

ЭМИССИЯ МЕТАНА В ЛЕСОТУНДРЕ: К СОЗДАНИЮ «СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ» (АА2) ДЛЯ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

В работе описана концепция «стандартной модели» эмиссии метана из болотных ландшафтов Западной Сибири. Под «стандартной моделью» понимается совокупность распределений плотностей вероятностей удельных потоков метана (в типичных биогеоценозах конкретной природной зоны) вкуче с продолжительностью периода эмиссии метана и площадями различных типов болот в данной природной зоне. Приводятся экспериментальные данные по эмиссии метана в лесотундре, вошедшие в «стандартную модель» Аа1: медианы потоков из бугров, мочажин (олиготрофных необводненных и обводненных) и мезотрофных болот соответственно равны 0.14, 1.12, 11.86 и 1.28 мгС·м⁻²·ч⁻¹. Вышеперечисленные значения считаются относящимися не ко всему году, а лишь к «периоду эмиссии метана», продолжительность которого принимается равной 120 суток.

Ключевые слова: эмиссия метана, Западная Сибирь, лесотундра, плоско-бугристые болота.

Введение

Метан сильно влияет на фотохимию атмосферы и является важным «парниковым» газом в климатической системе – по величине прямого потенциала глобального потепления он в 39 раз (для периода 20 лет) превышает СО₂ [1]. В связи с этим динамика концентрации метана в атмосфере учитывается в современных климатических моделях ([2], ссылки в [2]). Очевидно, что в таких моделях уравнение атмосферного переноса метана обязательно содержит в той или иной форме член, описывающий поверхностный источник метана.

Среди всех возможных источников метана главную роль играют болота [3]. Поток СН₄ из всех болот мира составляет, по данным разных авторов, от 92 до 110 Тг/год. Около 60 % глобальной эмиссии из болот обусловлено торфяными массивами, находящимися в полосе от 50 до 70° с. ш. Вклад болот бывшего СССР составляет 11 Тг/год (т. е. 19–21 % от всего потока СН₄ с территории страны). При этом на долю Западно-Сибирских болот приходится почти 1/3 потока всех болот страны ([4], ссылки в [4]).

Общей целью наших работ [5–7], проводимых в течение последних лет, является надежная идентификация интенсивности эмиссии СН₄ из болот Западной Сибири. Конкретной целью данного исследования является оценка мощности природных источников метана в лесотундровой зоне.

Концепция, терминология и история «стандартной модели»

Существует два взаимодополняющих подхода в определении мощности природных избыточно увлажненных почв как источников метана. Первый основан на длительном мониторинге потоков метана сетью полевых станций, которые покрывают основные виды избыточно увлажненных почв и основные типы растительности. Это позволяет вычислить характерные годовые эмиссии, а затем экстраполировать эти значения на площади, соответствующие каждому виду

избыточно увлажненных почв. Для того чтобы уточнить оценки эмиссии метана от природных переувлажненных почв и предсказать их отклик на наблюдаемые изменения климата, в настоящее время разработано несколько математических моделей [2], достаточно полный список которых приведен в [8].

Во втором подходе с помощью метода обратного моделирования из данных наблюдений о концентрации атмосферного метана выводится информация о вариациях потоков по пространству и времени [2].

Однако этот метод приводит к необходимости решать задачу, некорректную в математическом смысле. Как известно, решить некорректную задачу если и возможно, то лишь при использовании некоторой априорной информации о решении. Такой априорной информацией может быть:

– грубая оценка распределения эмиссий по пространству и времени, если решение ищется методом пробной функции [9];

– качественное соотношение между эмиссиями в различных точках пространства и времени (например, утверждения типа «летом эмиссия больше, чем осенью» и т. п.), если решение ищется на компактном множестве (напр.: [10]).

Следовательно, указанная приближенная оценка распределения эмиссий может оказаться полезной при любом подходе. Мы предлагаем такую оценку (полученную на основании данных мониторинга для типичных экосистем всех природных зон Западной Сибири) и называем ее «стандартной моделью» эмиссии. «Стандартная модель» включает в себя три основных элемента (для каждой природной зоны):

1) набор распределения плотностей вероятностей удельных потоков метана в типичных биогеоценозах зоны (или хотя бы такие характеристики распределений, как квартили);

2) продолжительность периода эмиссии метана (ППЭМ);

3) площади разных типов болот и соотношения микроландшафтов в них.

Для удобства было предложено обозначать «стандартные модели» эмиссии трехзначным кодом, в котором первый знак (прописная буква латинского алфавита) соответствует принятому в данной модели набору ППЭМ, второй (строчная буква латинского алфавита) – совокупности площадей различных типов болот и соотношению элементов микроландшафтов в них, а третий (цифра) – системе типичных величин удельных потоков.

Самый первый вариант такой «стандартной модели» (для которого, правда, еще не использовалось данное понятие) был представлен в [6, 7]. Однако оценка потока, даваемая этой моделью, была статистически ненадежной (иными словами, имела весьма широкий доверительный интервал). Получение нами в 2007 г. обширного экспериментального материала по удельным потокам почти во всех природных зонах Западной Сибири и анализ литературы позволили перейти к новой модели «Aa1», дающей оценку регионального потока 3.7 ± 1.7 МгС/год [11]. В модели «Aa1» наименьшими пространственными единицами были болотные округа, которые выделя-

лись в соответствии с [12] (таким образом, средняя площадь пространственной единицы составляла порядка 100 000 км²). В настоящее время совместно с коллегами из ИПА СО РАН (г. Новосибирск) и Национального института изучения окружающей среды (г. Цукуба, Япония) проводится работа над перспективной стандартной моделью «Ab2». В ней средняя площадь пространственной единицы составляет около 1400 км².

К сожалению, до сих пор не была подробно описана исходная экспериментальная информация, лежащая в основе «стандартной модели» (за одним лишь небольшим исключением – в [13] даны исходные экспериментальные данные и описана процедура их обработки, но только для подзоны средней тайги). В предлагаемой вниманию читателя работе мы приводим исходную экспериментальную информацию, входящую в «лесотундровую» часть стандартной модели и описывающую эмиссию из бугров и мочажин плоско-бугристых болот.

Методы исследований

Поток метана определялся методом статических камер, как было описано ранее [5, 13]. Дополнительно к измерениям потока метана при помощи электронных

Таблица 1

Эмиссия CH₄ из различных болот лесотундры

Точка	Координаты		Дата	Эмиссия CH ₄ (мгС·м ⁻² ·ч ⁻¹)	
	широта	долгота		среднее	погрешность
Мезотрофные болота					
T.Ur.Fen.2	66.52672	76.51068	12.08.2008	3.97	0.33
T.Ur.Fen.2	66.52672	76.51068	12.08.2008	3.79	0.32
T.Ur.Fen.Ern.2	66.52672	76.51068	12.08.2008	1.28	0.19
T.Ur.Fen.Ern.2	66.52672	76.51068	12.08.2008	1.27	0.11
T.Ur.Fen.3	66.52195	76.50955	12.08.2008	0.52	0.04
T.Ur.Fen.3	66.52195	76.50955	12.08.2008	2.25	0.19
T.Ur.Fen.3	66.52195	76.50955	12.08.2008	2.78	0.23
T.Ur.Fen.3	66.52195	76.50955	12.08.2008	2.43	0.20
T.Ur.Fen.4	66.52634	76.49433	12.08.2008	0.08	0.08
T.Ur.Fen.4	66.52634	76.49433	12.08.2008	1.22	0.10
T.Ur.Fen.4	66.52634	76.49433	12.08.2008	0.76	0.06
T.Ur.Fen.4	66.52634	76.49433	12.08.2008	0.08	0.02
Олиготрофные хасыреи					
T.Pa.Has.1	65.76348	74.52905	05.09.2007	0.99	0.18
T.Pa.Has.1	65.76348	74.52905	05.09.2007	0.29	0.15
T.Pa.Has.2	65.76348	74.52917	05.09.2007	0.93	0.10
T.Pa.Has.2	65.76348	74.52917	05.09.2007	0.79	0.13
Ручьи и озерки					
T.Ur.Fen.Riv.2	66.52672	76.51068	12.08.2008	1.16	0.12
T.Ur.Fen.Riv.2	66.52672	76.51068	12.08.2008	0.77	0.12
T.Ur.Ls.5	66.53030	76.50902	12.08.2008	9.65	2.86
T.Ur.Ls.5	66.53030	76.50902	12.08.2008	1.96	0.74

Таблица 2

Эмиссия CH_4 из плоскобугристых болот лесотундры

Точка	Координаты		Дата	Эмиссия CH_4 ($mgC \cdot m^{-2} \cdot ч^{-1}$)	
	широта	долгота		среднее	погрешность
Бугры					
T.Pa.Pal.1	65.87067	74.96588	04.09.2007	-0.11	0.06
T.Pa.Pal.1	65.87067	74.96588	04.09.2007	-0.06	0.05
T.Pa.Pal.2	65.87248	74.96157	04.09.2007	-0.12	0.05
T.Pa.Pal.2	65.87248	74.96157	04.09.2007	0.11	0.04
T.Pa.Pal.3	65.87257	74.96220	04.09.2007	0.18	0.14
T.Pa.Pal.3	65.87257	74.96220	04.09.2007	-0.07	0.09
T.Pa.Pal.4	65.75835	74.49634	05.09.2007	0.09	0.05
T.Pa.Pal.4	65.75835	74.49634	05.09.2007	-0.03	0.04
T.Ur.FP.Pal.1	66.53092	76.51202	11.08.2008	0.04	0.01
T.Ur.FP.Pal.1	66.53092	76.51202	11.08.2008	0.01	0.01
T.Ur.FP.Pal.1	66.53092	76.51202	11.08.2008	0.03	0.01
T.Vo.Pal	67	63.5	23.09.2003	0.28	0.17
T.Pa.Pal*)	65.9	75	07.08.2005	0.25	0.17
Олиготрофные необводненные мочажины					
T.Pa.Hol.2	65.87248	74.96157	04.09.2007	0.21	0.11
T.Pa.Hol.2	65.87248	74.96157	04.09.2007	0.46	0.07
T.Pa.Hol.3	65.87257	74.96220	04.09.2007	0.42	0.19
T.Pa.Hol.3	65.87257	74.96220	04.09.2007	0.36	0.21
T.Pa.Hol.4	65.75835	74.49634	05.09.2007	0.73	0.25
T.Pa.Hol.4	65.75835	74.49634	05.09.2007	1.29	0.28
T.Pa.Hol.4	65.75835	74.49634	05.09.2007	1.14	0.04
T.Pa.Hol.4	65.75835	74.49634	05.09.2007	0.73	0.07
T.Ur.FP.H.1	66.53072	76.51145	11.08.2008	0.91	0.08
T.Ur.FP.H.1	66.53072	76.51145	11.08.2008	0.99	0.08
T.Ur.FP.H.1	66.53072	76.51145	11.08.2008	0.59	0.05
T.Ur.FP.H.1	66.53072	76.51145	11.08.2008	0.97	0.08
T.Vo.Hol	67	63.5	23.09.2003	33.1	12.10
T.Pa.Hol*)	65.9	75	07.08.2005	0.25	0.17
Обводненные мочажины					
T.Ur.FP.M.1	66.53072	76.51145	11.08.2008	7.22	0.60
T.Ur.FP.M.1	66.53072	76.51145	11.08.2008	7.16	0.60
T.Ur.FP.M.1	66.53072	76.51145	11.08.2008	11.85	1.58
T.Ur.FP.M.1	66.53072	76.51145	11.08.2008	11.86	1.35
T.Ur.FP.M.6	66.53283	76.51398	13.08.2008	25.14	2.10
T.Ur.FP.M.6	66.53283	76.51398	13.08.2008	34.97	34.97

Примечание: *)Усредненные данные, опубликованные в [15]. Название точки дано нами.

датчиков iButton DS 1921–1923 (DALLAS Semiconductor, США) определялась температура почвы (на глубинах 0, 5, 15, 45 см) и температура воздуха, значения pH и электропроводности болотных вод (pH-метром-кондуктометром Combo “Hanna” HI-98130). Кроме того, измерялся уровень стояния болотных вод.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений эмиссии метана приведены в табл. 1 и 2. К сожалению, количество известных нам экспериментальных данных по эмиссии метана в лесотундре Западной Сибири не очень велико, в связи с чем в «стандартной модели» задействована информация и из соседних областей. Так, точки T.Vo.Pal и

T.Vo.Hol относятся к области Полярного Урала, но фактически очень близки к границе Западной Сибири.

К еще большему сожалению, даже существующие измерения часто публикуются не в виде первичных данных, а уже в виде некоторых средних величин, в лучшем случае снабженных какой-либо характеристикой погрешности. Например, как видно из табл. 1, для точки T.Pa.Pal опубликовано лишь среднее значение (однако оно получено по 22 индивидуальным измерениям [14]!). Это приводит к значительным трудностям при объединении разнородных данных различных авторов (частично данный вопрос уже обсуждался в [13]).

Как же осуществить такое объединение, например, для всех величин эмиссии, измеренных на буграх («palsa») плоскобугристых болот (табл. 1)?

Если авторы (для своего обобщенного значения потока) приводят достаточно полные статистические характеристики, то методом статистического моделирования можно построить некоторый набор значений (называемый нами «псевдоизмерения»), который был бы в статистическом смысле эквивалентен полному набору исходных измерений авторов. Например, по опубликованному в [14] значению эмиссии ($0.25 \pm 0.17 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) можно при помощи датчика нормально распределенных случайных чисел сгенерировать последовательность из 22 псевдоизмерений (см. табл. 3), среднее арифметическое и стандартное отклонение для которой будут близки именно к 0.25 и $0.17 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ соответственно.

Сделаем сразу существенное замечание: авторы [15] не указывают явно, что их исходные значения были распределены по Гауссову закону. Но именно этот закон полностью характеризуется средним арифметическим и стандартным отклонением. Следовательно, тип распределения неявно подразумевается тем, что для краткого представления результатов авторы используют именно эти статистические характеристики.

Однако, конечно, полной гарантии нет, поэтому в «стандартной модели» следует четко различать заложенные в нее два типа информации: реальные экспериментальные данные (табл. 1, 2) и «псевдоизмерения», полученные статистическим моделированием, как, например, в табл. 3.

Объединение всей доступной нам информации по эмиссии метана из **плоско-бугристых болот лесотундры**, т. е. объединение данных (табл. 1–3) дает

Таблица 3

«Псевдоизмерения» эмиссии CH_4 ($\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) из плоско-бугристых болот в лесотундре, используемые в «стандартной модели»

Бугры ("palsa") на плоскобугристых болотах							
-0.16243	0.05798	0.220224	0.291671	0.350461	0.377034	0.495147	0.04927
-0.05478	0.074839	0.238754	0.298888	0.362344	0.385263	0.518877	
0.021533	0.097033	0.24624	0.346471	0.366748	0.476259	0.571562	
Мочажины на плоскобугристых болотах							
0.552557	1.023862	1.239404	1.331095	1.407108	1.593767	1.801509	0.917097
0.69667	1.092003	1.264785	1.336083	1.410055	1.598783	1.802276	1.221577
0.779669	1.199565	1.307186	1.357655	1.42444	1.747961	2.236394	

распределения потоков, имеющие следующие статистические показатели (размерности всех величин - $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$):

1) БУГРЫ: медиана =0.14; 1-я квартиль=0.02; 3-я квартиль=0.35;

2) ОЛИГОТРОФНЫЕ НЕОБВОДНЕННЫЕ МОЧАЖИНЫ: 1.12; 0.77; 1.37;

3) ОБВОДНЕННЫЕ МОЧАЖИНЫ: 11.86; 8.38; 21.82;

4) МЕЗОТРОФНЫЕ БОЛОТА: 1.28; 0.70; 2.52.

Эти распределения используются нами в «стандартной модели» Аа2 эмиссии метана на территории Западной Сибири для характеристики потока вообще из всех болот лесотундры (следуя [15], мы принимаем полное отсутствие в лесотундре таких экосистем, как «гряды и рямы»). Все перечисленные значения считаются относящимися не ко всему году, а лишь к «периоду эмиссии метана», продолжительность которого принимается равной 120 сут.

Максимальное изменение по сравнению со «стандартной моделью» Аа1 при добавлении новых данных (2008 г.) продемонстрировала медиана для бугров (уменьшилась на 36 %). Для получения более устойчивых статистических характеристик необходимо получение большего объема измерений.

Благодарности

Мы приносим благодарность всем участникам экспедиций 2007 и 2008 гг. под руководством одного из авторов (и особенно мы благодарны учебному мастеру факультета почвоведения МГУ Н. А. Шныреву). Также считаем своим долгом поблагодарить д.б.н. Д. Г. Замолодчикова и д.б.н. Д. В. Карелина, предоставивших возможность участия в организованной ими «воркутинской» экспедиции 2003 г. Особую благодарность хотелось бы выразить к.ф.-м.н. Ш. Ш. Максютову, оказавшему неоценимую помощь в организации экспедиций 2007 и 2008 гг.

Список литературы

1. Кароль И. Л. // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 5–12.
2. Крупчатников В. Н., Крылова А. И. // География и природные ресурсы. Спец. вып. «Труды международной конференции по измерениям. моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2004». 2004. С. 272–276.
3. Заварзин Г. А. // Природа. 1995. № 6. С. 3–14.

4. Глаголев М. В., Клепцова И. Е. // Мат-лы Рос. конф. «Седьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу». Томск, 2007. С. 308–311.
5. Глаголев М. В., Смагин А. В. // Доклады по экологическому почвоведению. 2006. № 3. Вып. 3. С. 75–114.
6. Глаголев М. В. // Болота и биосфера: Сб. мат-лов 6-й научной школы (10–14 сентября 2007 г.). Томск, 2007. С. 33–41.
7. Шнырев Н. А., Глаголев М. В. // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: Прошлое и настоящее: Мат-лы II Междунар. полевого симпозиума (Ханты-Мансийск. 24 августа – 2 сентября 2007 г.). Томск, 2007. С. 144–146.
8. Smagin A. V., Glagolev M. V. // Мат-лы междунар. полевого симпозиума «Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее» (Ноябрьск. 18–22 августа 2001 г.). Новосибирск, 2001. С. 127–130.
9. Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клер Ч. мл. Некорректные обратные задачи теплопроводности. М., 1989. 312 с.
10. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Численные методы решения некорректных задач. М., 1990.
11. Глаголев М. В. // Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: «ENVIROMIS-2008» (Томск. 28 июня – 5 июля 2008 г.): Тез. докл. Томск, 2008. С. 74.
12. Лисс О. Л., Абрамова Л. И., Аветов Н. А., Березина Н. А., Инишева Л. И. и др. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула, 2001. 584 с.
13. Глаголев М. В., Суворов Г. Г. // Доклады по экологическому почвоведению. 2007. Вып. 6. № 2. С. 90–162.
14. Naumov A. V., Huttunen J. T., Repo M. E., Chichulin A. V., Peregon A. M. et al // Proc. of the 2nd Int. Field Symposium “West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present” (Khanty-Mansiysk. August 24 – September 2. 2007). Tomsk, 2007. P. 132–135.
15. Peregon A., Maksyutov S., Kosykh N. et al // Phytos (Austria) Spec. issue: «APGC 2004». 2005. V. 45. F. 4.

Глаголев М. В., младший научный сотрудник.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

Ленинские горы, Москва, Россия, 119899.

E-mail: m_glagolev@mail.ru

Клепцова И. Е., студент.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

Ленинские горы, Москва, Россия, 119899.

E-mail: kleptsova@gmail.com

Материал поступил в редакцию 10.09.2008

M. V. Glagolev, I. E. Kleptsova

METHANE EMISSION IN THE FOREST-TUNDRA: TOWARDS THE «STANDARD MODEL» (AA2) FOR WESTERN SIBERIA

The paper describes a conception of «standard model» for methane emission from the mires of Western Siberia. The «standard model» is a complex of (i) methane flux probability densities distributions for typical ecosystems of all natural zones, (ii) period of CH₄ emission for all zones, and (iii) fraction of wetland area for all zones. We present experimental data (methane fluxes in forest-tundra) which are the components of «standard model» Aa1. The medians of methane fluxes from pale, oligotrophic hollows, peat mats and poor fens are 0.14, 1.12, 11.86 and 1.28 mgC·m⁻²·h⁻¹ accordingly. All abovementioned values relate only to «period of methane emission» which is 120 days in forest tundra.

Key words: *methane emission, Western Siberia, forest-tundra, pale mires.*

Glagolev M. V.

Lomonosov Moscow State University.

Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119899.

E-mail: m_glagolev@mail.ru

Kleptsova I. E.

Lomonosov Moscow State University.

Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119899.

E-mail: kleptsova@gmail.com