

Оценка потоков метана в экосистеме крупнобугристого болота подзоны крайнесеверной тайги на европейском Северо-Востоке России (по результатам двух методов измерений)

С. В. ЗАГИРОВА¹, М. Н. МИГЛОВЕЦ¹, С. В. ЯКУБЕНКО²

¹Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28
E-mail: zagirova@ib.komisc.ru

²Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина
167001, Сыктывкар, Октябрьский просп., 55

Статья поступила 12.10.2022

После доработки 21.11.2022

Принята к печати 24.11.2022

АННОТАЦИЯ

В статье приведена оценка эмиссии метана в экосистеме крупнобугристого болота на европейском Северо-Востоке России на основании результатов измерений методом статических камер и микровихревых пульсаций в период вегетации. Основной вклад в экосистемный поток вносят мочажины, скорость эмиссии метана за сезон на этих элементах рельефа составила в среднем 5,7 мг/(м²·ч) и контролировалась температурой почвы и уровнем грунтовых вод. Скорость эмиссии метана с поверхности гряд и торфяного бугра была заметно ниже и составляла 0,85 и 0,28 мг/(м²·ч) соответственно. На торфяном бугре поступление метана в атмосферу зависело от мощности, температуры и влажности активного слоя торфа. Кумулятивный экосистемный поток метана в мае – сентябре, полученный на основании результатов измерений методом камер и микровихревых пульсаций, соответствовал 9,5 и 11,4 г/м².

Ключевые слова: крупнобугристое болото, крайнесеверная тайга, метан, эмиссия, метод статических камер, метод микровихревых пульсаций.

ВВЕДЕНИЕ

Болота и заболоченные земли на территории России занимают 369,1 млн га, значительная часть которых распространена в области многолетней мерзлоты [Вомперский и др., 1999]. Из болот Северного полушария в атмосферу поступает 12 % глобальной эмиссии метана [Gorham, 1991]. В болотных экосисте-

мах, подстилаемых многолетней мерзлотой, сезонный ход эмиссии контролируется температурой почвы [Christensen et al., 2012; Yu et al., 2013; Rinne et al., 2018], глубиной сезонно-талого слоя [Yu et al., 2017] и не зависит от уровня болотных вод [Hartley et al., 2015]. С потеплением климата в текущем столетии в Северной Евразии прогнозируют уве-

личение поступления метана в атмосферу до 0,06 Тг CH_4 /год [Zhu et al., 2011], что связывают с повышением активности метаногенных архей, обитающих в многолетнемерзлых грунтах. Поток метана на крупнобугристом болоте Северной Европы на разных элементах рельефа может варьировать от $-0,9$ до $42 \text{ мг } \text{C-CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ [Malhotra, Roulet, 2015]; поглощение метана из атмосферы обеспечивают метанокисляющие микроорганизмы. В тундровой зоне Западной Сибири суммарная эмиссия метана с поверхности мерзлотных бугров составила $1,9 \text{ кт } \text{C-CH}_4/\text{год}$, что соответствовало 1 % от суммарной эмиссии всех болот этого региона [Сабреков и др., 2011].

По региональной классификации растительности крупнобугристые болота относятся к группе европейско-западносибирских травяно-лишайниково-моховых болот [Растительность..., 1980]. Крупные бугры (до 4 м высотой) занимают небольшую площадь болотного массива и подстилаются многолетнемерзлыми породами. Известно, что криогенные (мерзлотные) экосистемы характеризуются низкой продуктивностью и замедленным биологическим круговоротом веществ, при этом они наиболее чувствительны к климатическим изменениям. В последнее десятилетие наблюдают повышение температуры почвогрунтов криолитозоны на европейском Севере [Каверин, Пастухов, 2018], что в будущем может изменить баланс потоков углерода в криогенных экосистемах.

Цель данной работы – оценить эмиссию метана в теплый период года на крупнобугристом болоте европейского Северо-Востока России по результатам измерений методом статических камер и микровихревых пульсаций. Основные задачи исследований: 1) выявить суточный и сезонный ход потока метана с поверхности болота в атмосферу; 2) установить факторы, контролирующие эмиссию; 3) оценить экосистемный поток метана с поверхности крупнобугристого болота в атмосферу по результатам использования двух методов измерений. Крупнобугристое болото является удобной моделью для изучения влияния изменения климата на экосистемы криолитозоны, результаты исследований могут быть использованы для верификации региональных или глобальных прогнозных климатических моделей.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в мае – сентябре 2016 г. на крупнобугристом болоте в подзоне крайнесеверной тайги на европейском Северо-Востоке России (Республика Коми, Интинский район, $65^\circ 55'$ с. ш., $60^\circ 26'$ в. д.). Бугры и мочажины этих болот существенно различаются по летнему и зимнему температурному режиму. Согласно исследованиям [Каверин, Пастухов, 2018] многолетняя мерзлота отмечается только в торфяных буграх, в мочажинах она не обнаружена. Дренажные почвы торфяных бугров характеризуются более сильным охлаждением зимой и меньшим прогреванием летом, чем почвогрунты мочажин. В мочажинах в зимний период из-за мощного снежного покрова промерзает только поверхность почвы, где фиксируются отрицательные околонулевые температуры.

Для выделения основных элементов ландшафта крупнобугристого болота использовали космоснимки, произведенные спутником GeoEye-1, в натуральных цветах от 22 июля 2020 г. Пространственное разрешение снимков составило менее 1 м на пиксель, что позволило использовать их для крупномасштабного картографирования. Дешифрирование и построение карты ландшафта выполнены в программе QGIS2.18. Процесс обрисовки контуров по видимым границам элементов ландшафта проводился путем создания полигонов в векторном shape-файле с последующим вычислением их площади. Радиус покрытия пространства измерениями пульсационным методом на исследуемом болоте (“футпринт”) соответствовал 125 м (см. ниже). На этом участке крупнобугристого болота площадью 4,9 га мерзлотные торфяные бугры и грядово-мочажинный комплекс занимают примерно равную площадь (табл. 1, рис. 1). Ручей пересекает болото в направлении юго-запад – северо-восток. Средняя мощность торфа на буграх составляет 3,5 м, толщина сезонно-талого слоя в середине сентября достигает 85 см.

Детальное описание растительного покрова болота представлено в работе [Мигловец и др., 2021]. На мерзлых торфяных буграх формируются лишайниковые, кустарничко-лишайниковые фитоценозы с доминированием *Ledum palustre* L., *Vaccinium uliginosum* L., *Betula nana* L., *Empetrum hermaphroditum* Hagerup., в мохово-лишайниковом

Т а б л и ц а 1

Характеристика элементов ландшафта крупнобугристого болота в радиусе проведения измерений потоков CH_4 пульсационным методом

Элемент рельефа	Площадь, га	Микроландшафт	Условное обозначение	Площадь, %
Торфяной бугор	2,46	Торфяное пятно без растений ($n = 3$)	ТП	4,9
		Лишайниковое и кустарничково-лишайниковое сообщества ($n = 2 + 3$)	ЛС	45,2
Грядово-мочажинный комплекс	2,37	Травянисто-сфагновая мочажина ($n = 3$)	М	36,2
		Кустарничково-морозково-сфагновая гряда ($n = 3$)	Г	12,0
Ручей	0,08	Открытое водное пространство без растений ($n=2$)		1,6
Всего	4,91			100

П р и м е ч а н и е. n – количество тестовых площадок для измерений методом статических камер.

ярусе преобладают лишайники *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot., *C. coccifera* (L.) Willd., *C. gracilis* (L.) Willd., *C. rangiferina* (L.) F. H. Wigg. (табл. 1). На вершине бугров отмечаются торфяные пятна без растений. На грядах доминируют *Ledum palustre* L., *Vaccinium uliginosum* L., *Empetrum hermaphroditum*

Hagerup., *Rubus chamaemorus* L., *Sphagnum fuscum* (Schimp.) H. Klinggr., в мочажинах – *Eriophorum russeolum* Fries., *Carex limosa* L., *C. rotundata* Wahlenb. и мхи *Sphagnum lindbergii* Schimp., *S. riparium* Engstr.

Для измерений потока метана в атмосфере с поверхности торфяного бугра, гряд и мо-

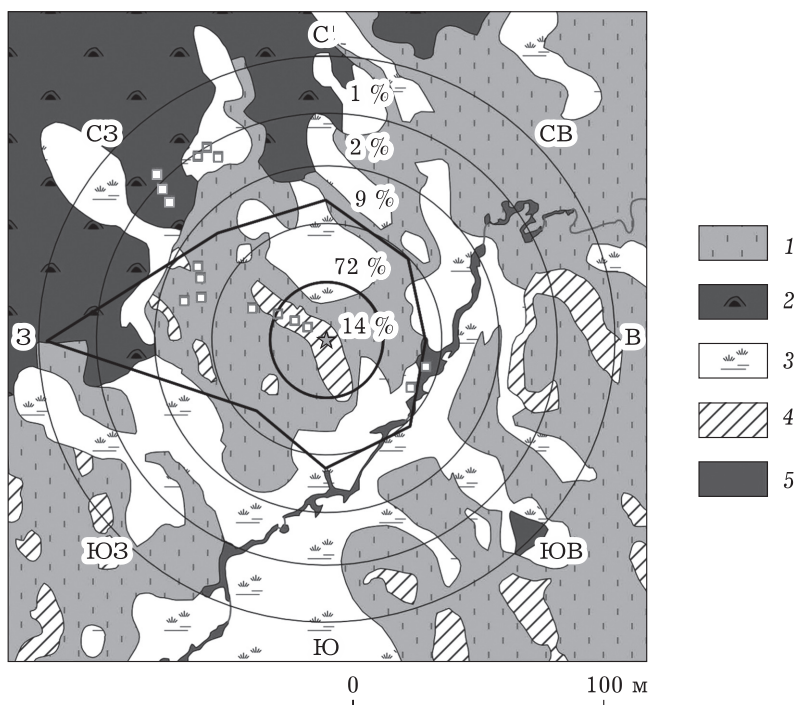


Рис. 1. Карта-схема рельефа крупнобугристого болота в радиусе действия измерительного комплекса. 1 – торфяной бугор; 2 – гряда; 3 – мочажина; 4 – торфяное пятно без растений на бугре; 5 – ручей. Кривой полигона изображена роза ветров. Проценты соответствуют суммарной доле потоков в радиусе измерений с шагом 25 м. Звездочкой указано положение метеорологического комплекса, квадратом – положение статических камер

чажин использовали темную металлическую камеру объемом $0,1 \text{ м}^3$, которую устанавливали на металлическую рамку ($0,25 \text{ м}^2$). При измерении потока с поверхности ручья камеру помещали на плавающее основание из пенополистирола. Концентрацию метана в камере определяли газоанализатором GGA-30p (Los Gatos Research, США), удельный поток метана рассчитывали с использованием модифицированного уравнения идеального газа [Мигловец и др., 2018]. Количество измерений для каждого элемента микроландшафта указано в табл. 1, экспозиция в каждом измерении составляла 20 мин.

Температуру торфяной залежи ($^{\circ}\text{C}$) регистрировали датчиками S-TMB-M006 с погрешностью $\pm 0,2^{\circ}$ (Onset, США), которые установлены на бугре под лишайниковым покровом (T_0) и на глубину 20 см (T_{20}), в мочажине — на глубинах 5 см (T_5) и 25 см (T_{25}). Для определения объемного содержания влаги в торфяной почве бугра (ОВ) использовали датчики S-SMC-M005 (погрешность $\pm 0,031 \text{ м}^3/\text{м}^3$). Температуру ($T_{\text{в}}$) и относительную влажность атмосферного воздуха (RH , %) измеряли датчиками S-TNB-M002 ($\pm 0,21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ / $\pm 2,5$ %). Глубину сезонно-талого слоя (СТС, см) определяли металлическим щупом. Уровень болотных вод в мочажине (УБВ, см) и давление атмосферного воздуха (P , гПа) фиксировали датчиками Baro/Diver фирмы Schlumberger Water Services (Нидерланды). Значения УБВ, регистрируемые датчиками, калибровали относительно ручных измерений, выполненных в течение сезона ($n = 6$).

Статистический анализ выполнен в среде Statistica 13 (StatSoft inc., США) при заданном уровне достоверности 95 %. Параметры для последующего регрессионного и дисперсионного анализа отбирали с использованием коэффициента корреляции Пирсона. По результатам множественной пошаговой регрессии при заданном уровне вхождения параметра ($F = 1$) построены уравнения, описывающие сезонный ход эмиссии метана на каждом микроландшафте болота. Качество модели оценивали с помощью пакета ANOVA. Кумулятивный поток метана с поверхности исследованного участка рассчитывали как интеграл суточных значений, восстановленных по регрессионному уравнению, с шагом одни сутки. Экстраполяцию результатов камерных измерений для

оценки экосистемного потока метана проводили с учетом средних суточных значений для всех элементов болотного ландшафта.

Для измерений экосистемного потока метана (F_{CH_4}) на крупнобугристом болоте использовали метод микровихревых пульсаций [Baldocchi, 2003]. Система включала акустический анемометр для измерения скорости ветра в трех проекциях (Gill WindMaster Gill Instruments Ltd., Великобритания) и метановый газоанализатор (Li-7700, Li-Cor Inc., США), установленные на высоте 3,23 м от поверхности торфяного бугра. Электропитание поступало от газового генератора, установленного в 700 м на северо-запад от измерительной системы.

Микрометеорологические параметры регистрировали автоматической метеостанцией с использованием микрологгера CR3000 (Campbell Scientific Inc., США). Поток F_{CH_4} измеряли с частотой 10 Гц, их математическую и статистическую обработку производили в программе EddyPro (Li-Cor Inc., США). Средние значения и вариабельность потоков CH_4 рассчитаны за 30-минутные измерения. Качество полученных средних значений оценивали с учетом стабильности атмосферных условий, выражающееся в отношении показателя шероховатости подстилающей поверхности Монина – Обухова (z/L) и футпринта ($d_{\text{fetch}70}$) к динамической скорости ветра (u^*) в момент измерения. При очень стабильных ($z/L > 1$) и очень нестабильных ($z/L < -5$) условиях атмосферы наблюдали критическое значение $u^* < 0,15 \text{ м/с}$. Чаще всего это происходило в ночной период при низкой турбулентности в приземном слое атмосферы, поэтому такие данные исключали из дальнейшей обработки. Радиус покрытия измерениями пространства на исследуемом болоте (“футпринт”) в 95 % случаев составил 75 м, 100 % детектируемых воздушных потоков приходилось на радиус 125 м. В статистическом анализе использовано 3450 значений 30-минутных измерений (63 % от всего набора первичных данных), полученных с 20 мая по 18 августа 2016 г. Статистический анализ проводили в среде Statistica 13 (StatSoft inc., США) при заданном уровне достоверности 95 %. В результате пошагового регрессионного анализа получено уравнение зависимости потока метана от экологических факторов, которое использовали

для заполнения длительных по времени пропусков в измерениях и восстановления сезонного хода эмиссии. Кумулятивный поток метана с 1 мая по 30 сентября рассчитан по сумме суточных эмиссий.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Погодные условия. В районе исследований отмечена необычно теплая погода в бесснежный период 2016 г. Среднемесячные значения температуры воздуха в мае–сентябре превышали среднегодовые на 3–5 °C (табл. 2). Сумма осадков в мае–августе составила 243 мм, недобор осадков отмечен в мае и июле. В теплый период года в районе исследования преобладал ветер западного направления (см. рис. 1).

Весенний переход к положительным температурам в дневное время суток отмечен в конце апреля, с этим связано начало схода снежного покрова на буграх. Лед в межбугорных понижениях сохранялся до середины мая. Верхний горизонт торфяной залежи на буграх начал оттаивать в первой декаде мая, в последующем температура почвы следовала за изменением температуры приземной атмосферы (рис. 2). В понижениях температура активного слоя торфа повышалась в июле до 17 °C. Нестабильность температуры воздуха сохранялась в течение всего периода наблюдений, снижение температуры воздуха и почвы отмечено при выпадении обильных осадков (9–16.06, 20.07–3.08, 20.08–1.09). Минимальный уровень болотных вод в мочажине отмечен в июле (–35 см), в конце августа повысился до –10 см.

Пространственная вариабельность потоков CH₄ на крупнобугристом болоте. Эмис-

сия метана на всех элементах рельефа болота отличалась сезонной динамикой. В мае поток с поверхности торфяного бугра и гряд различался незначительно, его медиана соответствовала 0,8–1,07 мг/(м²·ч) (рис. 3). На этих участках отмечено резкое снижение эмиссии в июне и незначительные изменения в июле–августе. Лишайниковые и кустарничково-лишайниковые сообщества на мерзлотном бугре в июне и августе характеризовались слабым стоком атмосферного метана.

Максимальная скорость потока метана в атмосферу отмечена с поверхности мочажин (см. рис. 3). В отличие от торфяного бугра и гряд, на обводненном участке болота эмиссия метана увеличивалась с мая по июль и снижалась в августе. Значения эмиссии достоверно не различались между открытой водной поверхностью (ручьем) и травяно-сфагновой мочажинной (*t*-тест, *p* = 0,17, *n* = 10), поэтому при статистическом анализе эти данные были объединены в одну выборку.

В соответствии с полученными значениями скорости эмиссии исследованные элементы ландшафта болота распределились в следующей последовательности: лишайниковые и кустарничково-лишайниковые сообщества на мерзлотном торфяном бугре → оголенные торфяные пятна → кустарничково-морошково-сфагновые гряды → пушицево-сфагновые мочажины и открытые водные пространства (их медианы соответствуют 0,24/0,28/0,85/5,7 мг/(м²·ч), включая майские результаты измерений). Среднее суммарное значение потока метана за сутки на бугре не превышало 6 мг/(м²·сут), на грядах и в мочажине – 20 и 137 мг/(м²·сут) соответственно.

Т а б л и ц а 2
Среднемесячная температура и сумма осадков в 2016 и 1995–2015 гг.*

Год	Месяц						Среднее
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
Температура воздуха, °С							
2016	0,6	5,3	12,8	19,8	15,2	9,2	10,5
1995–2015	-5,4	2,1	10,4	14,5	10,8	5,6	6,3
Осадки, мм							
2016	46	32	96	29	86	48	56,1
1995–2015	33	44	56	64	72	59	54,7

* Использованы данные температуры и осадков для ближайшей метеостанции Петрунь (<https://rp5.ru>).

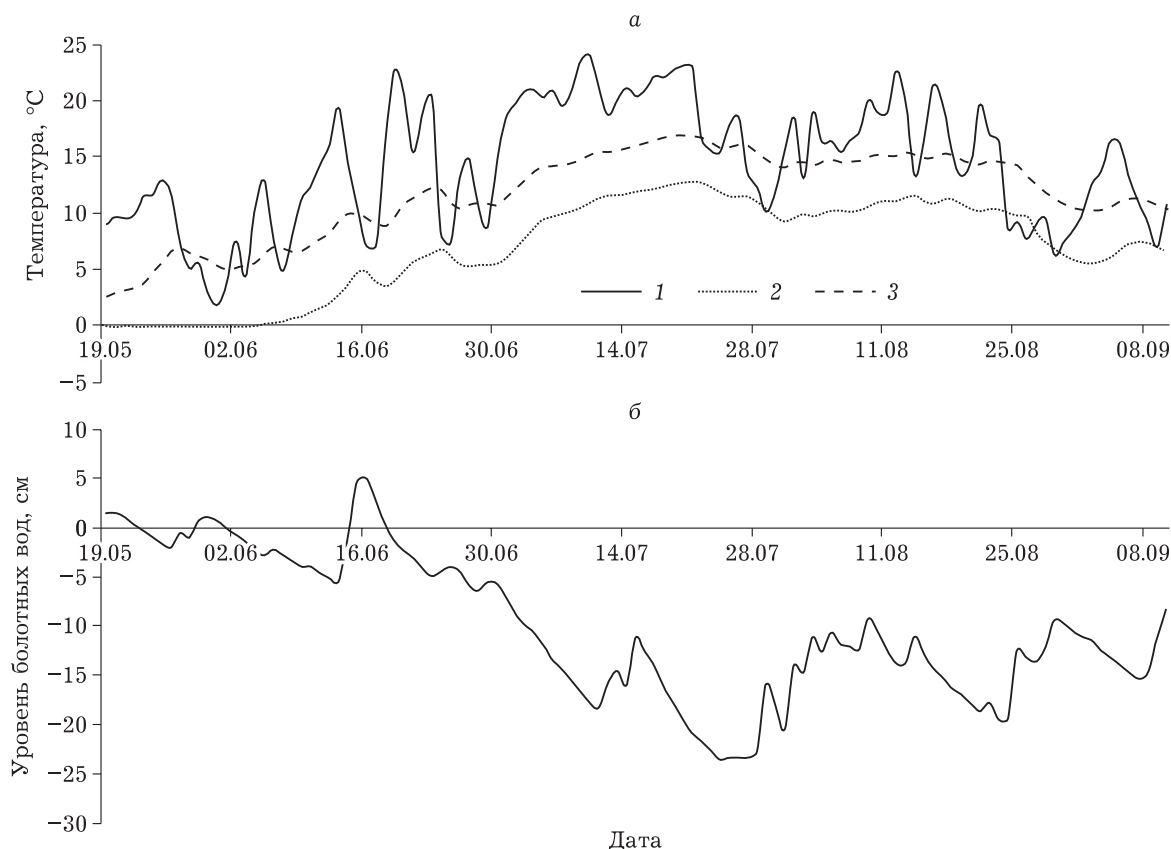


Рис. 2. Сезонный ход среднесуточной температуры (а) и уровня болотных вод (б) на крупнобугристом болоте. 1 – температура воздуха на высоте 3,23 м; 2 – температура торфяной почвы на бугре (глубина 20 см); 3 – температура торфяной почвы в мочажине (глубина 25 см)

В результате статистического анализа установлено, что поток метана с поверхности торфяных пятен и лишайниковых сообществ достоверно зависит от температуры и содержания влаги в активном слое почвы, а также глубины сезонно-талого слоя, однако в мае эти зависимости имеют положительный, а в июне–августе – отрицательный тренд (табл. 3).

В мочажинах эмиссия метана в течение всего периода наблюдений определялась температурой атмосферного воздуха ($r = 0,53$; $p = 0,02$) и уровнем болотных вод ($r = -0,68$; $p < 0,01$). Для гряд выявлена корреляция потока с температурой воздуха ($r = 0,58$; $p = 0,01$) и атмосферным давлением ($r = 0,45$; $p = 0,03$). Установленные предикторы использовали в регрессионных уравнениях для

Т а б л и ц а 3

Зависимость (r) скорости потока метана ($\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) с поверхности торфяных пятен (ТП) и лишайниковых сообществ (ЛС) мерзлотного бугра от температуры и увлажнения почвы

Месяц	T_0		T_{20}		$ОВ_3$		$ОВ_{15}$		СТС	
	ТП	ЛС	ТП	ЛС	ТП	ЛС	ТП	ЛС	ТП	ЛС
Май	0,46	0,43	0,60	0,14	0,70	-0,40	0,50	н/д	0,65	0,20
Июнь–август	-0,35	0,16	-0,47	-0,40	-0,38	0,37	0,25	н/д	-0,39	-0,58

П р и м е ч а н и е. T_0 – температура поверхности торфяного бугра, °С; T_{20} – температура активного горизонта почвы (глубина 20 см), °С; $ОВ_3$, $ОВ_{15}$ – объемное содержание влаги в почве на глубинах 3 и 20 см, $\text{м}^3/\text{м}^3$; СТС – глубина сезонно-талого слоя, см. Полужирным выделены статистически значимые коэффициенты при $p < 0,05$. н/д – нет данных.

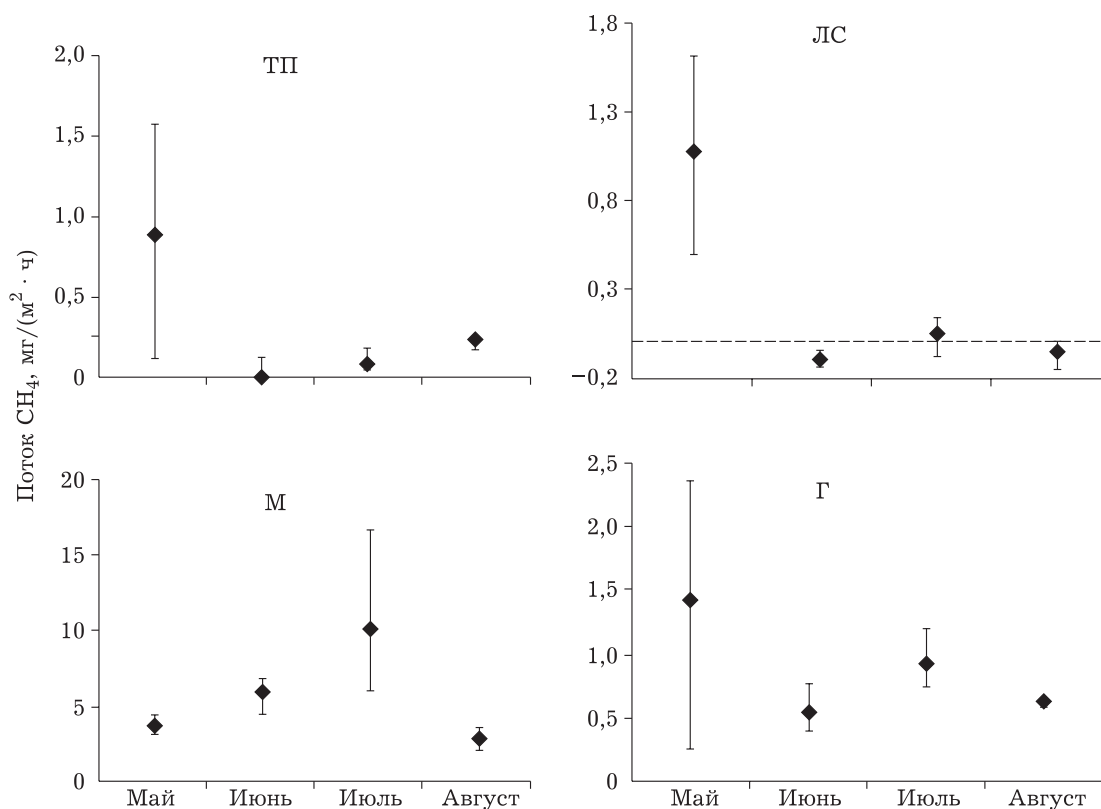


Рис. 3. Сезонный ход скорости эмиссии метана в трех основных типах микроландшафта на крупнобугристом болоте (ТП – торфяное пятно, ЛС – лишайниковое и кустарничково-лишайниковое сообщества мерзлотного бугра, М – мочажина, Г – кустарничково-морошково-сфагновая гряда). Точка соответствует медиане потока за месяц, отрицательная планка погрешности – I квартиль, положительная – III

моделирования сезонного хода эмиссии метана на выделенных элементах болотного ландшафта (табл. 4).

Суточная и сезонная вариабельность экосистемного потока CH_4 на крупнобугристом

болоте. По данным измерений методом микровихревых пульсаций суточная динамика экосистемного потока метана выражена слабо. В ночное время и ранним утром при низкой турбулентности и инверсии температуры

Т а б л и ц а 4
Регрессионные уравнения зависимости среднесуточного потока метана ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{ч})$) от экологических факторов на крупнобугристом болоте

Микроландшафт*	Период	Модель	Ошибка, %***	$R^2/F/n$
ТП + ЛС	Май	$F_{\text{CH}_4} = 0,002 \cdot (\text{СТС})^2 - 0,001 \cdot (T_0)^2$	67	0,68/33/20
ТП	Июнь – сентябрь	$0,35 + 0,001 \cdot (\text{СТС}) - 0,007 \cdot (T_{20}) - 1,26 \cdot (\text{ОВ}_3)$	65	0,56/6/18
ЛС	Июнь – сентябрь	$0,25 - 0,05 \cdot (\text{СТС}) + 0,026 \cdot (T_{20}) - 0,43 \cdot (\text{ОВ}_3)$	22	0,65/9/21
М	Май** – сентябрь	$0,0086 \cdot (T_{\text{в}})^2 - 0,001 \cdot (\text{УБВ})^3$	55	0,82/51/22
Г	Май** – сентябрь	$0,89 / (T_{\text{в}}) + 0,038 \cdot \ln(P)$	42	0,79/52/21

П р и м е ч а н и е. $T_{\text{в}}$ – температура воздуха на высоте 3,34 м, °C; T_0 – температура поверхности торфяного бугра, °C; T_{20} – температура активного горизонта почвы бугра на глубине 20 см, °C; ОВ_3 – объемное содержание влаги в почве бугра на глубине 3 см, $\text{м}^3/\text{м}^3$; УБВ – уровень болотных вод, см; P – атмосферное давление, гПа; СТС – глубина сезонно-талого слоя на торфяном бугре, см. Уровень значимости коэффициентов уравнений $< 0,01$.

* Условные обозначения соответствуют табл. 1.

** В анализ включены данные с середины мая.

*** Указан процент ошибки оценки к среднему наблюдаемому значению.

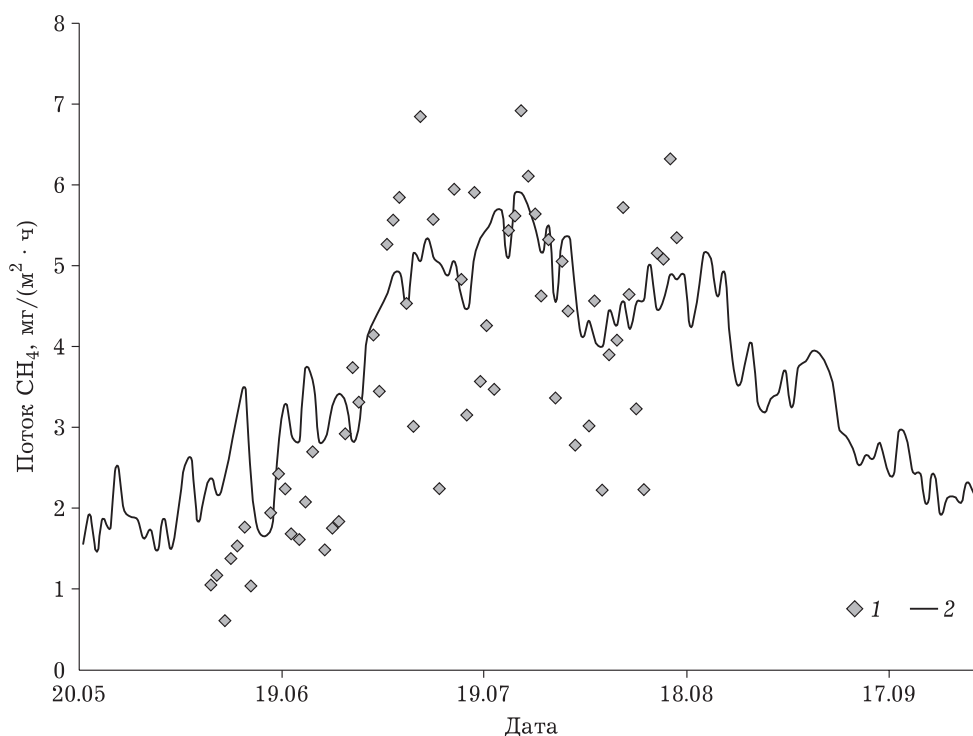


Рис. 4. Сезонный ход скорости экосистемного потока метана на крупнобугристом болоте по данным измерений методом микровихревых пульсаций. 1 – среднесуточные значения 30-минутных измерений; 2 – смоделированный поток с использованием регрессионного уравнения (см. табл. 5)

приземной атмосферы повышалась его вариабельность. Скорость экосистемного потока метана на крупнобугристом болоте в течение сезона менялась в пределах $0-7 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (рис. 4) и в среднем за сезон соответствовала $3,34 \pm 1,96 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Эмиссия метана повышалась с мая по июнь, достигала наибольших значений в июле и снижалась в августе. В течение сезона среднесуточное значение F_{CH_4} зависело от температуры почвы в межбугорных понижениях и УБВ ($R^2 = 0,66$ и $R^2 = 0,64$ соответственно при $p < 0,05$, $n = 75$), эти показатели использовали для заполнения пропусков и восстановления сезонного хода экосистемного потока метана на крупнобугристом болоте (табл. 5, см. рис. 4).

Оценка суммарного потока метана по данным двух методов измерений. Восстановление

временных рядов значений, полученных методом статических камер, показало разнонаправленность трендов потока метана на торфяных пятнах и в лишайниковых сообществах торфяного бугра, подстилаемого мерзлотой. В результате эмиссия метана с его поверхности в течение сезона приближалась к нулю и практически не влияла на значение суммарного экосистемного обмена. Эмиссия метана с поверхности гряд и мочажин за период наблюдений соответствовала $5,3 \pm 2,2$ и $13,9 \pm 7,6 \text{ г}/\text{м}^2$, среднее значение кумулятивного потока с мая по сентябрь для грядомочажинного комплекса составило $9,5 \text{ г}/\text{м}^2$ (рис. 5). Экстраполяция данных камерных измерений на поверхность болота в радиусе 125 м, с учетом площади каждого элемента микроландшафта, показала, что на мочажины

Т а б л и ц а 5

Регрессионное уравнение зависимости среднесуточного экосистемного потока метана ($\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) на крупнобугристом болоте от экологических факторов

Месяц	Модель	R^2	F	p
Май – сентябрь	$F_{\text{CH}_4} = 0,18 \cdot (T_{25}) - 0,068 \cdot (\text{УБВ})$	0,91	251	<0,000

П р и м е ч а н и е. T_{25} – температура почвы в мочажине на глубине 25 см, °С; УБВ – уровень болотных вод, см.

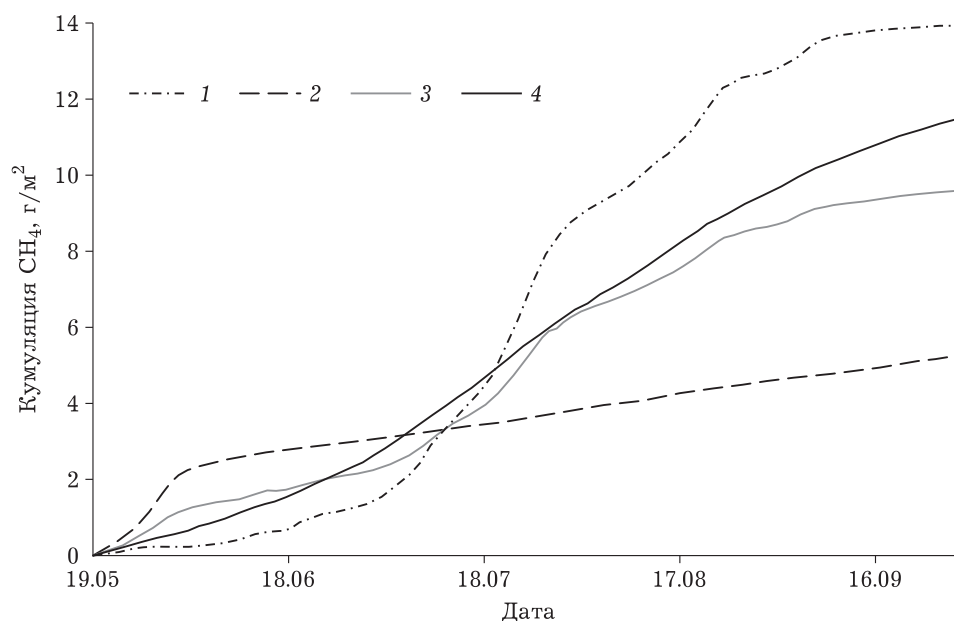


Рис. 5. Кумулятивный поток метана в атмосферу на крупнобугристом болоте по данным измерений методом статических камер (1–3) и микровихревых пульсаций (4). 1 – мочажина, 2 – гряда, 3 – средняя для мочажин и гряд

и ручьи приходится 89 %, на гряды – 11 % суммарного потока. По результатам измерений методом микровихревых пульсаций кумулятивный поток метана составил 11,4 г/м², что на 17 % больше значения, полученного на основании камерных измерений (см. рис. 5).

Таким образом, значения суммарного потока метана в теплый период года, полученные на основании результатов измерений двумя методами, вполне сопоставимы, незначительное расхождение нивелируется величиной ошибки выведенных регрессионных уравнений для разных элементов ландшафта крупнобугристого болота (см. табл. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ

Количественная оценка роли наземных экосистем в глобальном или региональном бюджете углерода предполагает использование результатов измерений, полученных разными методами. Достоинством камерного метода является возможность оценки пространственной вариабельности потоков парниковых газов [Bubier et al., 1995; Heikkinen et al., 2004; Schneider et al., 2016]. Метод микровихревых пульсаций (или микрометеорологический метод) позволяет проводить непрерывные долговременные измерения газообмена между экосис-

темой и приземной атмосферой [Christensen et al., 2012; Rinne et al., 2018]. Не так много публикаций посвящено сравнению результатов одновременного использования этих двух методов в исследованиях экосистемного обмена метана. В частности, на мерзлых болотах Тибетского плато скорость эмиссии метана при использовании статических камер и пульсационного метода различалась всего на 7,6 % [Yu et al., 2013]. По данным других авторов, сходимость результатов измерений этими методами может различаться по годам [Korrensalo et al., 2017].

Основным фактором сезонной динамики эмиссии метана в болотах, подстилаемых многолетней мерзлотой, является температура почвы, зависимость этого процесса от УБВ слабо выражена или отсутствует [Christensen et al., 2012; Yu et al., 2013; Rinne et al., 2018; Sun et al., 2018]. Согласно нашим наблюдениям, эмиссия метана с разных элементов крупнобугристого болота может контролироваться сочетанием нескольких факторов. Температура и УБВ объясняли 80 % вариабельности потока метана из межбугорных понижений, максимальная скорость эмиссии метана в мочажинах составила около 13,7 мг/(м²·ч). На торфяном бугре поступление метана в атмосферу зависело от мощности сезонно-та-

лого слоя торфяной залежи, температуры и влажности активного слоя торфа, что согласуется с исследованиями мерзлых болот в других регионах [Yu et al., 2017]. Присутствие многолетней мерзлоты ограничивало метаногенез и, соответственно, эмиссию метана, поэтому в летний период торфяные пятна были слабым его источником ($0,09 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$), а в лишайниковых и кустарничково-лишайниковых сообществах наблюдали незначительный сток, что могло быть результатом активности микроорганизмов-метанотрофов [Korrensalo et al., 2017]. По мнению некоторых авторов, всплеск потока метана в атмосферу, который наблюдается ранней весной, является результатом высвобождения газа, накопленного и замороженного в почвогрунтах в зимний период [Hargreaves et al., 2001; Nykänen et al., 2003; Wagner et al., 2003].

Согласно результатам исследования, на крупнобугристом болоте за сезон среднее значение суммарного потока метана с торфяного бугра не превышало $6 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, на грядах и мочажинах – 20 и $137 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ (что соответствует $4,5/15/103 \text{ мг C-CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$). Поток метана на разных элементах рельефа крупнобугристого болота Штордален на севере Швеции варьировал от $-0,9$ до $42 \text{ мг C-CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ [Malhotra, Roulet, 2015]. По результатам пульсационных измерений, среднесуточное значение F_{CH_4} составило $80 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ (или $60 \text{ мг C-CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$), что значительно выше данных, полученных для мерзлых болот других географических зон ($40 \text{ мг C-CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) [Łakomiec et al., 2021].

Вопрос о суточной динамике потока метана в болотных экосистемах остается дискуссионным. Некоторые авторы пик эмиссии наблюдали в дневные часы [Yu et al., 2013] или суточный цикл не выявили [Rinne et al., 2018]. По нашим наблюдениям (неопубликованные данные), скорость эмиссии метана на крупнобугристом болоте характеризовалась относительным постоянством в течение суток, усиление variability потока отмечено в ночные часы и ранним утром.

Кумулятивный поток метана в экосистеме крупнобугристого болота при экстраполяции результатов камерных измерений на разных элементах рельефа с 1 мая по 30 сентября (153 дня) составил $9,5 \text{ г}/\text{м}^2$. Основной объем выделенного метана приходился на мочажи-

ны (89 %), что согласуется с результатами исследований аапа болота на севере Скандинавии [Hartley et al., 2015]. Полученные значения эмиссии метана с поверхности травяно-сфагновых мочажин сопоставимы с данными исследований сходных сообществ плоскобугристых и крупнобугристых болот Финляндии и России [Nykänen et al., 2003; Heikkinen et al., 2004].

Кумулятивный экосистемный поток метана, смоделированный по результатам пульсационных измерений, за период с 1 мая по 30 сентября составил $11,4 \text{ г}/\text{м}^2$. Согласно некоторым авторам, оценка экосистемного обмена на основании результатов измерений этим методом и методом статических камер может различаться, причиной этого расхождения является зависимость футпринта от многих факторов, прежде всего направления и скорости ветра [Korrensalo et al., 2017]. В целом полученные значения суммарного потока метана по пульсационным измерениям почти в 2 раза ниже годовой суммы эмиссии на крупнобугристом болоте Швеции ($18\text{--}22 \text{ г CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$) [Christensen et al., 2012], но значительно больше, чем на мерзлых болотах Северного Китая ($0,38\text{--}1,27 \text{ г C-CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сезон})$) [Sun et al., 2018]; $0,71\text{--}1,52 \text{ г CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ [Yu et al., 2017]) и Аляски ($4,98 \text{ г CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сезон})$) [Euskirchen et al., 2014]. С поверхности крупнобугристого болота в атмосферу поступает в 2 раза меньше метана, чем с мезо-олиготрофного болота европейской тайги [Михайлов и др., 2015; Schneider et al., 2016], как результат более короткого вегетационного периода и низких температур почвы, сдерживающих продуцирование метана микроорганизмами. С усилением отепляющего влияния современных климатических сдвигов на состояние мерзлых почвогрунтов в криолитозоне можно ожидать изменение ландшафта и гидротермического режима крупнобугристого болота и, соответственно, баланса потоков парниковых газов между болотом и приземной атмосферой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка пространственной и временной variability потока метана на крупнобугристом болоте крайнесеверной тайги на европейском Северо-Востоке России выполнена на основании результатов измерений методом

статических камер и микровихревых пульсаций. Установлено, что основной вклад в экосистемный поток вносят мочажины, в которых не обнаружена мерзлота, средняя скорость потока за сезон на этих микроландшафтах составила 5,7 мг/(м²·ч). Скорость эмиссии метана с поверхности гряд и торфяного бугра заметно ниже и соответствовала 0,85 и 0,28 мг/(м²·ч). В межбугорных понижениях болота поток метана контролировался температурой почвы и уровнем грунтовых вод, максимальные его значения отмечены в июле. На подстилаемом мерзлотой бугре поступление метана в атмосферу зависело от мощности, температуры и влажности активного слоя торфа. Максимальные значения потока на данном элементе рельефа наблюдали в мае, что могло быть обусловлено высвобождением газа при оттаивании льда и почвогрунтов. Кумулятивный поток метана за сезон, рассчитанный на основании результатов камерного и пульсационного измерения, соответствовал 9,5 и 11,4 г/м². Основной вклад в суммарный поток метана с поверхности болота в атмосферу вносят мочажины. Незначительное различие оценок суммарной эмиссии, полученных на основании результатов использования двух методов, могло быть обусловлено влиянием направления и скорости ветра на экосистемный поток метана в пульсационных измерениях.

Авторы выражают благодарность научному сотруднику О. А. Михайлову за участие в сборе полевого материала, ведущему инженеру С. П. Швецову за техническое обслуживание измерительных систем.

Работа выполнена в рамках темы НИР “Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского Северо-Востока России” (№ рег. 122040100031-8).

ЛИТЕРАТУРА

- Вомперский С. Э., Цыганова О. П., Ковалёв А. Г., Глухова Т. В., Валяева Н. А. Заболоченность территории России как фактор связывания атмосферного углерода // *Круговорот углерода на территории России* / под ред. Г. А. Заварзина. М., 1999. С. 124–145.
- Каверин Д. А., Пастухов А. В. Температурное состояние почвогрунтов бугристо-мочажинных болот в зоне редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород (европейский Северо-Восток России) // *Криосфера Земли*. 2018. № 5. С. 47–56.
- Мигловец М. Н., Загирова С. В., Гончарова Н. Н., Михайлов О. А. Суммарная эмиссия метана на крупнобугристом болоте крайнесеверной тайги в теплый период года // *Вестн. Ин-та биологии Коми НЦ УрО РАН*. 2018. № 1 (203). С. 34–38. doi: 10.31140/j.vestnikib.2018.1(203).10
- Мигловец М. Н., Загирова С. В., Гончарова Н. Н., Михайлов О. А. Эмиссия метана с крупнобугристого болота на северо-востоке европейской части России // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 1. С. 93–102.
- Михайлов О. А., Мигловец М. Н., Загирова С. В. Вертикальные потоки метана на мезоолиготрофном болоте таежной зоны европейского Северо-Востока России // *Сиб. экол. журн.* 2015. Т. 22, № 3. С. 452–460.
- Растительность европейской части СССР. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1980. 429 с.
- Сабреков А. Ф., Глаголев М. В., Клепцова И. Е., Башкин В. Н., Барсуков П. А., Максютлов И. И. Вклад мерзлотных бугров в эмиссию метана из болот тундры Западной Сибири // *Динамика окружающей среды и глобальное изменение климата*. 2011. Т. 2, № 2. С. 1–11.
- Baldocchi D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future // *Global Change Biol.* 2003. Vol. 9. P. 479–492.
- Bubier J. L., Moore T. R., Bellisario L., Comer N. T., Crill P. M. Ecological controls on methane emissions from a northern peatland complex in the zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada // *Global Biogeochem. Cycles*. 1995. Vol. 9, N 4. P. 455–470
- Christensen T., Jackowicz-Korczynski M., Aurela M., Crill P., Heliasz M., Mastepanov M., Friborg T. Monitoring the multi-year carbon balance of a Subarctic peat mire with micrometeorological techniques // *AMBIO*. 2012. Vol. 41. P. 207–217. doi: 10.1007/s13280-012-0302-5
- Euskirchen E. S., Edgar C. W., Turetsky M. R., Waldrop M. P., Harden J. W. Differential response of carbon fluxes to climate in three peatland ecosystems that vary in the presence and stability of permafrost // *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* 2014. Vol. 119. P. 1576–1595. doi: 10.1002/2014JG002683
- Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecol. Applicat.* 1991. Vol. 1, N 2. P. 182–195
- Hargreaves K. J., Fowler D., Pitcairn C. E. R., Aurela M. Annual methane emission from Finnish mires estimated from eddy covariance campaign measurements // *Theoret. and Appl. Climatol.* 2001. Vol. 70 (1). P. 203–213.
- Hartley I. P., Hill T. C., Wade T. J., Clement R. J., Moncrieff J. B., Prieto-Blanco A., Disney M. I., Huntley B., Williams M., Howden N. J. K., Woakey P. A., Baxter R. Quantifying landscape-level fluxes in subarctic Finland using a multiscale approach // *Global Change Biol.* 2015. Vol. 21. P. 3712–3725. doi: 10.1111/gcb.12975
- Heikkinen J. E., Virtanen T., Huttunen J. T., Elsakov V., Martikainen P. J. Carbon balance in East European tundra // *Global Biogeochem. Cycles*. 2004. Vol. 18, N 1. P. GB002054. doi:10.1029/2003GB002054
- Korrensalo A., Männistö E., Alekseychik P., Mammarella I., Rinne J., Vesala T., Tuittila E.-S. Small spatial but large sporadic variability in methane emission measured from a patterned boreal bog // *Biogeosci. Discuss.* 2017. doi: 10.5194/bg-2017-443
- Lakomiec P., Holst J., Friborg Th., Crill P., Rakos N., Kljun N., Olsson P.-O., Eklundh L., Persson A., Rinne J.

- Field-scale CH₄ emission at subarctic mire with heterogeneous permafrost thaw status // *Biogeosciences*. 2021. Vol. 18. P. 5811–5830. doi:10.5194/bg-18-5811-2021
- Malhotra A., Roulet N. T. Environmental correlates of peatland carbon fluxes in a thawing landscape: do transitional thaw stages matter? // *Biogeosciences*. 2015. Vol. 12, N 10. P. 3119–3130. doi:10.5194/bg-12-3119-2015
- Nykänen H., Heikkinen J. E., Pirinen L., Tiilikainen K., Martikainen P. J. Annual CO₂ exchange and CH₄ fluxes on a subarctic palsamire during climatically different years // *Global Biogeochem. Cycles*. 2003. Vol. 17, N 1. P. 18–1–18–18. doi:10.1029/2002GB00186
- Rinne J., Tuittila E.-S., Peltola O., Li X., Raivonen M., Alekseychik P., Haapanala S., Pihlatie M., Aurela M., Mammarella I., Vesala T. Temporal variation of ecosystem scale methane emission from a boreal fen in relation to temperature, water table position, and carbon dioxide fluxes // *Global Biogeochem. Cycles*. 2018. Vol. 32, N 7. P. 1087–1106. doi: 10.1029/2017GB005747
- Schneider J., Jungkunst H. F., Wolf U., Schreiber P., Gazovic M., Miglovets M., Mikhaylov O., Grunwald D., Erasmí S., Wilmking M., Kutzbach L. Russian boreal peatlands dominate the natural European methane budget // *Environ. Res. Lett.* 2016. Vol. 11, N 1. P. 1–7. doi: 10.1088/1748-9326/11/1/014004
- Sun L., Song Ch., Lafleur P. V., Miao Y., Wang X., Gong Ch., Qiao T., Yu X., Tan W. Wetland-Atmosphere methane exchange in Northeast China: A comparison of permafrost peatland and freshwater wetland // *Agricul. and Forest Meteorol.* 2018. Vol. 249. P. 239–249. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.11.009
- Wagner D., Wille C., Kobabe S., Pfeiffer E. M. Simulation of freezing-thawing cycles in a permafrost microcosm for assessing microbial methane production under extreme conditions // *Permafrost and Periglacial Proc.* 2003. Vol. 14, N 4. P. 367–374.
- Yu L., Wang H., Wang G., Song W., Huang Y., Li S.-G., Liang N., Tang Y., He J.-S. A comparison of methane emission measurements using eddy covariance and manual and automated chamber-based techniques in Tibetan Plateau alpine wetland // *Environ. Pollut.* 2013. Vol. 181. P. 81–90. doi: 10.1016/j.envpol.2013.06.018
- Yu X., Song Ch., Sun L., Wang X., Shi F., Cui Q., Tan W. Growing season methane emission from a permafrost peatland of northern China: Observations using open-path eddy covariance method // *Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 153. P. 135–149. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.01.026
- Zhu X., Zhuang Q., Chen M., Sirin A., Melillo J., Kicklighter, Sokolov A., Song L. Rising methane emission in response to climate change in Northern Eurasia during the 21st century // *Environ. Res. Lett.* 2011. doi: 10.1088/1748-9326/6/4/045221

Estimation of methane fluxes in the ecosystem of the palsamire in the far northern taiga subzone in the European Northeast of Russia (according to the results of two measurement methods)

S. V. ZAGIROVA¹, M. N. MIGLOVETS¹, S. V. YAKUBENKO²

¹*Institute of Biology, Federal Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences
167982, Syktyvkar, Kommunisticheskaya str., 28
E-mail: zagirova@ib.komisc.ru Syktyvkar*

²*State University named after Pitirim Sorokin
167001, Syktyvkar, Oktyabrsky ave., 55*

The article presents an estimate of methane emission in palsamire in the European North-East of Russia based on the results of measurements by the method of static chambers and eddy covariance during the growing season. Hollows make the main contribution to the ecosystem flux, the rate of methane emission per season on these relief elements averaged 5,7 mg/(m²·h) and was controlled by soil temperature and groundwater level. The methane emission on the ridges and the peat mound was noticeably lower and corresponded to 0,85 and 0,28 mg/(m²·h). On the peat mound, the methane flux depended on the thickness, temperature, and humidity of the active peat layer. The cumulative ecosystem flux of methane into the atmosphere in May–September, obtained by the method of chambers and eddy covariance, corresponded to 9,5 and 11,4 g/m².

Key words: palsamire, far northern taiga, methane, fluxes, static chamber method, eddy covariance.