

«СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ» Вc8 ЭМИССИИ CH₄ ИЗ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**Глаголев М.В.^{1,2,3}, Сабреков А.Ф.¹, Клепцова И.Е.², Максюттов Ш.Ш.⁴**¹ *Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова*² *Югорский Государственный Университет, г. Ханты-Мансийск*³ *Институт экологического почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва*³ *Национальный институт изучения окружающей среды, г. Цукуба (Япония)*

m_glagolev@mail.ru

«Стандартная модель» представляет собой совокупность периодов эмиссии, картографической основы и плотностей распределения вероятностей величин потоков из типичных экосистем. На основе модели Вc8 региональная эмиссия CH₄ из болот Западной Сибири оценивается величиной 2.9 T₂C-CH₄/год.

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

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, [Крупчатников, Крылова, 2004] 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 [Заварзин, 1995]. Особый интерес в этом отношении представляют болотные экосистемы России (занимающие вместе с заболоченными мелкоотторфованными землями примерно 21.6% ее территории [Вомперский с соавт., 2005]). Однако невозможно провести измерения в каждой географической точке, поэтому особое значение приобретают вычислительные подходы, позволяющие экстраполировать величины потоков на неисследованные территории.

Математическое моделирование эмиссии CH₄ из почв развивалось, в основном, в традиционном ключе использования сосредоточенных или распределенных систем дифференциальных уравнений. Конкретно для Западной Сибири первый подход нашел отражение в [Glagolev, 1998], а второй – в [Крупчатников, Крылова, 2004]. 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 представляет собой совокупность периодов эмиссии метана (ПЭМ), электронной картографической основы и плотностей распределения вероятностей величин удельных потоков из типичных экосистем.

СМ непрерывно совершенствуется с появлением новых данных мониторинга, 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**).

Самый первый вариант «стандартной модели» (для которого, правда, еще не использовалось данное понятие) был представлен в [Глаголев, 2007]. Однако оценка регионального потока, даваемая этой моделью, была весьма ненадежной поскольку, во-первых, еще не существовало достаточного количества экспериментальных данных по удельным потокам метана в типичных болотных ландшафтах (в связи с чем часто приходилось принимать слабо обоснованные гипотезы о равенстве удельных потоков CH₄ в нескольких ландшафтах) и, во-вторых, использовались крайне приближенные представления о площадях распространения этих ландшафтов на территории Западной Сибири. Получение нами в 2007 г. весьма обширного экспериментального материала по удельным потокам почти во всех природных зонах Западной Сибири и пристальный анализ литературы позволили перейти к

новой модели «Аа1» (которая и должна считаться первой в ряду «стандартных»), дающей оценку регионального потока 3.7 ± 1.7 МтС/год [Glagolev, 2008]. В модели «Аа1» наименьшими пространственными единицами были болотные округа, которые выделялись в соответствии с [Лисс с соавт., 2001] (таким образом, средняя площадь пространственной единицы составляла порядка 100 000 км²). Распределение 6 видов характерных ландшафтов («мерзлые бугры», «гряды и рямы», «внутриболотные озера», «олиготрофные мочажины», «мезотрофные топи» и «эвтрофные болота») по типам болот для различных природных зон в этих моделях было взято из [Peregon et al., 2005]. К сожалению, первые СМ не были подробно описаны; разве что в [Глаголев, Суворов, 2007] даны исходные экспериментальные данные (но только для подзоны средней тайги) и представлена процедура их обработки в моделях серии «1». Достаточно подробно была описана лишь модель Аа3 в серии публикаций [Глаголев, 2008; Казанцев, Глаголев, 2008; Клепцова, 2008].

В предлагаемой вниманию читателя работе мы описываем наиболее точную на сегодняшний день СМ Вс8. В ней средняя площадь пространственной единицы составляет около 1400 км², количество типичных ландшафтов увеличено до восьми. Также вновь пересмотрены характерные потоки за счет добавления большого массива новых измерений.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Региональный поток (F , ТгС-СН₄/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 β – коэффициент для пересчета ($\beta = 10^{-15}$ Тг/ мг);

F_k (мгС-СН₄/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-СН₄ м⁻² час⁻¹) – удельный поток метана с болотных комплексов i -го типа в k -ой природной зоне ($i = 1, 2, \dots, n, n = 20$ в соответствии с типологией западно-сибирских болот Романовой, как она описана в [Peregon et al., 2005, 2008; Глаголев, 2008]);

S_{ik} (м²) – площадь болотных комплексов i -го типа в k -ой природной зоне (для подсчета площадей использовали электронную карту болотных комплексов Западной Сибири [Peregon et al., 2008; 2009]);

T_k (час/год) – период эмиссии метана в k -ой природной зоне (тундра – 2472, лесотундра – 2880, северная тайга – 3312, средняя тайга – 3984, южная тайга – 4128, подтайга – 4632, лесостепь – 4824; обоснование такого выбора приведено, например, в [Глаголев, 2008]);

α_{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 топи, $j = 6$ – эвтрофные болота, $j = 7$ – внутриболотные озера, $j = 8$ – рямы) на болотах i -го типа в k -ой природной зоне (численные значения α_{ijk} взяты из [Peregon et al., 2005; 2008; 2009]);

φ_{jk} – удельный поток метана из микроландшафта j -го вида в k -ой природной зоне (величины φ_{jk} получают статистическим моделированием в соответствии с эмпирическими распределениями вероятностей по методу обратного преобразования [Харбух, Бонэм-Картер, 1974, с. 58]).

Эмпирические распределения вероятностей удельных потоков метана (φ_{jk}) для каждого типичного микроландшафта всех природных зон Западной Сибири на основании собственных экспериментальных данных и опубликованных измерений других исследовательских групп [Слободкин с соавт., 1992; Naumov, 2001; Naumov et al., 2007; Карелин, Замолотчиков, 2008] строили методом «гистограмм с интервалами равной вероятности» [Костылев с соавт., 1991, с. 79] (конкретный алгоритм построения плотности вероятности эмпирического распределения брали из [Глаголев, Сабреков, 2008, с. 62-66], а оценку ее погрешностей – из [Косарев, с. 31]¹).

Измерения удельных потоков СН₄ осуществляли камерно-статическим методом как описано ранее – см. [Глаголев, Шнырев, 2008; Глаголев с соавт., 2008]. В основном, СМ Вс8 основана на измерениях, проведенных в летне-осенние периоды 2007-2010 гг. на десятках исследовательских полигонов (время и место измерений могло варьировать от года к году) во всех природных зонах Западной Сибири за исключением степи. Конкретные исследовательские полигоны описаны нами ранее в публикациях,

¹ В [Глаголев, Сабреков, 2008, с. 66] при вычислении оценки погрешности эмпирической плотности вероятности обсуждаются формулы из [Косарев, с. 31] и при этом они критикуются. Это, конечно, досадная описка – формулы в [Косарев, с. 31] вполне пригодны для грубой оценки погрешности.

посвященных непосредственно экспериментальным исследованиям в той или иной природной зоне Западной Сибири – см. [Глаголев, Суворов, 2007; Глаголев, Шнырев, 2008; Глаголев с соавт., 2008; Казанцев, Глаголев, 2008; Клепцова с соавт., 2008].

Таблица 1. Геоботаническое описание исследовательских полигонов в лесостепи.

Виды растений	Исследовательские полигоны						
	Ku	Ni.Eut.3	T.Ska.So	T.Tih.Fen	T.Tih.Phr	T.Cab.Phr	T.Tih.Typh
<i>Betula pubescens</i> Ehrh.	50	15	25				
<i>Calamagrostis</i> sp.					2		5
<i>Carex cespitosa</i> L.		3		20	+	1	
<i>Carex omskiana</i> L.			2				
<i>Carex riparia</i> Curt.			5	20		2	
<i>Chamaedaphne calyculata</i> (L.) Moench	15						
<i>Cicuta virosa</i> L.							+
<i>Equisetum fluviatile</i> L.			2				
<i>Eriophorum vaginatum</i> L.	+	2					
<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.		+		5			
<i>Ledum palustre</i> L.	40						
<i>Lemna minor</i> L.							3
<i>Lysimachia vulgaris</i> L.							1
<i>Oxycoccus palustris</i> Pers.	5						
<i>Phragmites australis</i> (Cav) Trin. ex Steud					15	15	3
<i>Pinus sylvestris</i> L.	50						
<i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt.	15						
<i>Polytrichum strictum</i> Brid.	10						
<i>Rubus chamaemorus</i> L.	+						
<i>Rumex aquaticus</i> L.							+
<i>Salix cinerea</i> L.			15	2			
<i>Sphagnum angustifolium</i> (Russ. ex Russ.) C.Jens.	5						
<i>Typha latifolia</i> L.							10
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	15	15					

В данной работе в качестве подробного примера будут приведены результаты измерений на эвтрофных болотах лесостепи. Для заболоченных ландшафтов западно-сибирской лесостепи характерны мелкозалежные (мощность торфа не более 1.5 м) эвтрофные болота, которые местами играют здесь ландшафтообразующую роль. Растительный покров таких болот мозаичен: основу его составляют тростниковые займища, в которых абсолютным доминантом выступает тростник *Phragmites australis* (например, исследовательские полигоны T.Cab.Phr.1.1 и T.Cab.Phr.1), заросли которого достигают 2 м высоты при проективном покрытии 80% и более. Растительность более обводненных участков низинных болот складывается из сообществ рогоза *Typha latifolia*, *T. angustifolia* с вкраплением тростника. Большую часть вегетационного периода такие болота залиты водой, что дает возможность селиться здесь таким гидрофитам как *Lemna minor* и *Utricularia vulgaris*. Кроме того, встречаются небольшие участки открытой воды и озерки, на которые тростниковые и рогозовые болота надвигаются сплавиной. Для исследовательских полигонов на эвтрофных болотах лесостепи детальное геоботаническое описание дано в табл.1, а гидротермические условия непосредственно в моменты измерений – в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Примеры эмпирических плотностей распределения вероятностей удельных потоков метана даны на рис.1. Прежде всего, подробнее рассмотрим самое простое распределение – рис.1а. Это вероятностное распределение значений потоков, приведенных в предпоследнем столбце табл.2. Как видим, данное распределение похоже на логнормальное (имеет «длинный хвост»), т.е. хотя наиболее вероятное значение не очень велико (пик распределения находится около значения $0.25 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$), тем не менее изредка встречаются весьма большие значения, превышающие указанное наиболее вероятное как минимум на порядок. В результате, «среднее» (характерное) значение потока из эвтрофных болот лесостепи (в качестве такового можно использовать медиану распределения) оказывается существенно больше, чем наиболее вероятное значение. Из табл. 3, в которой приведены квартили распределений для всех болотных микроландшафтов всех исследованных природных зон Западной Сибири, видно, что характерное значение удельного потока метана из эвтрофных болот лесостепи Западной Сибири составляет $3.04 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Рассмотренная особенность вероятностного распределения приводит к существенной проблеме при экстраполяции результатов отдельных измерений на обширные территории. Действительно, при небольшом числе измерений наиболее вероятным будет

получение значений около $0.25 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Однако если принять, что все эвтрофное болото выделяет метан приблизительно с такой интенсивностью, мы сильно занижим общую эмиссию. Если бы мы смогли измерить эмиссию в каждой точке болота, то изредка обнаруживали бы удельные потоки порядка $10 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$! И именно они, а не часто встречающиеся потоки $\sim 0.1 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, определяют общую эмиссию.

К сожалению, «логнормальность» не является какой-то уникальной чертой лишь для удельных потоков эвтрофных болот. Надо сказать, что довольно часто распределения для удельных потоков CH_4 в иных микроландшафтах и/или других природных зонах имеют такой же вид, как на рис. 1а. Известно, что распределения, похожие на логнормальные, действительно типичны для эмиссии метана – обсуждение этого вопроса и дальнейшие ссылки см., например, в [Глаголев с соавт., 2008].

Кроме «логнормальных» встречаются распределения с несколькими максимумами (рис. 1б, 1в). Эти распределения могут быть как артефактом математического метода построения эмпирического распределения плотности вероятности (этот случай мы рассмотрим позднее), так и отражать реальную природную картину. В последнем случае они могут получаться из-за объединения нескольких реальных классов объектов в рамках одного типичного класса ландшафта по Peregon et al. [2008]. Так, например, принято выделять, как минимум, два типа грядово-мочажинных комплексов: крупномочажинные (с небольшими грядами) и мелкомочажинные (напротив – с крупными грядами) [Лисс с соавт., 2001], в то время как в [Peregon et al., 2007] приводятся данные лишь для распространенности олиготрофных мочажин и гряд вообще. Таким образом, данные по удельным потокам, на самом деле полученные при исследовании как крупных, так и небольших гряд (соответственно – на мелкомочажинных и крупномочажинных комплексах), в СМ мы вынуждены объединить в один массив. Можно предположить, что левый пик на Рис. 1б соответствует крупным грядам мелкомочажинного комплекса (в них вода стоит ниже, чем в небольших грядах крупномочажинного комплекса, и потому удельный поток CH_4 в среднем меньше). Правый же пик соответствует, вероятно, грядам крупномочажинного комплекса.

Аналогичный (рисунку 1б) вид имеют и распределения плотности вероятности удельного потока из внутриболотных озер. Объяснение может быть также аналогичным: в [Naumov et al., 2007] было показано, что удельный поток CH_4 из мелких внутриболотных озер в несколько раз выше, чем из крупных. Однако в [Peregon et al., 2007] приводятся данные лишь для распространенности внутриболотных озер вообще. Таким образом, данные по удельным потокам, на самом деле полученные при исследовании как крупных, так и мелких озер, в СМ Вс8 мы были вынуждены объединить в один массив. Возможно, левый пик (меньшие удельные потоки) распределения эмиссии из озер соответствует крупным внутриболотным озерам, а правый (большие удельные потоки) – мелким.

Наконец, на рис. 1в мы видим еще более сложную картину, которая, впрочем, оказывается артефактом математического метода построения эмпирического распределения плотности вероятности. Это утверждение становится совершенно очевидным, если принять во внимание оценки погрешности плотности вероятности (обозначенные на рис. 1 вертикальными «усами»). Как видим, на рис. 1а и 1б погрешности относительно малы и пики выделяются статистически достоверно. А вот на рис. 1в погрешности велики (относительно большинства пиков), следовательно, не все пики будут статистически значимыми (можно строго показать, что значимым на рис. 1в является лишь главный пик, расположенный чуть левее значения $3 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$).

Однако заметим, что с теоретической точки зрения полимодальные распределения, отражающие реальные распределения эмиссии в болотных экосистемах (и не являющиеся математическим артефактом) вполне возможны. Например, на облесенных болотах принято выделять, как минимум, низкие и высокие рямы [Лисс с соавт., 2001], причем измерения проводят как в них, так и на границе «рям/открытая топь» (не говоря уже о том, что часто выделяют еще и средние рямы). Таким образом, мы имеем 3-4 естественных группы, в то время как в [Peregon et al., 2008; 2009] приводятся данные лишь для распространенности рямов вообще. Таким образом, данные по удельным потокам, на самом деле полученные при исследовании в высоких, средних и низких рямах, а также на границах между ними и открытой топью, мы вынуждены в СМ объединить в один массив.

Статистическое моделирование на основе СМ Вс8 дало достаточно логичную картину географического расположения источников метана (рис. 2), 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 CH_4 с территории Западной Сибири составляет $2.9 \text{ ТгС-CH}_4/\text{год}$.

Таблица 2. Эмиссия CH₄ из эвтрофных болот лесостепи Западной Сибири.

Название точки	Координаты		Дата	Температура, °С				УБВ, см ^{а)}	pH	Геоботаническое описание ^{б)}	Удельный поток CH ₄ , мгС·м ⁻² ·ч ⁻¹		
	Широта	Долгота		воздуха	почвы на глубине						среднее	СКО	
					0 см	5 см	15 см						45 см
Ku1	55.16550	81.32106	9.07.09	н.д.	19.9	19.9	5.7	16.1 ^{в)}	5	5.51	Bet, Led, Vac	2.52	2.49
Ku1	55.16550	81.32106	9.07.09	н.д.	19.9	19.9	5.7	16.1 ^{в)}	10	5.51	Bet, Led, Vac	8.09	0.24
Ku2	55.16553	81.32137	9.07.09	н.д.	19.9	19.9	5.7	16.1 ^{в)}	5	5.51	Bet, Led, Vac	-0.09	0.03
Ku2	55.16553	81.32137	9.07.09	н.д.	19.9	19.9	5.7	16.1 ^{в)}	5	5.51	Bet, Led, Vac	1.52	1.38
Ku2	55.16553	81.32137	9.07.09	н.д.	19.9	19.9	5.7	16.1 ^{в)}	5	5.51	Bet, Led, Vac	5.66	0.17
Ku2	55.16553	81.32137	9.07.09	н.д.	19.9	19.9	5.7	16.1 ^{в)}	5	5.51	Bet, Led, Vac	8.46	0.25
Ku2.1	55.16553	81.32145	9.07.09	н.д.	19.9	19.9	5.7	16.1 ^{в)}	5	5.51	Bet, Led, Vac	0.63	1.00
Ku2.1	55.16553	81.32145	9.07.09	н.д.	19.9	19.9	5.7	16.1 ^{в)}	5	5.51	Bet, Led, Vac	0.22	0.43
Ku3	55.16578	81.32084	9.07.09	н.д.	19.9	19.9	5.7	16.1 ^{в)}	0	5.51	Bet, Led, Vac	13.33	0.87
Ku3	55.16578	81.32084	9.07.09	н.д.	19.9	19.9	5.7	16.1 ^{в)}	5	5.51	Bet, Led, Vac	7.14	0.21
Ku3.1	55.16578	81.32079	9.07.09	н.д.	19.9	19.9	5.7	16.1 ^{в)}	5	5.51	Bet, Led, Vac	0.30	0.23
Ku3.1	55.16578	81.32079	9.07.09	н.д.	19.9	19.9	5.7	16.1 ^{в)}	10	5.51	Bet, Led, Vac	2.07	0.76
Ni.Eut.3	55.15038	79.05720	17.07.09	н.д.	13.2	12.8	10.4	8.0	-10	6.45	Bet, Vac, Ces	2.53	0.32
Ni.Eut.3	55.15038	79.05720	17.07.09	н.д.	13.2	12.8	10.4	8.0	-7	6.45	Bet, Vac, Ces	1.91	0.50
Ni.Eut.3	55.15038	79.05720	17.07.09	н.д.	14.0	13.0	10.4	7.8	-16	6.45	Bet, Led, Vac	1.30	0.73
Ni.Eut.3	55.15038	79.05720	17.07.09	н.д.	14.0	13.0	10.4	7.8	-10	6.45	Bet, Led, Vac	0.02	0.01
T.Ska.So.1.1	55.39607	81.78073	20.06.10	26.9	17.6	9.6	13.5	5.5	0	6.93	Alb, Rip, Oms	0.13	0.10
T.Ska.So.1.2	55.39606	81.78080	20.06.10	26.9	17.6	9.5	13.5	5.5	0	6.93	Alb, Rip, Oms	0.12	0.06
T.Ska.So.2.1	55.39617	81.78074	20.06.10	26.9	17.6	9.5	13.5	5.5	10	7.23	Alb, Rip, Oms	0.08	0.02
T.Ska.So.2.2	55.39615	81.78072	20.06.10	26.9	17.6	9.5	13.5	5.5	15	7.23	Alb, Rip, Oms	0.00	0.05
T.Tih.Fen.1.1	55.08806	81.55722	21.06.10	19.3	17.5	14.5	16.5	9.0	0	6.65	Rip, Ces, Fil	7.04	0.25
T.Tih.Fen.1.2	55.08806	81.55694	21.06.10	19.3	17.5	14.5	16.5	9.0	0	6.65	Rip, Ces, Fil	9.92	0.95
T.Tih.Fen.1.3	55.08806	81.55722	21.06.10	19.3	17.5	14.5	16.5	9.0	0	6.65	Rip, Ces, Fil	8.59	1.78
T.Tih.Fen.1.1	55.08806	81.55722	21.06.10	17.6	17.4	14.0	16.5	9.0	0	6.65	Rip, Ces, Fil	8.37	0.28
T.Tih.Fen.1.2	55.08806	81.55694	21.06.10	17.6	17.4	14.0	16.5	9.0	0	6.65	Rip, Ces, Fil	7.97	0.24
T.Tih.Fen.1.3	55.08806	81.55722	21.06.10	17.6	17.4	14.0	16.5	9.0	0	6.65	Rip, Ces, Fil	12.29	2.81
T.Tih.Fen.2.1	55.08806	81.55722	21.06.10	15.5	16.5	14.0	16.4	9.0	0	6.56	Rip, Ces, Fil	5.91	1.18
T.Tih.Fen.2.2	55.08806	81.55694	21.06.10	15.5	16.5	14.0	16.4	9.0	0	6.56	Rip, Ces, Fil	11.39	4.81
T.Tih.Fen.2.3	55.08806	81.55694	21.06.10	15.5	16.5	14.0	16.4	9.0	0	6.56	Rip, Ces, Fil	1.03	4.28
T.Tih.Fen.2.1	55.08806	81.55722	21.06.10	14.6	16.0	14.0	16.0	9.0	0	6.56	Rip, Ces, Fil	7.20	0.56
T.Tih.Fen.2.2	55.08806	81.55694	21.06.10	14.6	16.0	14.0	16.0	9.0	0	6.56	Rip, Ces, Fil	7.70	1.45
T.Tih.Fen.2.3	55.08806	81.55694	21.06.10	14.6	16.0	14.0	16.0	9.0	0	6.56	Rip, Ces, Fil	5.23	0.16
T.Tih.Phr.1.1	55.10268	81.52537	21.06.10	12.3	13.9	14.3	15.5	2.5	-20	6.67	Phr, Cal, Ces	2.67	1.55
T.Tih.Phr.1.2	55.10268	81.52537	21.06.10	12.3	13.9	14.3	15.5	2.5	-25	6.67	Phr, Cal, Ces	3.20	1.65
T.Tih.Phr.1.3	55.10268	81.52537	21.06.10	12.3	13.9	14.3	15.5	2.5	-20	6.67	Phr, Cal, Ces	0.64	0.10
T.Tih.Phr.1.1	55.10268	81.52537	21.06.10	9.5	11.3	11.5	11.9	1.5	-20	6.67	Phr, Cal, Ces	1.07	0.63
T.Tih.Phr.1.2	55.10268	81.52537	22.06.10	9.5	11.3	11.5	11.9	1.5	-25	6.67	Phr, Cal, Ces	5.30	0.55
T.Tih.Phr.1.3	55.10268	81.52537	22.06.10	9.5	11.3	11.5	11.9	1.5	-20	6.67	Phr, Cal, Ces	2.22	0.47
T.Tih.Phr.2.1	55.08177	81.48845	22.06.10	10.1	14.0	13.3 ^{г)}	14.0	н.д.	15	7.12	Phr, Cal, Ces	0.26	0.18
T.Tih.Phr.2.2	55.08177	81.48845	22.06.10	10.1	14.0	13.3 ^{г)}	14.0	н.д.	20	7.12	Phr, Cal, Ces	0.02	0.06
T.Tih.Phr.2.3	55.08177	81.48845	22.06.10	10.1	14.0	13.3 ^{г)}	14.0	н.д.	15	7.12	Phr, Cal, Ces	-0.04	0.01
T.Tih.Phr.2.1	55.08177	81.48845	22.06.10	8.3	13.5	12.9 ^{г)}	14.0	н.д.	15	7.12	Phr, Cal, Ces	0.15	0.15
T.Tih.Phr.2.2	55.08177	81.48845	22.06.10	8.3	13.5	12.9 ^{г)}	14.0	н.д.	20	7.12	Phr, Cal, Ces	0.05	0.10
T.Tih.Phr.2.3	55.08177	81.48845	22.06.10	8.3	13.5	12.9 ^{г)}	14.0	н.д.	15	7.12	Phr, Cal, Ces	0.16	0.04
T.Cab.Phr.1.1	55.11000	81.20472	23.06.10	11.8	14.6	13.5 ^{г)}	15.1	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.10	0.08
T.Cab.Phr.1.2	55.11000	81.20472	23.06.10	11.8	14.6	13.5 ^{г)}	15.1	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.27	0.17
T.Cab.Phr.1.3	55.11000	81.20472	23.06.10	11.8	14.6	13.5 ^{г)}	15.1	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.21	0.14
T.Cab.Phr.1.1	55.11000	81.20472	23.06.10	13.6	15.0	13.5 ^{г)}	16.3	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.14	0.19
T.Cab.Phr.1.2	55.11000	81.20472	23.06.10	13.6	15.0	13.5 ^{г)}	16.3	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.21	0.08
T.Cab.Phr.1.3	55.11000	81.20472	23.06.10	13.6	15.0	13.5 ^{г)}	16.3	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.16	0.05
T.Cab.Phr.1.1	55.11000	81.20472	23.06.10	13.5	15.5	13.0 ^{г)}	17.4	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.11	0.03
T.Cab.Phr.1.2	55.11000	81.20472	23.06.10	13.5	15.5	13.0 ^{г)}	17.4	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.23	0.05
T.Cab.Phr.1.3	55.11000	81.20472	23.06.10	13.5	15.5	13.0 ^{г)}	17.4	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.29	0.09
T.Cab.Phr.2.1	55.11002	81.20458	23.06.10	12.6	15.5	13.5 ^{г)}	16.5	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.21	0.06
T.Cab.Phr.2.2	55.11002	81.20458	23.06.10	12.6	15.5	13.5 ^{г)}	16.5	н.д.	-15	7.29	Phr, Rip, Ces	0.30	0.05

Примечания:

^{а)} Положительные и отрицательные значения отражают ситуации, когда уровень болотных вод (УБВ) ниже и выше среднего уровня поверхности мха соответственно;

^{б)} Alb – *Betula alba*, Bet – *Betula pubescens*, Led – *Ledum palustre*, Vac – *Vaccinium vitis-idaea*, Rip – *Carex riparia*, Oms – *Carex omskiana*; Ces – *Carex cespitosa*, Fil – *Filipendula ulmaria*, Phr – *Phragmites communis*, Cal – *Calamagrostis neglecta*, Lem – *Lemna minor*, Typ – *Typha latifolia*

^{в)} Температура почвы измерялась на глубине 10 см

^{г)} Температура почвы измерялась на глубине 25 см

Table 2 (продолжение).

Название точки	Координаты		Дата	Температура, °С					УБВ, см ^{а)}	рН	Геоботаническое описание ^{б)}	Удельный поток CH ₄ , мС·м ⁻² ·ч ⁻¹	
	Широта	Долгота		воздуха	почвы на глубине							среднее	СКО
					0 см	5 см	15 см	45 см					
T.Cab.Phr.2.1	55.11002	81.20458	23.06.10	12.5	15.5	13.5 ^{р)}	16.0	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.41	0.15
T.Cab.Phr.2.2	55.11002	81.20458	23.06.10	12.5	15.5	13.5 ^{р)}	16.0	н.д.	-15	7.29	Phr, Rip, Ces	0.23	0.16
T.Cab.Phr.2.1	55.11002	81.20458	23.06.10	12.5	15.5	13.5 ^{р)}	15.5	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.23	0.09
T.Cab.Phr.2.2	55.11002	81.20458	23.06.10	12.5	15.5	13.5 ^{р)}	15.5	н.д.	-15	7.29	Phr, Rip, Ces	0.32	0.12
T.Cab.Phr.2.3	55.11002	81.20457	23.06.10	12.5	15.5	13.5 ^{р)}	15.5	н.д.	-10	7.29	Phr, Rip, Ces	0.18	0.04
T.Cab.Phr.3.1	55.11012	81.20455	23.06.10	12.5	15.0	13.5 ^{р)}	15.3	н.д.	-15	7.29	Phr, Rip, Ces	0.44	0.05
T.Cab.Phr.3.2	55.11012	81.20455	23.06.10	12.5	15.0	13.5 ^{р)}	15.3	н.д.	-15	7.29	Phr, Rip, Ces	0.36	0.09
T.Cab.Phr.3.3	55.11007	81.20457	23.06.10	12.5	15.0	13.5 ^{р)}	15.3	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.15	0.12
T.Cab.Phr.3.1	55.11012	81.20455	23.06.10	12.5	15.0	13.5 ^{б)}	15.0	н.д.	-15	7.29	Phr, Rip, Ces	0.28	0.16
T.Cab.Phr.3.2	55.11012	81.20455	23.06.10	12.5	15.0	13.5 ^{р)}	15.0	н.д.	-15	7.29	Phr, Rip, Ces	0.09	0.11
T.Cab.Phr.3.3	55.11007	81.20457	23.06.10	12.5	15.0	13.5 ^{р)}	15.0	н.д.	-20	7.29	Phr, Rip, Ces	0.19	0.05
T.Cab.Phr.4.1	55.06590	81.28630	23.06.10	12.6	13.5	13.1 ^{р)}	12.8	н.д.	-9	7.29	Phr, Cal, Ces	4.54	0.26
T.Cab.Phr.4.2	55.06568	81.28600	23.06.10	12.6	13.5	13.1 ^{р)}	12.8	н.д.	-6	7.29	Phr, Cal, Ces	3.65	0.20
T.Cab.Phr.4.3	55.06565	81.28600	23.06.10	12.6	13.5	13.1 ^{р)}	12.8	н.д.	-12	7.29	Phr, Cal, Ces	2.93	0.78
T.Cab.Phr.4.1	55.06590	81.28630	23.06.10	12.5	13.1	13.0 ^{р)}	12.3	н.д.	-9	7.29	Phr, Cal, Ces	4.40	0.36
T.Cab.Phr.4.2	55.06568	81.28600	23.06.10	12.5	13.1	13.0 ^{р)}	12.3	н.д.	-6	7.29	Phr, Cal, Ces	3.23	0.10
T.Cab.Phr.4.3	55.06565	81.28600	23.06.10	12.5	13.1	13.0 ^{р)}	12.3	н.д.	-12	7.29	Phr, Cal, Ces	5.71	0.30
T.Tih.Typh.1	55.09586	81.52786	21.08.10	26.7	21.1	16.6	12.6	10	-19	5.60	Typ, Cal, Lem	71.94	2.16
T.Tih.Typh.2	55.09589	81.52792	21.08.10	26.8	21.1	16.6	12.6	10	-12	5.60	Typ, Cal, Lem	21.16	0.63
T.Tih.Typh.3	55.09592	81.52789	21.08.10	22.6	18.5	16.4	12.4	10	-12	5.60	Typ, Cal, Lem	30.96	2.62
T.Tih.Typh.4	55.09592	81.52786	21.08.10	22.6	18.5	16.4	12.4	10	-15	5.60	Typ, Cal, Lem	29.07	11.9
T.Tih.Typh.5	55.09592	81.52794	21.08.10	18.4	17.3	16.5	12.5	10	-6	5.60	Typ, Cal, Lem	11.35	1.86
T.Tih.Typh.6	55.09592	81.52812	21.08.10	18.4	17.3	16.5	12.5	10	-4	5.60	Typ, Cal, Lem	11.97	1.15
T.Tih.Typh.7	55.09592	81.52803	22.08.10	26.8	19.8	14.8	12.5	10	-15	6.34	Typ, Cal, Lem	15.72	0.47
T.Tih.Typh.8	55.09589	81.52797	22.08.10	26.8	19.8	14.8	12.5	10	-12	6.34	Typ, Cal, Lem	22.69	0.96
T.Tih.Typh.9.1	55.09581	81.52794	22.08.10	25.6	20.3	15.5	12.5	10	-17	6.15	Typ, Cal, Lem	16.53	1.23
T.Tih.Typh.9.2	55.09581	81.52794	22.08.10	29.4	21.4	15.9	12.5	10	-17	6.15	Typ, Cal, Lem	16.94	1.65
T.Tih.Typh.10.1	55.09581	81.52794	22.08.10	25.6	20.3	15.5	12.5	10	-10	6.15	Typ, Cal, Lem	73.35	4.97
T.Tih.Typh.10.2	55.09581	81.52794	22.08.10	29.4	21.4	15.9	12.5	10	-10	6.15	Typ, Cal, Lem	68.60	2.17
T.Tih.Typh.11.1	55.09589	81.52803	22.08.10	26.8	21.5	19.0	13.0	10	-6	6.60	Typ, Cal, Lem	3.23	0.30
T.Tih.Typh.11.2	55.09589	81.52803	22.08.10	24.5	20.6	18.5	13.5	10	-6	6.60	Typ, Cal, Lem	2.27	0.15
T.Tih.Typh.12.1	55.09589	81.52803	22.08.10	26.8	21.5	19.0	13.0	10	-7	6.60	Typ, Cal, Lem	5.84	0.90
T.Tih.Typh.12.2	55.09589	81.52803	22.08.10	24.5	20.6	18.5	13.5	10	-7	6.60	Typ, Cal, Lem	3.04	1.74
T.Tih.Typh.13.1	55.09589	81.52797	22.08.10	23.3	20.3	18.0	13.5	10	-6	6.56	Typ, Cal, Lem	18.16	2.86
T.Tih.Typh.13.2	55.09589	81.52797	22.08.10	21.1	19.4	18.0	13.5	10	-6	6.56	Typ, Cal, Lem	17.65	5.29
T.Tih.Typh.14.1	55.09589	81.52797	22.08.10	23.3	20.3	18.0	13.5	10	-7	6.56	Typ, Cal, Lem	9.36	1.19
T.Tih.Typh.14.2	55.09589	81.52797	22.08.10	21.1	19.4	18.0	13.5	10	-7	6.56	Typ, Cal, Lem	8.22	0.34
T.Tih.Typh.15.1	55.09578	81.52806	23.08.10	29.5	21.8	16.5	13.5	10	-6	6.38	Typ, Cal, Lem	5.32	2.41
T.Tih.Typh.15.2	55.09578	81.52806	23.08.10	30.5	22.5	17.1	13.5	10	-6	6.38	Typ, Cal, Lem	8.43	1.03
T.Tih.Typh.16.1	55.09578	81.52800	23.08.10	29.5	21.8	16.5	13.5	10	-8	6.38	Typ, Cal, Lem	10.44	0.42
T.Tih.Typh.16.2	55.09578	81.52800	23.08.10	30.5	22.5	17.1	13.5	10	-8	6.38	Typ, Cal, Lem	8.78	4.17
T.Tih.Typh.17.1	55.09575	81.52808	23.08.10	26.0	21.1	18.5	13.5	10	-6	6.53	Typ, Cal, Lem	12.03	5.90
T.Tih.Typh.17.2	55.09575	81.52808	23.08.10	25.5	20.8	18.5	13.5	10	-6	6.53	Typ, Cal, Lem	11.83	0.55
T.Tih.Typh.18.1	55.09575	81.52808	23.08.10	26.0	21.1	18.5	13.5	10	-5	6.53	Typ, Cal, Lem	11.50	5.31
T.Tih.Typh.18.2	55.09575	81.52808	23.08.10	25.5	20.8	18.5	13.5	10	-5	6.53	Typ, Cal, Lem	7.40	3.43
T.Tih.Typh.19.1	55.09574	81.52828	23.08.10	16.5	17.5	18.5	14.0	10	-5	6.72	Typ, Cal, Lem	17.48	3.42
T.Tih.Typh.19.2	55.09571	81.52812	23.08.10	16.1	17.1	18.1	14.0	10	-5	6.72	Typ, Cal, Lem	31.26	2.58
T.Tih.Typh.20.1	55.09575	81.52822	23.08.10	16.5	17.5	18.5	14.0	10	-5	6.72	Typ, Cal, Lem	85.34	14.53
T.Tih.Typh.20.2	55.09575	81.52808	23.08.10	16.1	17.1	18.1	14.0	10	-5	6.72	Typ, Cal, Lem	34.90	15.68

Примечания – см. табл. 1.

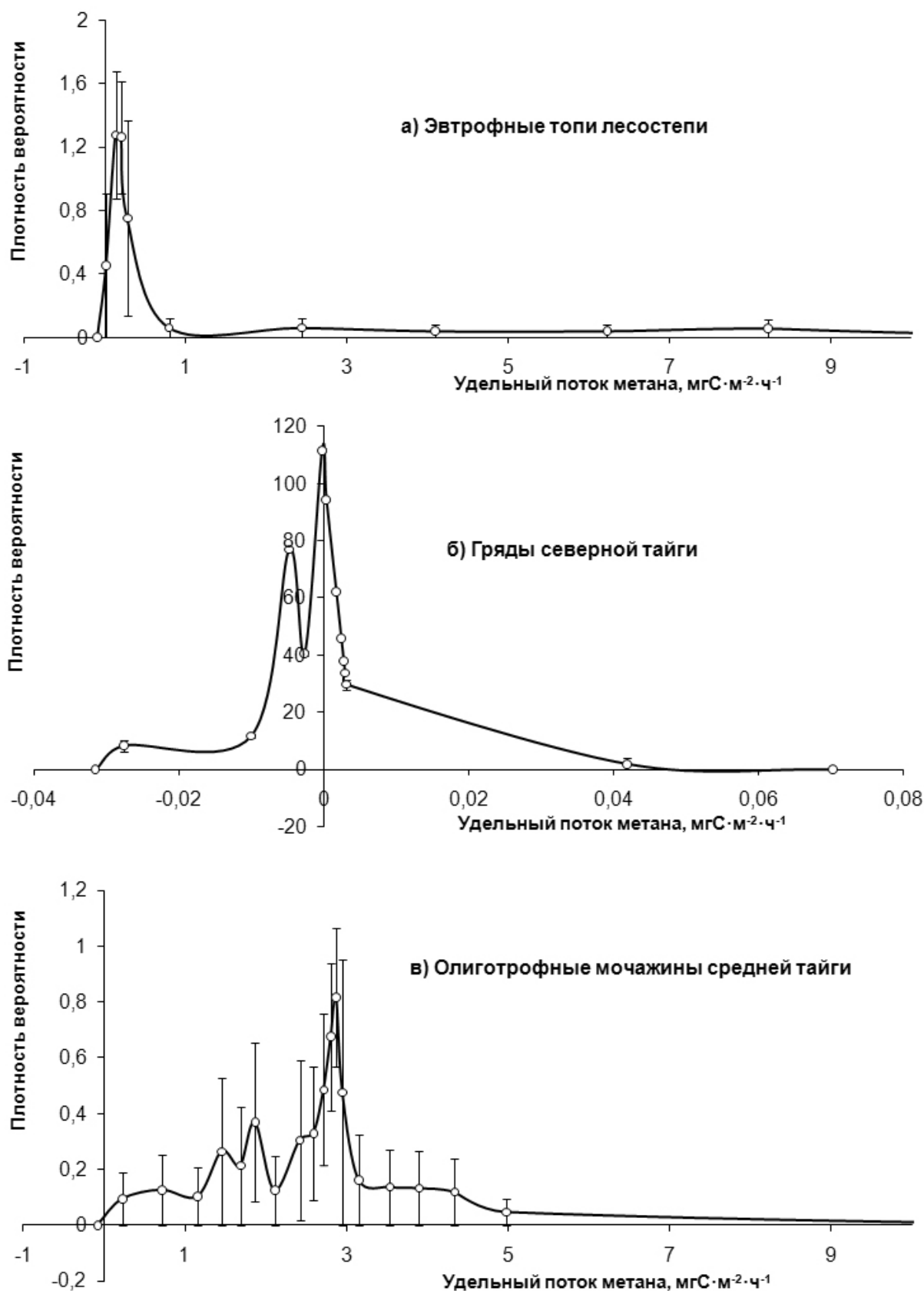


Рис. 1. Плотности вероятности потоков CH_4 из некоторых типичных болотных экосистем Западной Сибири, принятые в СМ Вс8.

Таблица 3. Типичные величины потоков CH_4 ($\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$) 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	0.01 -0.04,0.07		0.00 -0.02,0.00			Мерзлые бугры в средней и южной тайге, а также в подтайге и лесостепи отсутствуют	
Рямы	Рямы и гряды в тундре и лесотундре отсутствуют		0.56 0.21,1.44	0.03 0.00,0.16	0.56 0.05,1.55	0.08 0.03,0.11	0.09 -0.01,0.21
Гряды			0.00 -0.01,0.00	0.13 0.01,0.36	0.49 0.02,1.15		
Мочажины и гали	олиготрофные	0.03 -0.01,0.28	0.95 0.63,5.69	2.74 0.74,4.53	2.76 1.78,3.59	2.87 0.79,5.11	2.68 1.61,4.14
	мезотрофные	1.42 0.41,3.38	1.28 0.70,2.52	6.48 3.47,10.41	2.62 1.89,3.37	5.59 2.21,10.71	4.98 2.66,7.50
	эвтрофные	0.96 0.76,1.53		3.14 1.22,5.66			3.36 0.51,8.21
Приозерные славины	2.42 0.99,3.24		4.72 3.20,6.22			4.53 0.83,7.86	
Внутриболотные озера	0.27 0.15,0.57		0.10 -0.01,0.31	0.49 0.18,2.15	17.94 3.21,77.76		

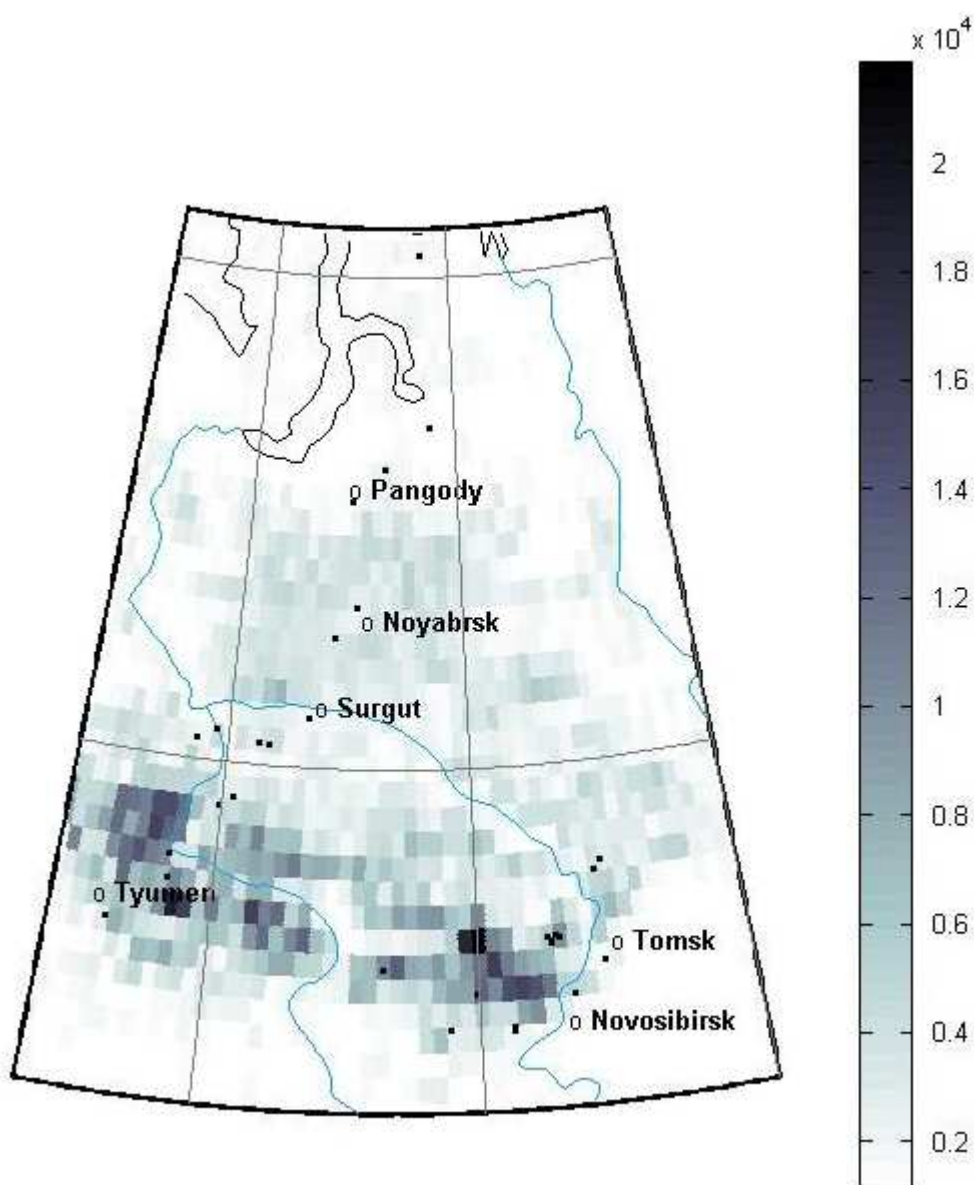


Рис. 2. Карта-схема годовой эмиссии метана, выдаваемая моделью Ab4 (точками изображено местоположение основных исследовательских полигонов измерения эмиссии метана).

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, [Коломыц, 2008; Golubyatnikov, 2008] и др.), посвященные как прогнозированию локальных экосистемных преобразований, так и моделированию смещения природных зон при возможном изменении климата. Таким образом, предсказание эмиссии CH_4 на основе СМ станет возможным при ее соединении с соответствующими биоклиматическими моделями.

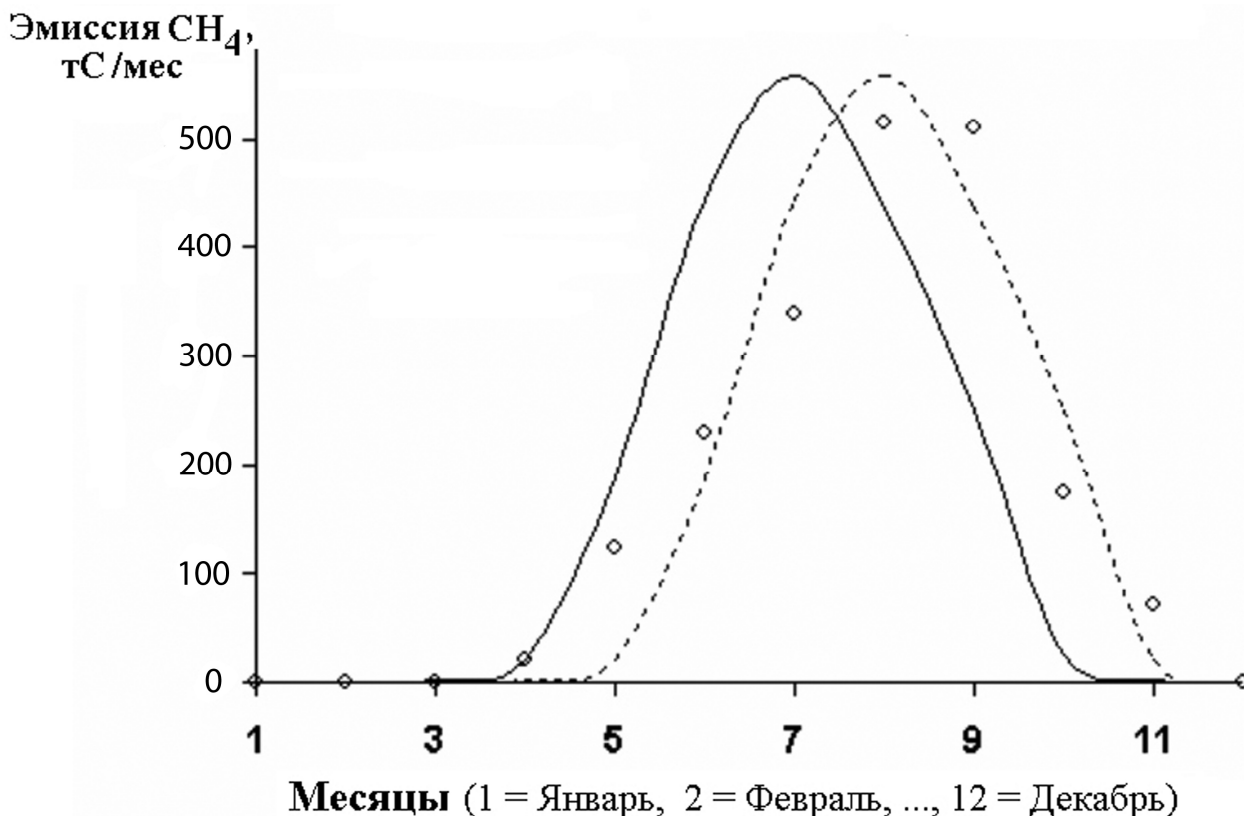


Рис. 3. Эмиссия метана в районе исследовательского полигона на Бакчарском болоте (из полуградусной ячейки с центром 59.75° с.ш., 82.25° в.д.) (кружками изображены данные, пересчитанные из результатов измерений [Maksyutov et al., 1999]; непрерывной линией – расчет по модели, предполагающей зависимость 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).

Для использования СМ совместно с современными биоклиматическими моделями необходимо предусмотреть возможность описания сезонного хода эмиссии CH_4 (поскольку временной шаг в моделях часто принимается меньше года, например, 1 месяц). В связи с этим в Вс8 принята линейная зависимость эмиссии от температуры предыдущего месяца (если эта температура положительна, в противном случае эмиссия принимается равной нулю). Вообще говоря, прямая пропорциональность потока CH_4 температуре, неоднократно обнаруживалась ранее – см., например, [Svensson, Rosswall, 1984; Christensen, 1993]. Предлагаемое нами месячное смещение температуры в этой зависимости, возможно, имеет физический смысл. Действительно, основная масса микробов-метаногенов расположена не в поверхностном (аэробном) слое почвы, а в более глубоком анаэробном слое. Так, в [Glagolev, 1998] показано, что на Бакчарском болоте (часть Большого Васюганского Болота, Западная Сибирь) максимум актуальной метаногенной активности достигается на глубине 20-30 см, после чего она медленно снижается (в [Паников, 1995] для потенциальной метаногенной активности на том же исследовательском полигоне было показано, что она, фактически, постоянна до глубины 1.1 м). Из курса физики почв [Воронин, 1986] известно, что при гармоническом (с амплитудой A и радиальной частотой ω) изменении температуры (T) со временем (t) на поверхности почвы $T(t) = T + A \sin(\omega \cdot t)$, на глубине z температура будет изменяться по закону

$$T(z, t) = T_{\text{cp}} + A \cdot \exp(-z/d) \cdot \sin(\omega \cdot t - z/d),$$

где T_{cp} – средняя температура; $d = [2 \cdot L / (C_v \cdot w)]^{0.5}$; L и C_v – соответственно, коэффициент теплопроводности и объемная теплоемкость почвы. Таким образом, очевидно, что температурная волна проходит на глубину метаногенного слоя спустя значительное время (этим обосновывается необходимость учета запаздывания), причем короткопериодические колебания температуры на поверхности практически никак не отражаются на температуре в данном слое (этим обосновывается необходимость месячного усреднения). Итак, если при работе с лабораторными образцами фиксируется четкая зависимость текущей эмиссии метана от текущего значения температуры, то в природных условиях, как раз, должна наблюдаться зависимость от средних значений температуры с запаздыванием по времени. Заметим, что принятая «зависимость с месячным запаздыванием» позволяет достаточно хорошо описать экспериментальные данные (рис. 3), в том числе явление температурного гистерезиса эмиссии, отмеченное в [Глаголев, 2002].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят всех участников экспедиций 2007-2010 гг., трудом которых получена значительная часть экспериментальных данных, вошедших в СМ Вс8. Особую благодарность авторы выражают аспиранту Югорского государственного университета (г. Ханты-Мансийск) И.В. Филиппову, при участии которого были описаны примеры объектов исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- Вомперский С.Э., Сири́н А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. 2005. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. географ. №5. С. 21-33.
- Воронин А.Д. 1986. Основы физики почв. М.: Изд-во МГУ. 244 с.
- Глаголев М.В. 2002. Температурный гистерезис потока метана из почвы // «Биология – наука XXI века»: 6-я Пушкинская школка-конференция молодых учёных (Пушино, 20-24 мая 2002 г.): Сб. тезисов. Том 3. Тула: Изд-во гос. пед. ун-та им. Л.Н. Толстого. С. 97-98.
- Глаголев М.В. 2007. Оценка эмиссии метана заболоченными территориями Западной Сибири // Болота и биосфера: Сборник материалов Шестой Научной Школы (10-14 сентября 2007 г.). Томск: Изд-во ФГУ «Томский ЦНТИ». С. 33-41.
- Глаголев М.В. 2008. Эмиссия метана: идеология и методология «стандартной модели» для Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сборник научных трудов кафедры ЮНЕСКО Югорского государственного университета. Вып. 1 / Глаголев М.В., Лапшина Е.Д. (ред). Новосибирск: НГУ. С. 176-190.
- Глаголев М.В., Сабреков А.Ф. 2008. О восстановлении плотности вероятности методом гистограмм в почвоведении и экологии // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сборник научных трудов кафедры ЮНЕСКО Югорского государственного университета. Вып. 1 / Глаголев М.В., Лапшина Е.Д. (ред). Новосибирск: НГУ. С. 55-83. Также доступна по URL: <http://www.ugrasu.ru/international/unesco/publications/journal/documents/Sbornic.pdf>
- Глаголев М.В., Суворов Г.Г. 2007. Эмиссия метана болотными почвами средней тайги Западной Сибири (на примере Ханты-Мансийского автономного округа) // Доклады по экологическому почвоведению. Вып. 6. №2. С. 90-162. URL: http://jess.msu.ru/index.php?option=com_scibibliography&func=view&id=55&Itemid=121&catid=65
- Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сири́н А.А. 2008. Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрехимия. №5. С. 46-58.
- Глаголев М.В., Шнырев Н.А. 2008. Летне-осенняя эмиссия CH_4 естественными болотами Томской области и возможности ее пространственно-временной экстраполяции // Вестник МГУ, сер. Почвоведение. №2. С. 24-36.
- Заварзин Г.А. 1995. Микробный цикл метана в холодных условиях // Природа. №6. С. 3-14.
- Казанцев В.С., Глаголев М.В. 2008. Эмиссия CH_4 в подзоне северной тайги: «стандартная модель» Аа3 // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сборник научных трудов кафедры ЮНЕСКО Югорского государственного университета. Вып. 1 / Глаголев М.В., Лапшина Е.Д. (ред). Новосибирск: НГУ. С. 200-207.
- Карелин Д.В., Замолотчиков Д.Г. 2008. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука. 344 с.
- Клепцова И.Е., Корнюшенко Е.Г., Глаголев М.В. 2008. Эмиссия CH_4 в подзоне лесотундры: «стандартная модель» Аа3 // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сборник научных трудов кафедры ЮНЕСКО Югорского государственного университета. Вып. 1 / Глаголев М.В., Лапшина Е.Д. (ред). Новосибирск: НГУ. С. 191-199.
- Коломыц Э.Г. 2008. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука. 427 с.
- Косарев Е.Л. 2008. Методы обработки экспериментальных данных. М.: ФИЗМАТЛИТ. 208 с.
- Костылев А.А., Мияев П.В., Дорский Ю.Д., Левченко В.К., Чикулаева Г.А. 1991. Статистическая обработка результатов экспериментов на микро-ЭВМ и программируемых калькуляторах. Л.: Энергоатомиздат. ЛО. 304 с.
- Крупчатников В.Н., Крылова А.И. 2004. Моделирование эмиссии метана от природных избыточно увлажненных почв и гидрологии поверхности с учетом топографии // География и природные ресурсы. Спец. вып. С. 272-276.
- 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. 2001. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и Ко. 584 с.
- Паников Н.С. 1995. Таежные болота – глобальный источник атмосферного метана? // Природа. №6. С. 14-25.
- Слободкин А.И., Паников Н.С., Заварзин Г.А. 1992. Образование и потребление метана микроорганизмами в болотах тундры и средней тайги // Микробиология. Т. 61. №4. С. 683-691.
- Харбух Дж., Бонэм-Картер Г. 1974. Моделирование на ЭВМ в геологии. М.: Мир. С. 58.
- Christensen T.R. 1993. Methane emissions from Arctic tundra // Biogeochemistry. № 21. P. 117-139.
- Glaguev M.V. 1998. 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. Research & Information Office. P. 79-111.

- Glagolev M.V. 2008. Standard model of methane emission from the West Siberian wetlands // Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: «ENVIROMIS-2008» (Томск, 28 июня - 5 июля 2008 г.): Тезисы докладов. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. С. 74.
- Golubyatnikov L.L. 2008 // Международная конференция «ENVIROMIS-2008» (Томск, 28 июня - 5 июля 2008 г.): Тезисы докладов. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. С. 90.
- Maksyutov S., Inoue G., Sorokin M., Nakano T., Krasnov O., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N., Vasiliev S. 1999. Methane fluxes from wetland in west Siberia during April-October 1998 // Proceedings of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba: Isebu. P. 115-124.
- Naumov A.V. 2001. Emission of CH₄ and CO₂ in connection with temperature conditions of peat bog soils in the northern taiga subzone // Proceedings of the International Field Symposium "West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present" (Noyabrsk, August 18-22, 2001). / Vasiliev S.V., Titlyanova A.A., Velichko A.A. (eds.). Novosibirsk: «Agency Sibprint». P. 110-112.
- Naumov A.V., Huttunen J.T., Repo M.E., Chichulin A.V., Peregon A.M., Filippov I., Lapshina E.D., Martikainen P.J., Bleuten W. 2007. West Siberian peatlands: comparative study of greenhouse gas emission in middle taiga and forest tundra climatic conditions // Proceedings of the Second International Field Symposium "West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present" (Khanty-Mansiysk, August 24 – September 2, 2007) / Под ред. акад. С.Э. Вомперского. Томск: Изд-во НТЛ. P. 132-135.
- Peregon A., Maksyutov S., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N. 2008. Map-based inventory of wetland biomass and net primary production in western Siberia // J. of Geophys. Res. V. 113. doi:10.1029/2007JG000441.
- Peregon A., Maksyutov S., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N., Tamura M., Inoue G. 2005 // Phytos, Spec. issue: «APGC 2004». V.45. №4.
- Peregon A., Maksyutov S., Yamagata Y. 2009. An image-based inventory of the spatial structure of west Siberian wetlands // Environmental Research Letters. No. 4, 045014.
- Svensson B.H., Rosswall T. 1984. In situ methane production from acid peat in plant communities with different moisture regimes in a subarctic mire // OIKOS. №43. P. 341-350.

«STANDARD MODEL» Bc4 OF CH₄ EMISSION FROM WEST SIBERIAN MIRES

Glagolev M.V., Sabrekov A.F., Kleptsova I.E., Maksyutov S.S.

Methane is a significant «greenhouse gas» and is of fundamental importance in atmospheric photochemistry, as it regulates the formation of ozone and hydroxyl, which are responsible for the breakdown of most gases that are emitted into the atmosphere by natural and anthropogenic processes. Mires are the most important natural methane source. West Siberian mires belong to the biggest wetland area in the world and contribute essentially to the global methane emission.

The aim of this study was to summarize results of monitoring of regional methane emissions from Western Siberia, using an approach, which we name the "standard model" (SM), this paper describes the newest SM version at the moment – Bc8. SM consists of data about a duration of methane emission in each zone, digital map and the probability density distribution of the specific methane fluxes from typical ecosystems, based on experimental methane emission measurements. As an example, results of those measurements in forest-steppe fens of Western Siberia and sites description are presented. Methane fluxes were measured with static chamber technique during snow-free period of year. Different mire types have been classified into eight categories and emission were measured in seven climatic zones from forest-steppe to tundra.

Bc8 estimates the value of yearly methane emission from Western Siberia mires as 2.9 Mt C-CH₄. Results obtained on the basis of the Bc8 give a logical picture of the geographical location of the main methane sources: emission has the maximum values in the southern taiga and subtaiga. Analysis of the probability density functions of specific fluxes from different mire types and climatic zones has shown that there are three types of probability density function of the specific methane fluxes: first, similar to lognormal with a single peak, second, which has two statistically significant peaks, and third, which has three or more statistically insignificant peaks. To understand how global warming influence on the methane emission from West Siberian mires, we can use models that describe the changes of the climatic zones boundaries. For this reason model assumed linear dependency between methane emission and mean air temperature of the previous month. That assumption probably has a physical reason because this dependency reflects influence of temperature wave on activity of methanogenic bacteria.

Key words: methane, greenhouse gases emission, West Siberia, mires.

Поступила в редакцию: 26.09.2010