

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

УДК 631.41

### ВКЛАД МЕРЗЛОТНЫХ БУГРОВ В ЭМИССИЮ МЕТАНА ИЗ БОЛОТ ТУНДРЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Сабреков А.Ф.<sup>1</sup>, Глаголев М.В.<sup>1,2,3</sup>, Клепцова И.Е.<sup>2</sup>, Башкин В.Н.<sup>4</sup>, Барсуков П.А.<sup>5,6</sup>, Максютков Ш.Ш.<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup> Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

<sup>3</sup> Томский государственный педагогический университет

<sup>4</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

<sup>5</sup> Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск

<sup>6</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет

<sup>7</sup> Национальный институт изучения окружающей среды, г. Цукуба (Япония)

[misternickel@mail.ru](mailto:misternickel@mail.ru), [m\\_glagolev@mail.ru](mailto:m_glagolev@mail.ru)

В августе 2011 г. в подзоне южной тундры Западной Сибири (ключевой участок «Ямбург», 67.97° с.ш., 75.4° в.д.) были проведены измерения удельного потока  $\text{CH}_4$  статическим камерным методом из мерзлых плоскобугристых болот. Несмотря на то, что мерзлотные бугры являются вторым по распространённости типом болотных микроландшафтов в тундровой зоне Западной Сибири, данных о величине эмиссии метана из них до сих пор крайне недостаточно.

Среднее значение удельного потока метана из мерзлых бугров тундры Западной Сибири составило  $0.13 \pm 0.29 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ . Полученные результаты были использованы в рамках развиваемого авторами подхода к вычислению регионального потока метана – стандартной модели, а именно её новой версии Vc9. Оказалось, что несмотря на распространённость в зоне тундры Западной Сибири, мерзлотные бугры выделяют в атмосферу лишь 1.9 килотонны  $\text{C-CH}_4 \cdot \text{год}^{-1}$  (2% от потока с болот тундры). Вычисленный поток с территории всех болот западносибирской тундры оказался равным около 108.7 килотонн  $\text{C-CH}_4$  в год, что соответствует примерно 4% региональной эмиссии метана из всех болот Западной Сибири.

Проводится попытка оценить репрезентативность как уже опубликованных, так и публикуемых в настоящей статье данных об эмиссии метана из болот в зоне тундры Западной Сибири, полученных в течение летнее-осенних периодов 2009-2011 гг.

**Ключевые слова:** эмиссия метана, тундра, Западная Сибирь, болота, мерзлотные бугры.

**Цитирование:** Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Башкин В.Н., Барсуков П.А., Максютков Ш.Ш. 2011. Вклад мерзлотных бугров в эмиссию метана из болот тундры Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 2. № 2(4). EDCCrar0002.

## ВВЕДЕНИЕ

Потребность в количественной оценке интенсивности процессов эмиссии и поглощения метана обусловлена важностью этого газа в контексте глобального изменения климата и изучения фотохимических процессов, происходящих в атмосфере Земли [Mikaloff Fletcher et al., 2004]. Поскольку одним из основных источников метана являются болота (вместе с другими переувлажнёнными экосистемами) [IPCC, 2007], в последние десятилетия XX века было начато измерение удельного потока метана из болот по всему миру. Особое внимание привлекли болота, расположенные севернее 50° с.ш., поскольку их площадь равна половине площади всех болот мира [Matthews, 1983]. Однако до сих пор существует значительная неопределённость оценки эмиссии из болот этого региона: последняя по данным разных авторов варьирует от 7 до 54  $\text{МтС-CH}_4 \cdot \text{год}^{-1}$  [Christensen et al., 1996; Cao et al., 1998; Mikaloff Fletcher et al., 2004]. Причём ситуация мало изменилась за последние два десятилетия – оценки эмиссии из «северных» болот, приведённые в [Bartlett, Harriss, 1993], варьировали от 20 до 50  $\text{МтС-CH}_4 \cdot \text{год}^{-1}$ . Впрочем, эти величины так или иначе ниже оценок эмиссии из тропических болот, особенно полученных с помощью обратного моделирования – см., например, [Mikaloff Fletcher et al., 2004], где эмиссия из болот тропического региона оценивается примерно в 160  $\text{МтС-CH}_4 \cdot \text{год}^{-1}$ .

Однако в процессе глобального изменения климата эмиссия из «северных» болот, по прогнозным оценкам, может сильно возрасти, поскольку именно в этих широтах повышение среднегодовых температур воздуха происходит особенно сильно [IPCC, 2007]. Так прогнозная оценка увеличения эмиссии метана для зоны тундры Западной Сибири, в которой болота занимают 29% территории

[Романова, 1985], к 2050 году составляет 50% [Anisimov, 2007]. При этом абсолютную оценку роста эмиссии, которая непосредственно нужна для подсчёта баланса метана в атмосфере, дать весьма затруднительно, так как относительно неё существует такая же большая неопределённость, как и относительно глобальных оценок эмиссии с «северных» болот, поскольку работ по измерению эмиссии метана из болот тундры Западной Сибири было выполнено немного, и они малорепрезентативны либо по причине малого количества измерений [Panikov et al., 1993, 1995; Christensen et al., 1995], либо по причине того, что исследования были проведены в нехарактерных для тундры Западной Сибири типах болотных экосистем [Neuger et al., 2002] (список характерных экосистем и доли занимаемых ими площадей см. в [Сабреков и др., 2011]).

В предыдущей нашей работе [Сабреков и др., 2011] речь шла в первую очередь об эмиссии метана из эвтрофных болот и внутриболотных озёр тундры, однако не было уделено должного внимания другому распространённому в тундре типу болотных микроландшафтов – мёрзлым буграм, доля которых по площади распространения среди всех болотных микроландшафтов тундры Западной Сибири согласно [Peregon et al., 2008] составляет примерно 22%. Таким образом, региональная оценка эмиссии не была репрезентативной. В обобщающей работе [Glagolev et al., 2011] расчёт эмиссии метана из мёрзлых бугров тундры проводился по экспериментальным данным, полученным для этих микроландшафтов в лесотундре Западной Сибири.

Задачи данного исследования были следующими:

- вычислить поток метана из мерзлотных плоскобугристых болот зоны тундры;
- оценить роль этого микроландшафта в потоке  $\text{CH}_4$  с территории всей тундры Западной Сибири;
- сопоставить приводимые в настоящей работе данные с полученными ранее результатами эмиссии метана из тундровых микроландшафтов ([Глаголев и др., 2010а; Сабреков и др., 2011]), а также с данными других авторов для того, чтобы понять, насколько наши расчеты отражают реальную картину эмиссии  $\text{CH}_4$  из различных типов болотных экосистем, существующих в тундре;
- оценить репрезентативность расчета регионального потока из зоны тундры, учитывая различные виды вариабельности удельного потока.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

**Объект.** Измерения проводились в августе 2011 г. в южной тундре на мерзлотных буграх пучения на ключевом участке «Ямбург» (подзона южной тундры, 67.97° с.ш., 75.4° в.д.), располагающемся в 25 км к югу от вахтового посёлка Ямбург Ямало-Ненецкого Автономного Округа в зоне сплошной многолетней мерзлоты, мощность мерзлоты в этом районе составляет около 200 метров. Этот участок приурочен к правобережной террасе реки Нюдямонтопоепоко-Яха, для которой характерны ландшафты различного типа: плоскобугристо-мочажинные и плоскобугристо-мочажинно-озерковые, полигональные и плоскобугристые в сочетании с крупнобугристыми. Измерения проводились на различных частях плоских бугров, слегка различающихся по нанорельефу и, соответственно, по составу растительности. Естественная вариабельность растительного покрова преимущественно укладывалась в следующие рамки: проективное покрытие (по площади) лишайников было в пределах 75-95%, мхов – 2-8%, карликовой березы – 5-10%. Среди лишайников преобладал вид *Alectoria ochroleuca*, проективное покрытие которого составляло 60-70%.

Почвенный покров изучаемой территории состоит, главных образом, из комбинации торфяно-криоземов грубогумусированных, торфяно-криоземов глееватых криотурбированных, торфяно-глееземов мерзлотных и торфяных эвтрофных мерзлотных почв. Названия почв приведены в соответствии с современной русской классификацией почв [Шишов и др., 2004]. Верхняя граница многолетней мерзлоты располагалась на глубине 30-50 см (на 11-14.08.2011), мощность торфяного слоя не превышала 40 см.

Шесть точек для проведения измерений были выбраны таким образом, чтобы охватить всё естественное разнообразие растительных сообществ в рамках микроландшафта. Расстояние между двумя максимально удалёнными точками было равно 6 км. В каждой точке для большей репрезентативности было установлено по три основания. Измерения велись в период с 11 по 15 августа.

**Методы.** Отбор и хранение проб, хроматографический анализ проб воздуха, расчет удельного потока, проведение сопутствующих экологических измерений, а также статистическая обработка результатов производились в соответствии с [Сабреков и др., 2011]. Единственным отличием было то, что хроматографический анализ выполняли, помимо хроматографа «Кристалл-5000» («Хроматэк», г. Йошкар-Ола, Россия), и на хроматографе Chrom-41 («Chromex Ltd», США), также оснащённом пламенно-ионизационным детектором, со стальной колонкой (2.4 м), наполнитель колонки – Spherosil (100-120 mesh), рабочая температура 50 °C с аргоном в качестве газа-носителя (скорость потока – около

20 мл·мин<sup>-1</sup>). Точность измерения концентрации метана на этих хроматографах оказалось близка и составила приблизительно  $\pm 0.05$  ppmv.

Полученные значения удельного потока метана использовались нами для вычисления потока из мерзлотных бугров тундры Западной Сибири в рамках концепции так называемой стандартной модели. Стандартная модель представляет собой совокупность электронной карты болот Западной Сибири, набора периодов эмиссии метана из болот различных зон и набора значений удельного потока метана из различных микроландшафтов в каждой из зон. Стандартная модель с появлением новых данных непрерывно совершенствуется, поэтому уместно говорить об историческом ряде таких моделей. Для удобства «стандартные модели» эмиссии обозначаются 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). На данный момент последней опубликованной оценкой эмиссии с территории Западной Сибири является оценка по модели Вс8. Для зоны тундры Западной Сибири оценка по модели Вс8 представлена в [Сабреков и др., 2011]. В данной статье представлена новая версия стандартной модели – Вс9. Цифра 9 означает, что расчёты по предыдущей модели велись по другому массиву экспериментальных данных об удельном потоке, который содержал меньшее количество данных. Подробнее о концепции стандартной модели см. в [Glagolev et al., 2010].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения эмиссии метана, а также соответствующие гидротермические и геохимические условия приведены в приложении А. Каждое значение в таблице представляет собой индивидуальное измерение, в колонке «среднее» приведено значение потока, вычисленное с помощью метода наименьших квадратов, а в колонке «СКО» (среднеквадратическое отклонение) погрешность потока, формирующаяся за счёт того, что в реальности измеренные значения концентрации метана в камере не оказываются расположенными в точности на регрессионной прямой (подробнее о процедуре вычисления удельного потока см. в [Глаголев и др., 2010]). Положительные значения удельных потоков метана обозначают выделение метана в атмосферу, отрицательные – его поглощение. Некоторые статистические характеристики распределений удельного потока CH<sub>4</sub> приведены в табл. 1, в которой сведения об эмиссии из мерзлотных бугров получены на основе результатов измерений, приведённых в данной статье, а сведения об эмиссии из других микроландшафтов – на основе результатов измерений, приведённых в [Глаголев и др., 2010а; Сабреков и др., 2011]. Отметим, что региональный поток вычисляется исходя из медиан значений удельного потока (для вычисления регионального потока они умножаются на периоды эмиссии метана для каждой зоны и на площади, занимаемые тем или иным микроландшафтом), поскольку медиана является робастной оценкой, слабо чувствительной к отклонениям от стандартных условий и обладающей высокой эффективностью для широкого класса распределений [Глаголев, 2008]. Однако медианы значений удельного потока, к сожалению, довольно редко приводятся в литературе. Именно поэтому в приложении А даны результаты каждого отдельного измерения, для того чтобы предоставить всем желающим возможность их самостоятельной статистической обработки, а в табл. 1 приводятся и средние значения, и медианы удельных потоков из микроландшафтов. Ниже, при сравнении с данными других авторов, там, где возможно, мы будем сравнивать медианы, а где нет – средние значения. Так, среднее значение удельного потока метана из мерзлотных бугров тундры Западной Сибири составило  $0.13 \pm 0.29$  мгС-CH<sub>4</sub>·м<sup>-2</sup>·час<sup>-1</sup>, а медиана удельного потока –  $0.06$  мгС-CH<sub>4</sub>·м<sup>-2</sup>·час<sup>-1</sup>.

Поток с поверхности болот всей территории западносибирской тундры, вычисленный по стандартной модели Вс9 с использованием как данных настоящей статьи, так и опубликованных ранее [Глаголев и др., 2010а; Сабреков и др., 2011], составляет около 108.7 килотонн С-CH<sub>4</sub>·год<sup>-1</sup> (примерно 4% эмиссии метана со всей территории Западной Сибири, оцененной по [Glagolev et al., 2011]). Это довольно близко к оценкам эмиссии, полученным ранее по предыдущей версии стандартной модели Вс8, которые составляли 120 килотонн С-CH<sub>4</sub>·год<sup>-1</sup> [Глаголев и др., 2010а] или 110 килотонн С-CH<sub>4</sub>·год<sup>-1</sup> [Сабреков и др., 2011]. Различия между этими оценками связаны с тем, что за период между опубликованием указанных работ, некоторые исследованные экосистемы были переклассифицированы и перенесены из одного типа болотных микроландшафтов в другой.

**Таблица 1.** Характеристики распределения удельного потока ( $\text{mgC-CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ ) в различных микроландшафтах болот зоны тундры

**Table 1.** Statistical characteristics of methane emission ( $\text{mgC-CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) in different tundra wetland microlandscapes

<i>Тип микроландшафта</i>	<i>Среднее</i>	<i>Стандартное отклонение</i>	<i>Медиана</i>	<i>1-ая квартиль</i>	<i>3-ая квартиль</i>
Олиготрофные мочажины <sup>1</sup>	0.16	0.26	0.03	-0.01	0.28
Мезотрофные топи <sup>1,2</sup>	1.99	1.78	1.42	0.41	3.38
Эвтрофные мочажины <sup>1</sup>	1.30	1.12	0.96	0.76	1.53
Мерзлотные бугры (Пальса)	0.13	0.29	0.06	-0.01	0.17
Приозёрные сплавины <sup>1</sup>	2.21	1.40	2.42	0.99	3.24
Внутриболотные озёра <sup>1,2</sup>	0.52	0.54	0.27	0.15	0.57

Примечания: <sup>1</sup> [Сабреков и др., 2011];

<sup>2</sup> [Глаголев и др., 2010a]

Поток метана из мерзлотных бугров тундры Западной Сибири составил лишь 1.9 килотонн  $\text{C-CH}_4 \cdot \text{год}^{-1}$ . Таким образом, учёт мерзлотных бугров почти не внёс изменений в новую оценку, даже несмотря на значительную площадь, занимаемую этим микроландшафтом. Эта оценка потока получена в соответствии с [Glagolev et al., 2011] – удельный поток (в качестве которого взята медиана массива измерений приведённых в данном исследовании) умножается на площадь распространения мерзлотных бугров по данным [Peregón et al., 2008] и на длину периода эмиссии метана, взятую из [Суворов и Глаголев, 2007]:  $0.06 \text{ mgC-CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{час}^{-1} \times 1.3 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 \times 2472 \text{ часа} \cdot \text{год}^{-1} \approx 1.9 \text{ килотонны C-CH}_4 \cdot \text{год}^{-1}$ . Результат аналогичного расчёта для эвтрофных мочажин в Вс9 не отличается от Вс8, поскольку в Вс9 нет новых данных об удельном потоке метана из этого микроландшафта по сравнению с Вс8, – около 106.8 килотонн  $\text{C-CH}_4 \cdot \text{год}^{-1}$ . Далее, чтоб не запутать читателя будем говорить о величине удельного потока из эвтрофных мочажин только применительно к модели Вс9, несмотря на то, что для этого микроландшафта это те же самые данные, что и Вс8. Отметим, что оценка потока со всех болот тундры из [Сабреков и др., 2011] – 110 килотонн  $\text{C-CH}_4 \cdot \text{год}^{-1}$  – округлена до десятков килотонн  $\text{C-CH}_4 \cdot \text{год}^{-1}$ , и уточнённая в настоящей работе оценка 108.7 килотонн  $\text{C-CH}_4 \cdot \text{год}^{-1}$  её не меняет.

Значение потока из мёрзлых бугров тундры по предыдущей версии стандартной модели – Вс8 [Сабреков и др., 2011] было равно  $0.01 \text{ mgC-CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{час}^{-1} \times 1.3 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 \times 2472 \text{ часа} \cdot \text{год}^{-1} \approx 0.3 \text{ килотонны C-CH}_4 \cdot \text{год}^{-1}$ . Таким образом, если округлять до десятых долей килотонн, то благодаря измерениям в мерзлотных буграх уточнённое значение потока с зоны тундры увеличилось на  $1.9 - 0.3 = 1.6 \text{ килотонны C-CH}_4 \cdot \text{год}^{-1}$  по сравнению с предыдущим за счёт того, что в [Сабреков и др., 2011] в качестве значения удельного потока из мерзлотных бугров использовалась величина  $0.01 \text{ mgC-CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ .

При анализе качества такого рода региональных оценок всегда встаёт вопрос об их репрезентативности. Относительно площади распространения каждого из болотных микроландшафтов и длины периода эмиссии иных сведений практически нет: более качественной картографической основы, чем у [Peregón et al., 2008] на данный момент не появилось, как, впрочем, и новых данных для оценки длины периода эмиссии, который и в других исследованиях принимается равным примерно 100 суткам (см., например, [Bartlett, Harriss, 1993; Christensen et al., 1995]). Что же касается удельного потока, то можно выделить четыре составляющих, вносящих вклад в неопределённость этой величины:

- межгодовая вариабельность эмиссии метана, вызванная вариабельностью климата;
- сезонная вариабельность, вызванная внутригодовым изменением основных факторов эмиссии метана – температуры почвы, уровня болотных вод и т.д.;
- пространственная вариабельность эмиссии между разными болотами, обусловленная климатическими или гидрологическими факторами.
- пространственная вариабельность эмиссии внутри каждого микроландшафта.

Довольно трудно понять, можно ли дать репрезентативную оценку регионального потока из болот зоны тундры Западной Сибири, располагая примерно 400 измерениями (при этом на двух наиболее распространённых по площади микроландшафтах, то есть в эвтрофных мочажинах и мерзлотных буграх, сделано соответственно  $59 + 103 = 162$  измерения), проведёнными в течение трёх лет на четырёх разных ключевых участках в начале, середине и конце летне-осеннего периода эмиссии метана. Отчётливо влияние числа измерений на медиану удельного потока  $\text{CH}_4$  можно показать на примере двух микроландшафтов, исследованных в наиболее актуальной на данный момент версии инвентаризации [Glagolev et al., 2011]. Критерии при выборе таких микроландшафтов были следующими: медиана должна быть достаточно велика, чтобы погрешности камерного метода (в первую очередь, связанные с

выдавливанием газа при установке камер и оснований) не оказывали на неё значимого влияния, а количество измерений – достаточно велико, чтобы оценить зависимость медианы удельного потока от числа измерений. Такими микроландшафтами оказались олиготрофные мочажины средней тайги (результаты измерений в этих микроландшафтах приведены в работе [Sabrekov et al., 2011]) и объединённые мезотрофные и эвтрофные мочажины южной тайги (результаты измерений в этих микроландшафтах опубликованы в [Глаголев, Смагин, 2006; Глаголев, Шнырёв, 2007, 2008; Клепцова и др., 2010]). Оказалось, что для этих микроландшафтов медиана удельного потока отличается, менее чем на 10% от итогового значения после 167 и 82 измерений соответственно (при этом результаты измерений располагались в хронологическом порядке, от самых ранних к самым поздним), причём среди этих измерений были измерения, позволяющие охватить и межгодовую вариабельность (то есть измерения на одних и тех же точках, имеющие примерно одну и ту же дату, но сделанные в разные годы), и сезонную (измерения на одних и тех же точках, сделанные на протяжении всего сезона одного и того же года) и оба типа пространственной (измерения в разных точках, сделанные практически одновременно). Как видим, количество имеющихся измерений для тундры не превосходит количества измерений в этих двух подробно исследованных микроландшафтах, упомянутых выше. Исходя из этого элементарного количественного сравнения, а также из того, что наши исследования в зоне тундры охватывают в основном пространственную вариабельность, не покрывая межгодовую и сезонную, не стоит торопиться называть полученную оценку потока из зоны тундры репрезентативной.

Наиболее разумным приёмом в такой ситуации представляется сопоставление полученных результатов с данными других исследователей эмиссии метана в тундре. Одновременно необходимо выяснять, насколько принятые нами величины удельных потоков характерны для тундровых болот вообще и Западной Сибири в частности, и пытаться оценить репрезентативность нашей оценки регионального потока метана из болот зоны тундры Западной Сибири. Логика в данном случае проста: если в других, столь же локальных, как и наше, исследованиях получены близкие к нашим результаты, то наши величины удельных потоков и, следовательно, сами оценки потока можно считать репрезентативными при рассмотрении в данном достаточно грубом региональном масштабе.

Основное наше внимание будет сосредоточено на двух самых распространённых в тундре (согласно [Peregon et al., 2008]) типах болотных микроландшафтов – эвтрофных мочажинах (75% от площади всех болот в тундре), результаты измерений в которых опубликованы в [Глаголев и др., 2010a; Сабреков и др., 2011], и мерзлотных буграх (22%), результаты измерений в которых опубликованы в настоящей статье. Заметим, что в ряде случаев возникали проблемы с отнесением разных болот к тем или иным типам микроландшафтов, поскольку в разных работах использованы принципиально различные классификации болот. Поэтому мы старались ориентироваться на растительные описания объектов исследования, если таковые имелись.

В работе [Christensen et al., 1995] в Западной Сибири измерения проводились на двух ключевых участках 18 августа (на широте 72.7° с.ш.) и 22 августа (на широте 69.9° с.ш.) 1994 года. Средний поток с аналогов эвтрофных мочажин составлял для каждого из участков 0.3 и 3.3 мгС-СН<sub>4</sub>·м<sup>-2</sup>·час<sup>-1</sup>, а для аналогов мерзлотных бугров – 0.001 и 0.04 мгС-СН<sub>4</sub>·м<sup>-2</sup>·час<sup>-1</sup>. На первый взгляд удельные потоки из аналогов эвтрофных мочажин могут показаться сильно отличающимися от медианы в нашей модели – 0.96 мгС-СН<sub>4</sub>·м<sup>-2</sup>·час<sup>-1</sup>. Однако, эти значения получены лишь для двух отдельных микроместообитаний, в отличие от медианы в Вс9, полученной для широкого спектра экологических условий. Нивелировать этот «эффект локальных условий» и проверить общее соответствие этих значений нашим данным можно с помощью регрессионного уравнения, полученного на основании последних в работе [Сабреков и др., 2011]. Для приведённых в [Christensen et al., 1995] экологических характеристик каждой из точек удельный поток, вычисленный с помощью регрессионного уравнения, составит, соответственно, 0.2 и 2.5 мгС-СН<sub>4</sub>·м<sup>-2</sup>·час<sup>-1</sup>, что существенно ближе к 0.3 и 3.3 мгС-СН<sub>4</sub>·м<sup>-2</sup>·час<sup>-1</sup>, чем 0.96 мгС-СН<sub>4</sub>·м<sup>-2</sup>·час<sup>-1</sup>. Стандартная ошибка регрессионной модели при этом составляет 0.6 мгС-СН<sub>4</sub>·м<sup>-2</sup>·час<sup>-1</sup> (R<sup>2</sup> = 0.68). Значения для аналогов мерзлотных бугров близки к нашим данным, учитывая погрешность статического камерного метода, связанную с выдавливанием газа при установке основания и камеры.

Небезынтересно сопоставить с нашими данными и средние величины удельного потока СН<sub>4</sub> для аналогов эвтрофных мочажин и мерзлотных бугров, которые получили Christensen et al. [1995] на трансекте, проходящей по побережью Северного Ледовитого океана от Баренцева до Чукотского моря (широта точек варьировала между 67° с.ш. и 77° с.ш., долгота – 40° в.д. и 179° в.д.). Так, для аналогов эвтрофных мочажин медиана удельного потока СН<sub>4</sub> составила 0.61 мгС-СН<sub>4</sub>·м<sup>-2</sup>·час<sup>-1</sup>, а для аналогов мерзлотных бугров – около 0.1 мгС-СН<sub>4</sub>·м<sup>-2</sup>·час<sup>-1</sup>. Разницу между величинами медиан удельного потока для эвтрофных мочажин (0.96 - 0.61 = 0.35 мгС-СН<sub>4</sub>·м<sup>-2</sup>·час<sup>-1</sup>) можно объяснить более южным расположением исследовательских полигонов, на которых были проведены наши измерения (67-72° с.ш.), по сравнению с полигонами, исследованными в [Christensen et al., 1995]. Такой вывод можно

сделать собственно на основании работы [Christensen et al., 1995], поскольку в ней выявлено статистически значимое убывание удельного потока с возрастанием широты. К сожалению, само регрессионное уравнение авторами не приводится, поэтому количественно влияние широты оценить мы не можем.

Работа [Heikkinen et al., 2004] проводилась с начала июня до середины сентября 2001 года на Воркутинской станции изучения вечной мерзлоты (67.4° с.ш., 63.4° в.д.), то есть сравнительно близко к Западно-Сибирской тундре. Средний за сезон удельный поток из аналогов эвтрофных мочажин и мерзлотных бугров в терминах [Peregon et al., 2008] составил  $1.1 \pm 0.6$  и  $0.2 \pm 0.2$   $\text{мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ , соответственно, что вновь находится в очень хорошем совпадении с нашими результатами. В данной работе выделяются также более обводнённые болотные экосистемы, средний за сезон удельный поток из которых составил  $5.7 \pm 2.9$   $\text{мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ . Если выделить среди объектов, измерения на которых проводились нами, аналогичные в эколого-геоботаническом плане объекты, среднее значение удельного потока из них окажется равным  $2.18 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ , что, казалось бы, существенно отличается от данных [Heikkinen et al., 2004]. Однако, в работе [Heikkinen et al., 2002], в которой использовались данные 1999 года, средний за сезон удельный поток  $\text{CH}_4$  в тех же точках на этих сильно обводнённых экосистемах, в которых проводились измерения [Heikkinen et al., 2004] в 2001 году, оказался равен  $2.27 \pm 1.2$   $\text{мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ , что практически совпадает с нашими данными. Таким образом, межгодовая вариабельность может оказывать очень существенное влияние на оценку эмиссии метана. Это можно объяснить тем, что в литературе отмечаются весьма высокие значения коэффициента  $Q_{10}$  для метаногенеза – от 5 до 16 для субарктических болот [Dunfield et al., 1993], так как, исходя из данных [Heikkinen et al., 2002] и [Heikkinen et al., 2004], средняя температура торфа в 2001 году была выше на несколько градусов.

Близким к полученному нами среднему значению удельного потока для эвтрофных мочажин (с учётом того, что в последних сезонная вариабельность эмиссии  $\text{CH}_4$  почти не отражена – продолжительных измерений на одной точке нами не проводилось) было и значение среднего удельного потока из полигональной тундровой экосистемы, измеренное методом eddy covariance на острове Самойлова в дельте р. Лены (72.4° с.ш., 126.5° в.д.) с начала июня до конца сентября [Sachs et al., 2008]. Это значение составило  $0.8 \pm 0.4$   $\text{мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ .

Интересно, что для данных из [Glagolev et al., 2011] сезонная вариабельность эмиссии метана составляет  $\pm 20\text{-}30\%$  для тех микроландшафтов, где это может быть проанализировано (в частности, для подтайги и средней тайги), а все без исключения упомянутые выше работы, в рамках которых проводилось изучение сезонной вариабельности, свидетельствуют о уровне сезонной вариабельности  $\pm 50\%$  для болотных экосистем, аналогичных эвтрофным мочажинам в терминах [Peregon et al., 2008]. Объяснить это также можно исходя из более высоких величин значения коэффициента  $Q_{10}$  метаногенеза для субарктических болот, приведённых выше, по сравнению с болотами бореальной зоны (для последних,  $Q_{10}$ , согласно данным [Dunfield et al., 1993], варьирует в интервале от 2 до 8). А поскольку температура торфа в наибольшей степени (коэффициент корреляции Спирмена – 0.78) определяет удельный поток метана [Christensen et al., 1995], общая картина более выраженной сезонной динамики по сравнению с болотами бореальной зоны не «зашумляется» влиянием других факторов.

Статистически достоверная сезонная вариабельность эмиссии метана из мерзлотных бугров (если основываться на данных сезонных измерений из [Nakayama and Akiyama, 1994; Nakano et al., 2000]), по-видимому, отсутствует, в связи с чем полученные нами в середине августа результаты можно считать вполне репрезентативными для всего сезона.

Такое хорошее совпадение наших результатов с весьма разнообразными данными является необходимым, но не достаточным условием репрезентативности оценки. Последняя зависит ещё и от того, насколько все упомянутые выше типы вариабельности были охвачены во время исследования. Понять это можно, анализируя величину стандартного отклонения значения удельного потока для эвтрофных мочажин или их аналогов (поскольку именно они дают более 98% потока с территории тундры) и сопоставляя полученные интервальные оценки с литературными данными. Итак, оценим каждый из перечисленных выше видов вариабельности.

- Межгодовая вариабельность на основе как имеющихся у нас, так и литературных данных достоверно оценена быть не может, однако может быть крайне существенной, о чём свидетельствует проведённое выше сравнение работ [Heikkinen et al., 2002] и [Heikkinen et al., 2004] – средние за сезон значения удельного потока метана из болот, полученные в 1999 и 2001 году соответственно, различались в два раза.

- Сезонная (внутригодовая) вариабельность также не может быть оценена на основе наших данных, однако литературные данные, как было отмечено выше, говорят о том, что для аналогов эвтрофных мочажин в тундре коэффициент вариации составляет около 50%.
- Пространственная вариабельность эмиссии между разными болотами может быть оценена по нашим данным. Для этого сопоставим взвешенные средние значения удельного потока  $\text{CH}_4$  для 4 разных точек, относящихся к эвтрофным мочажинам, измерения на которых велись почти одновременно. Веса брались обратно пропорционально погрешности каждого измерения. Среднее по четырём болотам значение удельного потока  $\text{CH}_4$  равно  $1.35 \pm 0.74 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ . Как видим, вариабельность эмиссии между разными болотами высока (коэффициент вариации равен примерно 55%) и перекрывает почти весь спектр значений удельного потока для эвтрофных мочажин зоны тундры – см. ссылки выше, а также [King et al., 1998; Reeburgh et al., 1998].
- Пространственную вариабельность эмиссии внутри каждого микроландшафта можно не рассматривать, так как она обычно ниже вариабельности между разными болотами [Глаголев и др., 2008; Sabrekov et al., 2011].

Для оценки суммарной неопределённости ( $\Delta$ ), вносимой различными независимыми видами неопределённости ( $\Delta i$ ), исходя из логики, следует применить следующую формулу:  $\Delta = (\sum \Delta i^2)^{1/2}$  [Румшиский, 1971]. Тогда суммарная неопределённость составит  $\Delta = ((1.3 \cdot 0.5)^2 + (1.3 \cdot 0.55)^2)^{1/2} = \pm 0.93 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$  или  $\pm 72\%$ . Для всего массива наших измерений в эвтрофных мочажинах стандартное отклонение равно 1.12 или 86%. Исходя из этого, можно сказать, что наши измерения покрыли практически весь ожидаемый уровень вариабельности удельного потока (оставшиеся 14% можно списать на пространственную вариабельность эмиссии внутри каждого микроландшафта). По-видимому, измерения проведённые в самом начале и самом конце августа смогли в какой то мере отразить и сезонную динамику.

Таким образом, выполненную нами оценку потока метана из болот зоны тундры Западной Сибири можно считать репрезентативной, исходя из имеющихся литературных данных.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы глубоко признательны старшему научному сотруднику Л.И. Абрамовой (МГУ им. М.В. Ломоносова) за определение трофности болот по видовому составу их растительности, а также участникам полевых экспедиционных работ 2011 года: к.б.н. А.Г. Башуку (ИПА СО РАН), Б.В. Бахареву (МГУ им. М.В. Ломоносова), П.А. Никитич (ТГУ), Т.В. Раудиной (ТГУ). Особую благодарность выражаем д.б.н. А.В. Наумову (ИПА СО РАН) за ценные консультации и хроматографический анализ части образцов.

Кроме того, авторы выражают глубокою благодарностью рецензентам за проявленное ими внимание к настоящей работе.

**Приложение А. Эмиссия метана с тундровых болот Западной Сибири**  
**Appendix A. Methane emission from West Siberia tundra wetlands**

Название точки	Координаты		Дата	УБВ, см <sup>а)</sup>	рН	Описание растительного покрова <sup>б)</sup>	Поток CH <sub>4</sub> , мгС·м <sup>-2</sup> ·ч <sup>-1</sup>	
	Широта	Долгота					Сред- нее	СКО
Южная тундра, Т.Уа – мёрзлые бугры (пальса), 2011 год								
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	11.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	0.07	0.01
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	11.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	-0.13	0.02
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	12.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	0.18	0.09
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	12.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	0.1	0.05
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	12.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	-0.06	0.05
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	12.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	-0.01	0.08
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	12.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	-0.08	0.11
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	14.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	0.01	0.03
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	14.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	-0.09	0.04
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	14.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	0.02	0.01
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	14.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	-0.13	0.01
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	14.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	0.05	0.01
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	14.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	0.03	0.05
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	14.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	-0.13	0.07
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	14.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	-0.08	0.08
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	14.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	-0.22	0.10
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	14.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	-0.12	0.11
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	14.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	-0.04	0.09
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	15.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	0.04	0.09
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	15.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	0.1	0.03
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	15.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	0.03	0.04
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	15.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	0.04	0.01
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	15.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	0.1	0.01
T.Уа.FP.0	67.97771	75.41923	15.08	100	5.05	Alc, Cld, Bet	0.03	0.01
T.Уа.FP.300	67.98007	75.40451	11.08	0	5.05	Led, Rub, Cld	0.64	0.23
T.Уа.FP.300	67.98007	75.40451	11.08	0	5.05	Led, Rub, Cld	1.14	0.28
T.Уа.FP.300	67.98007	75.40451	12.08	0	5.05	Led, Rub, Cld	0.80	0.02
T.Уа.FP.300	67.98007	75.40451	12.08	0	5.05	Led, Rub, Cld	1.44	0.20
T.Уа.FP.300	67.98007	75.40451	12.08	0	5.05	Led, Rub, Cld	0.27	0.01
T.Уа.FP.300	67.98007	75.40451	12.08	0	5.05	Led, Rub, Cld	1.56	0.02
T.Уа.FP.300	67.98007	75.40451	12.08	0	5.05	Led, Rub, Cld	0.08	0.08
T.Уа.FP.300	67.98007	75.40451	12.08	0	5.05	Led, Rub, Cld	0.14	0.11
T.Уа.FP.300	67.98007	75.40451	12.08	0	5.05	Led, Rub, Cld	0.12	0.05
T.Уа.FP.300	67.98007	75.40451	12.08	0	5.05	Led, Rub, Cld	0.43	0.13
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	14.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.08	0.02
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	14.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.13	0.03
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	14.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.05	0.01
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	14.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.02	0.01
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	14.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.04	0.01
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	14.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.07	0.04
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	14.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.42	0.13
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	14.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.16	0.02
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	14.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.08	0.03
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	14.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.36	0.27
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	14.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.08	0.23
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	15.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.22	0.06
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	15.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	-0.10	0.04
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	15.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.06	0.04
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	15.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	0.33	0.03
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	15.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	-0.09	0.02
T.Уа.FP.450	67.97535	75.43395	15.08	30	5.70	Led, Rub, Cld	-0.06	0.05



**Приложение А (продолжение)**  
**Appendix A (continuation)**

Название точки	Координаты		Дата	УБВ, см <sup>а)</sup>	рН	Описание растительного покрова <sup>б)</sup>	Поток CH <sub>4</sub> , мгС·м <sup>-2</sup> ·ч <sup>-1</sup>	
	Широта	Долгота					Сред-нее	СКО
Южная тундра, Т. Ya – мёрзлые бугры (пальса), 2011 год								
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	11.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.10	0.02
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	11.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.13	0.03
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	11.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	-0.01	0.08
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	11.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.01	0.05
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	11.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	-0.01	0.02
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	11.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	-0.17	0.05
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	11.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	-0.02	0.04
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	11.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.03	0.23
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	12.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.02	0.04
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	12.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.06	0.05
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	12.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.03	0.11
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	12.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	-0.04	0.05
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	12.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	-0.06	0.13
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	12.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.16	0.13
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	12.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	-0.01	0.09
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	12.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.19	0.17
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	12.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.08	0.05
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	12.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	-0.02	0.04
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	14.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.04	0.04
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	14.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.17	0.04
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	14.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.04	0.03
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	14.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.03	0.02
T.Ya.FP.500	67.98007	75.40451	14.08	40	6.35	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.09	0.05
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	14.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.11	0.02
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	14.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.03	0.04
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	14.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.05	0.03
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	14.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.06	0.02
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	14.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.08	0.03
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	14.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.35	0.05
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	14.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	-0.18	0.13
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	14.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	-0.1	0.13
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	14.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.53	0.09
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	14.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	-0.18	0.17
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	14.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.1	0.16
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	15.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	-0.04	0.04
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	15.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	-0.06	0.03
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	15.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.2	0.02
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	15.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.17	0.05
T.Ya.FP.750	67.97299	75.44867	15.08	25	5.83	<i>Led, Rub, Cld</i>	0.05	0.07
T.Ya.FP.5000	67.99728	75.31032	11.08	15	5.32	<i>Cld, Alc, Bet</i>	0.77	0.14
T.Ya.FP.5000	67.99728	75.31032	11.08	15	5.32	<i>Cld, Alc, Bet</i>	0.37	0.07
T.Ya.FP.5000	67.99728	75.31032	11.08	15	5.32	<i>Cld, Alc, Bet</i>	-0.07	0.02
T.Ya.FP.5000	67.99728	75.31032	11.08	15	5.32	<i>Cld, Alc, Bet</i>	0.12	0.05
T.Ya.FP.5000	67.99728	75.31032	11.08	15	5.32	<i>Cld, Alc, Bet</i>	0.2	0.04
T.Ya.FP.5000	67.99728	75.31032	12.08	15	5.32	<i>Cld, Alc, Bet</i>	0.33	0.01
T.Ya.FP.5000	67.99728	75.31032	12.08	15	5.32	<i>Cld, Alc, Bet</i>	0.29	0.05
T.Ya.FP.5000	67.99728	75.31032	12.08	15	5.32	<i>Cld, Alc, Bet</i>	-0.10	0.02
T.Ya.FP.5000	67.99728	75.31032	12.08	15	5.32	<i>Cld, Alc, Bet</i>	0.29	0.08
T.Ya.FP.5000	67.99728	75.31032	12.08	15	5.32	<i>Cld, Alc, Bet</i>	0.13	0.11
T.Ya.FP.5000	67.99728	75.31032	12.08	15	5.32	<i>Cld, Alc, Bet</i>	0.32	0.05
T.Ya.FP.5000	67.99728	75.31032	12.08	15	5.32	<i>Cld, Alc, Bet</i>	0.23	0.13
T.Ya.FP.5000	67.99728	75.31032	12.08	15	5.32	<i>Cld, Alc, Bet</i>	0.69	0.23

**Примечания:** <sup>а)</sup> Положительные и отрицательные значения отражают ситуации, когда уровень болотных вод (УБВ) ниже и выше среднего уровня поверхности мха соответственно;

<sup>б)</sup> *Alc* – *Alectoria ochroleuca*; *Bet* – *Betula nana*; *Cld* - *Cladonia stellaris*; *Led* – *Ledum palustre*; *Rub* – *Rubus chamaemorus*.

## ЛИТЕРАТУРА

- 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. Статья доступна также по URL: <http://www.ugrasu.ru/international/unesco/publications/journal/documents/Sbornic.pdf> (дата обращения: 22.03.11).
- Глаголев М.В., Шнырев Н.А. 2007. Динамика летне-осенней эмиссии  $\text{CH}_4$  естественными болотами (на примере юга Томской области) // Вестник МГУ, сер. 17: Почвоведение. №1. С. 8-15.
- Глаголев М.В., Шнырев Н.А. 2008. Летне-осенняя эмиссия  $\text{CH}_4$  естественными болотами Томской области и возможности ее пространственно-временной экстраполяции // Вестник МГУ, сер. 17: Почвоведение. №2. С. 24-36.
- Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. 2010. Физикохимия и биология торфа. Методы измерения газообмена на границе почва/атмосфера. Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета. 77 с.
- Глаголев М.В., Смагин А.В. 2006. Количественная оценка эмиссии метана болотами: от почвенного профиля – до региона (к 15-летию исследований в Томской области) // Доклады по экологическому почвоведению. Вып. 3. №3. С. 75-114. URL: [http://jess.msu.ru/index.php?option=com\\_scibibliography&func=view&id=34&Itemid=121&catid=62](http://jess.msu.ru/index.php?option=com_scibibliography&func=view&id=34&Itemid=121&catid=62) (дата обращения 08.10.11).
- Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.С., Филиппов И.В., Максютлов Ш.Ш. 2010а. Эмиссия метана из болотных ландшафтов тундры Западной Сибири // Вестник ТГПУ. Вып. 3 (93). С. 78-86. Статья доступна также по URL: [http://vestnik.tspu.ru/files/PDF/articles/batuev\\_v\\_i\\_78\\_86\\_3\\_93\\_2010.pdf](http://vestnik.tspu.ru/files/PDF/articles/batuev_v_i_78_86_3_93_2010.pdf) (дата обращения: 29.07.2010).
- Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сирин А.А. 2008. Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрохимия. №5. С. 46-58.
- Клепцова И.Е., Глаголев М.В., Филиппов И.В., Максютлов Ш.Ш. 2010. Эмиссия метана с эвтрофных болот южной тайги Западной Сибири // Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове / Сборник материалов IV Всероссийской научной конференции с международным участием (1-5 сентября 2010 г.). Т. 2. / Под ред. С.П. Кулижского, Е.В. Каллас и С.В. Лойко. Томск: ТМЛ-Пресс. С. 81-84.
- Румицкий Л.З. 1971. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука. 192 с.
- Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Максютлов Ш.Ш. 2011. Эмиссия метана из болот тундры Западной Сибири: результаты наблюдений 2010 г. // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 2. № 1(3). Статья доступна также по URL: [http://www.ugrasu.ru/uploads/files/\\_Sabrecov\\_Glagolev\\_em.pdf](http://www.ugrasu.ru/uploads/files/_Sabrecov_Glagolev_em.pdf) (дата обращения: 22.10.11).
- Суворов Г.Г., Глаголев М.В. 2007. Продолжительность «периода эмиссии метана» // Болота и биосфера: Сборник материалов Шестой Научной Школы (10-14 сентября 2007 г.). Томск: Изд-во ФГУ «Томский ЦНТИ». С. 270-274.
- Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. 2004. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена. 342 с.
- Anisimov O.A. 2007. Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission // Environ. Res. Lett. V. 2. 045016. DOI:10.1088/1748-9326/2/4/045016
- Bartlett K.B., Harriss R.C. 1993. Review and assessment of methane emissions from wetlands // Chemosphere. V. 26, Nos. 1-4. P. 261-320.
- Cao M., Gregson G., Marshall S. 1998. Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change // Atmospheric environment. V. 32. No. 19. P. 3293-3299.
- Christensen T.R., Jonasson S., Callaghan T.V., Havstrom M. 1995. Spatial variation in high-latitude methane flux along a transect across Siberian European tundra environments // J. Geophys. Res. V. 100. No. D10. P 21035-21045.
- Christensen T.R., Prentice I.C., Kaplan J., Haxeltine A., Sitch S. 1996. Methane flux from northern wetlands and tundra: An ecosystem source modeling approach // Tellus B. V. 48. No. 5. P. 652-661.
- Dunfield P., Knowles R., Dumont R., Moore T.R. 1993. Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils response to temperature and pH // Soil Biol. Biochem. V. 25. P. 321-326.
- Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Filippov I.V., Kazantsev V.S., Machida T., Maksyutov S.S. 2010. Methane emissions from subtaiga mires of Western Siberia: the standard model Bc5 // Mosc. Univ. Soil Sci. Bull. V. 65. P. 86-93. DOI: 10.3103/S0147687410020067.
- Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov S., Machida T. 2011. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // Environ. Res. Lett. V. 6. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045214.
- Heikkinen J.E.P., Elsakov V., Martikainen P.J. 2002. Carbon dioxide and methane dynamics and annual carbon balance in tundra wetland in north east Europe, Russia // Global Biogeochem. Cycles. V. 16. № 4. 1115. DOI:10.1029/2002GB001930.
- Heikkinen J.E.P., Virtanen T., Huttunen J.T., Elsakov V., Martikainen P.J. 2004. Carbon balance in East European tundra // Global Biogeochem. Cycles. V. 18. GB1023. DOI:10.1029/2003GB002054.
- Heyer J., Berger U., Kuzin I.L., Yakovlev O.N. 2002. Methane emissions from different ecosystem structures of the subarctic tundra in Western Siberia during midsummer and during the thawing period // Tellus B. V. 54. No. 3. P. 231-249.
- IPCC 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Chapter 2: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. Intergovernmental Panel on Climate Change. P. 129-234.
- King J.Y., Reeburgh W.S., Regli S.K. 1998. Methane emission and transport by Arctic sedges in Alaska: Results of a vegetation removal experiment // J. Geophys. Res. V. 103. P. 29083-29092.
- Matthews E. 1983. Global vegetation and land use: new high-resolution data bases for climate studies // Journal of climate and applied meteorology. V. 22. P. 474-487.
- Mikaloff Fletcher S.E., Tans P.P., Bruhwiler L.M., Miller J.B., Heimann M. 2004.  $\text{CH}_4$  sources estimated from atmospheric observations of  $\text{CH}_4$  and  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  isotopic ratios: 1. Inverse modeling of source processes // Global Biogeochemical Cycles. Vol. 18. GB4004. DOI:10.1029/2004GB002223.
- Nakano T., Kuniyoshi S., Fukuda M. 2000. Temporal variation in methane emission from tundra wetlands in a permafrost area, northeastern Siberia // Atmospheric Environment. V. 34. P. 1205-1213.
- Nakayama T., Akiyama A. 1994. Measurement of Methane Flux in a Tundra Wetland, Mustakh Island in 1993 // Proceedings of the Second Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1993. Tsukuba: Isebu. P. 37-39.

Panikov N.S., Belyaev A.S., Semenov A.F., Zelenev V.V. 1993. Methane production and uptake in some terrestrial ecosystems of the former USSR // Biogeochemistry of global change – radiatively active trace gases / Ed. by R.S. Oremland. New York: Chapman and Hall. P. 221-244.

Panikov N.S., Sizova M.V., Zelenev V.V., Machov G.A., Naumov A.V., Gadzhiev I.M. 1995. Methane and carbon dioxide emission from several Vasyugan wetlands: spatial and temporal flux variations // Ecological Chemistry. V. 4. P. 13-23.

Peregon A., Maksyutov S., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N. 2008. Map-based inventory of wetland biomass and net primary production in western Siberia // J. Geophys. Res. V. 113. G011007. DOI:10.1029/2007JG000441.

Reeburgh W.S., King J.Y., Regli S.K., Kling G.W., Auerbach N.A., Walker D.A. 1998. A CH<sub>4</sub> emission estimate for the Kuparuk River basin, Alaska // J. Geophys. Res. V. 103. P. 29005-29013.

Sabrekov A.F., Kleptsova I.E., Glagolev M.V., Maksyutov S.S., Machida T. 2011. Methane emission from middle taiga oligotrophic hollows of Western Siberia // Вестник ТГПУ. Вып. 5 (107). С. 135-143. Статья доступна также по URL: [http://vestnik.tspu.ru/files/PDF/articles/sabrekov\\_a\\_f\\_135\\_143\\_5\\_107\\_2011.pdf](http://vestnik.tspu.ru/files/PDF/articles/sabrekov_a_f_135_143_5_107_2011.pdf) (дата обращения: 27.11.11).

Sachs T., Giebel M., Wille C., Kutzbach L., Boike, J. 2008. Methane Emission from Siberian Wet Polygonal Tundra on Multiple Spatial Scales: Vertical Flux Measurements by Closed Chambers and Eddy Covariance, Samoylov Island, Lena River Delta // Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost, June 29 - July 3, 2008, University of Alaska, Fairbanks, USA. P. 1149-1154.

## CONTRIBUTION OF PALSA TO METHANE EMISSION FROM WEST SIBERIAN TUNDRA WETLANDS

*Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Bashkin V.N., Barsukov P.A., Maksyutov S.S.*

Methane flux measurements using static chamber technique were carried out on a palsa site («Yamburg», 67.97° N, 75.4° E) in the south tundra subzone of West Siberia in August 2011. Despite the fact that palsa is the second most common type of wetland microlandscapes in West Siberian tundra, our knowledge about methane fluxes from this microlandscape is still very limited.

The mean methane flux value from West Siberian tundra palsas was  $0.13 \pm 0.29 \text{ mgC-CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ . Obtained results were used in the new version (Bc9) of the “standard model” for regional methane fluxes, developed by the authors. It was found that despite the large coverage in the tundra zone of Western Siberia, palsa emits only  $1.9 \text{ Gg C-CH}_4 \cdot \text{year}^{-1}$ , or 2% of the regional methane flux from tundra wetlands, estimated as  $0.1087 \text{ Tg C-CH}_4 \cdot \text{year}^{-1}$ , which in turn is about 4% of the total methane flux from West Siberian wetlands.

We compared CH<sub>4</sub> flux data from two most abundant microlandscapes, palsas and eutrophic hollows, with similar data obtained by other authors over the whole Eurasian tundra. Comparison showed that variations in methane emission rates within each microlandscape are insignificant and can be caused by the interannual variability and different ecological and climatic conditions. Evaluation of different variability types including spatial and temporal variability showed that the uncertainty of obtained fluxes is close to the theoretically expected rate.

**Key words:** methane emission, tundra, West Siberia, wetlands, palsa.

Поступила в редакцию: 07.10.2011  
Переработанный вариант: 01.12.2011