

## «СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ» (AB4) ЭМИССИИ CH<sub>4</sub> ИЗ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2009 М.В. Глаголев<sup>1</sup>, А.Ф. Сабреков<sup>2</sup>, Ш.Ш. Максютгов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;  
e-mail: m\_glagolev@mail.ru

<sup>2</sup> Югорский Государственный Университет; e-mail: misternickel@mail.ru

<sup>3</sup> Национальный институт изучения окружающей среды, Япония, г. Цукуба;  
e-mail: shamil@nies.go.jp

«Стандартная модель» представляет собой совокупность периодов эмиссии, картографической основы и плотностей распределения вероятностей величин потоков из типичных экосистем. На основе модели Ab4 региональная эмиссия CH<sub>4</sub> из болот Западной Сибири оценивается величиной  $5,1 \pm 2,4$  ТгС-CH<sub>4</sub>/год.

Ключевые слова: метан, эмиссия парниковых газов, Западная Сибирь.

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с тем, что метан сильно влияет на фотохимию атмосферы и является важным «парниковым» газом, динамика его концентрации в атмосфере учитывается в современных климатических моделях (см., например, [11] и ссылки там). Очевидно, что в такие модели обязательно должен входить в той или иной форме член, описывающий поверхностный источник метана.

Среди всех возможных источников метана главную роль играют болота [6]. Особый интерес в этом отношении представляют болотные экосистемы России (занимающие вместе с заболоченными мелкоотторфованными землями примерно 21,6% ее территории [1]). Однако невозможно провести измерения в каждой географической точке, поэтому особое значение приобретают вычислительные подходы, позволяющие экстраполировать величины потоков на неисследованные территории.

Математическое моделирование эмиссии CH<sub>4</sub> из почв развивалось, в основном, в традиционном ключе использования сосредоточенных или распределенных систем дифференциальных уравнений. Конкретно для Западной Сибири первый подход нашел отражение в [15], а второй – в [11]. Однако подобные модели содержат значительное число параметров, определить которые в региональном масштабе с достаточной степенью подробности пока не представляется возможным (хотя при описании отдельных хорошо изученных экосистем были получены обнадеживающие результаты). Задача данной работы состояла в обобщении результатов мониторинга региональной эмиссии метана с территории Западной Сибири в рамках иного подхода, называемого нами «стандартной моделью» (СМ). СМ представля-

ет собой совокупность периодов эмиссии метана (ПЭМ), электронной картографической основы и плотностей распределения вероятностей величин удельных потоков из типичных экосистем.

С появлением новых данных мониторинга СМ непрерывно совершенствуется, в связи с чем следует говорить об историческом ряде таких моделей. Для удобства было предложено обозначать СМ трехзначным кодом, в котором первый знак (*прописная буква латинского алфавита*) соответствует принятому в данной модели набору ПЭМ и *определяет тип модели*, второй (*строчная буква латинского алфавита*) – совокупности площадей различных типов болот и соотношению элементов микроландшафтов в них (*класс модели*), а третий (*цифра*) – системе типичных величин удельных потоков (*серия модели*).

В предлагаемой вниманию читателя работе мы описываем наиболее точную на сегодняшний день СМ Ab4. В ней средняя площадь пространственной единицы составляет около 1400 км<sup>2</sup>, количество типичных ландшафтов увеличено до восьми. Также вновь пересмотрены характерные потоки за счет добавления большого массива новых измерений.

### МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Региональный поток ( $F$ , ТгС-CH<sub>4</sub>/год) вычисляется по формуле

$$F = \beta \cdot \sum_{k=1}^l F_k; \quad F_k = \sum_{i=1}^n f_{ik} \cdot S_{ik} \cdot T_k; \quad f_{ik} = \sum_{j=1}^m (\varphi_{jk} \cdot \alpha_{ijk});$$

где  $\beta$  - коэффициент пересчета мг в Тг ( $\beta = 10^{-15}$ );  $F_k$  (мгС-CH<sub>4</sub>/год) поток метана из  $k$ -ой природной зоны ( $k = 1, 2, \dots, l$ ,  $l = 7$ :  $k = 1$  лесостепь,

$k = 2$  - подтайга,  $k = 3$  - южная тайга,  $k = 4$  - средняя тайга,  $k = 5$  - северная тайга,  $k = 6$  - лесотундра,  $k = 7$  - тундра);  $f_{ik}$  (мгС-СН<sub>4</sub> м<sup>-2</sup> час<sup>-1</sup>) удельный поток метана с болотных комплексов  $i$ -го типа в  $k$ -й природной зоне ( $i = 1, 2 \dots n$ ,  $n = 20$  в соответствии с типологией западно-сибирских болот Романовой, как она описана в [20]);  $S_{ik}$  (м<sup>2</sup>) - площадь болотных комплексов  $i$ -го типа в  $k$ -й природной зоне (для подсчета площадей использовали электронную карту болотных комплексов Западной Сибири [20]);  $T_k$  (час/год) период эмиссии метана в  $k$ -й природной зоне (тундра- 2472, лесотундра- 2880, северная тайга - 3312, средняя тайга - 3984, южная тайга - 4128, подтайга - 4632, лесостепь - 4824);  $\alpha_{ijk}$  - доля ландшафта  $j$ -го вида ( $j = 1, 2 \dots m$ ,  $m = 8$ :  $j = 1$  приозерные сплавины,  $j = 2$  мерзлые бугры,  $j = 3$  гряды,  $j = 4$  - олиготрофные мочажины,  $j = 5$  - мезотрофные болота,  $j = 6$  - эутрофные болота,  $j = 7$  - внутриболотные озера,  $j = 8$  - рьямы) на болотах  $i$ -го типа в  $k$ -й природной зоне (численные значения  $\alpha_{ijk}$  взяты из [20]);  $\varphi_{jk}$  - удельный поток метана из микроландшафта  $j$ -го вида в  $k$ -й природной зоне (величины  $\varphi_{jk}$  получаются статистическим моделированием в соответствии с эмпирическими распределениями вероятностей по методу обратного преобразования [13]).

Эмпирические распределения вероятностей удельных потоков метана ( $\varphi_{jk}$ ) для каждого типичного микроландшафта всех природных зон Западной Сибири строили на основании собственных экспериментальных данных и опубликованных измерений других исследовательских групп [14; 18; 19; 8].

Измерения удельных потоков СН<sub>4</sub> осуществляли камерно-статическим методом как описано ранее см. [4; 5]. Эти измерения проводили в летне-осенние периоды, начиная с 1995 г., на десятках исследовательских полигонов (время и место измерений могло варьировать от года к году) во всех природных зонах Западной Сибири за исключением тундры и степи. Для болотных ландшафтов тундры в модели принимаются характерные удельные потоки, измеренные в воркутинской тундре и опубликованные в [2], а наличием болот в степи пренебрегаем. Конкретные исследовательские полигоны описаны нами ранее в публикациях, посвященных непосредственно экспериментальным исследованиям в той или иной природной зоне Западной Сибири - см. [3-5, 7-9].

Анализ неопределенности регионального потока, обусловленной неопределенностью удельного потока с микроландшафта  $J$ -го вида в  $K$ -й природной зоне проводили следующим образом. Все  $\varphi_{jk}$  при  $J \neq j$ ,  $K \neq k$  фиксировали на уровне

медиан их распределений, а для  $\varphi_{jk}$  оставляли принятое в модели вероятностное распределение.

При заданных таким образом  $\varphi_{jk}$  получали распределение регионального потока. В качестве численной оценки его неопределенности принимали разность третьей и первой квартилей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Квартили всех эмпирических распределений вероятностей удельных потоков СН<sub>4</sub> приведены в таблице 1. В основном эти распределения представляют собой (похожие на лог-нормальное) распределения «с длинным хвостом». Такие распределения действительно типичны для эмиссии метана – обсуждение этого вопроса и дальнейшие ссылки см., например, в [4]. Реже встречаются более симметричные распределения, похожие на нормальное. Наконец, есть распределения с несколькими максимумами. Если это не артефакт математического метода построения эмпирического распределения плотности вероятности, то последние могут получаться из-за объединения нескольких реальных классов объектов в рамках одного типичного класса ландшафта по [20]. Так, например, принято выделять крупномочажинные и мелкомочажинные комплексы [12], в то время как в [20] приводятся данные лишь для распространенности олиготрофных мочажин вообще.

Статистическое моделирование на основе СМ Ab4 дало достаточно логичную картину географического расположения источников метана (рис. 1), связанных, в основном, с подтайгой и южной, а также (в несколько меньшей степени) со средней тайгой; севернее для образования метана не являются оптимальными температурные условия, а южнее – гидрологический режим. Получающееся в результате моделирования значение регионального потока СН<sub>4</sub> с территории Западной Сибири составляет  $5,1 \pm 2,4$  ТгС-СН<sub>4</sub>/год.

Может показаться, что СМ дает лишь современный географический «срез» эмиссии метана и, казалось бы, не позволяет составить прогноз эмиссии в условиях изменения климата. На самом деле это не принципиальное, а скорее, техническое ограничение, которое в настоящее время может быть снято. Действительно, существуют работы (например, [10, 16] и др.), посвященные как прогнозированию локальных экосистемных преобразований, так и моделированию смещения природных зон при возможном изменении климата. Таким образом, предсказание эмиссии СН<sub>4</sub> на основе СМ станет возможным при ее соединении с соответствующими биоклиматическими моделями.

Анализ чувствительности и неопределенности (табл. 2) показал, что по вкладу в неопределенность регионального потока типичные болотные ландшафты можно разделить на несколько групп. Нули в табл. 2 объясняются тем, что в данной зоне нет соответствующих ландшафтов (например, в тундре не может быть рямов и гряд). Но при этом следует различать две ситуации: действительное отсутствие данных ландшафтов в природе (как в только что приведенном примере) и недоработки электронной карты (в частности, очевидно, что переходные болота должны существовать и в средней, и в южной тайге). Наибольшие неопределенности имеют потоки из рямов и гряд средней и южной тайги, олиготрофных мочажин болот северной и средней тайги, эвтрофных болот южной тайги, подтайги и лесостепи, а также внутриболотных озер северной и южной тайги (порядка 10<sup>2</sup> ктС каждая).

Для использования СМ совместно с современными биоклиматическими моделями необходимо предусмотреть возможность описания сезонного хода эмиссии CH<sub>4</sub> (поскольку временной шаг в моделях часто принимается меньше года, например, 1 месяц). В связи с этим в Ab4 принята линейная зависимость эмиссии от температуры предыдущего месяца (если она положительна, в противном случае эмиссия принимается равной нулю). Принятая «зависимость с месячным за-

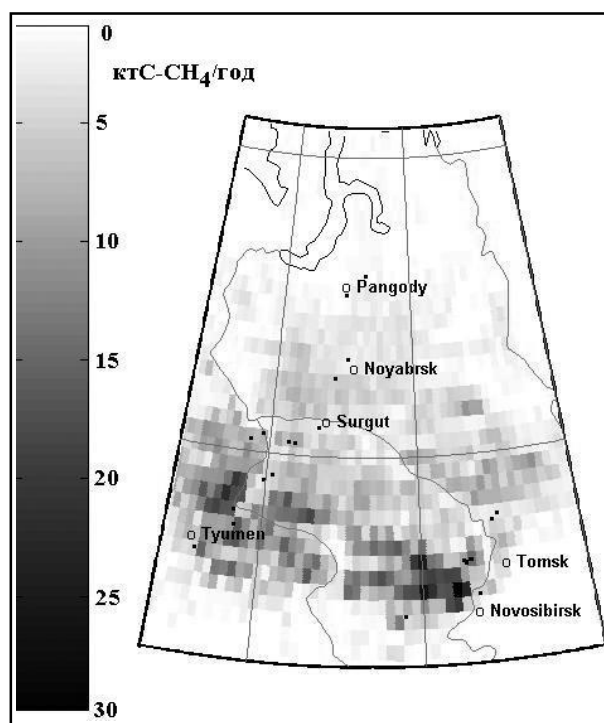


Рис. 1. Карта-схема годовой эмиссии метана, выдаваемая моделью Ab4. (Точками изображено местоположение основных исследовательских полигонов измерения эмиссии метана).

паздыванием» позволяет достаточно хорошо описать экспериментальные данные (рис. 2).

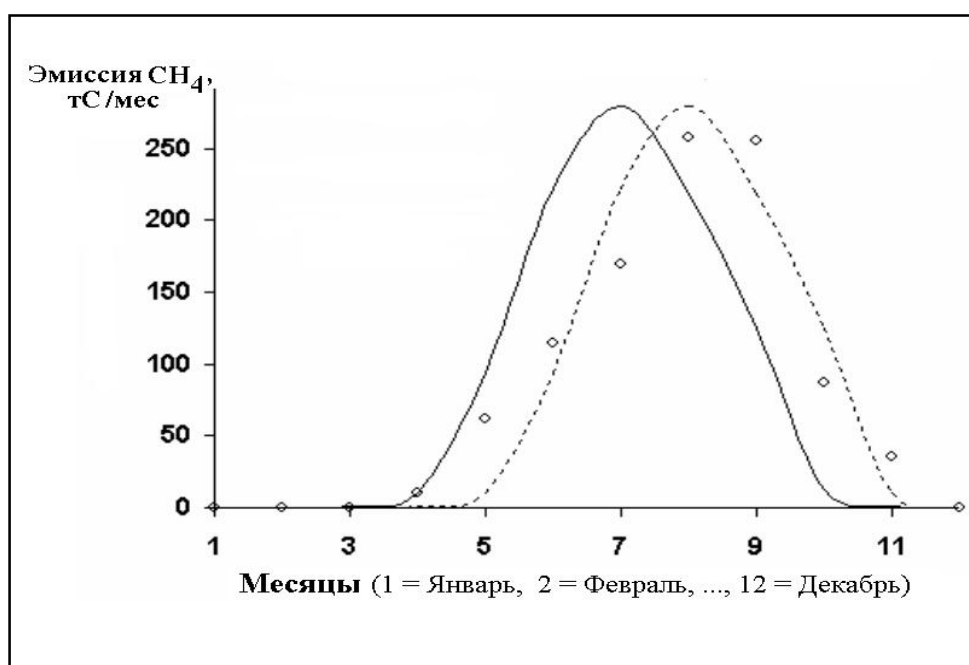


Рис. 2. Эмиссия метана в районе исследовательского полигона на Бакчарском болоте (из полуградусной ячейки с центром 59,75° с.ш., 82,25° в.д.). (Кружками изображены данные, пересчитанные из результатов измерений [17]; (непрерывной линией - расчет по модели, предполагающей зависимость средней эмиссии в текущем месяце от средней температуры воздуха текущего месяца; прерывистой линией - расчет по модели, предполагающей зависимость средней эмиссии в текущем месяце от средней температуры воздуха предыдущего месяца)

**Таблица 1.** Типичные величины потоков  $\text{CH}_4$  ( $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) в экосистемах Западной Сибири для летне-осеннего периода (в числителе – медиана, в знаменателе – 1-я и 3-я квартили).

Болотный ландшафт	Природная зона или подзона						
	Тундра	Лесотундра	Тайга			Подтайга	Лесостепь
			Северная	Средняя	Южная		
Мерзлые бугры	$\frac{-0.03}{-0.12, 0.01}$	$\frac{0.20}{0.03, 0.28}$	$\frac{0.00}{-0.05, 0.01}$	Мерзлые бугры в средней и южной тайге, а также подтайге и лесостепи отсутствуют			
Рямы	Рямы и гряды в тундре и лесотундре отсутствуют		$\frac{0.01}{-0.03, 0.44}$	$\frac{0.02}{-0.02, 0.27}$	$\frac{1.23}{0.27, 2.92}$	$\frac{0.26}{-0.11, 0.42}$	
Гряды			$\frac{0.45}{0.23, 0.65}$	$\frac{1.69}{0.94, 2.72}$			
Мочажины и гальи	олиготрофные	$\frac{1.12}{0.77, 1.37}$	$\frac{0.34}{0.12, 1.53}$	$\frac{0.80}{0.15, 1.90}$	$\frac{2.98}{1.80, 4.30}$	$\frac{2.68}{1.88, 3.46}$	
	мезотрофные	$\frac{1.28}{0.70, 2.52}$	$\frac{0.68}{0.13, 4.64}$	$\frac{0.91}{0.21, 2.10}$	$\frac{4.00}{2.48, 7.50}$	$\frac{8.53}{2.47, 16.3}$	
	эвтрофные			$\frac{1.97}{0.82, 2.47}$			
Приозерные сплавины	$\frac{4.81}{2.73, 7.07}$			$\frac{1.64}{0.55, 13.44}$			
Внутриболотные озера	$\frac{0.55}{0.26, 1.36}$		$\frac{1.40}{0.14, 2.74}$	$\frac{0.33}{0.10, 0.96}$	$\frac{5.30}{0.27, 23.66}$		

**Таблица 2.** Неопределенности потока  $\text{CH}_4$  ( $\text{кгС} \cdot \text{год}^{-1}$ ), вносимые в региональный поток типичными болотными экосистемами Западной Сибири.

Болотный ландшафт	Природная зона или подзона							
	Тундра	Лесотундра	Тайга			Подтайга	Лесостепь	
			Северная	Средняя	Южная			
Мерзлые бугры	4.73	3.04	3.80	0.02	0	0	0	
Рямы	0	0	16.71	357.61	326.47	50.52	0.1	
Гряды	0	0	10.51	244.87	144.74	4.99	0	
Мочажины и гальи	олиготрофные	2.00	5.67	174.37	128.95	78.87	2.96	0
	мезотрофные	0.01	0.48	20.64	0	0	0.16	0
	эвтрофные	94.96	7.06	2.62	6.06	117.77	306.49	124.8
Приозерные сплавины	0	0.05	35.76	68.70	18.06	0.87	0	
Внутриболотные озера	2.77	6.46	131.60	1.73	208.04	4.59	0	

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вомперский С.Э., Сири́н А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А.* Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. географ. 2005. № 5. С. 21-33.
2. *Глаголев М.В., Смагин А.В.* Приложения MATLAB для численных задач биологии, экологии и почвоведения. М.; 2005. 200 с..
3. *Глаголев М.В., Суворов Г.Г.* Эмиссия метана болотными почвами средней тайги Западной Сибири (на примере Ханты-Мансийского автономного округа) // Доклады по экологическому почвоведению (электронный журнал), Вып. 6, № 2. С. 90-162. URL: [http://jess.msu.ru/index.php?option=com\\_scibibliography&func=view&id=55&Itemid=121&catid=65](http://jess.msu.ru/index.php?option=com_scibibliography&func=view&id=55&Itemid=121&catid=65).
4. *Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сири́н А.А.* Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрохимия. 2008. № 5. С. 46-58.
5. *Глаголев М.В., Шнырев Н.А.* Летне-осенняя эмиссия  $\text{CH}_4$  естественными болотами Томской области и возможности ее пространственно-временной экстраполяции // Вестник МГУ, сер. Почвовед. 2008. № 2. С. 24-36.
6. *Заварзин Г.А.* Микробный цикл метана в холодных условиях // Природа. 1995. № 6. С. 3-14.
7. *Казанцев В.С., Глаголев М.В.* Эмиссия  $\text{CH}_4$  в подзоне северной тайги: «стандартная модель» Аа3 // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сб. науч. тр. кафедры ЮНЕСКО Югорского гос. ун. Вып. 1 Новосибирск. 2008. С. 200-207.
8. *Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г.* Углеродный

- обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука. 2008. 344 с.
9. Клепцова И.Е., Корнюшенко Е.Г., Глаголев М.В. Эмиссия CH<sub>4</sub> в подзоне лесотундры: «стандартная модель» Аа3 // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сб. науч. тр. каф. ЮНЕСКО Югорского гос. ун. Вып. 1. Новосибирск. 2008. С. 191-199.
  10. Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природной экосистем. М.: Наука. 2008. 427 с.
  11. Крупчатников В.Н., Крылова А.И. Моделирование эмиссии метана от природных избыточно увлажненных почв и гидрологии поверхности с учетом топографии // География и природные ресурсы. Спец. вып. 2004. С. 272-276.
  12. Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и Ко, 2001. 584 с.
  13. Харбук Дж., Бонэм-Картер Г. Моделирование на ЭВМ в геологии. М.: Мир. 1974.
  14. Слободкин А.И., Паников Н.С., Заварзин Г.А. Образование и потребление метана микроорганизмами в болотах тундры и средней тайги // Микробиология 1992. Т. 61, № 4. С. 683-691.
  15. Glagolev M.V. Modeling of Production, Oxidation and Transportation Processes of Methane // Global Environment Research Fund: Eco-Frontier Fellowship (EFF) in 1997. Tokyo: Environment Agency. Global Environment Department. Res. & Inform. Office, 1998. - P. 79-111.
  16. Golubyatnikov L.L. // Международная конф. «ENVIROMIS-2008»: Тез. докл. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2008. С. 90.
  17. Maksyutov S., Inoue G., Sorokin M. Methane fluxes from wetland in west Siberia during April-October 1998 // Proc. of the Seventh Symp. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. – Tsukuba: Isebu. 1999. P. 115-124.
  18. Naumov A.V. Emission of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> in connection with temperature conditions of peat bog soils in the northern taiga subzone // Proc. of the Intern. Field Symp. West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present 2001. P. 110-112.
  19. Naumov A.V., Huttunen J.T., Repo M.E. West Siberian peatlands: comparative study of greenhouse gas emission in middle taiga and forest tundraclimatic conditions // Proc. of the Second Intern. Field Symp. West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present Tomsk: Изд-во НТЛ, 2007. P. 132-135.
  20. Peregon A., Maksyutov S., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N. Map-based inventory of wetland biomass and net primary production in western Siberia // J. of Geophys. Res. 2008. V. 113. doi:10.1029/2007JG000441.

## «STANDARD MODEL» (AB4) OF CH<sub>4</sub> EMISSION FROM WEST SIBERIAN MIRES

© 2009 M.V. Glagolev<sup>1</sup>, A.F. Sabrekov<sup>2</sup>, Sh.Sh. Maksyutov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University, Moscow; e-mail: m\_glagolev@mail.ru,

<sup>2</sup> Center for Global Environmental Research; e-mail: misternickel@mail.ru

<sup>3</sup> National Institute for Environmental Studies, Japan, Ibaraki, Tsukuba, Onogawa;  
e-mail: shamil@nies.go.jp

«Standard model» presents summation of emission periods, cartographical foundation and density functions of probability distribution of methane flux's value from typical ecosystems. Regional CH<sub>4</sub> emission from West Siberian mires is estimated in 5,1±2,4 TgC-CH<sub>4</sub> per year on the basis of model Ab4.

Key words: *methan, emission of greenhouse gases, West Siberia.*