Высокие концентрации метана сохраняются в шельфовых водах, но выноса в центральную часть Арктики не происходит. За счет окисления метана отсутствуют процессы его накопления в течение года. Так, в мае высокие значения метана определяются только в районе речного стока Лены, тогда как в первом эксперименте для этого периода характерно накопление метана на всей области шельфа.

## Эксперимент 3

В эксперименте 3 процесс окисления метана был реализован на основе подхода, предложенного в работе [15]. Был введен термин «turnover times» как мера, характеризующая время существования



а



б

Рис. 2. Пространственное распределение растворенного метана (нмоль/л), полученное для сентября 2008 г.: а – в эксперименте 2 (максимальная концентрация 65 нмоль/л), б – в эксперименте 3 (22 нмоль/л)

метана в растворенном виде в морской воде. Результаты измерений концентраций метана в районе его поддонной разгрузки, приведенные в работе [15], показывают, что его «время жизни» в морской воде относительно постоянно: примерно 1,5 года для глубоких слоев океана с высокой концентрацией  $CH_4$  и порядка десятилетий на небольших глубинах, где его концентрация существенно ниже.

Подобная параметризация была рассмотрена в работе [18]: сток метана в модели задавался с учетом его времени жизни [15], которое составляло 1,5 года на глубине свыше 370 м и 10 лет для более мелкого океана. В эксперименте мы использовали аналогичный подход, а именно рассматривали

$$C_{ox} = C/\tau,$$

где

$$\tau = \begin{cases} 1,5 \text{ года при } z \geq 370 \text{ м,} \\ 10 \text{ лет при } z < 370 \text{ м.} \end{cases}$$

Как и в предыдущем эксперименте, полученные высокие концентрации метана сохраняются только в районе речного стока Лены, и к сентябрю происходит их распространение к проливу Дмитрия Лаптева, однако максимальные значения уменьшились

в 3 раза по сравнению со вторым экспериментом и составили только около 22 нмоль/л (рис. 2, б).

## Поток метана в атмосферу

Перенасыщение поверхностных вод растворенным метаном позволяет рассчитать поток метана в атмосферу. Расчет эмиссии метана проводился по методологии, описанной в [19]. Поток метана из шельфовых вод в атмосферу был рассчитан как функция разницы концентрации растворенного метана в поверхностном слое воды  $C_w$  (нмоль/л) и равновесной с атмосферой концентрации метана  $C_a$  (нмоль/л) (для данного региона получена от 3 до 4,5 нмоль/л), скорости ветра  $V$  (м/с) и числа Шмидта  $Sc$ :

$$F = 0,31V^2 \left( \frac{Sc}{660} \right)^{-0,5} (C_w - C_a).$$

Число Шмидта характеризует свойства метана при различной температуре воды  $T$  (°C) и определяется по формуле

$$Sc = 2039,2 - 120,31T + 3,4209T^2 - 0,040437T^3.$$

Были рассчитаны потоки метана «вода – атмосфера» с учетом поля концентраций метана в морской воде, полученного в эксперименте 3. Потоки определены в диапазоне от 0 до  $40 \cdot 10^{-10}$  г(CH<sub>4</sub>)/(см<sup>2</sup> · ч) для сентября 2003 г., от 0 до  $20 \cdot 10^{-10}$  г(CH<sub>4</sub>)/(см<sup>2</sup> · ч) для сентября 2004 г., что сопоставимо с данными наблюдений. Полученные на основе результатов измерений количественные оценки потока метана в атмосферу из Восточно-Сибирского шельфа приведены в [6]: среднее значение для сентября 2003 г. –  $4,86 \cdot 10^{-10}$  и  $3,02 \cdot 10^{-10}$  г(CH<sub>4</sub>)/(см<sup>2</sup> · ч) – для 2004 г.

Для оценки вклада речного стока в общую эмиссию метана были рассчитаны интегральные потоки метана для всей области моделирования. На рис. 3 приведены диаграммы с полученными оценками для всего летнего периода, когда отсутствует ледовый покров.

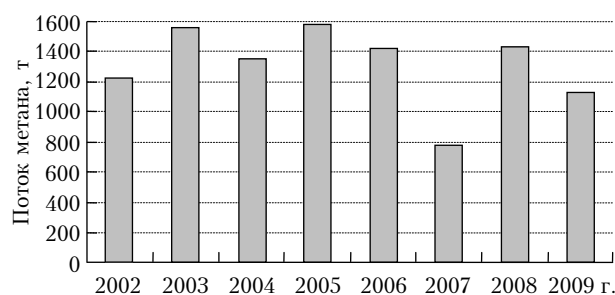


Рис. 3. Суммарный поток метана в атмосферу, полученный в эксперименте 3 для летнего периода

Выявлено, что эмиссия метана в атмосферу могла составить от 800 до 1600 т (CH<sub>4</sub>) в зависимости от рассматриваемого года. Так, в 2003 г. получен возможный поток метана 1600 т, в 2004 г. – 1360 т. Подобные оценки для этих периодов, сделанные на основе данных измерений, приведены в работе [20].

Эмиссия метана из Восточно-Сибирского шельфа могла составить 5700 т (CH<sub>4</sub>) в 2003 г. и 1570 т в 2004 г.

## Заключение

В результате численного моделирования воспроизведены процессы накопления и устойчивости во времени высоких концентраций растворенного метана в море Лаптевых, известные на основе данных наблюдения.

Получено, что сток р. Лены может вносить весомый вклад в формирование аномально высоких концентраций метана в воде в проливе Дмитрия Лаптева. Причина накопления метана – система течений и береговая линия. Учитывая динамику речного стока, можно сделать вывод, что видимые значения метана появляются в мае, дальнейшее распространение происходит в соответствии с системой течений и к сентябрю максимальные значения определяются у пролива Дмитрия Лаптева, что соответствует данным измерений.

Показано, что окисление метана в толще воды обеспечивает эффективный сток в пределах зоны распространения растворенного газа, что может уменьшать его поступление в атмосферу. На основе численных экспериментов показано, что результаты моделирования могут значительно меняться в зависимости от параметризации процесса окисления.

Работа выполнена в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, при поддержке междисциплинарного Интеграционного проекта СО РАН № 109, проекта РФФИ № 11-05-01075-а.

1. Polyakov I.D., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Makshas A.P., Walsh D., Yulin A.V. Observationally based assessment of polar amplification of global warming // *Geophys. Res. Lett.* 1878. V. 29, N 18. doi: 10.1029/2001GL011111.
2. Peterson B.J., Holmes R.M., McClelland J.W., Vorosmarty C.J., Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Rahmstorf S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // *Science*. 2002. V. 298, N 5601. P. 2171–2173.
3. Serreze M.C., Barrett A.P., Slater A.G., Woodgate R.A., Aagaard K., Lammers R.B., Steele M., Moritz R., Meredith M., Lee C.M. The large-scale freshwater cycle of the Arctic // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. C11010. doi: 10.1029/2005JC003424.
4. McGuire A.D., Anderson L.G., Christensen T.R., Dallimore S., Guo L., Hayes D.J., Heimann M., Lorenson T.D., Macdonald R.W., Roulet N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change // *Ecol. Monogr.* 2009. V. 79, N 4. P. 523–555.
5. Damm E., Mackensen A., Budeus G., Faber E., Hanfland C. Pathways of methane in seawater: plume spreading in an Arctic shelf environment (SW-Spitsbergen) // *Continental Shelf Res.* 2005. V. 25, iss. 12–13. P. 1453–1472.
6. Shakhova N., Semiletov I. Methane release and coastal environment in the East Siberian Arctic shelf // *J. Marine Systems*. 2007. N 66. P. 227–243.
7. Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П. Растворенный метан в шельфовых водах Арктических морей // *Докл. РАН*. 2005. Т. 402, № 4. С. 529–533.

8. Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Бельчева Н.Н. Великие Сибирские реки как источники метана на Арктическом шельфе // Докл. РАН. 2007. Т. 414, № 5. С. 683–685.
9. Golubeva E.N., Platov G.A. On improving the simulation of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. C04S05. 16 p. doi: 10.1029/2006JC003734.
10. Голубева Е.Н. Численное моделирование динамики Атлантических вод в Арктическом бассейне с использованием схемы QUICKEST // Вычислит. технол. 2008. Т. 13, № 5. С. 11–24.
11. Hunke E.C., Dukowicz J.K. An elastic-viscous-plastic model for ice dynamics // J. Phys. Oceanogr. 1997. V. 27, N 9. P. 1849–1867.
12. Bitz C.M., Lipscomb W.H. An energy-conserving thermodynamic model of sea ice // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, N 15. P. 669–677.
13. Lipscomb W.H., Hunke E.C. Modeling Sea Ice Transport Using Incremental Remapping // Mon. Wea. Rev. 2004. V. 132, N 6. P. 1341–1354.
14. Голубева Е.Н., Платов Г.А. Численное моделирование отклика Арктической системы «океан – лед» на вариации атмосферной циркуляции 1948–2007 гг. // Изв. РАН. Сер. Физ. атмосфер. и океана. 2009. Т. 45, № 1. С. 145–160.
15. Valentine D.L., Blanton D., Reeburgh W.S., Kastner M. Water column methane oxidation adjacent to an area of active hydrate dissociation, Eel River Basin // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2001. V. 65, N 16. P. 2633–2640.
16. Elliott S., Maltrud M., Reagan M., Moridis G., Cameron-Smith P. Marine methane cycle simulations for the period of early global warming // J. Geophys. Res. 2011. V. 16. G01010. doi: 10.1029/2010JG001300.
17. Griffiths R.P., Caldwell B.A., Cline J.D., Broich W.A., Morita R.Y. Field Observations of Methane Concentrations and Oxidation Rates in the Southeastern Bering Sea // Appl. and Environ. Microbiol. 1982. V. 44, N 2. P. 435–446.
18. Yamamoto A., Yamanaka Y., Tajika E. Modeling of methane bubbles released from large sea-floor area: Condition required for methane emission to the atmosphere // Earth and Planetary Sci. Lett. 2009. V. 284, iss. 3–4. P. 590–598.
19. Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean // J. Geophys. Res. C. 1992. V. 97, N 5. P. 7373–7382.
20. Shakhova N., Semiletov I., Panteleev G. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L09601. doi: 10.1029/2005GL022751.

**V.V. Malakhova, E.N. Golubeva. The role of the Siberian rivers in increase of the dissolved methane concentration in the East Siberian shelf.**

On the basis of the climatic pattern of circulation the modeling problem about carrying out of the dissolved methane in the Arctic Ocean with a drain of the Siberian Rivers is considered. The regional large-scale ocean model, developed in ICMG of the SB RAS is used. Distribution of the dissolved methane in sea water is obtained from the advection-diffusion equation with inclusion of the parameterization of the oxidation process. As a result of numerical modeling accumulation processes, and time stability of high concentration of the dissolved methane to Laptev Sea, known on the basis of supervised data are reproduced. It is obtained, that the drain of the Lena River can bring the powerful contribution to abnormal high concentration of methane in the Dm. Laptev Strait water. It is shown, that methane oxidation controls  $\text{CH}_4$  release to the atmosphere.