

УДК 551.511

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ГЛОБАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ МЕТАНА В АТМОСФЕРУ ВЛАЖНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ

© 2015 г. С. Н. Денисов*, А. В. Елисеев**, И. И. Мохов**, М. М. Аржанов*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

119017 Москва, Пыжевский пер., 3

**Институт прикладной физики РАН

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

E-mail: mokhov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 15.07.2014 г., после доработки 18.12.2014 г.

Выполнены оценки изменений эмиссии метана в атмосферу влажными экосистемами для различных регионов и Земли в целом с новой версией модели эмиссий метана из почвы в глобальной климатической модели промежуточной сложности, используемой в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Проведены численные эксперименты с моделью в соответствии с условиями международного проекта сравнения подобных моделей WETCHIMP (Wetland and Wetland CH₄ Inter-comparison of Models Project). Модель реалистично воспроизводит глобальные и региональные характеристики эмиссии метана. Отмечена общая тенденция увеличения потоков метана из болотных экосистем в атмосферу при глобальном потеплении. В проведенных расчетах глобальные естественные эмиссии метана из болот увеличились в XX веке на 9 МтСН₄/год. Оценена чувствительность глобальной эмиссии метана к изменению глобальной приповерхностной температуры над сушей: 16 МтСН₄/год/К (примерно 10%/К). При продолжении потепления можно ожидать значительное увеличение эмиссий метана в первую очередь из высоких широт Северного полушария.

Ключевые слова: эмиссии метана, влажные экосистемы, изменения климата, моделирование, WETCHIMP.

DOI: 10.7868/S000235151505003X

ВВЕДЕНИЕ

Метан – третий по значимости интегрального радиационного влияния на современную земную климатическую систему парниковый газ после водяного пара и углекислого газа. При этом метан более чем в 20 раз радиационно эффективнее углекислого газа в расчете на одну молекулу. Радиационный форсинг метана, составляющий в настоящее время около 1 Вт/м², сравним с форсингом углекислого газа (около 1.7 Вт/м²) [1]. Поэтому в глобальных климатических моделях в блоке углеродного цикла необходимо учитывать и метановый обмен.

Крупнейший природный источник метана – влажные экосистемы, в которых разложение органики в почве происходит в анаэробных условиях (озера и другие водоемы при этом не учитываются), в частности болота. Глобальные запасы углерода в верхнем слое почвы толщиной 1 м оцениваются в 1500–1600 ГтС [2] – приблизительно в 2 раза больше, чем запасы в атмосфере [1]. Медленное разложение органической материи в болотах способствует накоплению углерода. Поэтому, хотя влажные экосистемы занимают

всего 6–7% площади поверхности Земли, большая часть почвенного углерода находится в них. Около половины болот расположено в высоких широтах Северного полушария, что связано, в частности, с влиянием вечной мерзлоты на гидрологию почвы [3, 4]. Запасы углерода в районах распространения вечной мерзлоты, которые при деградации мерзлоты могут включиться в углеродный цикл, оцениваются в 1400–1850 ГтС [5, 6]. Режим болот и в целом природный цикл метана зависят от региональных и глобальных изменений климата и, в свою очередь, влияют на них.

Для глобальной климатической модели, используемой в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) [7–10], была разработана модель эмиссий метана влажными экосистемами, позволяющая учитывать отклик потоков метана из почвы в атмосферу на изменения климата. С этой моделью была проведена серия численных экспериментов [11–17], в том числе в соответствии с условиями международного проекта сравнения подобных моделей WETCHIMP. Международный проект WETCHIMP [13, 14] (см. <http://arve.unil.ch/research/wetchimp>)

imp/) был иницирован для координации исследований в области моделирования влажных экосистем и связанных с ними потоков метана. С моделью проводились неинтерактивные расчеты эмиссий метана из почвы в атмосферу с использованием временных серий среднемесячных данных высокого разрешения CRU [18] для XX века.

В настоящее время модель эмиссий метана из почвы в КМ ИФА РАН существенно модернизирована. Блок термофизики почвы, использовавшийся в [11, 12], заменен на разработанную для КМ ИФА РАН динамическую модель термо- и гидрофизических процессов в почвогрунте [4, 15, 19], а блок эмиссий метана был модернизирован и позволяет учитывать влияние доступности углеродного субстрата в почве на производство метана. В данной работе представлены результаты расчетов с новой версией модели эмиссий метана по сравнению с использованной ранее в рамках проекта WETCHIMP.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ЭМИССИЙ МЕТАНА

Новая модель эмиссий метана влажными экосистемами в КМ ИФА РАН состоит из двух блоков. В блоке эмиссии метана рассчитывается поток метана из почвы в атмосферу. Необходимые для этого физические характеристики почвы в свою очередь рассчитываются в блоке тепло- и влагопереноса.

Блок эмиссии метана, ранее использованный в [11, 12, 16, 17], был модернизирован и позволяет учитывать влияние количества углеродного субстрата почвы на производство метана согласно [20, 21]. Полный поток метана из почвы в атмосферу экспоненциально зависит от температуры почвы. Он рассчитывался согласно

$$F = \sum H(T_i)(2\Theta_i - 1)P_i\Delta z_i Q_{10,s}^{(T_i - T_0)/10}, \quad (1)$$

где T_i – температура i -го слоя почвы (в градусах Цельсия), Θ_i – его влагосодержание в долях от насыщающего значения, а Δz_i – толщина, $Q_{10,s} = 2$, $T_0 = 2^\circ\text{C}$, H – функция Хевисайда, P_i – интенсивность производства метана 1-го слоя.

По экспериментальным данным [22] для тундры P_i слабо возрастает в течение теплого периода, в результате при одинаковой температуре почвы поток метана из почвы в конце теплого периода несколько выше, чем в начале. Интенсивность, таким образом, определялась согласно

$$P = kC_{\text{eff}}(a + b \times DDT), \quad (2)$$

где DDT – число градусодней за период без замерзания данного слоя почвы, C_{eff} – содержание углерода в почве по данным [23]. Численные расчеты проводились при $k = 0.01$ с измененными по срав-

нению с [12] значениями параметров a ($42.5 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-3} \text{ сут}^{-1}$) и b ($0.0375 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-3} \text{ сут}^{-1} \text{ C}^{-1}$).

Суммирование в (1) производилось по слоям почвы до некоторой предельной глубины. В данной работе использовалась схема расчета запасов углерода в почве согласно [24]. Вертикальное распределение задавалось на основе результатов измерений [25] с максимальной концентрацией углерода в верхних 20 см почвы и последующим экспоненциальным убыванием содержания углерода с глубиной. Учет содержания углерода в почве позволил задавать предельную глубину расчета, одинаковую для всех модельных ячеек (ранее для тропических и внетропических широт ее значения различались [11, 12]). В проведенных расчетах для предельной глубины использовалось значение 1 м.

Для расчета температуры и влажности почвы использовалась динамическая модель процессов тепло- и влагопереноса в почвогрунте [4, 17]. Болота характеризуются ограниченным подповерхностным стоком воды, связанным с наличием водоупорного слоя в грунте. Нужно учитывать, что одномерная модель не позволяет рассчитывать боковой сток с соседних модельных ячеек или внутри ячейки. В связи с этим в каждой модельной ячейке доля влажных территорий предписывалась в соответствии с данными [26]. При расчете эмиссии метана для влажных территорий почвенные слои считались насыщенными влагой. На верхней границе расчетной области в модели термо- и гидрофизики почвы атмосферное воздействие задавалось полями приповерхностной температуры, осадков, коротковолновой солнечной радиации, влажности и облачности.

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

При модельных расчетах потоков метана и их изменений использовались временные серии среднемесячных данных CRU TS3.1 [18] для приповерхностной температуры, осадков и облачности. Их пространственное разрешение составляет $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Остальные характеристики атмосферного воздействия незначительно влияют на величины потоков метана [17]. Они задавались по расчетам с полной версией КМ ИФА РАН (пространственное разрешение $4.5^\circ \times 6.0^\circ$) с учетом изменений от года к году.

С моделью эмиссий метана был проведен ряд численных экспериментов, в том числе базовый эксперимент (D) для 1901–2009 гг. Для оценки чувствительности модели к осадкам и температуре были проведены дополнительные численные эксперименты. В первом из них (TS) на вход модели подавалась температура, увеличенная на 3.4 К, а остальные параметры атмосферного воздействия не менялись. Эта величина соответствует средне-

Таблица 1. Площадь болот [10^6 км^2] по различным массивам данных

Данные	Глобально	Тропические широты ($30^\circ\text{S}–30^\circ\text{N}$)	Внетропические широты ($>35^\circ\text{N}$)
[26]	6.2	2.9	2.9
CDIAC NDP-017	20.3	1.3	18.9
[29]	5.3		

Примечание. В данной работе использовались данные [26], в более ранних версиях модели – данные CDIA NDP-017.

Таблица 2. Эмиссии метана [$\text{MtCH}_4/\text{год}$] по расчетам в численном эксперименте *D* (за период 1994–2003 гг.)

Данные	Глобально	Тропические широты ($30^\circ\text{S}–30^\circ\text{N}$)	Внетропические широты ($>35^\circ\text{N}$)
Эксперимент <i>D</i>	178 ± 3	139 ± 2	36 ± 3
Версия модели [15]	164 ± 3	115 ± 2	43 ± 2
WETCHIMP [13]	190 ± 39	126 ± 31	51 ± 15
[29]	181	67	106
[30]	145 ± 30		
[32]	92	55	30
[33]	165 ± 50	91 ± 28	69 ± 20
[34]	145 ± 10	91 ± 11	43 ± 4

Примечание. Для сравнения приведены результаты расчетов с предыдущей версией модели и межмодельное среднее для ансамбля моделей проекта WETCHIMP (в аналогичных численных экспериментах), а также другие модельные оценки и данные наблюдений.

му межмодельному повышению глобальной приповерхностной температуры за период 2080–2099 гг. относительно периода 1980–1999 гг. по расчетам при антропогенном сценарии SRES A2 [27]. Во втором численном эксперименте (*PS*) были увеличены осадки на 3.9% (изменение глобальной средней величины для периода 2071–2100 гг. относительно периода 1961–1990 гг. по расчетам при антропогенном сценарии SRES A2 [28]), а остальные параметры атмосферного воздействия, включая температуру, не менялись по сравнению с экспериментом *D*. Повышение приповерхностной температуры и осадков в численных экспериментах *TS* и *PS* было однородно по пространству и месяцам года аналогично экспериментам 5 и 6 проекта WETCHIMP.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При использовавшихся параметрах предлагаемая модель в целом достаточно реалистично воспроизводит потоки метана по имеющимся данным. На рис. 1 представлено пространственное распределение рассчитанных среднегодовых потоков метана для численного эксперимента *D* для периода 1991–2009 гг. Наибольший вклад в глобальные эмиссии метана вносят влажные экосистемы Азии (Западной Сибири и Юго-Восточной Азии), Северной Америки (низменности Гудзонова залива), Центральной Африки и Южной Америки (бас-

сейна Амазонки). Для сравнения представлены распределения по расчетам с предыдущей версией модели эмиссий метана ИФА РАН (в рамках проекта WETCHIMP [13]) и по данным наблюдений [29]. Различия в распределении потоков метана связаны в первую очередь с использованием различных распределений болот. В отличие от новой версии модели эмиссий метана в КМ ИФА РАН, в которой используется распределение увлажненных территорий согласно [26], в предыдущей версии модели использовалась база данных CDIAC NDP-017 (<http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp017.html>). Влажными экосистемами считались болота и тундра. В табл. 1 приведены площади болот по разным данным.

Средняя величина глобальной интенсивности эмиссий метана болотными экосистемами в новой версии модели в базовом численном эксперименте *D* по расчетам с использованием данных CRU для периода 1901–2009 гг. около $170 \text{ MtCH}_4/\text{год}$. Близкие оценки получены в [30] и [31] – $145 \pm \pm 30 \text{ MtCH}_4/\text{год}$ и $145 + 41 \text{ MtCH}_4/\text{год}$ соответственно. При этом полученные в данной работе оценки потоков метана во внетропических широтах ($36 \text{ MtCH}_4/\text{год}$) находятся в пределах, а в тропических ($134 \text{ MtCH}_4/\text{год}$) несколько выше оценок [31] (соответственно в диапазонах 29–69 и 65–117 $\text{MtCH}_4/\text{год}$). В табл. 2 представлено сравнение результатов расчета эмиссии метана в эксперименте *D* с результатами расчетов с предыду-

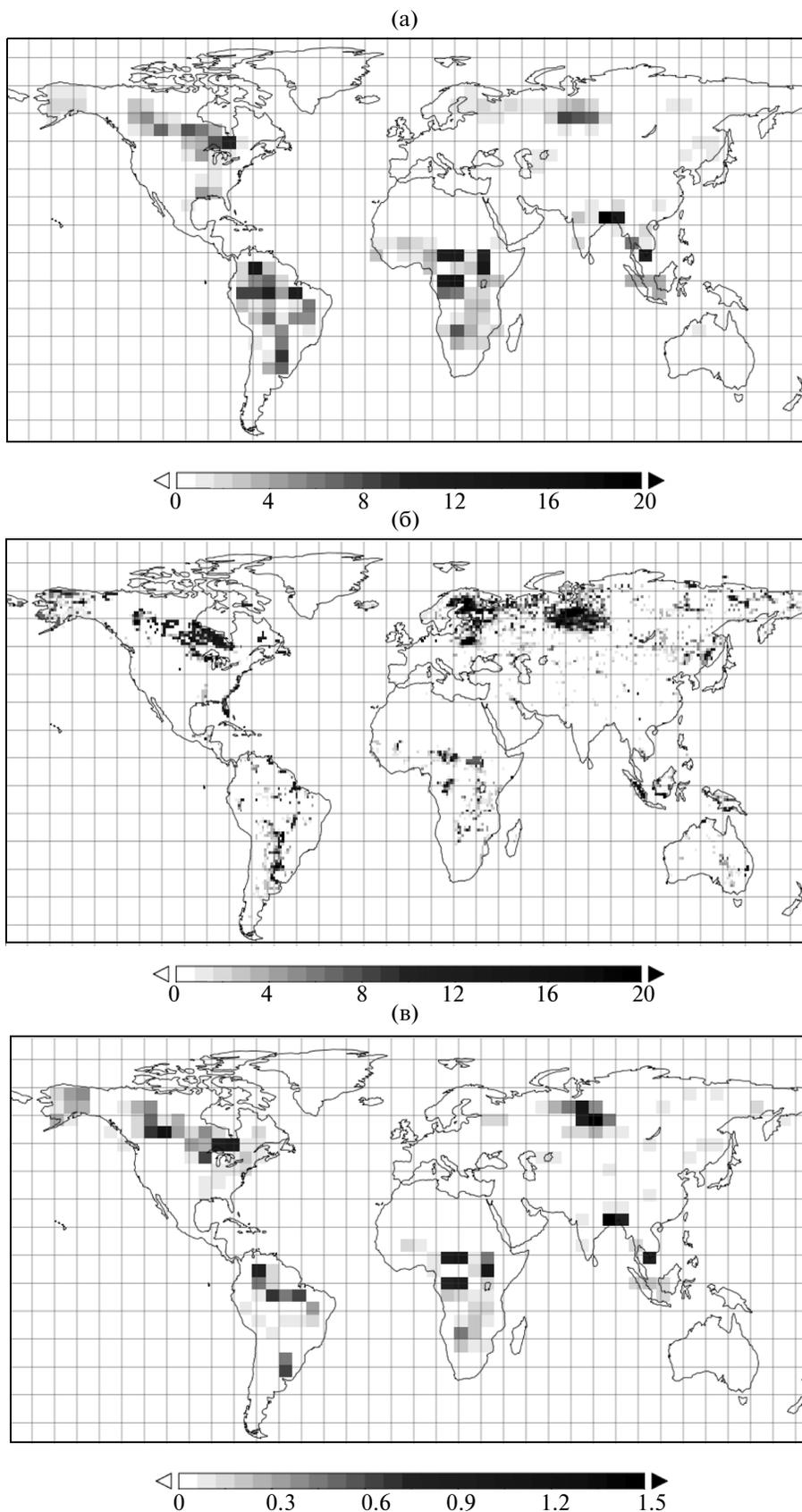


Рис. 1. Пространственное распределение среднегодовых потоков метана [$\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$] по модельным расчетам в численном эксперименте D для периода 1991–2000 гг. (а), распределение эмиссий по данным [24] (б) и изменение рассчитанных среднегодовых потоков метана (в) в численном эксперименте D для периода 1991–2000 гг. по сравнению с периодом 1901–1910 гг.

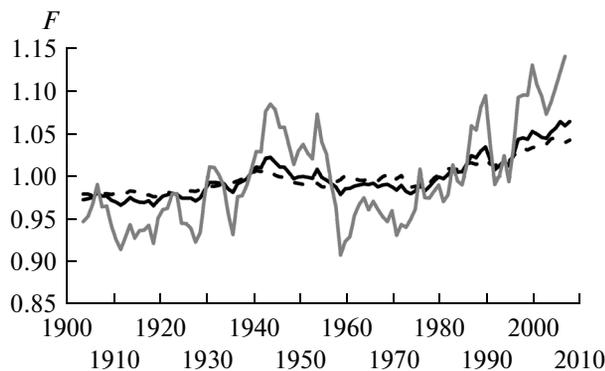


Рис. 2. Нормированные (на соответствующие средние значения для всего периода 1901–2009 гг.) 5-летние скользящие средние величины потоков метана в численном эксперименте *D* для Земли в целом (черная кривая), для тропических (штриховая кривая) и внетропических широт (серая кривая).

шей версией модели, с данными WETCHIMP, с оценками различных моделей [30, 32–34] и с данными наблюдений [29].

В эксперименте *D* в течение XX века глобальные эмиссии возрастают примерно на 9 МтСН₄/год. Межгодовая изменчивость эмиссий может превышать в отдельных случаях это значение, но в основном – менее 6 МтСН₄/год. При этом можно отметить два периода спада эмиссий в 1910-х и 1960-х годах. Согласно рис. 2 они связаны главным образом со снижением эмиссий из влажных экосистем внетропических широт. Относительное увеличение эмиссий метана из внетропических широт в XX веке значительно превосходит увеличение глобальных эмиссий. Глобальные эмиссии увеличиваются в XX веке примерно на 5%, а эмиссии из внетропических широт возрастают более чем на 9%. Анализ пространственного распределения разности средних потоков метана в последнем и первом десятилетиях XX века выявил также регионы с небольшими отрицательными изменениями эмиссии метана – в основном в Африке и Южной Америке.

Рассчитанные эмиссии метана слабо чувствительны к изменению количества осадков. Замена осадков в численном эксперименте *PS* в среднем за XX век практически не меняет общие эмиссии и эмиссии из тропиков, а внетропические эмиссии уменьшаются в среднем на 3%. Изменение температуры в численном эксперименте *TS* увеличивает общие эмиссии метана из почвы по сравнению с экспериментом *D* в среднем за расчетный период на 40% (67 МтСН₄/год). При этом относительное увеличение внетропических эмиссий (84%) значительно сильнее, чем тропических (28%), что связано в первую очередь с удлинением теплого периода.

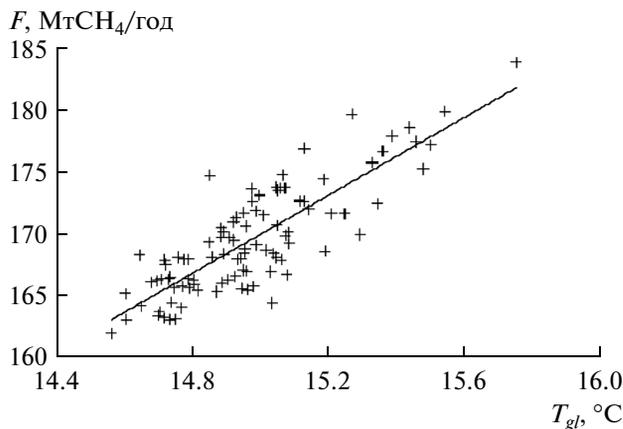


Рис. 3. Глобальные эмиссии метана в зависимости от глобальной приповерхностной температуры T_{gl} над сушей по модельным расчетам в численном эксперименте *D*.

Низкая чувствительность модели эмиссий метана из почвы к изменению осадков связана с использованием предписанной маски болот, не меняющейся от года к году. В реальности (а также в других моделях ансамбля WETCHIMP) при изменении количества осадков меняются и площади болот, однако с использованием одномерной модели почвы с довольно грубым пространственным разрешением такие оценки получить нельзя.

На основе линейной регрессии (прямая на рис. 3) оценен коэффициент чувствительности глобальной эмиссии метана к изменению глобальной приповерхностной температуры атмосферы над сушей – 16 МтСН₄/год/К или 10%/К (при коэффициенте корреляции $r = 0.70$). Коэффициент чувствительности эмиссии метана к изменению приповерхностной температуры для пояса низких широт (30° N–30° S) значительно меньше – 9 МтСН₄/год/К или 6%/К (при $r = 0.76$). Рост эмиссий метана с ростом приповерхностной температуры над сушей во внетропических широтах составляет 7 МтСН₄/год/К или 20%/К (при $r = 0.32$) для пояса широт 30°–90° N в Северном полушарии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием новой версии модели эмиссий метана из почвы, разработанной в ИФА РАН, сделаны оценки изменений эмиссии метана в атмосферу влажными экосистемами для различных регионов и Земли в целом. В том числе проведены численные эксперименты с моделью в соответствии с условиями международного проекта сравнения подобных моделей WETCHIMP. В условиях глобального потепления ожидается общий рост потоков метана в атмосферу из наземных экоси-

стем в связи с зависимостью потоков метана от температуры и удлинения безморозного периода.

Получена оценка чувствительности глобальной эмиссии метана к изменению глобальной приповерхностной температуры над сушей: 16 МтСН₄/год/К (или 10%/К). Для конца XX века глобальная эмиссия метана из болотных экосистем по расчетам около 175 МтСН₄/год. По результатам численного эксперимента с учетом возможных изменений температуры в XXI веке значения этой глобальной эмиссии могут увеличиться более чем на треть и достигать 240 МтСН₄/год. При этом региональные тенденции изменения потоков метана зависят также от региональных изменений гидрологического режима. Усиление осадков с увеличением увлажнения почвы должно усиливать температурный эффект, в то время как иссушение почвы и сокращение площади болот должно способствовать ослаблению эмиссии метана в атмосферу болотными экосистемами.

Данная работа выполнена при поддержке программ РАН, гранта Президента РФ (НШ – 3894.2014.5), Правительства РФ (соглашение 14.Z50.31.0033 с ИПФ РАН) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-05-02457).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds.: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K. et al. Cambridge/New York: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
2. Hugelius G., Bockheim J.G., Camill P. et al. A new dataset for estimating organic carbon storage to 3m depth in soils of the northern circumpolar permafrost region // *Earth System Sci. Data*. 2013. № 5. P. 393–402, doi:10.5194/essd-5-393-2013.
3. Володин Е.М., Лыков В.Н. Параметризация процессов тепло-и влагообмена в системе растительность–точва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1998. Т. 34. № 4. С. 453–465.
4. Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф. и др. Моделирование температурного и гидрологического режима водосборов сибирских рек в условиях вечной мерзлоты с использованием данных реанализа // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2008. Т. 44. № 1. С. 86–93.
5. Schuur E.A.G., Bockheim J., Canadell J.G. et al. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle // *Bioscience*. 2008. V. 58. № 8. P. 701–714.
6. McGuire A.D., Anderson L.G., Christensen T.R. et al. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change // *Ecological Monographs*. 2009. V. 79. № 4. P. 523–555.
7. Petoukhov V.K., Mokhov I.I., Eliseev A.V., Semenov V.A. The IAP RAS Global Climate Model. Moscow: Dialogue-MSU, 1998. 110 p.
8. Мохов И.И., Демченко П.Ф., Елисеев А.В. и др. Оценки глобальных и региональных изменений климата в XIX–XXI веках на основе модели ИФА РАН с учетом антропогенных воздействий // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2002. Т. 38. № 5. С. 629–642.
9. Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф. и др. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // *ДАН*. 2005. Т. 402. № 2. С. 243–247.
10. Мохов И.И., Елисеев А.В. Моделирование глобальных климатических изменений в XX–XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // *ДАН*. 2012. Т. 443. № 6. С. 732–736.
11. Мохов И.И., Елисеев А.В., Денисов С.Н. Модельная диагностика изменений эмиссии метана болотными экосистемами во второй половине XX века с использованием данных реанализа // *ДАН*. 2007. Т. 417. № 2. С. 258–262.
12. Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. и др. Учет взаимодействия метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2008. Т. 44. № 2. С. 147–162.
13. Melton J.R., Wania R, Hodson E.L. et al. Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: conclusions from a model inter-comparison project (WETCHIMP) // *Biogeosciences*. 2013. № 10. P. 753–788.
14. Wania R, Melton J.R., Hodson E.L. et al. Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: methodology of a model inter-comparison project (WETCHIMP) // *Geosci. Model Dev*. 2013. № 6. P. 617–641.
15. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Изменения климата в глобальной модели ИФА РАН с учетом взаимодействия с метановым циклом при антропогенных сценариях семейства RCP // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 11. С. 30–42.
16. 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 // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 2. С. 55–62.
17. Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. Чувствительность эмиссий метана болотными экосистемами Западной Сибири к изменениям климата: мультимодельные оценки // *Оптика атмосферы и океана*. 2011. Т. 24. № 4. С. 319–322.
18. Mitchell T.D., Jones P.D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids // *Int. J. Climatol*. 2005. V. 25. № 6. P. 693–712.
19. Аржанов М.М., Мохов И.И. Температурные тренды в многолетнемерзлых грунтах Северного полушария: Сравнение модельных расчетов с данными наблюдений // *ДАН*. 2013. Т. 449. № 1. С. 87–92.

20. Clark D.B., Mercado L.M., Sitch S. et al. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Pt. 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics // *Geosci. Model Dev.* 2011. № 4. P. 701–722.
21. Whiting G.J., Chanton J.P. Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration // *Tellus.* 2001. V. 53B. № 5. P. 521–528.
22. Christensen T.R., Cox P. Response of methane emission from arctic tundra to climatic change: results from a model simulation // *Tellus.* 1995. V. 47B. № 3. P. 301–309.
23. Los S.O., Collatz G.J., Sellers P.J. et al. A global 9-year biophysical land-surface data set from NOAA AVHRR data // *J. Hydrometeorol.* 2000. V. 1. № 2. P. 183–199.
24. Аржанов М.М., Мохов И.И. Модельные оценки количества органического углерода, освобождаемого из многолетнемерзлых грунтов при сценариях глобального потепления в XXI веке // *ДАН.* 2014. Т. 499. № 1. С. 87–92.
25. Jobbagy E.N., Jackson R.B. The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and its Relation to Climate and Vegetation // *Ecol. Appl.* 2000. V. 10. № 2. P. 423–436.
26. Bergamaschi P., Frankenberg C., Meirink J.F. et al. Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT 2. Evaluation based on inverse model simulations // *J. Geophys. Res.: Atm.* 2007. V. 112. № D2. P. D02304.
27. IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: Solomon S., Qin D., Manning M. et al. Cambridge/New York: Cambridge Univ. Press, 2007. 996 p.
28. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J. et al. Cambridge/New York: Cambridge Univ. Press, 2001. 881 p.
29. Matthews E., Fung I. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area and environmental characteristics of sources // *Glob. Biogeochem. Cycles.* 1987. V. 1. № 1. P. 61–86.
30. Lelieveld J., Crutzen P., Dentener F. Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane // *Tellus.* 1998. V. 50B. № 2. P. 128–150.
31. Houweling S., Kaminski T., Dentener F. et al. Inverse modeling of methane sources and sinks using the adjoint of a global transport model // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D21. P. 26137–26160.

Model Estimates of Global and Regional Atmospheric Methane Emissions of Wetland Ecosystems

S. N. Denisov^a, A. V. Eliseev^{a, b}, I. I. Mokhov^{a, b}, M. M. Arzhanov^a

^a A.M. Obukhov RAS Institute of Atmospheric Physics, Pyzhevsky per. 3, Moscow, 119017 Russia

^b Institute of Applied Physics RAS, ul. Ul'yanova 46, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

e-mail: mokhov@ifaran.ru

Received July 15 2014; in final form, December 18 2014

Abstract—Estimates of the changes of atmospheric methane emissions from wetland ecosystems for different regions and the Earth as a whole are performed. The new version of the model of methane emissions from soil in a global climate model of intermediate complexity developed at the A.M. Obukhov Institute of atmospheric physics is used. Numerical experiments in accordance with the conditions of WETCHIMP (Wetland and Wetland CH₄ Inter-comparison of Models Project) have been performed. The model is capable of realistically reproducing global and regional characteristics of methane emissions. The general trend of increases in methane flows from wetland ecosystems into the atmosphere due to global warming is noted. According to the results of calculations, the global natural methane emissions from wetlands have increased in the 20th century by 9 MtCH₄/year. The sensitivity of global methane emissions to changes in global near-surface temperature over the land was estimated to be equal to 16 MtCH₄/year/K (approximately 10%/K). With continuing warming, we can expect a significant increase in methane emissions, primarily from the high latitudes of the northern hemisphere.