

СЕЗОННЫЕ ПОТОКИ МЕТАНА В ПОЙМЕННОМ БОЛОТЕ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ (СЕВЕРО-ВОСТОК ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ)

М.Д. Сивков, Е.Н. Патова

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Сыктывкар

E-mail: sivkov@ib.komisc.ru

Аннотация. Впервые проведен сравнительный анализ потоков метана в растительных сообществах пойменного болота среднетаежной подзоны Республики Коми. Дана оценка удельных потоков метана в разные сезоны года в зависимости от факторов среды. Установлено, что эмиссия метана определяется температурой торфа на глубине 20–30 см. Суммарная эмиссия метана в разных сообществах растений за вегетационный сезон составила 6.5–39.4 г CH_4 m^{-2} , в зимний период – 1.14–10.0 г CH_4 m^{-2} , что соответствовало 15.5–20.3 % годовых величин.

Ключевые слова: годовые и зимние эмиссии метана, пойменное болото, сфагновые сообщества, европейский Северо-Восток

Введение

В связи с проблемой климатических изменений актуальной задачей является оценка выделения парниковых газов различными природными ландшафтами. Метан – второй по значимости парниковый газ после диоксида углерода (Carbon ..., 2013). Один из основных источников метана в северных экосистемах – переувлажненные заболоченные комплексы, где в анаэробных условиях разложение органических веществ происходит с образованием метана. Если в типичных болотных ландшафтах Западной Сибири годовые потоки метана относительно хорошо изучены, то на севере европейской части такие сведения не многочисленны (Сезонные изменения ..., 1998; Глаголев, 2008, 2010). Для средней тайги европейского Северо-Востока получены сведения о потоках метана за ряд вегетационных периодов для олиго-мезотрофного болота (Мигловец, 2014; Ecosystem ..., 2016) и первые экспериментальные данные годового потока метана для осково-сфагновой ассоциации пойменного болота (Сивков, 2018). Более обобщающая информация по годовым потокам метана для переходных болот, широко распространенных в поймах рек и озер этой зоны, отсутствует, что определило необходимость проведения подробных исследований для оценки вклада CH_4 в баланс углерода пойменных болотных комплексов на европейском Севере.

Цель работы – анализ данных круглогодичных мониторинговых измерений потоков метана на пойменном болоте в подзоне средней тайги.

Материал и методы

Измерения потоков метана проводили на участке озерной сплавины пойменного/переходного болота с минеротрофным питанием. Болото формируется в прибрежной полосе старичного озера длиной около 1 км и шириной до 90 м (61°33'25.0" с.ш., 50°46'28" в.д.). Водный режим озера связан с гидрологическим режимом реки, водоем посте-

пенно зарастает, превращаясь в болото. В озерной котловине береговую зону занимают островки переходного болота шириной 5–50 м, на одном из которых (шириной до 50 м) проводили исследование. На экспериментальном участке мощность торфяной толщи в середине участка составляла около 1 м, которая уменьшалась в направлении уреза воды. Изотопный анализ торфа показал, что основная часть его залежи сформировалась примерно за 700 лет (неопубликованные данные авторов). Уровень болотных вод (УБВ) постоянно высок, лишь на некоторых участках он снижается в среднем на 15 см, поэтому основная масса торфяной толщи болота круглогодично находится ниже уровня болотной воды. Значения рН болотных вод за время наблюдений варьировали в диапазоне 4.40–4.80, рНвод торфа – 4.45–4.68. Растительный покров озерной сплавины сформирован сосудистыми растениями *Carex aquatilis* Wahlenb., *C. vesicaria* L., *Eriophorum polystachion* L., *E. vaginatum* L., *Menyanthes trifoliata* L., *Comarum palustre* L., *Equisetum fluviatile* L., *Oxycoccus palustris* Pers., *Alnus incana* (L.) Moench, *Betula pubescens* Ehrh., *Pinus sylvestris* L. В моховом покрове доминируют сфагны *Sphagnum angustifolium* (C.E.O. Jensen ex Russow) C.E.O. Jensen и *S. riparium* Angstr., с низким обилием отмечены *S. girgensohnii* Russow, *S. teres* (Schimp.) Angstr. и зеленый мох *Straminergon stramineum* (Dicks. ex Brid.) Hedenas.

В современной литературе эмиссию метана рассматривают как результирующую скоростей производства метана, переноса и потери посредством окисления (Strack, 2004; Глаголев, 2006 и др.), поэтому эмиссию мы оценивали как результирующую метаногенеза (образования метана), диффузионного переноса и метанотрофного окисления (утилизации метана), не вдаваясь в детали gross-продуцирования данного газа и его окисления. Круглогодичные систематические измерения эмиссии метана в микроландшафтах выполнены в 2014 г. методом закрытых камер (Crill,

1991; Oechel, 1994). За вегетационный сезон принимали период от схода снега на участках весной до установления устойчивого снежного покрова осенью. Измерения выполняли на четырех мониторинговых локальных участках, наиболее типичных для растительных сообществ исследованного болота и имеющих особенности по структуре растительности и локализации относительно уреза воды. Участок № 1 находится примерно в центре болота, растительность представлена только сфагновыми мхами, доминирует *S. angustifolium*. Участок № 2 занимает центральную часть болотного комплекса, наиболее обильны пушица и осоки, в нижнем ярусе – сфагновые мхи и клюква. Участок № 3 занимает промежуточное положение между центральной частью болота и участками, примыкающими к урезу воды. Здесь произрастают в основном осоки и хвощи, нижний ярус формируют сфагновые мхи и клюква. Участок № 4 – самый влажный, находится на периферии болота, отличается высоким уровнем болотных вод. Здесь растут крупные осоки, хвощ, вахта, нижний ярус сообществ формирует *S. riparium*.

На каждом участке установили по две металлические рамки размерами 40×40 см² с желобом для создания гидрозатвора. Измерения выполняли три раза за сутки с интервалом 3–5 суток летом и по одному разу в дневное время весной и осенью с интервалом 5–7 дней. Со специально оборудованных мостков пробы воздуха начинали отбирать спустя 3 мин после установки камеры на рамку. По истечении этого времени концентрация CH₄ в камере в любое время суток и на любом участке изменялась линейно благодаря высокопроизводительному вентилятору. Зимой с момента установления снежного покрова и до его схода измерения выполняли в периоды потеплений при внешней температуре не ниже –3...–5 °С, снег убирали заблаговременно, камеру размещали на заранее установленные в болото рамки. Максимальная глубина снежного покрова к концу зимнего периода измерений составляла до 80 см. Измерения начинали спустя 1 ч после уборки снега (Сивков, 2018).

Отбор проб выполняли в 20-миллилитровые трехкомпонентные шприцы Арехмед (Россия) четыре раза в течение 15 мин и спустя 3–8 ч в лабораторных условиях анализировали на содержание метана. Специальные измерения показали отсутствие изменений концентрации метана в применяемых нами шприцах в 12-часовом периоде. В течение года проведены измерения температуры воздуха в приземном слое с использованием станции микроклимата НОВО-021 (США), а также мохового покрова и торфа на глубинах 1, 5, 10, 20, 30, 40, 60 см от поверхности моховой дернины с применением автономных температурных логгеров DS-1922L (США).

В течение всего сезона после отбора газовых проб сразу же измеряли УБВ в предварительно установленных рядом с участками пластмассовых трубках диаметром 2 см. Измерения выполняли после оттаивания в них льда весной и вплоть до замерзания в них воды. За уровень болотных вод принимали модуль разницы между текущим и максимальным в сезоне значением УБВ, который наблюдали поздней осенью.

Измерения метана выполняли на газовом хроматографе Цвет-800 (Россия) с пламенно-ионизационным детектором. Использовали двухметровую стальную колонку с сорбентом Porapak N 80/100. Газ-носитель – гелий; расход гелия через колонку составлял 30 мл мин⁻¹, водорода – 40, воздуха – 300 мл мин⁻¹. Температура колонки – 50 °С. Для калибровки хроматографа использовали две стандартные смеси производства «Линде-Газ-Рус» (Россия) с концентрациями метана 5.0 и 17.5 ppm, имеющие абсолютную погрешность 4 %. Калибровку выполняли перед каждой серией измерений после двухчасового прогрева прибора.

Для оценки кислорода ниже УБВ проведены измерения его концентрации с помощью прибора HQ 30D (Hich, США) с погружаемым флуоресцентным датчиком растворенного кислорода LDO (Lange, Германия).

Статистический анализ

Удельные потоки метана рассчитывали по результатам измерений CH₄ в камере, используя линейную регрессию. В расчет принимали только регрессии с коэффициентами детерминации не ниже 0.999. Исходные данные для разных участков за вегетационный сезон составляли временные ряды из 17–30 значений и 6–8 результатов потоков метана в зимний сезон. Суточные значения удельных потоков рассчитывали как среднее из трех измерений за сутки. Сезонные удельные потоки метана за периоды без снега и со снегом рассчитывали аппроксимацией сезонных кривых эмиссии метана полиномиальной функцией. Определялись на степени аппроксимирующей функции, если использование более высокой степени не улучшало прогнозные свойства (по значению скорректированного R²) и аппроксимирующая функция показывала наименьшую сумму квадратов отклонений (разницы расчетных и экспериментальных значений). В таблицах и в тексте приведены средние и стандартные ошибки средних двух и более измерений. Все статистические анализы выполняли в программе Statistica 13.

Результаты

Температурный режим торфа. Как показали сезонные наблюдения, рост температуры аэробного слоя 0–15 см мохового покрова, следуя за температурой внешнего воздуха, завершился в се-

редине июля, в торфяном слое ниже уровня болотных вод 20–60 см – к середине августа (рис. 1). Со второй половины августа в слоях ниже 5 см от поверхности болота суточные температурные колебания были незначительными. Результаты измерений температуры в разных слоях мохового покрова показывают, что даже при существенной суточной амплитуде температуры воздуха (около 18 °С) колебания температуры торфа более или менее выражены в 10-сантиметровом аэробном слое, в нижележащих слоях на глубине более 20 см их практически не наблюдали (рис. 2).

Сезонная эмиссия метана в разных сообществах растений. На рис. 3 представлен типичный ход эмиссии метана в годичной шкале на примере участка № 3, а также сезонной температуры торфяной залежи на глубине 30 см от поверхности и уровня стояния болотной воды относительно его максимального уровня в году. Как на участке № 3, так и на других участках динамические кривые сезонной эмиссии метана представляют собой одновершинные кривые с оптимальными значениями в июле. Они полностью согласуются с сезонными температурами торфяной залежи на глубинах 30 см для участков № 1–3 и 20 см для участка № 4 от ее поверхности ($R > 0.92$), в отличие от температур в других слоях напочвенного покрова и торфа. В табл. 1 приведены результаты измерений удельных потоков метана на экспериментальных участках и эмиссий за вегетационный сезон и зимний период. Максимальный удельный поток метана $13.19 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ наблюдали на участке № 4. Средняя величина $12.33 \pm 0.35 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ удельного потока в июле на этом участке достоверно выше ($p < 0.000$), чем на других участках.

Самый низкий показатель потока метана $2.81 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ выявлен на участке № 1 с единичными побегами осок, средняя величина эмиссии $1.94 \pm 0.20 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ достоверно ниже ($p < 0.0000$) относительно других участков. Различия средних значений эмиссий метана на участках № 2 и 3 существенно не отличались ($p = 0.145$).

За вегетационный период максимальный уровень удельного потока метана $39.4 \text{ г CH}_4 \text{ м}^{-2}$ зарегистрирован на участке № 4, зимняя эмиссия метана здесь также была максимальной. На удаленных от уреза воды участках № 2 и 3 при прочих равных показателях среды наблюдали не столь высокие уровни эмис-

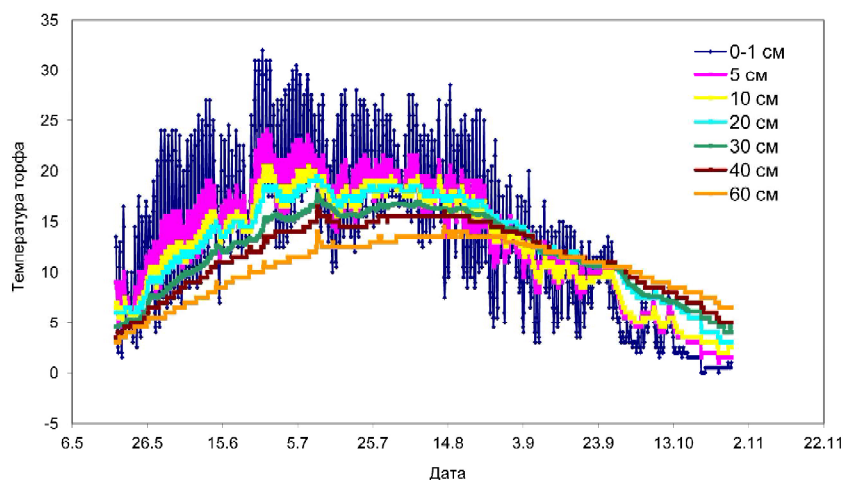


Рис. 1. Температурный режим торфяной залежи на глубине от 1 до 60 см за бесснежный период (на примере участка № 3).

сии метана – 23.6 и 27.5 г $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2}$ соответственно. Самые низкие величины выделения метана – 6.5 и 1.14 г $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2}$ – в вегетационном и зимнем периодах отмечены на участке № 1.

Зависимость эмиссии метана от температуры в сезонной динамике. Анализ экспериментальных данных показал, что лучше всего удельные потоки метана в сезонном интервале времени были согласованы с изменениями температуры торфа на глубине 30 см на участках № 1–3 и 20 см на участке № 4, а функционально кривую зависимости эмиссии от температуры описывала экспоненциальная функция (рис. 4).

Нелинейные регрессии (модели) приведены в табл. 2. При достаточной частоте наблюдений в разные периоды года показатели нелинейных связей (коэффициенты детерминации R^2) эмиссии с температурным фактором высокие (0.92–0.97), а все коэффициенты в моделях статистически значимые.

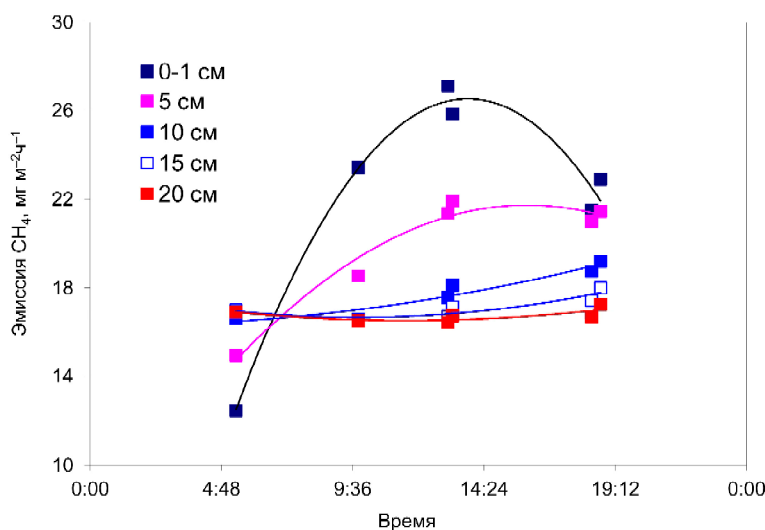


Рис. 2. Суточный ход температуры в разных слоях напочвенного покрова и торфяной залежи в момент измерения потока метана в июле (на примере участка № 3). По оси абсцисс – часы в сутках, по оси ординат – температура, °С.

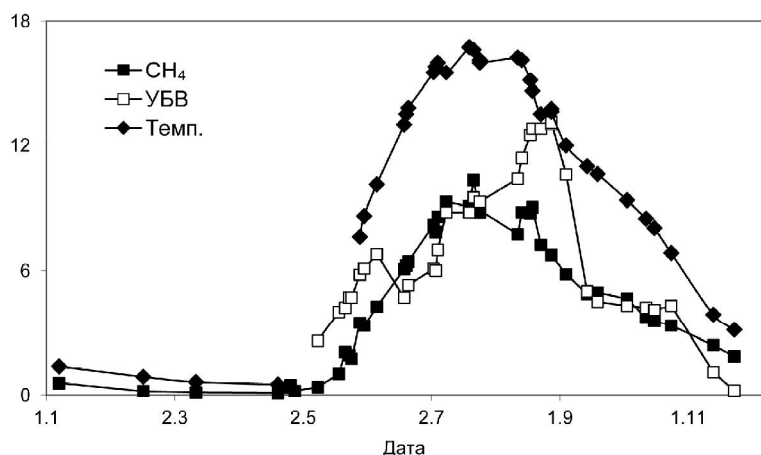


Рис. 3. Сезонный ход эмиссии метана, уровня болотных вод и температуры на участке № 3. CH_4 – удельный поток метана, $\text{мг м}^{-2}\text{ч}^{-1}$; УБВ – уровень болотной воды, см; Темп. – температура торфа ($^{\circ}\text{C}$) на глубине 30 см. Точки соответствуют средним за сутки измерениям эмиссии метана ($n=2-6$).

Полученные модели объясняют 92–97 % вариаций удельных потоков метана в зависимости от температуры в 20–30-сантиметровых горизонтах болота.

Кислород в болотной воде. Измерения показали полное отсутствие кислорода практически уже у самого УБВ. Лишь однажды после кратковременного ливневого дождя на участке № 2 наблюдали повышение кислорода до 3 мг л^{-1} , когда датчик был установлен на 2 см глубже УБВ, но уже спустя 4 ч кислород датчиком не регистрировался.

Обсуждение

На всех участках максимальные удельные потоки метана фиксировали в июле после достижения оптимальных значений температур в слоях торфа, расположенных ниже УБВ (табл. 1). Наиболее высокий уровень удельного потока метана зарегистрирован на участке № 4. Близость озерной воды, соответственно постоянно высокий

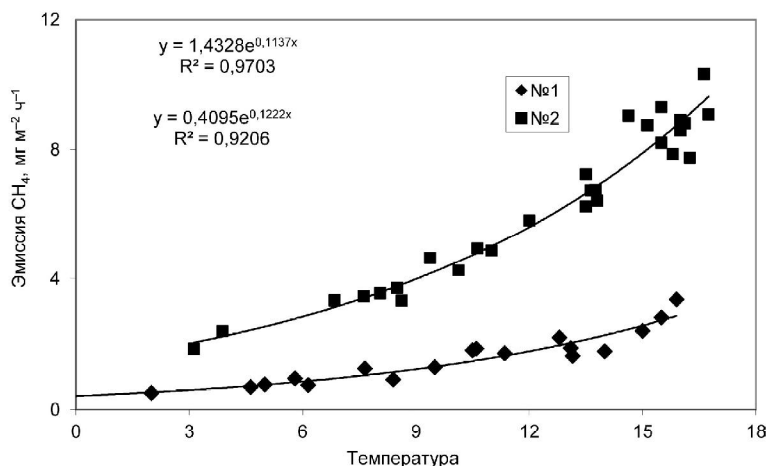


Рис. 4. Зависимости потоков метана ($\text{мг CH}_4\text{ м}^{-2}\text{ч}^{-1}$) от температуры на участках № 1 и 2. Точки на графиках представляют средние значения измерений ($n=2-3$).

УБВ, отсутствие кислорода в болотной воде, развитая биомасса сосудистых растений и сфагновых мхов создают на данном участке благоприятный режим для метаногенеза и обеспечивают вынос CH_4 с меньшими потерями в аэробном слое с окисляющими метан бактериями. Учитывая, что в среднем уровень болотных вод в течение сезона на основном массиве участка не был ниже 15 см от поверхности, можно с уверенностью отметить, что условия для метаногенеза на данном участке благоприятны уже в самых верхних уровнях торфяной толщи болотной сляпины. Из литературы известно, что метаногенная активность обнаруживается в болотных комплексах приблизительно на глубине 8 см от уровня стояния воды, глубже на 10–20 см достигает максимума, а потом падает экспоненциально (Глаголев, 2006). Если исходить из этих значений, то на исследованных участках основная метаногенная активность должна быть сосредоточена в слое торфа на глубине 25–40 см от поверхности болота.

Относительно низкие удельные потоки метана зарегистрированы на участке № 1, что при прочих равных условиях с участком № 2 по температурному режиму и УБВ обусловлено отсутствием здесь осок и других сосудистых растений. Известно, что различные виды растений в торфяниках могут оказывать сильное влияние на динамику выхода CH_4 в атмосферу (Као-Kniffin, 2010; Plant species ..., 2010; Bhullar, 2014). Экспериментально было показано различие потоков метана в опыте, где присутствовали сосудистые растения и в контроле без них (Глаголев, 1999). Выявлено, что травянистая растительность усиливает продукцию CH_4 , обеспечивая лабильный субстрат непосредственно в бескислородной зоне, где происходит образование метана (Saarnio, 1999; Strom, 2005). Многие сосудистые растения при разложении создают свежую и легко разлагающуюся подстилку, а их корневые экссудаты обеспечивают субстрат для микроорганизмов, осуществляющих метаногенез (Глаголев, 1999; Strom, 2005; Effect of plant ..., 2017). С другой стороны, сомкнутый моховой покров без сосудистых растений представляет большее препятствие для диффузии метана, удлиняя время его нахождения в аэробном слое.

Максимальная амплитуда суточных изменений эмиссии метана (30 %) проявлялась на участке № 1, где сосудистые растения отсутствуют, на других участках максимальные суточные колебания эмиссии находились в пределах

10–12 %. Отметим, что такие цифры зарегистрированы в периоды высоких суточных амплитуд температуры воздуха, достигающих 20 °С и более. Поэтому в эти периоды измерения метана проводили три раза за сутки – утром, днем и вечером, а в расчет принимали средние за сутки значения. С другой стороны, на участке № 4 с высоким уровнем УБВ суточной аритмии эмиссии метана не выявлено в течение всего сезона. Здесь суточная стабильность эмиссии метана предопределена стабильным температурным режимом в толще мохового покрова и торфа, а также высоким и стабильным УБВ в сезоне.

В летних измерениях, когда температуры торфа достигли максимальных величин, редко и только на участке № 1 наблюдали случайные выбросы метана, или так называемый «пузырьковый эффект». Возможно, такой эффект обусловлен высокой скоростью образования метана при повышенных температурах и невозможностью быстрого отведения его скоплений ввиду отсутствия здесь осок, способствующих выходу этого газа. К тому же есть сведения о том, что при повышенных температурах метанотрофы (микроорганизмы, утилизирующие метан) в аэробном слое торфа не в состоянии полностью компенсировать увеличение производства метана метаногенами (Temperature-induced ..., 2012).

В зимнее время на всех участках также отмечено выделение метана. Особенность температурного режима пойменного болота, отличающая его от других типов болот, в том, что зимой здесь промерзание верхнего слоя торфа происходит только к концу холодного периода, не каждый год и не на всех участках. Поэтому степень промерзания поверхности болота и, следовательно, скорость выделения метана зависят от суровости зимы и высоты снежного покрова. В морозные и малоснежные зимы промерзший верхний слой, по нашим наблюдениям, к концу февраля может достигать до 10–15 см. Он формируется из нескольких слоев льда, каждый из которых образуется при вытеснении воды из обводненных горизонтов торфа под давлением снега после обильных снегопадов. В таких условиях метан концентрируется подо льдом и по мере его таяния высвобождается в атмосферу. Вследствие этого реальный поток метана в зимнее время может быть на 2–4 % выше от измеренных величин (Сивков, 2018).

Из табл. 1 видно, что доля зимней эмиссии на участках составляла 15.5–20.3 % годовой и была максимальной на участке № 4. С учетом 2–4 % метана, сконцентрированного в подледном состоянии и по мере таяния льда высвобождающегося в атмосферу, максимальная эмиссия метана на

Таблица 1

Эмиссия метана и уровень болотных вод на исследованных участках

Номер участка	Показатель					
	CH ₄ макс	CH ₄ ср	CH ₄ вп	CH ₄ зп	ДЗЭ	ΔУБВ
1	2.81	1.94±0.20 (n=7)	6.5	1.14	15.5	12.9
2	10.00	9.76±0.20 (n=16)	23.6	5.65	19.3	13.4
3	13.84	10.49±0.58 (n=12)	27.5	6.49	19.1	14.4
4	13.19	12.33±0.35	39.4	10.01	20.3	4.6

Примечание. Максимальные эмиссии метана (CH₄макс) и среднемесячные показатели (CH₄ср) для исследованных участков (мг CH₄м⁻²ч⁻¹) в июле; потоки метана за вегетационный (CH₄вп) и зимний (CH₄зп) периоды (г CH₄м⁻²); ДЗЭ – доля зимней эмиссии от годовой, (%); ΔУБВ – максимальное снижение в УБВ в сезоне на каждом из участков, см. Представлены средние значения из n измерений ± стандартные ошибки средних.

исследованном болоте может составлять до 24 % годовой. Численные значения потоков метана для исследованного болота укладываются в диапазон показателей, полученных рядом исследователей, занимавшихся измерениями сезонных и годовых потоков метана камерным методом в других географических зонах. Например, в торфяниках Миннесоты на зимние потоки приходится до 21 % годового потока CH₄ (Dise, 1992), а в Нью-Гемпшире – только 4 % годовых выбросов CH₄ (Melloh, 1996). До 12 % годового объема CH₄ производят насыщенные почвы в обводненных болотах национального парка «Rocky Mountain», штат Колорадо (Winter fluxes ..., 1998). Для омботрофных болот Западной Сибири вклад в ежегодные зимние потоки метана варьировал от 3.5 до 11 % в зависимости от метода расчета (Panikov, 2000). В Финляндии в олиготрофных болотах средние значения выделения метана с сентября по май составили 8.0 г CH₄ м⁻², а в минеротрофных болотах – 19.0 г CH₄ м⁻² (Methane fluxes ..., 1998). Максимальные значения зимних эмиссий (23.8 % от годовых) отмечали на бугристых болотах штата Квебек (Канада) (Strack, 2004). Полученные нами зимние потоки CH₄ для пойменного болота близки к результатам для минеротрофных болот Финляндии, находящихся примерно на широте наших исследований, где зимняя эмиссия мета-

Таблица 2

Потенциальные модели регрессий эмиссий метана в зависимости от температуры торфяной залежи

Номер участка	Модель	R ²
1	0.410exp(0.122T ₃₀)	0.92
2	1.433exp(0.114T ₃₀)	0.97
3	1.315exp(0.127T ₃₀)	0.97
4	1.981exp(0.111T ₂₀)	0.95

Примечание. В столбцах: модель температурной зависимости эмиссии (мг CH₄ м⁻²ч⁻¹) на участке; T₂₀, T₃₀ – температура в 20- и 30-сантиметровом слоях от поверхности моховой дернины; R² – коэффициент детерминации.

на составляет 22 % от годовой (Winter CO₂ ..., 1999). Приведенные выше значения и наши результаты указывают на то, что зимние эмиссии метана составляют важную часть годовых бюджетов этого газа и их следует учитывать в годовых балансах CH₄.

Заключение

В результате исследований получены первые сведения о потоках метана в вегетационный и зимний сезоны, а также рассчитаны годовые потоки метана для переходного пойменного болота среднетаежной подзоны Республики Коми. В данном типе болот ввиду незначительных изменений в сезонной динамике уровня болотных вод доминирующим фактором для потоков метана является температурный режим торфяной толщи. Установлено, что пространственная вариабельность эмиссии метана обусловлена структурой растительных сообществ на исследованных участках и уровнем болотных вод, временная изменчивость – температурой торфяной залежи. Максимальная скорость эмиссии метана в сезонной динамике отмечена на участках с высоким уровнем болотных вод и высоким проективным покрытием осок, минимальная – на участках со сфагновым покровом при отсутствии осок.

Согласно имеющимся прогнозам, в текущем 100-летию в средних и высоких широтах будет продолжаться потепление и увлажнение климата. Известно, что функциональная активность у связанных со сфагновыми мхами микроорганизмов метанотрофов и метаногенов зависит от температуры и уровня болотных вод, поэтому можно предположить, что потепление и увеличение количества осадков могут привести к изменению скорости образования и эмиссии метана.

Полученные авторами результаты могут быть использованы при анализе сезонных потоков метана в других типах болот среднетаежной зоны и станут основой для дальнейших экспериментов для переходных/пойменных болот.

Авторы признательны сотрудникам Института биологии Коми НЦ УрО РАН к.б.н. Н.Н. Гончаровой за описание растительности болота и к.б.н. Т.П. Шубиной за определение сфагновых мхов.

Исследования выполнены при поддержке программы УрО РАН, проекта №18-4-4-5 «Эмиссионная составляющая углеродного цикла пойменных болот среднетаежной подзоны в условиях климатических изменений».

ЛИТЕРАТУРА

Глаголев, М. В. Аннотированный список литературных источников по результатам измерений потоков CH₄ и CO₂ из болот России / М. В. Глаголев // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. – 2010. – Т. 1, № 2. – С. 1–53. – doi: 10.17816/edgcc121

Глаголев, М. В. Болота в проблеме метана как парникового газа: что сделано и что предстоит сделать? /

М. В. Глаголев, Г. Г. Суворов // Доклады по экологическому почвоведению. – 2008. – Вып. 2, № 8. – С. 19–43.

Глаголев, М. В. Количественная оценка эмиссии метана болотами – от почвенного профиля до региона / М. В. Глаголев, А. В. Смагин // Доклады по экологическому почвоведению. – 2006. – Вып. 3, № 3. – С. 75–114.

Глаголев, М. В. Оценка переноса метана из почвы в атмосферу болотными растениями / М. В. Глаголев, С. А. Голышев, С. Ю. Фирсов // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования (Материалы конференции). – Москва : ГЕОС, 1999. – С. 177–180.

Мигловец, М. Н. Эмиссия метана в растительных сообществах мезо-олиготрофного болота средней тайги / М. Н. Мигловец, С. В. Загирова, О. А. Михайлов // Теоретическая и прикладная экология. – 2014. – № 1. – С. 93–98.

Сезонные изменения растворенного метана в вертикальном профиле болот Западнодвинской низины / А. А. Сирин, М. Нильсон, Д. Б. Шумов, Г. Гранберг, А. Г. Ковалев // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 361, № 2. – С. 280–283.

Сивков, М. Д. Потоки метана на переходном болоте среднетаежной подзоны Республики Коми: результаты трех лет наблюдений / М. Д. Сивков, Е. Н. Патова // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2018. – № 3 (35). – С. 34–45. – doi: 10.19110/1994-5655-2018-3-34-45

Bhullar, G. S. Influence of different plant species on methane emissions from soil in a restored Swiss wetland / G. S. Bhullar, P. J. Edwards, H. O. Venterink // PLoS One. – 2014. – N 9 (2). – P. 1–5. – doi: 10.1371/journal.pone.0089588

Carbon and Other Biogeochemical Cycles / P. Ciais, C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le, R. B. Myneni, S. Piao, P. Thornton // Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.). – Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2013. – P. 465–570.

Crill, P. M. Seasonal patterns of methane uptake and carbon dioxide release by a temperate woodland soil / P. M. Crill // Global Biogeochem. Cycles. – 1991. – N 5 (4). – P. 319–334. – doi: 10.1029/91GB02466

Dise, N. B. Winter fluxes of methane from Minnesota peatlands / N. B. Dise // Biogeochemistry. – 1992. – N 17 (2). – P. 71–83. – doi: 10.1007/BF00002641

Ecosystem of a mesooligotrophic peatland in northwestern Russia: development, structure and function / ed. S. Zagirova, J. Shneider. – Syktyvkar : IB Komi SC UB RAS, 2016. – 172 p.

Effect of plant functional type on methane dynamics in a restored minerotrophic peatland / M. Strack, K. Mwakanyamale, G. H. Fard, M. Bird, V. Berube, L. Rochefort // Plant and soil. – 2017. – N 410 (1–2). – P. 231–246. – doi: 10.1007/s11104-016-2999-6

Kao-Kniffin, J. Methane dynamics across wetland plant species / J. Kniffin, D. S. Freyre, T. C. Balsler // Aquatic Botany. – 2010. – N 93 (2). – P. 107–113. – doi: 10.1016/j.aquabot.2010.03.009

Melloh, R. A. Winter methane dynamics in a temperate peatland / R. A. Melloh, P. M. Crill // Global Biogeochem. Cycles. – 1996. – N 10 (2). – P. 247–254. – doi: 10.1029/96GB00365

Methane fluxes on boreal peatlands of different fertility and the effect of long-term experimental lowering of the water table on flux rates / H. Nykanen, J. Alm, J. Silvola, K. Tolonen, P. J. Martikainen // *Global Biogeochem. Cycles.* – 1998. – N 12 (1). – P. 53–69. – doi: 10.1029/97GB02732

Oechel, W. C. The effects of climate change on Arctic tundra ecosystems / W.C. Oechel, G. L. Vourlitis // *Trends Ecol. and Evol.* – 1994. – Vol. 9. – P. 324–329. – doi: 10.1016/0169-5347(94)90152-X

Panikov, N. S. Cold season CH₄ and CO₂ emission from boreal peat bogs (West Siberia): Winter fluxes and thaw activation dynamics / N. S. Panikov, S. N. Dedysh // *Global Biogeochemical Cycles.* – 2000. – N 14 (4). – P. 1071–1080. – doi: 10.1029/1999GB900097

Plant species from mesotrophic wetlands cause relatively high methane emissions from peat soil / A. Koelbener, L. Strom, P. J. Edwards, H. O. Venterink // *Plant and Soil.* – 2010. – Vol. 326 (1–2). – P. 147–158. – doi: 10.1007/s11104-009-9989-x

Saarnio, S. Effects of increased CO₂ and N on CH₄ efflux from a boreal mire: a growth chamber experiment / S. Saarnio, J. Silvola // *Oecologia.* – 1999. – N 19 (3). – P. 349–356. – doi: 10.1007/s00442000507

Strack, M. Effect of water table drawdown on northern peatland methane dynamics: Implications for climate change / M. Strack, J. M. Waddington, E. S. Tuittila // *Global biogeochemical cycles.* – 2004. – N 18 (4). – P. 1–7. – doi: 10.1029/2003GB002209

Strom, L. Species-specific effects of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from wetlands / L. Strom, M. Mastepanov, T. R. Christensen // *Biogeochemistry.* – 2005. – N 75 (1). – P. 65–82. – doi: 10.1007/s10533-004-6124-1

Temperature-induced increase in methane release from peat bogs: a mesocosm experiment / J. L. Van Winden, G.-J. Reichart, N. P. McNamara, A. Benthien, J. S. S. Damaste // *PLoS One.* – 2012. – N 7. – e39614. – doi: 10.1371/journal.pone.0039614

Winter CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands / J. Alm, S. Saarnio, H. Nykanen, J. Silvola, P. J. Martikainen // *Biogeochemistry.* – 1999. – N 44. – P. 163–186. – doi: 10.1007/BF00992977

Winter fluxes of CO₂ and CH₄ from subalpine soils in Rocky Mountain National Park, Colorado / M. A. Mast, K. P. Wickland, R. T. Striegl, D. W. Clow // *Global Biogeochemical Cycles.* – 1998. – N 12 (4). – P. 607–620. – doi: 10.1029/98GB02313

SEASONAL FLOWS OF METHANE IN THE FLOODPLAIN BOG OF THE MIDDLE TAIGA ZONE (NORTH–EAST EUROPEAN RUSSIA)

M.D. Sivkov, E.N. Patova

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar

Summary. A comparative analysis of methane flows was carried out for the first time in various vegetative communities of the floodplain bog located in the middle taiga zone 61°33'25.0" N, 50°46'28" E (Komi Republic, Russia). The vascular plant flora of the examined eutrophic floodplain swamp are represented by *Carex aquatilis*, *C. vesicaria*, *Eriophorum polystachion*, *E. vaginatum*, *Menyanthes trifoliata*, *Comarum palustre*, *Equisetum fluviatile*, *Oxycoccus quadripetalus*, *Alnus incana*, *Betula pubescens*, *Pinus sylvestris*. Moss cover is formed by different species from *Sphagnum* genus with *Sp. angustifolium* and *Sp. riparium* as the dominant one. The year-round measurements of the methane emissions were carried out in 2014 by «closed dark chambers» method. The methane fluxes were measured on a seasonal scale taking into account affecting environmental factors (air and peat temperature at different depths, the level of swamp waters). Studies had shown that the determining factor for methane missions was a temperature of 20–30 cm of peat layer. The methane emissions during the growing season ranged between 6.5–39.4 g CH₄ m⁻² and in the winter period – 1.14–10.0 g CH₄ m⁻². Winter methane flows accounted for 15.5–20.3 % of annual values. In future, obtained data can be used to estimate regional flows of methane from the transitional floodplain swamps in the European Northeast.

Key words: annual and winter methane emissions, floodplain swamp, sphagnum communities, European Northeast