

УДК 631.445.122; 631.433.5; 547.211

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭМИССИИ МЕТАНА В ОЛИГОТРОФНЫХ ГРЯДОВО-МОЧАЖИННЫХ КОМПЛЕКСАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2025 г. Е. Э. Веретенникова^{1, 2, *}, Е. А. Дюкарев^{1, 3}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Сибирский государственный медицинский университет, Томск, Россия

³Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

*e-mail: lena2701@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.02.2024 г.

После доработки 09.06.2024 г.

Принята к публикации 28.12.2024 г.

В течение трех лет при помощи статического камерного метода была изучена эмиссия метана с поверхности одного из самых распространенных типов болотных ландшафтов таежной зоны Западной Сибири — грядово-мочажинного комплекса (ГМК). Обнаружена значительная пространственная изменчивость потоков CH_4 между элементами ГМК — грядой и мочажиной (от 60 до 74% в июле и от 20 до 50% в сентябре). Временная изменчивость играет не менее важную роль и является откликом на изменение температуры торфяных залежей. На мочажине обнаружена изменчивость суточного цикла метана, которая на 34–64% объясняется изменчивостью температуры торфяной залежи на глубине от 2 до 15 см. На гряде ГМК суточного цикла не обнаружено, однако изменчивость потоков метана в течение летне-осеннего периода на 46% объясняется температурой на глубине 30 и 40 см. В работе обсуждаются возможные причины пространственно-временной изменчивости CH_4 с поверхности элементов ГМК. Результаты пространственно-временного анализа показали, что не дифференцированный разовый отбор пробы и последующая экстраполяция этого результата на сутки и сезон может дать завышенную оценку, если не учитывать влияние текущей температуры, а также положения в микрорельефе и характера растительности, что в конечном итоге может привести как к переоценке, так и к недооценке эмиссии CH_4 .

Ключевые слова: метан, болотные комплексы, температура, торфяная залежь, суточный цикл, температура, изменчивость

DOI: 10.31857/S2587556625020118

ВВЕДЕНИЕ

Западносибирские торфяники составляют около 13% мировой площади торфяников, и вносят значительный вклад в глобальные потоки CH_4 (Peregon et al., 2009). Несмотря на многочисленные исследования газообмена в болотах Западной Сибири, наблюдается явная нехватка информации о потоках парниковых газов из болот значительной части этой территории. Поэтому существует неопределенность как в определении величины самих потоков метана, так и в оценке факторов, которые их регулируют. По этой причине неопределенность потоков CH_4 из болот Западной Сибири до сих пор остается достаточно высокой, о чем свидетель-

ствуют значительные расхождения в оценках этих потоков с данной территории (от 0.84 до 19.9 Тг CH_4 год⁻¹), полученные разными авторами (Bohn et al., 2015; Glagolev et al., 2011; Kim et al., 2011; Terentyeva et al., 2016).

Цикл метана в болотных экосистемах включает как продукцию, так и его потребление, при этом результирующий поток CH_4 в наибольшей степени зависит от преобладающих транспортных механизмов, таких как барботаж, диффузия и перенос, опосредованный растениями. Изменение одного из факторов внешней среды, например, температуры, может отрицательно повлиять на один процесс и положительно на другой. Из-за таких сложных взаимодействий

потоки CH_4 из boreальных болотных экосистем характеризуются высокой временной и пространственной изменчивостью (Glagolev et al., 2011; Koch et al., 2014; Lai et al., 2014; Nadeau et al., 2013; Veretennikova and Dyukarev, 2021). Исследования Sabrekov et al. (2014) показали, что наиболее существенную неопределенность в оценку регионального потока CH_4 болот Западной Сибири вносит именно его локальная пространственная вариабельность, а не временная.

Среди болот Западной Сибири различают особый тип — грядово-мочажинные болотные комплексы (ГМК). Это уникальные природные образования, простирающиеся на огромные пространства, на которых идет закономерное чередование гряд и мочажин, что придает своеобразный облик их рельефу (рис. 1). Грядово-мочажинные комплексы не относятся к распространенному типу болотных ландшафтов, они встречаются на северо-западе европейской части России, в Белоруссии, Эстонии, Финляндии, Канаде. На территории Западной Европы они отсутствуют полностью.

В Западной Сибири ГМК получили наибольшее распространение, особенно в южной и средней тайге, где на их долю приходится от 27 до 43% от площади всех болотных массивов (Терентьева и др., 2020) и, таким образом, они представляют собой типичные для таежной зоны болотные массивы. Результаты исследований эмиссии метана с поверхности элементов ГМК представлены в работах для некоторых регионов нашей страны и за ее пределами: ГМК на болоте Ламмин-Суо в Ленинградской области (Калюжный и др., 2009); ГМК на Полистово-Ловатском болотном массиве в Псковской области (Федоров и др., 2015); ГМК на болоте Мянникъярве в Эстонии (Frenzel and Karofeld, 2000). Для территории Западной Сибири можно отметить работы А.В. Наумова (2009), Дьячковой

и др. (2019). Есть данные, в которых приводятся результаты измерений потоков метана с какого-нибудь одного элемента ГМК, например, гряды (Клепцова и др., 2010), а также для разных типов болотных экосистем, где среди прочих рассмотрены и ГМК [например, (Сабреков и др., 2012; Sabrekov et al., 2013, 2022)].

Вместе с тем, несмотря на широкое распространение этих ландшафтов на данной территории, они остаются малоизученными объектами, в частности с точки зрения их газообмена и способности выделять метан в атмосферу. Одной из причин слабой изученности ГМК является их труднодоступность для исследований из-за высокого обводнения центральных участков болот, куда исследователю сложно добраться для организации систематических наблюдений за потоками метана. Вместе с тем, наибольшую неопределенность в оценки потоков могут привносить именно ГМК, поскольку в эти комплексы заключены два различных элемента микрорельефа — гряды и мочажины, отличающиеся между собой строением торфяной залежи, гидрологическим режимом и растительным покровом, следовательно, и потоками метана.

Выбранный для данного исследования ГМК, является наиболее типичным болотным участком, обладающим всеми перечисленными характеристиками. В основу работы положен фактический материал, собранный в летне-осенний период (июль и первая половина сентября) с 2012 по 2014 г. Цель исследований — выявление локальной пространственно-временной изменчивости потоков CH_4 ГМК болот Западной Сибири, способной влиять на их региональные оценки. Среди конкретных задач выделим: выявление пространственной изменчивости потоков CH_4 между двумя элементами ГМК, их временной изменчивости внутри каждого элемента ГМК и оценку влияния факторов среды (уровня грунтовых вод и температуры торфа) на потоки CH_4 .

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемый ГМК занимает центральную часть Бакчарского болотного массива, находящегося на водораздельном пространстве, между двумя малыми реками — Бакчаром и Иксой, которые входят в состав речных систем Чая—Обь (см. рис. 1). Водораздел относится к подзоне южной тайги и является северо-восточной частью крупнейшего в мире Васюганского болота ($56^{\circ}03'$ и $56^{\circ}57'$ с.ш., $82^{\circ}22'$ и $82^{\circ}42'$ в.д.). Согласно классификации наземного покрова, основанной на данных спутниковых снимков *Landsat 7* (Дюкарев и др., 2017) ГМК здесь занимают 41.4% от заболоченной площади водосбора.

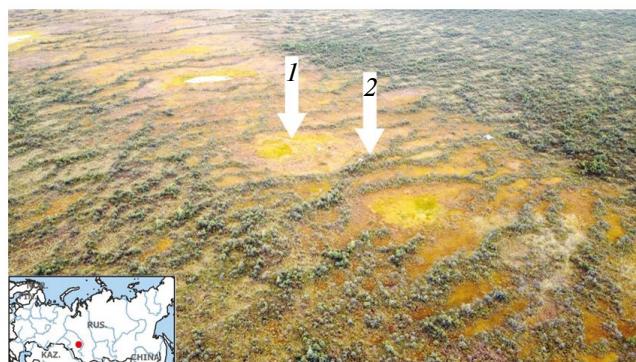


Рис. 1. Расположение района (красная точка) и объекта (1 и 2 — пункты наблюдений) исследования. Фотография Е.А. Дюкарева.

Исследуемый ГМК состоит из крупных мочажин, блюдцеобразной формы, которые чередуются с узкими дугообразными грядами (шириной 3–6 м), соединяющимися между собой. На долю мочажин приходится около 80% поверхности ГМК (см. рис. 1). Современный растительный покров на гряде представлен сосново-кустарничково-сфагновым фитоценозом. Древесный ярус состоит из сосны *Pinus silvestris* f. *Wilkommii*, высотой 1–3 м с проективным покрытием 10–15%. Кустарничковый ярус представлен низкими растениями (5–30 см высотой) — *Andromeda polifolia*, *Chamaedaphne calyculata* (30–50%). В моховом покрове доминирует *Sphagnum fuscum* (100%), у основания гряд по краям мочажин растет *Sph. balticum*. Травяный ярус представлен *Rubus chamaemorus*, *Eriophorum vaginatum*, *Drosera rotundifolia*. Мощность торфяной залежи гряд от 2.3 до 3 м. До глубины 1.3–1.5 м она сложена верховым сфагновым торфом. Далее, до глубины 2.0–2.5 м следует слой мезотрофного торфа, в основании залегает маломошный слой древесного торфа. Современный растительный покров мочажин представлен шейхцериево-сфагновым фитоценозом. В отличие от гряд, здесь значительно возрастает проективное покрытие трав (до 60%) — *Scheuchzeria palustris*, *Carex limosa*. Моховой покров представлен *Sphagnum pappilosum* с вкраплениями *Sph. angustifolium* и *Sph. magellanicum*. Мощность торфяной залежи около 3 м. Верхний слой (1.0–1.3 м) сложен торфами верхового типа (*Sph. majus*, *Sph. jensenii*, *Sph. papillosum*), далее — слой переходного торфа, с глубины 2 м залежь формируют торфа травяного вида (Курина, Веретенникова, 2015).

Климат района исследований континентальный с продолжительной холодной зимой и коротким жарким летом. Средняя годовая температура воздуха составляет -0.3°C (Дюкарев, 2015). Самый теплый — июль (18.1°C), самый холодный — январь (-19.2°C). Отрицательные значения средней месячной температуры воздуха наблюдаются с ноября (-9.9°C) по март (-8.9°C). Сумма годовых осадков 468 мм, из них 45% приходится на лето и 12% на зиму. Продолжительность залегания устойчивого снежного покрова в среднем составляет 172 дня, который разрушается в среднем к 20 апреля (Киселев и др., 2019).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В течение трех лет (летом — в июле и осенью — в сентябре) были произведены измерения эмиссии CH_4 в круглосуточном режиме с частотой отбора проб 8 раз в сутки (в 01:00, 04:00, 07:00, 10:00, 13:01, 16:00, 19:00 и 22:00 ч

по местному времени). В 2012 г. экспедиционные работы были организованы с 20 по 25 июля, с 5 по 10 сентября; в 2013 г. — с 18 по 23 июля, с 20 по 25 сентября; в 2014 — с 21 по 26 июля и с 21 по 25 сентября.

Скорость эмиссии CH_4 измеряли методом темновых статических камер [например, (Pavelka et. al., 2018)]. На гряде и на мочажине устанавливались по три непрозрачных цилиндрических камеры объемом 16.6 л, размещаемые на предварительно установленные основания площадью 590 cm^2 . Основания заглублялись в торф на глубину 5 и 20 см на мочажине и гряде соответственно. Перемешивание в камере осуществляли электрическим вентилятором с питанием 12 В.

На мочажине на все время проведения измерений устанавливались три одинаковые камеры на расстоянии 15–20 см друг от друга. В 1.5 м от места измерения был установлен автономный измеритель профиля температуры торфяной залежи и датчик давления для регистрации уровня болотных вод (Киселев и др., 2019). На гряде, как и на мочажине устанавливались три камеры для измерения потока CH_4 . Для этого была выбрана ровная поверхность, без кочек, полностью покрытая *Sphagnum fuscum*. Чтобы свести к минимуму влияние оператора на проведение измерений, над поверхностью растительности каждой фации ГМК были сооружены деревянные площадки для проведения измерений, которые соединялись между собой тротуарами. Отбор проб воздуха из каждой камеры проводили с помощью пластикового шприца объемом 1 мл в трехкратной повторности. Первые три образца забирались из камеры сразу после установки ее на основание. Последующие образцы отбирались через 15 мин (на мочажине) и 30 мин (на гряде) после начала экспозиции. Отбор проб воздуха из камер на гряде и мочажине производился синхронно. После отбора проб шприцы плотно закрывались резиновыми пробками и доставлялись в лабораторию для анализа. Концентрацию CH_4 в воздухе шприца определяли на газовом хроматографе Shimadzu GC — 14B с пламенно-ионизационным детектором (ПИД), насадочной колонкой Carboxen-1000, диаметром 2.1 мм, длиной 15 м, газ-носитель — гелий.

Скорость изменения концентрации CH_4 ($\text{dC}/(\text{m}^2 \text{ч})$) в камере рассчитывали по формуле:

$$\text{dC} = C_0 \times \text{dX} \times P \times M / (R \times T), \quad (1)$$

где $C_0 = 0.001 \text{ мг}/(\text{г} \cdot \text{млн}^{-1})$ — константа; P — атмосферное давление, Па; dX — скорость изменения объемной концентрации CH_4 в камере, $\text{млн}^{-1} \text{ ч}^{-1}$; M — молярная масса метана, 16.04 г/моль;

R — универсальная газовая постоянная, 8.31 Дж/(моль·К); T — температура воздуха в камере, К. Величину удельного потока (скорость эмиссии) CH_4 с поверхности торфяной залежи рассчитывали по формуле:

$$F = dC \times V/S, \quad (2)$$

где F — скорость эмиссии CH_4 , мг $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$; S — площадь основания камеры, м^2 ; V — объем камеры, м^3 .

В расчетах скорости эмиссии CH_4 использовалась линейная зависимость накопления газа внутри камеры, которая была получена в результате полевого эксперимента. Для этого проводили отбор проб воздуха через каждую минуту в течение 15 мин — на мочажине и 30 мин — на гряде. В результате не было обнаружено значительных отклонений роста концентраций в камере от линейной функции.

Регистрация потоков метана сопровождалась дополнительным измерением факторов внешней среды: температуры воздуха и торфяной залежи, атмосферного давления и уровня болотных вод. Измерения температуры торфяной залежи и воздуха проводились с использованием атмосферно-почвенного измерительного комплекса (АПИК) (Киселев и др., 2019) с шагом 1 ч. Температура торфяной залежи регистрировалась на поверхности и на глубинах: 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 160, 240 см.

Статистический анализ

Для отобранных проб газа (3-кратная повторность) по каждой камере рассчитывали среднее значение концентрации CH_4 в начале и в конце экспозиции, затем по формулам 1–2 вычислялся удельный поток CH_4 в каждой камере. На основе полученных значений по трем камерам рассчитывали среднее значение потока и стандартное отклонение (далее результаты приводятся как “среднее арифметическое \pm стандартное отклонение”). Для анализа данных использовалось программное обеспечение SigmaStat 12 Software. Различия в потоках CH_4 и факторов среды между элементами ГМК проверены с помощью непараметрического критерия (U-критерий Уилкоксона, тест Манна-Уитни), который используется для проверки нулевой гипотезы при сравнении как независимых, так и зависимых выборочных групп. Оценка связи между метеорологическими параметрами и потоками CH_4 проведена с помощью коэффициентов ранговой корреляции Спирмена. Графическая визуализация данных представлена с помощью MS Excel и OriginPro 21 Software.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Погодные условия в период наблюдений. Период наблюдений характеризовался достаточно контрастными гидротермическими условиями. Лето 2012 г. было аномально жарким, засушливым и безветренным, самым жарким месяцем был июль (среднемесячная температура $+20.6^\circ\text{C}$). Сумма осадков за вегетационный период составила 254 мм, а средняя температура за вегетационный сезон $+15.7^\circ\text{C}$. 2013 г. был прохладным и влажным, средняя температура вегетационного периода в этот год составила 13.0°C , а количество осадков — 338 мм. Вегетационный сезон 2014 г., как и в 2012 г., был теплым и засушливым, средняя температура за вегетационный период составила 16.1°C , что на 3 градуса выше по сравнению с предыдущим годом. Количество осадков в 2014 г. (295 мм) было сходным по сравнению с 2012 г. Продолжительность периода с температурой воздуха выше 0°C в 2012 г. составила 193 дня, в 2013 г. — 213 дней, в 2014 г. — 192 дня (Киселев и др., 2019).

Уровень болотных вод и температура торфяной залежи. Как на мочажине, так и на гряде самые низкие значения УБВ наблюдались в июле 2012 г., что значимо ($P < 0.001$) отличается от последующих лет наблюдений (рис. 2). Самые высокие УБВ были зарегистрированы в июле 2013 г., а 2014 г. характеризовался промежуточным положением УБВ. В период исследований температура торфяных залежей обоих элементов ГМК уменьшалась от поверхности к глубине. Торфяная залежь на мочажине характеризовалась более высокой температурой на глубине от 10 до 80 см ($P < 0.001$) по сравнению с торфяной залежью на гряде на тех же глубинах. Ниже 80 см температура торфяных слоев на обоих элементах ГМК характеризовалась близкими значениями.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОТОКОВ МЕТАНА С ПОВЕРХНОСТИ ГМК

Поток CH_4 с поверхности ГМК характеризуется сильной временной и пространственной изменчивостью. Мочажина выделяет в атмосферу значительно больше CH_4 (от 0.01 до 11.64, в среднем $2.11 \pm 2.20 \text{ мг} \text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$), чем гряда (от -0.08 до 2.03, в среднем $0.45 \pm 0.45 \text{ мг} \text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$) ($P < 0.001$). На гряде большая часть потоков была положительной (выделение в атмосферу) и только около 10% приходилось на поглощение (отрицательные значения потоков). На диаграмме частоты встречаемости величин потоков (рис. 3) хорошо видно, что половина величин находится в диапазоне от 0 до $1 \text{ мг} \text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$,

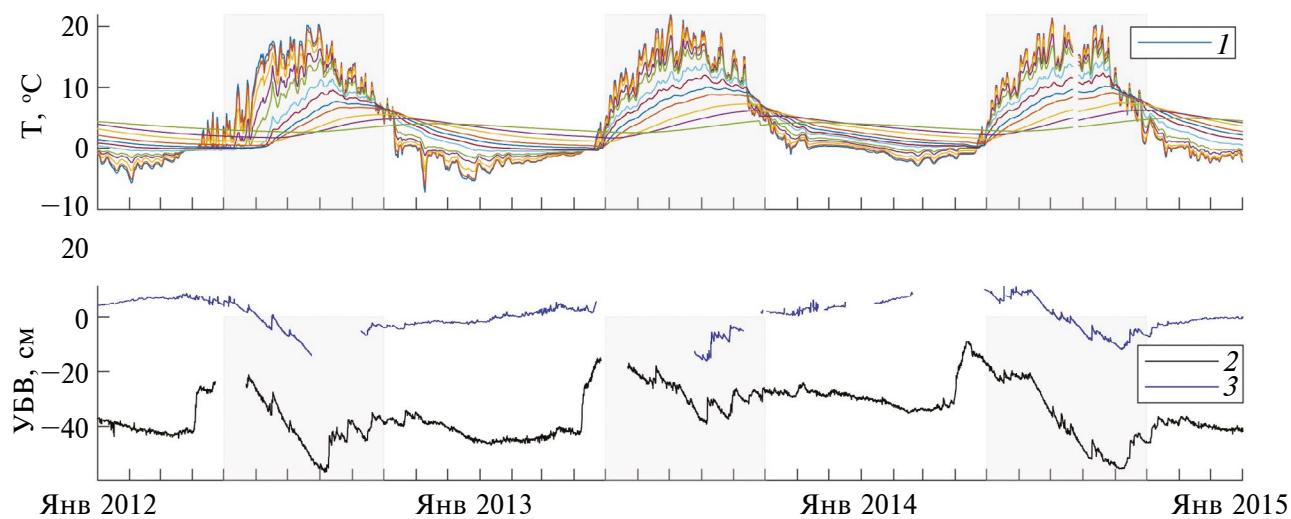


Рис. 2. Гидротермические условия грядово-мочажинного комплекса: 1 — температура торфяной залежи (цветными линиями обозначена температура на глубинах: 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 см); 2 и 3 — уровень болотных вод (УБВ) на гряде и мочажине, соответственно; серым цветом выделен вегетационный период.

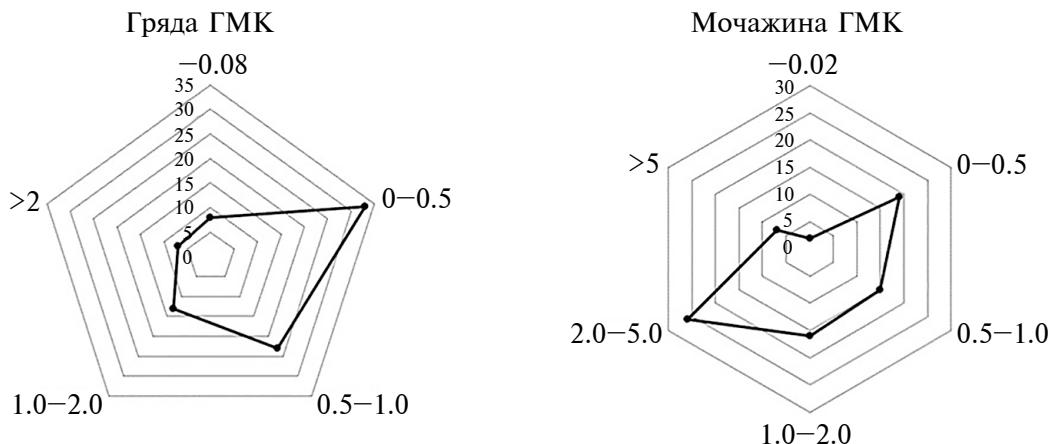


Рис. 3. Диаграмма частоты встречаемости величин потоков CH_4 с поверхности ГМК.

при этом большая часть потоков сосредоточена в диапазоне от 0–0.5 $\text{mgCH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ ch}^{-1}$. На мочажине все потоки были положительными, в равной степени преобладали минимальные (от 0 до 0.5 $\text{mgCH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ ch}^{-1}$) и максимальные (2–5 $\text{mgCH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ ch}^{-1}$) значения.

На обоих элементах ГМК эмиссия CH_4 в июле была выше, чем в сентябре ($P < 0.001$) (табл. 1). Наибольшее различие величины эмиссии CH_4 прослеживалось на мочажине: среднее значение в июле за весь период исследований составило $3.30 \pm 2.36 \text{ mgCH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ ch}^{-1}$, в сентябре — $0.79 \pm 0.71 \text{ mgCH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ ch}^{-1}$. На гряде в те же периоды измерений средние значения потоков в июле и сентябре составили 0.56 ± 0.48 и $0.35 \pm 0.35 \text{ mgCH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ ch}^{-1}$ соответственно.

Пространственная изменчивость потоков метана с поверхности ГМК. Поскольку на мо-

чажине и гряде исследуемого ГМК измерения проводились синхронно, т.е. при одинаковых внешних условиях, это дало возможность оценить реальное различие потоков метана между этими элементами. Наиболее значительная разница (от 60 до 74%) в потоках CH_4 между элементами ГМК была характерна для июля, при этом потоки достаточно сильно различались как в дневное (60–78%), так и ночные (49–71%) время суток. В сентябре за счет сильного снижения интенсивности (в среднем в 4 раза) потоков CH_4 на мочажине (в то время как на гряде потоки снизились в среднем всего лишь в 1.6 раз по сравнению с сентябрем) разница в потоках между элементами ГМК значительно сократилась (20–50%), оставаясь, тем не менее, статистически значимой ($P < 0.02$).

Таблица 1. Средние значения потоков ($\text{мгCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$) в июле и сентябре 2012–2014 гг. с поверхности ГМК Бокчарского болотного массива (Томская область, Россия)

Период наблюдений	Мочажина ГМК		Гряды ГМК	
	$X \pm \text{StDev.}$	Min–Max	$X \pm \text{StDev.}$	Min–Max
Июль 2012 г.	4.75 ± 2.97	1.6–11.64	0.74 ± 0.50	–0.08–1.20
Сентябрь 2012 г.	1.18 ± 0.82	0.01–2.93	0.31 ± 0.31	–0.05–0.94
Июль 2013 г.	2.51 ± 1.87	0.38–6.45	0.54 ± 0.56	–0.05–2.03
Сентябрь 2013 г.	0.42 ± 0.28	0.12–0.88	0.18 ± 0.16	–0.03–0.48
Июль 2014 г.	2.91 ± 1.68	0.28–6.62	0.53 ± 0.30	0.06–1.20
Сентябрь 2014 г.	0.44 ± 0.27	0.22–0.88	0.29 ± 0.15	–0.01–0.47
Июль 2012–2014 гг.	3.30 ± 2.36	0.28–11.64	0.56 ± 0.48	–0.08–2.03
Сентябрь 2012–2013 гг.	0.79 ± 0.71	0.01–2.93	0.35 ± 0.35	–0.05–0.94

Примечания: $X \pm \text{StDev.}$ — среднее значение \pm стандартное отклонение; Min–Max — минимальное и максимальное значения.

Временная изменчивость потоков метана с поверхности ГМК. Изучение временной изменчивости эмиссии CH_4 в данном исследовании основано на краткосрочных суточных сериях измерений, которые проводились в июле и сентябре на протяжении трех лет. В течение суток эмиссия CH_4 существенно варьировалась: на мочажине от 0.00 до 11.64 $\text{мгCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, на гряде от –0.08 до 2.45 $\text{мгCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$. Полученный набор данных был разделен на 2 периода — дневной (с 10:00 до 19:00) и ночной потоки (с 22:00 до 07:00).

В июле в дневное время с поверхности мочажины выделялось от 1.69 до 11.64 $\text{мгCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ (в среднем $4.46 \pm 2.44 \text{ мгCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$). Несмотря на то, что величины ночных потоков имели большой разброс (от 0.27 до 4.08, в среднем $1.88 \pm 1.21 \text{ мгCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$), медианные значения ночных и дневных потоков достоверно отличаются друг от друга (критерий Уилкоксона, $P < 0.001$) (рис. 4). В целом на долю дневных потоков CH_4 пришлось 68–74% суммарного суточного потока. В сентябре дневные потоки CH_4 , по-прежнему, превышали ночные, но разница между ними была менее выраженной, и только в сентябре 2012 г. она была статистически значима ($P = 0.022$). В целом на долю дневных потоков в сентябре приходилось от 57 до 67% суммарного суточного потока.

На мочажине на пике вегетации наблюдалась суточные колебания эмиссии CH_4 , которые характеризовались единообразной динамикой для всех дней наблюдений. Как правило, выделение CH_4 резко увеличивалось к 13:00 и оставалось высоким до последующего момента измерения (16:00). В этот временной интервал выделялось от 3.0 до 11.64 $\text{мгCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, что составило больше половины CH_4 (~62%)

суммарного суточного потока и от 76 до 82% суммарного дневного потока. К вечеру (19:00) эмиссия CH_4 снижалась и менялась от 0.74 до 3.28 $\text{мгCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$. В сентябре этот суточный цикл CH_4 был менее выражен и наблюдался не во все дни, однако отмечается общая тенденция увеличения потоков CH_4 после полудня и ближе к вечеру (с 16:00 до 22:00). В этот период потоки варьировали от 0.64 до 2.65 $\text{мгCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ и на их долю приходилось от 57 до 73% суммарного дневного потока.

На гряде, в отличие от мочажины, величины потоков в течение дня менялись хаотично, поэтому общей закономерности изменчивости потоков CH_4 здесь не выявлено. После разделения на дневные и ночные потоки было обнаружено, что дневной поток в среднем в 2–3 раза превышал ночной. Тем не менее, только в 2012 г. это различие оказалось достоверным ($P = 0.004$ и $P = 0.003$ в июле и сентябре соответственно), а доля дневных потоков составила 71% суммарного суточного потока. В июле 2013 г. средняя величина потока CH_4 днем также была выше потока ночью ($0.59 \pm 0.57 \text{ мгCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ и $0.36 \pm 0.53 \text{ мгCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ соответственно), но разница между ними была недостоверна ($P = 0.24$). В 2014 г., напротив, ночной поток превысил дневной в 1.5 раза, и на его долю пришлось ~60% суммарного суточного потока. В сентябре во все годы исследований на граде в дневное время потоки CH_4 были в 1.4–4 раза выше, чем в ночной период.

Связь эмиссии метана с уровнем болотных вод и температурой. Мы не обнаружили связи эмиссии CH_4 с поверхности исследуемых элементов ГМК с изменением уровня болотных вод ни в одном из рассмотренных масштабов времени. Температура, напротив, оказалась су-

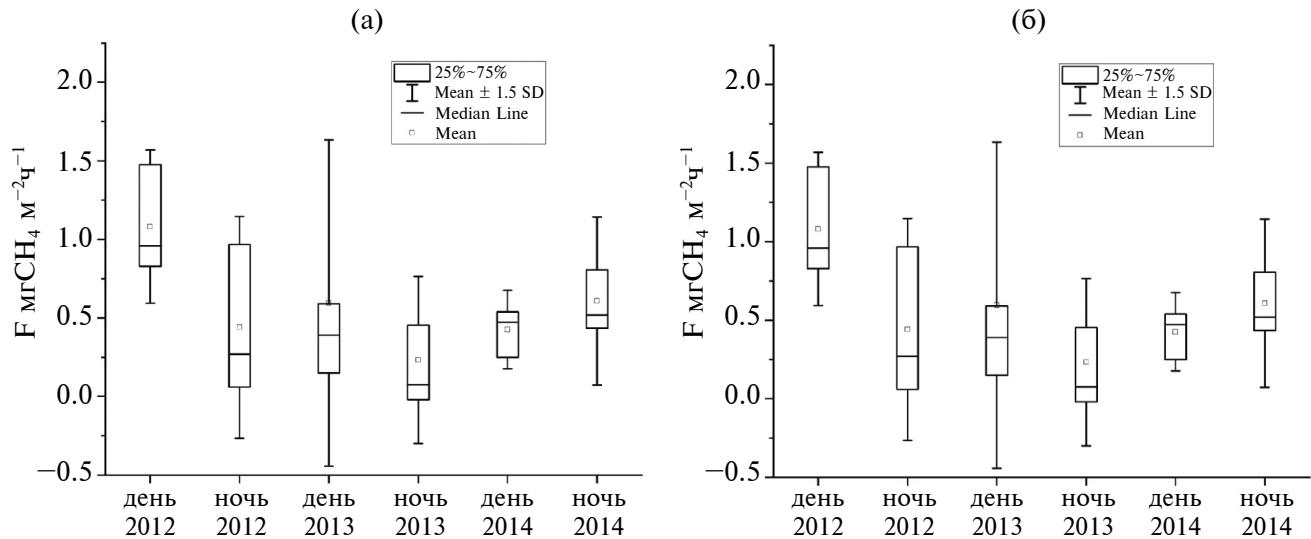


Рис. 4. Потоки CH_4 в дневное (10:00–19:00) и ночное (22:00–07:00) время суток с поверхности гряды (а) и мочажины (б) ГМК.

щественным фактором изменчивости потоков CH_4 . На мочажине, в июле суточные вариации потоков CH_4 были взаимосвязаны с температурой торфяной залежи на глубине от 2 до 15 см, при максимальной силе связи на глубинах 5 и 10 см (рис. 5а, б, в). Эта связь наилучшим образом описывается экспоненциальной функцией и объясняет 53–64% изменчивости потока CH_4 в течение суток. Полученные нами данные соответствуют ряду других независимых наблюдений [например, (Mikhailov et al., 2015; Rinne et al., 2017)]. В сентябре суточные вариации потоков CH_4 сохраняют связь с температурой торфяного слоя только на глубине 5 см, причем сила этой связи значительно ослабевает (рис. 5г, д, е). В сентябре 2012 г. максимальный коэффициент детерминации ($R^2 = 0.50$) был получен для линейной зависимости. В последующие годы наблюдений значения коэффициентов были ниже ($R^2 = 0.36$ и 0.34, для 2013 и 2014 гг. соответственно), при этом зависимости лучше описывались экспоненциальной функцией.

На для гряды связь эмиссии CH_4 с температурой в суточном масштабе не выявлена. Однако при усреднении потоков до среднесуточных значений обнаруживается ее связь с температурой торфа на глубинах 30 и 40 см. Для трехлетнего периода построена линейная регрессионная модель, согласно которой изменчивость эмиссии CH_4 в июле и сентябре на 46% объясняется температурой на глубине 30 и 40 см соответственно (рис. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пространственная изменчивость эмиссии метана с поверхности ГМК. На протяжении всего пе-

риода измерений с поверхности мочажины ГМК выделялось больше метана, чем с поверхности гряды ГМК (см. табл. 1). Такое пространственное различие в потоках было ожидаемым, что объясняется основными факторами, которые определяют уровень продукции и эмиссии CH_4 в любой болотной экосистеме [например, (Lai et al., 2014)]. Гряды и мочажины ГМК контрастно различаются между собой растительным покровом, положением уровней болотных вод, а, следовательно, условиями образования и окисления метана в торфяной залежи.

Болотные экосистемы, в растительном покрове которых доминируют сосудистые растения, такие как *Carex* sp., *Eriophorum* sp., *Scheuchzeria palustris*, демонстрируют больший поток CH_4 (Greenup et al., 2000; Korrensaalo et al., 2022; Shannon et al., 1996; Veretennikova and Dukarev, 2021). В растительном покрове исследуемой в нашей работе мочажины ГМК преобладает *Scheuchzeria palustris*, которая обладает аренхимой, способной стимулировать метаногенез и обеспечивать более быстрый транспорт метана, минуя зону его окисления (Korrensaalo et al., 2022; Shannon et al., 1996; Whiting and Chanton, 1992). Исследования Shannon et al. (1996) на юго-западе штата Мичиган в США показали, что 64–90% потока CH_4 на местных болотах проходит через *S. palustris*. Несколько меньшую, но все же также значительную долю (45%) потока CH_4 через *S. palustris* демонстрируют болота Финляндии (Korrensaalo et al., 2022).

На гряде ГМК не существует подобного механизма быстрого переноса CH_4 из бескислородного слоя в атмосферу. Корни *Andromeda polifolia* и *Chamaedaphne calyculata*, произрастающих на гряде, состоят из одревесневшей ткани без

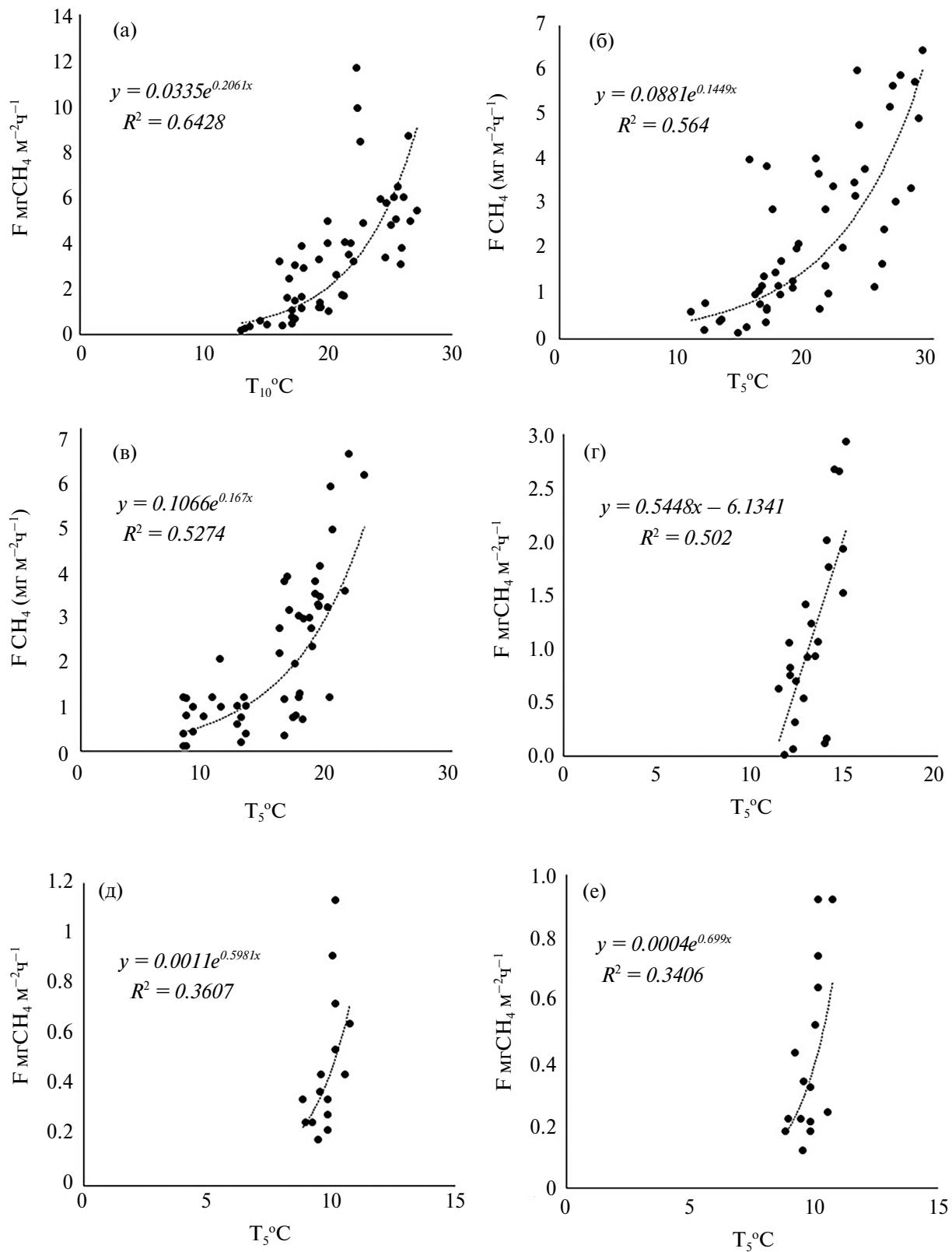


Рис. 5. Связь суточных потоков CH_4 с поверхности мочажины ГМК и температурой торфяной залежи: (а) июль 2012 г., (б) июль 2013 г., (в) июль 2014 г., (г) сентябрь 2012 г., (д) сентябрь 2013 г., (е) сентябрь 2014 г.

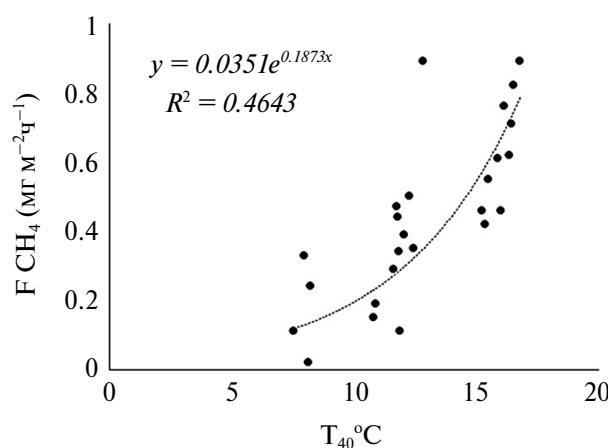


Рис. 6. Связь среднесуточных среднемесячных потоков CH_4 с поверхности гряды ГМК и температурой торфяной залежи.

аэренихимных клеток и распространяются лишь на 10–15 см ниже поверхности, следовательно, не могут играть значительной роли в прямом переносе CH_4 .

Сфагновые мхи, которые полностью покрывают поверхность гряды, не имеют корневой системы и клеток, отвечающих за передвижение газов (Thomas et al., 1996) и поэтому также не играют существенной роли в транспорте CH_4 по профилю. Из этого следует, что CH_4 на данном участке ГМК переносится из более глубоких слоев торфяной залежи преимущественно за счет диффузии, и по пути потребляется метанотрофными микроорганизмами в верхнем, достаточно мощном аэробном слое (УВВ от 31.6 до 47 см ниже поверхности). В результате с поверхности исследуемой гряды ГМК наблюдается значительно более низкая эмиссия метана.

Наиболее сильное различие в потоках CH_4 (60–74%) между элементами ГМК наблюдали в июле, что связано с наиболее высокими потоками метана на мочажине. В сентябре эта разница становилась значительно меньше (20–50%). Мы считаем, что усиление выделения CH_4 в середине лета с поверхности мочажины обусловлено, по крайней мере, частично за счет его переноса через сосудистые растения. Например, Saarnio et al. (1998) показали, что сосудистая растительность участвует в сезонных колебаниях потоков метана за счет увеличения подачи субстрата для метаногенеза, что приводит к большей его продукции и, соответственно, к более высоким потокам в пик вегетационного периода. Исходя из этого, становится понятным, почему в сентябре с понижением температур и началом отмирания растительности на исследуемом участке наблюдается снижение интенсивности потока CH_4 . Kortensalo et al.

(2022) на болоте в Финляндии показали, что снижение потока CH_4 осенью связано именно с деградацией аэренихимной ткани в стареющих листьях *S. pallustris*. На грядах растительность, вероятно, не является основным регулятором сезонного потока метана, поэтому здесь не отмечается значительных перепадов скоростей эмиссии между июлем и сентябрем.

Временная изменчивость эмиссии метана с поверхности ГМК. В литературе информации о вариабельности суточного цикла CH_4 не так много, и она неоднозначна: самые высокие потоки CH_4 обнаруживались в разное время суток — в дневные, вечерние или ночные часы. В большинстве этих работ показано, что дневные потоки, как правило, превышают ночные в два и более раза и что, на долю ночных потоков приходится от 26 до 47% суточного потока (Drollinger et al., 2019; Hommeltenberg et al., 2014; Koriakoski et al., 2017; Long et al., 2010; Morin et al., 2014). Наши данные показали, что на мочажине соотношение дневных и ночных потоков, как в июле (от 26 до 32%), так и в сентябре (от 30 до 42%) хорошо вписывается в диапазон значений, приведенный в литературе. Вместе с тем, в некоторых исследованиях отмечается противоположный эффект — увеличение эмиссии метана ночью, а не днем (Juutinen et al., 2004; Whiting and Chanton, 1993), кроме того, есть исследования, в которых суточной изменчивости потоков метана не отмечено (Mikkela et al., 1995; Nadeau et al., 2013; Rinne et al., 2007). В нашем случае на гряде наблюдались оба варианта. Например, в июле 2012 г. поток метана днем был значительно выше (71%), чем ночью (29%), а в 2014 г., напротив, больше половины (60%) суточного потока выделилось ночью. В сентябре, во все годы исследований эмиссия метана была ниже в ночные времена суток (от 16 до 42% суточного потока).

Что касается закономерностей внутрисуточной динамики CH_4 , то данных об этом еще меньше. Тем не менее, имеющиеся в литературе сведения о вариабельности суточного цикла CH_4 и наши результаты свидетельствуют, что в большинстве случаев наибольшая эмиссия CH_4 , отмечается в полуденный период (с 12:00 до 16:00). Например, (Long et al., 2010) наблюдали суточный цикл эмиссии CH_4 , измеренный методом турбулентных пульсаций на открытом “умеренно богатом болоте” (северная Канада), в растительном покрове которого присутствовало несколько типов трав с аэренихимной тканью (*Triglochin maritima*, *Carex* sp., *Menyanthes trifoliata*). Исследователи выявили значительное увеличение эмиссии CH_4 днем в период пика вегетации (июль) с 8:00 до 16:00. Duan et al. (2005) отмечали увеличение потока CH_4 в полуденное время (с 12:00 до 16:00) в сере-

дине июля с поверхности водно-болотных угодий и мелководных озер Западного Китая с макрофитным типом растительности. Chen et al. (2010) с помощью камерного метода в альпийском водно-болотном угодье с *Carex miliensis* и *Eleocharis valleculosa* (Тибетское плато, Китай) наблюдали увеличение эмиссии метана днем в 15:00, также небольшой пик был обнаружен в 06:00. Morin et al. (2014) измеряли поток CH_4 методом турбулентных пульсаций на водно-болотных угодьях в долине р. Олентанги (США) и отметили, что потоки CH_4 достигали максимума около полудня.

Среди специалистов, изучающих CH_4 есть мнение, что один из механизмов, вызывающий суточные колебания потока CH_4 — его перенос, опосредованный растениями. Молекулы газа либо движутся через растения за счет диффузии по градиенту концентрации, либо переносятся конвективным потоком, причем именно последний механизм демонстрирует сильную суточную изменчивость (Shannon et al., 1996). Транспорт CH_4 , опосредованный растениями, происходит через непрерывное воздушное пространство внутри растения, обеспечивающее передачу атмосферного кислорода к корням и “утечку” газа вверх (Joabsson et al., 1999). Еще один механизм, который может контролировать суточные вариации CH_4 — устьичная проводимость растений; закрытие устьиц в ночное время приводит к снижению потока и, наоборот — в полуденное время, когда устьица открыты, поток увеличивается (Mikkelä et al., 1995; Thomas et al., 1996).

Согласно полевым экспериментам на омбротрофных болотах южного Мичигана в США (Shannon et al., 1996), *Scheuchzeria palustris*, которая преобладает и в растительном покрове нашей мочажины, транспортирует CH_4 преимущественно по диффузионному механизму через микропоры аренхимной ткани, расположенные на абаксиальном эпидермисе листового влагалища. Такой вид транспорта метана, по мнению Clymo and Pearce (1995), не предполагает формирование суточных колебаний или, во всяком случае, не может демонстрировать столь значительные суточные вариации из-за значительно более медленной диффузии газов, чем при конвективном переносе (Sebacher et al., 1985).

На основе полученных данных нельзя сделать однозначный вывод о том, что транспорт CH_4 , опосредованный растениями, является значительным фактором внутрисуточной изменчивости потоков метана. Температурный фактор продемонстрировал здесь более очевидное влияние. Как показали полевые данные, вариации внутрисуточных потоков CH_4 на мочажине сильно и положительно коррелировали с температурой

торфяной залежи на глубинах от 2 до 15 см в июле и на глубине 5 см — в сентябре (см. рис. 5а, б, в). В целом, продукция CH_4 более чувствительна к температуре, чем его потребление (Yvon-Durocher et al., 2014). Поэтому полученные значимые и высокие коэффициенты детерминации указывают скорее всего на то, что опосредованный растениями транспорт CH_4 на мочажине не играет столь значительную роль в изменчивости суточного цикла, чем зависящий от температуры метаногенез. Это подтверждается и тем, что в сентябре внутрисуточные пики эмиссии метана чаще наблюдаются между 16:00 и 22:00, когда наиболее благоприятный для метаногенеза торфяной слой достигает максимальной температуры (Yvon-Durocher et al., 2014). Все же следует отметить, что в сентябре сила связи между скоростью эмиссии и температурой торфяной залежи, как правило, снижается ($R^2 = 0.34$ и 0.36), хотя исследования суточной изменчивости в начале сентября 2012 г. продемонстрировали сильную связь ($R^2 = 0.50$) между этими величинами (см. рис. 5г).

Как уже отмечалось, на гряде не было обнаружено значимой внутрисуточной изменчивости потоков CH_4 , хотя колебания потока в течение суток здесь иногда наблюдались довольно значительные. На грядах, из-за наличия мощного аэробного слоя, окисление CH_4 протекает с большим эффектом, в отличие от мочажин, где транспорт CH_4 к поверхности нередко происходит напрямую через стебли растений. Поэтому на гряде в нашем случае наблюдались очень нестабильные, вариабельные и трудно предсказуемые по величине потоки, что вероятно и является причиной отсутствия прямых корреляционных связей суточных вариаций CH_4 с температурой. Температура более глубоких нижних мертвых слоев торфа (так называемых катотельм) более постоянна, поэтому является лучшим предиктором потока (Rinne et al., 2007), но в более крупном масштабе времени. Наши данные показывают, что температура слоя на глубине 30 и 40 см почти на 50% обусловливает среднесуточные летние и среднесуточные осенние колебания CH_4 (см. рис. 6). Разными авторами единодушно отмечается, что температура на глубине 30–40 см является главным фактором метаногенеза в торфяниках с более низким уровнем болотных вод и более мощным аэробным слоем, в растительном покрове которых преобладает кустарнички и мхи (Brown et al., 2013; Lai et al., 2014; Nadeau et al., 2013; Rinne et al., 2017; Veretennikova and Dyukarev, 2021). Наши результаты это подтверждают.

Важный вопрос, который часто обсуждается в связи с корректной крупномасштабной экстраполяцией локальных оценок эмиссии

метана — пространственная и временная изменчивость его потоков. В работе Sabrekov et al. (2014) было высказано мнение о том, что учет пространственной изменчивости потоков CH_4 имеет большее значение для точной оценки регионального потока. Тем не менее, наши данные показывают, что изменчивость потоков CH_4 внутри отдельно взятой болотной экосистемы достаточно выражена и в разные годы может меняться от 60 до 74%. Помимо этого, в пределах отдельных элементов ГМК наблюдается заметная внутригодовая изменчивость потоков CH_4 . Так, на мочажине изменчивость CH_4 между июлем и сентябрем составляет 60–76%, что в целом совпадает по величине с пространственной изменчивостью. Тем не менее, вклад внутрисуточной изменчивости неоднозначен. Если летом диапазон суточного хода потоков CH_4 может быть действительно внушительным — от 40 до 60%, что практически приближается к пространственной изменчивости, то осенью временная изменчивость потоков может меняться от незначительной (6%) до высокой (56%). В целом же, очевидно, что при оценке ландшафтного потока CH_4 следует учитывать не только пространственную вариабельность, но и временную. Ее вклад может быть очень значительным, особенно на болотах с преобладанием сосудистых растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты продемонстрировали высокую чувствительность потоков CH_4 с поверхности ГМК к температуре. На мочажине роль температуры на глубине от 2 до 15 см в суточной изменчивости эмиссии CH_4 поддерживалась на протяжении трех лет наблюдений, что свидетельствует об устойчивости найденного эффекта. Для потоков CH_4 с поверхности гряды оказалась значимой температуры слоя на глубине 30–40 см, определяющая 50% сезонной изменчивости потока CH_4 .

Несмотря на ярко выраженный пространственный аспект полученные данные продемонстрировали, что временная изменчивость играет не менее важную роль для оценки крупномасштабных потоков CH_4 , чем их пространственная вариабельность. Наличие суточного хода, вызванное в большей степени откликом на изменение температуры почвы, имеет важное значение при изучении эмиссии CH_4 , особенно это касается метода закрытых камер. В таком случае отбор пробы в один момент времени (например, днем) и последующая экстраполяция этого результата на сутки и более, может дать завышенную оценку, если не учитывать влияние температуры, а также растительности, что в конечном итоге может

привести как к переоценке, так и недооценке эмиссии CH_4 . Поэтому временные закономерности изменчивости потоков метана в ГМК должны обязательно учитываться, особенно в исследованиях, ограниченных по времени, проводимые только в течение некоторых сезонов или в определенное время суток.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке госбюджетного проекта № 121031300154-1.

FUNDING

The study was carried out with the financial support of the Russian Academy of Sciences within the framework of the basic research no. 121031300154-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дюкарев Е.А., Алексеева М.Н., Головацкая Е.А. Исследования растительного покрова болотных экосистем по спутниковым данным // Исследования Земли из Космоса. 2014. № 2. С. 38–51.
<https://doi.org/10.7868/S0205961417020014>
- Дьячкова А.В., Давыдов Д.К., Фофонов А.В., Краснов О.А., Головацкая Е.А., Симоненков Д.В., Nakayata T., Максютов Ш.Ш. Влияние аномальных факторов среды на эмиссию метана на Бакчарском болоте в районе пос. Плотниково летом 2018 г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 6. С. 482–489.
<https://doi.org/10.15372/AOO20190611>
- Калужный И.Л., Лавров С.А., Решетников А.И., Парамонова Н.Н., Привалов В.И. Эмиссия метана на олиготрофном болотном массиве северо-запада России // Метеорология и Гидрология. 2009. № 1. С. 53–67.
- Киселев М.В., Дюкарев Е.А., Воропай Н.Н. Сезонно-мерзлый слой болот южно-таежной зоны Западной Сибири // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 4. С. 3–15.
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-4\(3-15\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-4(3-15))
- Клепцова И.Е., Глаголев М.В., Филиппов И.В., Максютов Ш.Ш. Эмиссия метана из рямов и гряд средней тайги Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Т. 1. № 1. С. 66–76.
<https://doi.org/10.17816/edgcc1166-76>
- Курьина И.В., Веретенникова Е.Э. Воздействие климатических изменений на развитие грядово-мочажинного комплекса в голоцене // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 2. С. 74–87.

- Наумов А.В.* Дыхание почвы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 208 с.
- Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Филиппов И.В., Казанцев В.С., Лапшина Е.Д., Мачида Т., Максютов Ш.Ш.* Эмиссия метана из типичных болотных ландшафтов северной и средней тайги Западной Сибири: к “стандартной модели” BC8 // Вестн. Моск. ун-та. Серия 17: Почвоведение. 2012. № 1. С. 50–59.
- Терентьева И.Е., Филиппов И.В., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Курбатова Ю.А., Максютов Ш.Ш.* Картографирование таежных болот Западной Сибири на основе дистанционной информации // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 6. С. 920–930.
- <https://doi.org/10.31857/S2587556620060102>
- Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Шипкова Г.В.* Эмиссия метана торфяными залежами верховых болот Псковской области // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 88–97.
- Bohn T.J., Melton J.R., Ito A., et al.* WETCHIMP-WSL: intercomparison of wetland methane emissions models over West Siberia // Biogeosci. 2015. № 11. P. 3321–3349.
- <https://doi.org/10.5194/bg-12-3321-2015>
- Brown M.G., Humphreys E.R., Moore T.R., Roulet N.T., Lafleur P.M.* Evidence for a nonmonotonic relationship between ecosystem-scale peatland methane emissions and water table depth // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2014. № 119. P. 826–835.
- <https://doi.org/10.1002/2013JG002576.826-835>
- Clymo R.S., Pearce D.M.E.* Methane and carbon dioxide production in transport through and efflux from a peatland // Philos. Trans. R. Soc. London. 1995. № 350. P. 249–259.
- Ding W.X., Cai Z.C., Tsuruta H.* Diurnal variation in methane emissions from the stands of *Carex lasiocarpa* and *Deyeuxia angustifolia* in a cool temperate freshwater marsh // Atmosph. Environ. 2004. № 38. P. 181–188.
- <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.09.066>
- Drollinger S., Maier A., Glatzel S.* Interannual and seasonal variability in carbon dioxide and methane fluxes of a pine peat bog in the Eastern Alps, Austria // Agricult. Forest Meteorol. 2019. № 275. P. 69–78.
- <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.05.015>
- Duan X., Wang X., Mu Y., Ouyang Z.* Seasonal and diurnal variations in methane emissions from Wuliangsu Lake in arid regions of China // Atm. Environ. 2005. № 39. P. 4479–4487.
- <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.03.045>
- Frenzel P., Karofeld E.* CH_4 emission from a hollow-ridge complex in a raised bog: the role of CH_4 production and oxidation // Biogeochem. 2000. Vol. 51. P. 91–112.
- Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov S., MacHida T.* Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // Environ. Res. Let. 2011. Vol. 6. P. 045214.
- <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045214>
- Greenup A.L., Bradford M.A., McNamara N.P., Ineson P., Lee J.A.* The role of *Eriophorum vaginatum* in CH_4 flux from an ombrotrophic peatland // Plant and Soil. 2000. Vol. 227. P. 265–272.
- Hommeltenberg J., Mauder M., Drösler M., Heidbach K., Werl P., Schmid H.P.* Ecosystem scale methane fluxes in a natural temperate bog-pine forest in southern Germany // Agricult. Forest Meteorol. 2012. № 198–199. P. 273–284.
- <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.017>
- Joabsson A., Christensen T., Wallen B.* Vascular plant controls on methane emissions from northern peatforming wetlands // Trends Ecol. Evol. 1999. № 14. P. 385–388.
- Juutinen S., Alm J., Larmola T., Saarnio S., Martikainen P.J., Silvola J.* Stand-specific diurnal dynamics of CH_4 fluxes in boreal lakes: Patterns and controls // J. Geophys. Res. 2004. № 109. D19313.
- <https://doi.org/10.1029/2004JD004782>
- Kim H.S., Maksyutov S., Glagolev M.V., Machida T., Patra P.K., Sudo K., Inoue G.* Evaluation of methane emissions from West Siberian wetlands based on inverse modeling // Environ. Res. Let. 2011. № 6. P. 035201.
- <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/035201>
- Koch S., Jurasiński G., Koebsch F., Koch M., Glatzel S.* Spatial Variability of Annual Estimates of Methane Emissions in a *Phragmites Australis* (Cav.) *Trin. ex Steud.* Dominated Restored Coastal Brackish Fen // Wetlands. 2014. № 34. P. 593–602.
- <https://doi.org/10.1007/s13157-014-0528-z>
- Korkiakoski M., Tuovinen J.-P., Aurela M., Koskinen M., Minkkinen K., Ojanen P., Penttilä T., Rainne J., Laurila T., Lohila A.* Methane exchange at the peatland forest floor — automatic chamber system exposes the dynamics of small fluxes // Biogeosci. 2017. № 14. P. 1947–1967.
- <https://doi.org/10.5194/bg-14-1947-2017>
- Korrensalo A., Mammarella I., Alekseychik P., Vesala T., Tuittila E.S.* Plant mediated methane efflux from a boreal peatland complex // Plant Soil. 2022. № 471. P. 375–392.
- Lai D.Y.F., Moor T.R., Roulet N.T.* Spatial and temporal variations of methane flux measured by antechambers in a temperate ombrotrophic peatland // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2014. № 119. P. 864–880.
- <https://doi.org/10.1002/2013JG002410>
- Long K.D., Flanagan L.B., Cai T.* Diurnal and seasonal variation in methane emissions in a northern

- Canadian peatland measured by eddy covariance // *Glob. Change Biol.* 2010. № 16. P. 2420–2435.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02083.x>
- Mikhaylov O.A., Miglovets M.N., Zagirova S.V.* Vertical methane fluxes in mezooligotrophic boreal peatland in European Northeast Russia // *Contemp. Probl. Ecol.* 2015. Vol. 8. № 3. P. 368–375.
<https://doi.org/10.1134/S1995425515030099>
- Mikkelä C., Sundh I., Svensson B.H., Nilsson M.* Diurnal variation in methane emission in relation to the water table, soil temperature, climate and vegetation cover in a Swedish acid mire // *Biogeochem.* 1995. № 28. P. 93–114.
- Morin T.H., Bohrer G., Naor-Azrieli L., Mesi S., Kenny W.T., Mitsch W.J., Schäfer K.V.R.* The seasonal and diurnal dynamics of methane flux at a created urban wetland // *Ecol. Eng.* 2014. № 72. P. 74–83.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.02.002>
- Morrissey L.A., Zobel D.B., Livingston G.P.* Significance of stomatal control on methane release from Carex-dominated wetlands // *Chemosphere.* 1993. № 26. P. 339–355.
- Nadeau D.F., Rousseau A.N., Coursolle C., Margolis H.A., Parlange M.B.* Summer methane fluxes from a boreal bog in northern Quebec, Canada, using eddy covariance measurements // *Atmos. Environ.* 2013. № 81. P. 464–474.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.09.044>
- Pavelka M., Acosta M., Kiese R., et al.* Standardisation of chamber technique for CO_2 , N_2O and CH_4 fluxes measurements from terrestrial ecosystems // *Int. Agrophys.* 2018. № 32. P. 569–587.
<https://doi.org/10.1515/intag-2017-0045>
- Peregon A., Maksyutov S., Yamagata Y.* An image-based inventory of the spatial structure of West Siberian wetlands // *Environ. Res. Let.* 2009. Vol. 4. P. 045014.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045014>
- Rinne J., Ruitta T., Pihlatie M., Aurela M., Haapanala S., Tuovinen J.-P., Tuittila E.-S., Vesala T.* Annual cycle of methane emission from a boreal fen measured by the eddy covariance technique // *Tellus.* 2007. № B 59. P. 449–457.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2007.00261.x>
- 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 // *Glob. Biogeoch. Cycles.* 2017. № 32. P. 1087–1106.
<https://doi.org/10.1029/2017GB005747>
- Saarnio S., Alm J., Martikainen P.J., Silvola J.* Effects of raised carbon dioxide on potential methane production and oxidation in, and methane emission from a boreal mire // *J. Ecol.* 1998. № 86. P. 261–268.
- Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Machida T., Maksyutov S.S.* Methane emission from bog complexes of the West Siberian taiga // *Eurasian Soil Sci.* 2013. Vol. 46–12. P. 1182–1193.
- Sabrekov A.F., Filippov I.V., Dyukarev E.A., Zarov E.A., Kaverin A.A., Glagolev M.V., Terentieva I.E., Lapshina E.D.* Hot spots of methane emission in West Siberian middle taiga wetlands physically disturbed by petroleum extraction activities // *Environ. Dynamics and Global Climate Change.* 2022. Vol. 13. № 3. P. 142–155.
- Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Maksyutov S.S.* Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH_4 flux upscaling // *Iop: Environ. Res. Let.* 2014. № 9. P. 045008.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/045008>
- Sebacher D.J., Harriss R.C., Barlett K.B.* Methane emissions to the atmosphere through aquatic plants // *J. of Environ. Quality.* 1985. № 14. P. 40–46.
- Shannon R.D., White J.R., Lawson J.E., Gilmour B.S.* Methane efflux from emergent vegetation in peatlands // *J. Ecol.* 1996. № 84. P. 239–246.
- Terentieva I.E., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Sabrekov A.F., Maksyutov S.* Mapping of West Siberian taiga wetland complexes using Landsat imagery: implications for methane emissions // *Biogeosciences.* 2016. Vol. 13. P. 4615–4626.
- Thomas K.L., Benstead J., Davies K.L., Lloyd D.* Role of wetland plants in the diurnal control of CH_4 and CO_2 fluxes in peat // *Soil Biol. Biochem.* 1996. № 28. P. 17–23.
[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00103-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00103-4)
- Veretennikova E.E., Dyukarev E.A.* Comparison of methane fluxes of open and forested bogs of the southern taiga zone of Western Siberia // *Boreal Environ. Res.* 2021. № 26. P. 43–59.
- Whiting G.J., Chanton J.P.* Plant-dependent CH_4 emission in a subarctic Canadian fen // *Global Biogeochem. Cycles.* 1992. № 6. P. 225–231.
- Whiting G.J., Chanton J.P.* Control of the diurnal pattern of methane emission from emergent aquatic macrophytes by gas transport mechanisms // *Aquat. Bot.* 1996. № 54. P. 237–253.
[https://doi.org/10.1016/0304-3770\(96\)01048-0](https://doi.org/10.1016/0304-3770(96)01048-0)
- Yvon-Durocher G., Allen A.P., Bastviken D., Conrad R., Gudasz C., St-Pierre A., Thanh-Duc N., del Giorgio P.A.* Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales // *Nature.* 2014. № 507. P. 488–491.
<https://doi.org/10.1038/nature13164>

Spatial and Temporal Variability of Methane Emissions in the Oligotrophic Ridge-Hollow Complex of Western Siberia

E. E. Veretennikova^{a, b, *} and E. A. Dyukarev^{a, c}

^a*Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia*

^b*Siberian State Medical University, Tomsk, Russia*

^c*Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia*

**e-mail: lena2701@yandex.ru*

In the summer-autumn seasons (during for three years) using the static chamber method the CH_4 emission from the surface of one of the most common types of bog ecosystems in the taiga zone of Western Siberia—the ridge-hollow complex (RHC) was studied. A very significant spatial variability of CH_4 fluxes (from 60 to 74% in July and from 20 to 50% in September) was observed between the elements of the RHC: ridge and hollow. The temporal variability plays an equally important role and is a response to changes in the temperature of the peat deposits. At the hollow, a diurnal cycle of CH_4 was detected, which which is explained 34–64% by the variability of the peat deposit temperature at a depth of 2 to 15 cm. At the ridge, no diurnal cycle was found on the however, CH_4 fluxes during the summer-autumn period are 46% explained by the temperature at depths of 30 and 40 cm. The paper also discusses possible reasons for the spatial and temporal variability of CH_4 fluxes from the surface of the RHC.

Keywords: methane, peatlands, temperature, peat deposit, diurnal cycle, variability

REFERENCES

- Bohn T.J., Melton J.R., Ito A., et al. WETCHIMP-WSL: Intercomparison of wetland methane emissions models over West Siberia. *Biogeosci.*, 2015, vol. 11, pp. 3321–3349.
<https://doi.org/10.5194/bg-12-3321-2015>
- Brown M.G., Humphreys E.R., Moore T.R., Roulet N.T., Lafleur P.M. Evidence for a nonmonotonic relationship between ecosystem-scale peatland methane emissions and water table depth. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2014, vol. 119, pp. 826–835.
<https://doi.org/10.1002/2013JG002576.826-835>
- Clymo R.S., Pearce D.M.E. Methane and carbon dioxide production in transport through and efflux from a peatland. *Philos. Trans. R. Soc.*, 1995, vol. 350, pp. 249–259.
- Ding W.X., Cai Z.C., Tsuruta H. Diurnal variation in methane emissions from the stands of *Carex lasiocarpa* and *Deyeuxia angustifolia* in a cool temperate freshwater marsh. *Atmosph. Environ.*, 2004, vol. 38, pp. 181–188.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.09.066>
- Drollinger S., Maier A., Glatzel S. Interannual and seasonal variability in carbon dioxide and methane fluxes of a pine peat bog in the Eastern Alps, Austria. *Agricul. Forest Meteorol.*, 2019, vol. 275, pp. 69–78.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.05.015>
- Duan X., Wang X., Mu Y., Ouyang Z. Seasonal and diurnal variations in methane emissions from Wuliangsu Lake in arid regions of China. *Atm. Environ.*, 2005, vol. 39, pp. 4479–4487.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.03.045>
- D'yachkova A.V., Davydov D.K., Fofonov A.V., Krasnov O.A., Golovatskaya E.A., Simonenkov D.V., Nakayama T., Maksyutov Sh.Sh. Effect of anomalous environmental conditions on methane emission on the Bakchar bog nearby Plotnikovo in summer 2018. *Optika Atm. Okeana*, 2019, vol. 32, no. 6, pp. 482–489. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15372/AOO20190611>
- Dyukarev E.A., Alekseeva M.N., Golovatskaya E.A. Study of wetland ecosystem vegetation using satellite data. *Issled. Zemli Kosmosa*, 2014, no. 2, pp. 38–51. (In Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S0205961417020014>
- Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Shipkova G.V. Methane emission from peat deposits of raised bogs in Pskov oblast. *Geogr. Nat. Resour.*, 2015, vol. 36, pp. 70–78.
- Frenzel P., Karofeld E. CH_4 emission from a hollow-ridge complex in a raised bog: The role of CH_4 production and oxidation. *Biogeochem.*, 2000, vol. 51, pp. 91–112.
- Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov S., MacHida T. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes. *Environ. Res. Lett.*, 2011, no. 6, art. 045214.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045214>
- Greenup A.L., Bradford M.A., McNamara N.P., Ineson P., Lee J.A. The role of *Eriophorum vaginatum* in CH_4 flux from an ombrotrophic peatland. *Plant Soil*, 2000, vol. 227, pp. 265–272.
- Hommeltenberg J., Mauder M., Drösler M., Heidbach K., Werl P., Schmid H.P. Ecosystem scale methane fluxes in a natural temperate bog-pine forest in southern Germany. *Agricul. Forest Meteorol.*, 2012, vol. 198–199, pp. 273–284.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.017>

- Joabsson A., Christensen T., Wallen B. Vascular plant controls on methane emissions from northern peatforming wetlands. *Trends Ecol. Evol.*, 1999, no. 14, pp. 385–388.
- Juutinen S., Alm J., Larmola T., Saarnio S., Martikainen P.J., Silvola J. Stand-specific diurnal dynamics of CH₄ fluxes in boreal lakes: Patterns and controls. *J. Geophys. Res.*, 2004, vol. 109, art. D19313. <https://doi.org/10.1029/2004JD004782>
- Kalyuzhnii I.L., Lavrov S.A., Reshetnikov A.I., Paramonova N.N., Privalov V.I. Methane emission from the oligotrophic bog massif in the northwestern Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2009, no. 1, pp. 53–67. <https://doi.org/10.31857/S2587556620060102>
- Kim H.S., Maksyutov S., Glagolev M.V., Machida T., Patra P.K., Sudo K., Inoue G. Evaluation of methane emissions from West Siberian wetlands based on inverse modeling. *Environ. Res. Lett.*, 2011, no. 6, art. 035201. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/035201>
- Kiselev M.V., Dyukarev E.A., Voropai N.N. Seasonally frozen layer of peatlands in the southern taiga zone of Western Siberia. *Kriosfera Zemli*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 3–15. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-4\(3-15\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-4(3-15))
- Kleptsova I.E., Glagolev M.V., Filippov I.V., Maksyutov Sh.Sh. Methane emission from middle taiga ridges and ryams of Western Siberia. *Dinam. Okruzh. Sredy Glob. Izmen. Klimata*, 2010, no. 1-1, pp. 66–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.17816/edgcc1166-76>
- Koch S., Jurasicki G., Koebisch F., Koch M., Glatzel S. Spatial Variability of Annual Estimates of Methane Emissions in a Phragmites Australis (Cav.) Trin. ex Steud. Dominated Restored Coastal Brackish Fen. *Wetlands*, 2014, vol. 34, pp. 593–602. <https://doi.org/10.1007/s13157-014-0528-z>
- Korkiakoski M., Tuovinen J.-P., Aurela M., Koskinen M., Minkkinen K., Ojanen P., Penttilä T., Rainne J., Laurila T., Lohila A. Methane exchange at the peatland forest floor — automatic chamber system exposes the dynamics of small fluxes. *Biogeosci.*, 2017, vol. 14, pp. 1947–1967. <https://doi.org/10.5194/bg-14-1947-2017>
- Korrensalo A., Mammarella I., Alekseychik P., Vesala T., Tuittila E.S. Plant mediated methane efflux from a boreal peatland complex. *Plant Soil*, 2022, vol. 471, pp. 375–392.
- Kur'ina I.V., Veretennikova E.E. Impact of climate change of the Holocene on the development of the Ridge-Hollow Swamp Complex of Western Siberia. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2015, no. 2, pp. 74–87. (In Russ.).
- Lai D.Y.F., Moor T.R., Roulet N.T. Spatial and temporal variations of methane flux measured by antechambers in a temperate ombrotrophic peatland. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2014, vol. 119, pp. 864–880. <https://doi.org/10.1002/2013JG002410>
- Long K.D., Flanagan L.B., Cai T. Diurnal and seasonal variation in methane emissions in a northern Canadian peatland measured by eddy covariance. *Glob. Change Biol.*, 2010, vol. 16, pp. 2420–2435. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02083.x>
- Mikhaylov O.A., Miglovets M.N., Zagirova S.V. Vertical methane fluxes in mesooligotrophic boreal peatland in European Northeast Russia. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2015, vol. 8, pp. 368–375. <https://doi.org/10.1134/S1995425515030099>
- Mikkälä C., Sundh I., Svensson B.H., Nilsson M. Diurnal variation in methane emission in relation to the water table, soil temperature, climate and vegetation cover in a Swedish acid mire. *Biogeochem.*, 1995, vol. 28, art. 93–114.
- Morin T.H., Bohrer G., Naor-Azrieli L., Mesi S., Kenny W.T., Mitsch W.J., Schäfer K.V.R. The seasonal and diurnal dynamics of methane flux at a created urban wetland. *Ecol. Eng.*, 2014, vol. 72, pp. 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.02.002>
- Morrissey L.A., Zobel D.B. and Livingston G.P. Significance of stomatal control on methane release from Carex-dominated wetlands. *Chemosphere*, 1993, vol. 26, pp. 339–355.
- Nadeau D.F., Rousseau A.N., Coursolle C., Margolis H.A., Parlange M.B. Summer methane fluxes from a boreal bog in northern Quebec, Canada, using eddy covariance measurements. *Atmos. Environ.*, 2013, vol. 81, pp. 464–474. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.09.044>
- Pavelka M., Acosta M., Kiese R., et al. Standardization of chamber technique for CO₂, N₂O and CH₄ fluxes measurements from terrestrial ecosystems. *Int. Agrophys.*, 2018, vol. 32, pp. 569–587. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0045>
- Peregon A., Maksyutov S., Yamagata Y. An image-based inventory of the spatial structure of West Siberian wetlands. *Environ. Res. Lett.*, 2009, no. 4, art. 045014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045014>
- Rinne J., Riutta T., Pihlatie M., Aurela M., Haapanala S., Tuovinen J.-P., Tuittila E.-S., Vesala T. Annual cycle of methane emission from a boreal fen measured by the eddy covariance technique. *Tellus*, 2007, vol. 59, no. 3, pp. 449–457. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2007.00261.x>
- 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. *Glob. Biogeoch. Cycles*, 2017, vol. 32, pp. 1087–1106. <https://doi.org/10.1029/2017GB005747>
- Saarnio S., Alm J., Martikainen P.J., Silvola J. Effects of raised carbon dioxide on potential methane production

- and oxidation in, and methane emission from a boreal mire. *J. Ecology*, 1998, vol. 86, pp. 261–268.
- Sabrekov A.F., Filippov I.V., Dyukarev E.A., Zarov E.A., Kaverin A.A., Glagolev M.V., Terentieva I.E., Lapshina E.D. Hot spots of methane emission in West Siberian middle taiga wetlands physically disturbed by petroleum extraction activities. *Environ. Dyn. Glob. Clim. Change*, 2022, vol. 13, no. 3, pp. 142–155.
- Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Filippov I.V., Kazantcev V.S., Lapshina E.D., Machida T., Maksyutov S.S. Methane emission from north and middle taiga mires of Western Siberia: the “Standard model” BC8. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 17: Pochvoved.*, 2012, no. 1, pp. 50–59. (In Russ.).
- Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Machida T., Maksyutov S.S. Methane emission from bog complexes of the West Siberian taiga. *Eurasian Soil Sci.*, 2013, vol. 46–12, pp. 1182–1193.
- Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Maksyutov S.S. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH_4 flux upscaling. *Environ. Res. Lett.*, 2014, vol. 9, art. 045008.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/045008>
- Sebacher D.J., Harriss R.C., Barlett K.B. Methane emissions to the atmosphere through aquatic plants. *J. Environ. Qual.*, 1985, vol. 14, pp. 40–46.
- Shannon R.D., White J.R., Lawson J.E., Gilmour B.S. Methane efflux from emergent vegetation in peatlands. *J. Ecol.*, 1996, no. 84, pp. 239–246.
- Terent'eva I.E., Filippov I.V., Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kurbatova Yu.A., Maksyutov Sh. Western Siberia's Taiga Wetlands Mapping Based on Remote Sensing Data. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, no. 6, pp. 920–930. (In Russ.).
- Terentieva I.E., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Sabrekov A.F., Maksyutov S. Mapping of West Siberian taiga wetland complexes using Landsat imagery: implications for methane emissions. *Biogeosci.*, 2016, vol. 13, pp. 4615–4626.
- Thomas K.L. Benstead J., Davies K.L., Lloyd D. Role of wetland plants in the diurnal control of CH_4 and CO_2 fluxes in peat. *Soil Biol. Biochem.*, 1996, vol. 28, pp. 17–23.
[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00103-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00103-4)
- Veretennikova E.E., Dyukarev E.A. Comparison of methane fluxes of open and forested bogs of the southern taiga zone of Western Siberia. *Boreal Environ. Res.*, 2021, vol. 26, pp. 43–59.
- Whiting G.J., Chanton J.P. Plant-dependent CH_4 emission in a subarctic Canadian fen. *Glob. Biogeochem. Cycles.*, 1992, no. 6, pp. 225–231.
- Whiting G.J., Chanton J.P. Control of the diurnal pattern of methane emission from emergent aquatic macrophytes by gas transport mechanisms. *Aquat. Bot.*, 1996, vol. 54, pp. 237–253.
[https://doi.org/10.1016/0304-3770\(96\)01048-0](https://doi.org/10.1016/0304-3770(96)01048-0)
- Yvon-Durocher G., Allen A.P., Bastviken D., Conrad R., Gudasz C., St-Pierre A., Thanh-Duc N., del Giorgio P.A. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scale. *Nature*, 2014, vol. 507, pp. 488–491.
<https://doi.org/10.1038/nature13164>