

Чувствительность эмиссии метана болотными экосистемами Западной Сибири к изменениям климата: мультимодельные оценки

С.Н. Денисов, М.М. Аржанов, А.В. Елисеев, И.И. Мохов*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 3.12.2010 г.

Схема эмиссий метанового цикла, учитывающая отклик эмиссий метана болотными экосистемами на вариации климата, объединена с динамической моделью процессов тепло- и влагопереноса в почве. С помощью полученной модели проведены расчеты изменений эмиссии метана и основных характеристик термического и гидрологического режимов многолетнемерзлых грунтов в XXI в. для региона Западной Сибири (55–65° с.ш., 65–85° в.д.) при заданном по ансамблю климатических моделей внешнем атмосферном воздействии. Для сценария SRES A1B к концу XXI в. эмиссии метана в среднем по оценкам возрастают более чем вдвое – с 9 МтСН₄/год до 21 МтСН₄/год. Проанализировано влияние основных параметров атмосферного воздействия на эмиссии метана в расчетах с ансамблем климатических моделей. Отмечена особая чувствительность эмиссий к изменению приповерхностной температуры атмосферы.

Ключевые слова: метан, болотные экосистемы, многолетнемерзлые грунты, изменение климата, тепло-влагоперенос, математические модели; methane, wetlands, permafrost, climate change, heat-moisture transfer, numerical models.

Введение

Метан является третьим по величине суммарного радиационного влияния на земную климатическую систему газом после водяного пара и углекислого газа. Парниковый радиационный форсинг метана сравним по порядку с радиационным форсингом углекислого газа при росте концентрации метана в атмосфере от доиндустриального (630–720 млрд⁻¹) до современного (~1800 млрд⁻¹) значения [1]. С учетом характерного времени жизни молекул парниковых газов в атмосфере так называемый потенциал глобального потепления для метана на временном интервале в 20 лет более чем в 60 раз превышает соответствующий потенциал углекислого газа [2]. Величина потока может составлять 250 мг·м⁻²·сут⁻¹ и зависит от многих факторов: температуры и влажности почвы, типа растительности и др. [3, 4].

В настоящее время в мировых научных центрах развиваются климатические модели, включающие интерактивный метановый цикл наряду с углеродным. По модельным расчетам к концу XXI в. концентрация метана в атмосфере может увеличиться в 1,5–2 раза в зависимости от выбранного сценария антропогенного воздействия [1, 5]. Данные инструментальных наблюдений и численные эксперименты с различными моделями показывают

значительный разброс оценок эмиссий метана болотными экосистемами субполярных широт от 10 до 51 МтСН₄/год [6–8] и не позволяют достоверно оценить вклад болотных экосистем в глобальный углеродный цикл.

Значительная часть эмиссий метана связана с богатыми торфом болотами, находящимися в относительно узкой полосе от 50 до 70° с.ш. [9]. Он особенно важен для России, так как болота занимают значительную площадь, из-за чего большая часть естественных источников метана в высоких широтах сосредоточена на ее территории. Для болот Западной Сибири запас углерода оценивается величиной 70 ГтС [10], а суммарные эмиссии метана по различным оценкам составляют от 1 до 20 МтСН₄/год [11–13].

В настоящей статье дана оценка эмиссии метана в XXI в. для болот Западной Сибири при задании внешнего атмосферного воздействия на основе расчетов с ансамблем климатических моделей.

Описание совместной модели и проведенных численных экспериментов

Схема эмиссий метанового цикла, учитывающая отклик эмиссий метана на вариации климата, объединена с динамической моделью процессов тепло- и влагопереноса в почве. Использовалась схема эмиссий метана болотными экосистемами, аналогичная примененной в [2, 5, 14]. Для простоты все болотные экосистемы считались насыщенными влагой.

* Сергей Николаевич Денисов (denisov@ifaran.ru); Максим Михайлович Аржанов (arzhanov@ifaran.ru); Алексей Викторович Елисеев (eliseev@ifaran.ru); Игорь Иванович Мохов (mokhov@ifaran.ru).

Это предположение несколько завышает значение потоков метана, однако следует отметить, что характерная площадь отдельных болотных экосистем не более 5 км² [15] и применение среднего для модельной ячейки показателя влажности почвы приведет к значительному занижению потоков. Кроме того, используемая почвенная схема не воспроизводит уровень грунтовых вод, что также способствует применению данного предположения. Таким образом, общая интенсивность производства метана в единице объема талого слоя почвы на каждом временном шаге рассчитывается в зависимости от температуры почвы:

$$F_{\text{CH}_4} = \sum_{i=1}^N \Theta(T_i) P_i \Delta z_i q(T_i),$$

где T_i — температура i -го слоя толщиной Δz_i , °C; Θ — функция Хевисайда (1 при $T_i > 0$ °C и 0 при $T_i \leq 0$ °C); N — полное число слоев почвы; P_i — продуктивность метана i -го слоя; $q(T_i) = Q^{(T_i - T_*)/T_0}$; T_* и T_0 — эмпирические коэффициенты; $Q = 2$. Согласно [6] $T_* = 2$ °C, $T_0 = 10$ °C.

В рассматриваемой модели продуктивность P_i линейно зависит от интеграла положительных значений температуры (градусо-дней) T_{Σ} :

$$P_i = \alpha + \beta T_{\Sigma,i}.$$

По сравнению с версией метанового блока, включенного в КМ ИФА РАН [5], для коэффициентов были приняты значения $\alpha = 42,5 \text{ мгCH}_4 \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ и $\beta = 3,75 \text{ мгCH}_4 \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$ (согласно [2]). Расчет эмиссии метана проводился только для болот, доля которых в модельной ячейке задавалась по данным <http://cdiac.ornl.gov/epubs/ndp/ndp017/ndp017.html>, при этом зависимость потоков метана от количества субстрата не учитывалась. Для мерзлых слоев почвы эмиссии метана отсутствуют. В расчет эмиссии включены только слои почвы до предельной глубины 1 м.

Распределение температуры и влажности почвы по глубине рассчитывается динамической моделью процессов тепло- и влагопереноса [16]. В рассматриваемой задаче тепло- и влагопереноса все процессы предполагаются одномерными, поскольку вертикальные градиенты значительно превосходят горизонтальные (см., например, [17]). При отрицательной температуре слоя почвы предполагается, что вся влага в нем находится в твердой фазе. На верхней границе почвы/снега задается температура, определяемая из уравнения теплового баланса подстилающей поверхности. На нижней границе задается геотермальный поток тепла. Глубина расчетной области составляет 14,5 м.

Расчеты проводились для региона Западной Сибири (55–65° с.ш., 65–85° в.д.), включающего Большое Васюганское болото. Тип почвы задавался соответствующими значениями плотности и коэффициентов теплопроводности и теплоемкости. В качестве начальных условий использовали профиль тем-

пературы и влажности/льдистости почвы. Входные данные атмосферного воздействия задавались полями приповерхностной температуры воздуха, осадков, коротковолновой солнечной радиации, влажности воздуха и облачности. С совместной моделью были проведены численные эксперименты для XXI в. при задании атмосферного воздействия (сценарий SRES A1B) по ансамблю климатических моделей: ECHAM5/MPI-OM, CCCMA-CGCM3, NCAR-CCSM3, INMCM3, КМ ИФА РАН.

Расчет эмиссий метана

Результаты расчетов эмиссий метана болотными экосистемами представлены на рис. 1.



Рис. 1. Средние по ансамблю моделей эмиссии метана, МтCH₄/год, для региона Западной Сибири (55–65° с.ш., 65–85° в.д.) за период 2001–2100 гг. (жирная линия) и пятилетние скользящие средние эмиссии для каждой из моделей

По модельным оценкам для выбранного региона к концу XXI в. эмиссии метана болотными экосистемами увеличиваются в среднем с 9,1 до 21,3 МтCH₄/год. Стоит отметить, что оценки разных авторов для Западной Сибири отличаются в разы. По данным наблюдений для второй половины XX в. [9] эмиссии метана для этого региона составляют около 1,7 МтCH₄/год. По оценкам на основе данных наблюдений [18] суммарные эмиссии метана с болот зон средней и южной тайги Западной Сибири составляют 3,2 МтCH₄/год, для расчетного региона соответствующие эмиссии по этим данным порядка 3 МтCH₄/год. По расчетам [19] современные эмиссии метана болотами Западной Сибири составляют 22,2 МтCH₄/год. По расчетам с КМ ИФА РАН [5] эмиссии метана изменяются при сценарии SRES A1B для данного региона с 9,9 МтCH₄/год в начале XXI в. до 22 МтCH₄/год к его концу. При этом в связи с недостаточно высоким пространственным разрешением модели источники метана из болот в этих расчетах были существенно более локализованы, чем по данным наблюдений, с завышением их интенсивности. По оценкам с использованием аналогичной схемы эмиссии метана и результатов расчетов параметров почвы с региональной моделью ГГО при сценарии SRES A2 [14] эмиссии метана для данного региона меняются с 6,2 МтCH₄/год в конце XX в. до 9,8 МтCH₄/год в конце XXI в.

Разброс в значениях эмиссии метана, полученный при расчете с входными параметрами различ-

ных моделей, достигает 15 МтСН₄/год и более в отдельные годы XXI в. В связи с этим целесообразно оценить, какие входные параметры оказывают наибольшее влияние на значения эмиссии метана и на изменение эмиссии в XXI в.

Анализ чувствительности эмиссий метана к атмосферному воздействию

Для оценки влияния различных входных параметров атмосферного воздействия на эмиссии метана были произведены дополнительные расчеты эмиссии метана в XXI в. В каждом из этих расчетов значения одного из параметров атмосферного воздействия задавались на уровне 2001 г. В анализируемой версии модели поток метана зависит только от температуры почвы, которая, в свою очередь, наиболее сильно зависит от приповерхностной температуры атмосферы.

Результаты расчетов эмиссии метана при сохранении приповерхностной температуры атмосферы на уровне 2001 г. представлены на рис. 2.

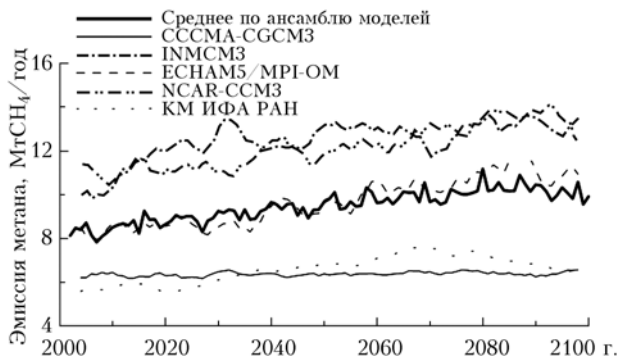


Рис. 2. Средние по ансамблю моделей эмиссии метана, МтСН₄/год, для региона Западной Сибири (55–65° с.ш., 65–85° в.д.) за период 2001–2100 гг. при сохранении приповерхностной температуры на уровне 2001 г. (жирная линия) и пятилетние скользящие средние эмиссий для каждой из моделей

Для анализируемого региона к концу XXI в. происходит относительно небольшое увеличение эмиссий метана болотными экосистемами в среднем с 8,4 до 10,5 МтСН₄/год. При этом для отдельных моделей рост эмиссий еще меньше. Таким образом, рост эмиссий метана при расчетах с совместной моделью связан в основном с ростом приповерхностной температуры атмосферы. Разброс значений эмиссии метана при расчете с входными параметрами различных моделей, в свою очередь, связан с разбросом в значениях приповерхностной температуры атмосферы. Он для различных моделей может составлять до нескольких градусов в отдельные месяцы. Одной из возможных причин такой разницы в температуре может являться различие в пространственном разрешении моделей.

Для сравнения на рис. 3 представлены результаты расчетов эмиссии метана при сохранении осадков на уровне 2001 г. Для анализируемого региона к концу XXI в. эмиссии метана болотными

экосистемами увеличиваются в среднем с 8,8 до 20,9 МтСН₄/год.



Рис. 3. Средние по ансамблю моделей эмиссии метана, МтСН₄/год, для региона Западной Сибири (55–65° с.ш., 65–85° в.д.) за период 2001–2100 гг. при сохранении осадков на уровне 2001 г. (жирная линия) и пятилетние скользящие средние эмиссий для каждой из моделей

В этом случае не только средние эмиссии, но и эмиссии для отдельных моделей мало отличаются от рассчитанных с измененными осадками. Отличия связаны с зависимостью температуры почвы от осадков. При этом на температуру почвы существенное влияние оказывает изменение коэффициента теплопроводности почвы в зависимости от ее влажности. Кроме того, температура почвы в зимний сезон зависит от толщины снежного покрова.

Заключение

В данной работе сделаны оценки изменений эмиссии метана болотными экосистемами для региона Западной Сибири (55–65° с.ш., 65–85° в.д.) в XXI в. с использованием схемы эмиссий метана, совмещенной с динамической моделью тепло- и влагопереноса в почве при задании атмосферного воздействия по расчетам с ансамблем климатических моделей. В среднем для ансамбля моделей эмиссии метана возрастают на 12,2 МтСН₄/год. При этом отмечен значительный разброс в значениях потоков для разных моделей.

Проанализировано влияние основных параметров атмосферного воздействия на эмиссии метана в расчетах с ансамблем климатических моделей. В целом эмиссии метана при расчете с использованием совместной схемы наиболее зависимы от значений приповерхностной температуры атмосферы. С разницей в приповерхностной температуре в анализируемом регионе по расчетам с различными моделями в наибольшей степени связана разница в значениях эмиссий.

Авторы выражают благодарность В.С. Казанцеву за полезные обсуждения.

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проектов Министерства образования и науки РФ, программ Президиума РАН и Отделения наук о земле РАН и гранта Президента РФ НШ–3301.2010.5.

1. *Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

- Change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. (eds.). Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2007. P. 433–497.
2. Мохов И.И., Елисеев А.В., Денисов С.Н. Модельная диагностика эмиссии метана болотными экосистемами во второй половине XX века с использованием данных реанализа // Докл. РАН. 2007. Т. 417, № 2. С. 258–262.
 3. Wagner D., Kobabe S., Pfeiffer E.-M., Hubberten H.-W. Microbial controls on methane fluxes from a polygonal tundra of the Lena Delta, Siberia // Permafrost and Periglacial Processes. 2003. V. 14, iss. 2. P. 173–185.
 4. Whalen S., Reeburgh W. Composition of atmospheric methane by tundra soils // Nature (Gr. Brit.). 1990. V. 346, N 6280. P. 160–162.
 5. Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Денисов С.Н. Учет взаимодействия метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2008. Т. 44, № 2. С. 147–162.
 6. Christensen T.R., Cox P. Response of methane emission from arctic tundra to climatic change: results from a model simulation // Tellus B. 1995. V. 47, N 3. P. 301–309.
 7. Christensen T.R., Prentice I.C., Kaplan J., Haxeltine A., Sitch S. Methane flux from northern wetlands and tundra // Tellus B. 1996. V. 48, N 5. P. 409–416.
 8. Zhuang Q., Melillo J.M., Kicklighter D.W., Prim R.G., McGuire D.A., Steudler P.A., Felzer B.S., Hu S. Methane fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere at northern high latitudes during the past century: A retrospective analysis with a process-based biogeochemistry model // Glob. Biogeochem. Cycles. 2004. V. 18, N 3. P. GB3010.
 9. Matthews E., Fung I. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area and environmental characteristics of sources // Glob. Biogeochem. Cycles. 1987. V. 1, N 1. P. 61–86.
 10. Smith L.C., MacDonald G.M., Velichko A.A., Beilman D.W., Borisova O.K., Frey K.E., Kremenetski K.V., Sheng Y. Siberian peatlands a net carbon sink and global methane source since the early Holocene // Science. 2004. V. 303, N 5656. P. 353–356.
 11. Andronova N.G., Karol I.L. The contribution of USSR sources to global methane emission // Chemosphere. 1993. V. 26, iss. 1–4. P. 111–126.
 12. Паников Н.С., Титлянова А.А., Палева М.В., Семенов А.М., Мироньчева-Токарева Н.П., Макаров В.И., Дубинин Е.В., Ефремов С.П. Эмиссия метана из болот юга Западной Сибири // Докл. РАН. 1993. Т. 330, № 3. С. 388–390.
 13. Бажин Н.М. Метан в атмосфере // Соросовский Образовательный Журнал. 2000. Т. 6, № 3. С. 52–57.
 14. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Оценка изменений эмиссии метана болотными экосистемами Северной Евразии в XXI веке с использованием результатов расчетов с региональной моделью климата // Метеорол. и гидрол. 2010. № 2. С. 55–62.
 15. Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слукса З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: ИПП «Гриф К», 2001. С. 396–400.
 16. Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Мохов И.И., Хон В.Ч. Моделирование температурного и гидрологического режима водосборов сибирских рек в условиях вечной мерзлоты с использованием данных реанализа // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2008. Т. 44, № 1. С. 86–93.
 17. Володин Е.М., Лысков В.Н. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность–почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1998. Т. 34, № 4. С. 453–465.
 18. Глаголев М.В., Шнырев Н.А. Летне-осенняя эмиссия CH₄ естественными болотами Томской области и возможности ее пространственно-временной экстраполяции // Вестн. МГУ. Сер. 17. 2008. № 2. С. 24–36.
 19. Anisimov O.A., Reneva S.A. Permafrost and Changing Climate: The Russian Perspective // Ambio. 2006. V. 35, N 4. P. 169–175.

S.N. Denisov, M.M. Arzhanov, A.V. Eliseev, I.I. Mokhov. Sensitivity of methane emissions from Western Siberian wetlands to climate changes: multi-model estimations.

The emission scheme of methane cycle, which takes into account response of methane flux from wetlands to climate variations, is coupled with the dynamic model of heat and moisture transport processes in soil. Simulations of methane emissions and main characteristics of thermal and hydrologic regimes in soil are performed with the coupled model for the region of Western Siberia (55–65 °N, 65–85 °E) for the 21st century forced by atmospheric parameters from the ensemble of climate models. On average, simulated methane emissions under the SRES A1B scenario grows more than twofold to the end of 21st century – from 9 MtCH₄/yr to 21 MtCH₄/yr. Sensitivity of simulated methane emissions to input parameters of atmospheric forcing from the ensemble of climate models is analyzed. It is shown that this sensitivity is large with respect to the surface air temperature variations.