

УДК 502.057; 502.501

Влияние аномальных факторов среды на эмиссию метана на Бакчарском болоте в районе пос. Плотниково летом 2018 г.

А.В. Дьячкова¹, Д.К. Давыдов¹, А.В. Фофонов¹, О.А. Краснов¹,
Е.А. Головацкая², Д.В. Симоненков¹, Т. Накаюма³, Ш.Ш. Максюттов^{3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, Россия

³National Institute for Environmental Studies
305-8506, Ibaraki, Tsukuba-Sity, Onogawa 16-2, Japan

Поступила в редакцию 22.02.2019 г.

Приводятся данные измерений удельных потоков метана (CH₄), полученные автоматическим камерным методом в характерных растительных ассоциациях на участке «Плотниково» Бакчарского болота (Большое Васюганское болото) в июне 2018 г. Отбор образцов воздушных проб осуществлялся в болотных фитоценозах грядово-мочажинного микрорельефа. Рассматриваемый период отличался аномальными погодными условиями по сравнению с теми же периодами предыдущих лет: в регионе наблюдались нехарактерные для многолетних наблюдений экстремальные осадки и высокая температура воздуха. Выявлена суточная динамика эмиссии CH₄. Корреляционный анализ позволил описать зависимости потоков CH₄ от гидрометеорологических параметров приземного слоя атмосферы и верхнего слоя почвы болота. Высокий уровень болотных вод оказал угнетающее влияние на метаногенез в рассматриваемый период.

Ключевые слова: болотные экосистемы, газообмен на границе «почва–атмосфера», летучие органические соединения, метан, эмиссионные потоки; wetland ecosystems, terrain-atmosphere gases exchange, volatile organic compounds (VOCs), methane, emission flows.

Введение

Большая часть юга Западно-Сибирской низменности покрыта бореальными лесами и болотами, выбрасывающими в атмосферу огромное количество летучих органических соединений (ЛОС), биогенная эмиссия которых в значительной степени определяет как формирование аэрозольного поля, так и баланс климатически и экологически важных малых газовых примесей во всей нижней тропосфере региона. Наибольшей эмиссией среди всех ЛОС на территории Васюганской равнины отличается первый гомолог углеводородного ряда – метан (CH₄), глобальное значение которого как парникового газа хорошо известно [1]. Долгосрочное прогнозирование климатического эффекта малых парниковых газовых составляющих атмосферы невозможно без знания распределения их наземных источников и стоков [2]. Точное измерение потоков метана на

границе «почва–атмосфера» должно сыграть существенную роль в предсказании атмосферной концентрации CH₄ и его влияния на климат.

Эмиссия метана в болотных экосистемах зависит от множества гидрометеорологических параметров, важнейшими из которых считаются температура торфяной залежи и уровень болотных вод [3]. Водно-минеральное питание болот – главный фактор, определяющий развитие растительности и динамику болотной экосистемы, а также интенсивность биохимических процессов в деятельном слое торфяной залежи, в том числе и метаногенеза [4]. Временная изменчивость химического состава вод под воздействием гидрологического и метеорологического факторов определяет гидрохимический режим переувлажненных территорий. В совокупности все эти процессы формируют годовой бюджет углерода болотных экосистем.

Любые отклонения в сезонном поведении метеорологических и гидрологических параметров окружающей среды могут влиять на гидрохимический режим болотных экосистем, вызывая качественные и количественные изменения в типах биохимических процессов, определяющих углеродный бюджет заболоченных территорий. Поэтому так важны мониторинг этих территорий и изучение сезонного поведения метеорологических и гидрологи-

* Алена Владимировна Дьячкова (alena_sidlyarova@mail.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru); Олег Александрович Краснов (krasnov@iao.ru); Евгения Александровна Головацкая (golovatskaya@imces.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Tadanobu Nakayama (nakat@nies.go.jp); Шамиль Шавратович Максюттов (shamil@nies.go.jp).

ческих параметров на постоянной ежегодной основе для определения углеродного баланса.

Цель работы – получение оценки эмиссии метана на болотном участке, выявление влияния различных факторов на ее интенсивность в начале летнего измерительного сезона 2018 г. и причин возможных наблюдаемых отклонений по сравнению с данными мониторинга прошлых лет и известными литературными источниками.

Для достижения цели исследования решалась задача определения величин удельных суточных потоков CH_4 с помощью автоматических камер; для выявления степени связи удельных потоков метана с гидрометеорологическими факторами использовалась методика корреляционного анализа.

Место проведения измерений

Измерения проводятся в теплое время года (с мая по октябрь) в зоне южной тайги Западной Сибири на Бакчарском болоте, представляющем собой северо-восточный отрог Большого Васюганского болота, на полевом стационаре «Плотниково» Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия). Измерительная площадка находится примерно в 16 км от пос. Плотниково (Бакчарский р-н, Томская обл.) [5]. Координаты площадки $56^{\circ}48'52''$ с.ш., $82^{\circ}51'21''$ в.д.

Удельные потоки метана определялись при помощи автоматического камерного метода [5, 6]: шесть одинаковых камер из оргстекла ($0,9 \times 0,9 \times 0,5 \text{ м}^3$) устанавливались на увлажненной части мезотрофного болота в гряде-мочажинном комплексе, покрытом в основном травой и мхом. Камеры располагались на различных участках (1–6) болотного микрорельефа таким образом, чтобы тип подстилающей поверхности на каждом из них соответствовал характерному растительному сообществу.

На рис. 1 представлены спутниковый снимок и схема расположения автоматических камер на измерительной площадке. Камеры измерительного комплекса установлены компактно, что определяет большую однородность исследуемой болотной экосистемы.

Следует отметить, что регулярные сезонные измерения на этой болотной площадке были возобновлены в 2016 г. после продолжительного перерыва (с 2009 г.) с полным восстановлением утраченного оборудования.

Профиль исследуемого участка расположен от сосново-кустарничково-сфагнуовой гряды к зарастающему озеру. Камера 1 находится на краю гряды и соответствует сосново-кустарничково-сфагнуовой фитоценозу. В составе растительного покрова присутствуют низкорослые сосны (*Pinus sylvestris* f. *willkommii*) высотой 50 см, проективное покрытие (ПП) 30%. Травяно-кустарничковый ярус представлен багульником (*Ledum palustre* L.), ПП 30%, и кочками пушицы (*Eriophorum vaginatum* L.), ПП 40%, встречается клюква (*Oxycoccus microcarpus* Turcz.), ПП не более 5%. Моховой покров

сплошной, состоит в основном из *Sphagnum fuscum* Klinggr. и *Sph. angustifolium* C. Jens.

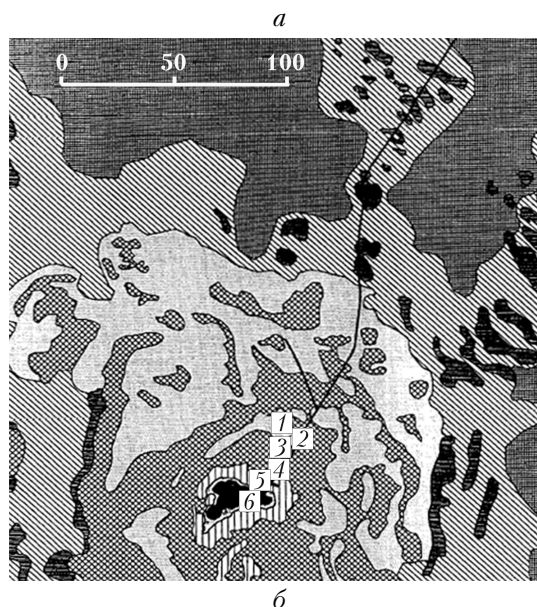
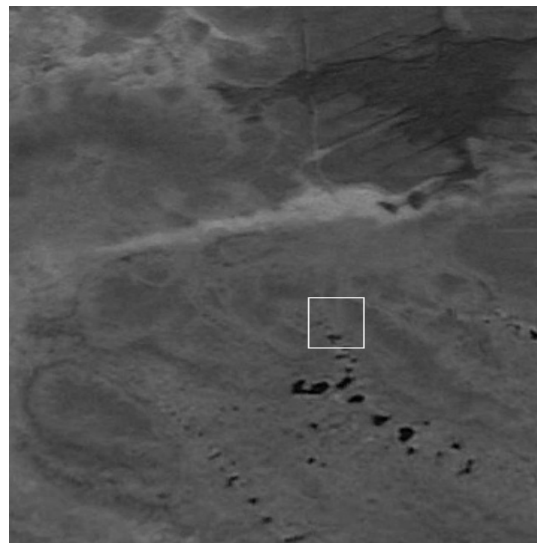


Рис. 1. Космический снимок местности (а) и схема расположения автоматизированного комплекса измерительных камер Flux-NIES на болотной площадке «О» (б)

Камера 2 находится также на краю гряды (на южной ее стороне и ближе к краю мочажины по направлению к озеру) и характеризуется как сосново-пушицево-сфагнуовой фитоценоз. Участие сосны в растительном покрове снижается до 10%, в травяно-кустарничковом ярусе преобладает пушица (ПП 40%), увеличивается доля клюквы (10%), встречаются единичные растения андромеды (*Andromeda polifolia* L.) и багульника. Моховой покров сплошной, представлен *Sphagnum fuscum*.

Камеры 3 и 4 расположены на осоково-сфагнуовой мочажине. Микрорельеф мочажины слабо выражен, разница высот составляет не более 10 см. На 3-м участке в травяно-кустарничковом ярусе встречаются низкорослые растения андромеды

(высота 5 см, ПП 5%), кочки пушицы (ПП 5%), осока (*Carex limosa* L.) (ПП 5%), клюква (ПП 5%), росянка (*Drosera rotundifolia* L.). Проективное покрытие сфагнового мха 100%, в моховом покрове встречаются *Sph. angustifolium*, *Sph. Compactum* Lam & DC, *Sph. Lindbergii* Schimp.

По мере приближения к озеру увеличивается обводненность мочажины. В растительном покрове 4-го участка несколько увеличивается участие андромеды (ПП 10%), появляются ринхоспора (*Rhynchospora alba* (L.) Vahl), осока (*Carex pauciflora* Lightf), ПП травяного яруса достигает 50%. Моховой покров состоит из *Sph. compactum* и *Sph. papillosum* Lindb (ПП 100%).

Растительный покров участка 5, расположенного ближе всего к озеру, характеризуется как сфагновая топь. В растительном покрове не более 10% занимают *Carex pauciflora* и андромеда. Сплошной моховой покров (ПП 100%) состоит из *Sph. papillosum*. На границе мочажины и озера обильно растет вахта (*Menyanthes trifoliata* L.).

Камера 6 расположена непосредственно на озере.

Средства и методика измерений

Автоматизированный измерительный комплекс Flux-NIES с шестью автоматическими камерами разработан в Национальном институте окружающей среды (Цукуба, Япония) в начале 2000-х гг. для исследования потоков метана и диоксида углерода на границе «почва – атмосфера» [7]. С тех пор состав его оборудования неоднократно изменялся и модернизировался. В настоящее время на полевом стационаре «Плотниково» эксплуатируются два почти идентичных по набору оборудования комплекса.

В качестве газоанализатора метана в состав измерительного комплекса включен модифицированный полупроводниковый сенсор TGS-842 (Figaro Inc., США) с чувствительным элементом на основе кристалла диоксида олова – касситерита (SnO_2) [8]. Для измерения концентраций CO_2 используется не дисперсионный инфракрасный NDIR-газоанализатор LI-820 (Licor Inc., США). Подача пробы воздуха от камер к приборам газоанализа осуществляется нагнетающим насосом типа N86KN (KNF Neuberger GmbH, Германия) по системе полиэтиленовых трубок (\varnothing 4 мм) и пневмоэлектрических клапанов. Управление измерительным комплексом, сбор и сохранение информации осуществляется через даталоггер CR1000 (Campbell Sci., США).

Для автономного функционирования комплекса в качестве бесперебойного источника электроэнергии используется набор аккумуляторных батарей, подзарядка которых осуществляется в дневное время солнечными электропанелями или ветровой турбиной.

Основные параметры окружающей среды контролируются стандартным набором метеорологических датчиков и приборов: датчики атмосферного давления RX2760 (OMEGA, США), скорости и направления ветра 05103VM (R.M. Young Com., США), пиргеометр/радиометр PIR (Eppley Lab., США),

пиранометр солнечной интегральной радиации РСМ-21 (Kipp&zonen, Нидерланды), измерители уровня осадков 52202H (R.M. Young Com., США), температуры и относительной влажности атмосферного воздуха HMP45A (VAISALA, Финляндия). Дополнительно температура почвы измеряется датчиками iBotton DS1921G (Maxim Integrated, США), а уровень грунтовых вод – датчиком НОВО U20-001-04 (Oneset Comp., США).

Методика измерений основана на регистрации изменения концентрации исследуемого газа внутри кратковременно изолируемой от атмосферы камеры. Анализируемый воздух по трубкам через управляемый многоходовый клапан выбора камеры подается на газоанализаторы. Клапан высокого давления разделяет поток воздуха из рабочей камеры на два, меньший из которых (~20 мл/мин) поступает на блок газоанализаторов, а оставшаяся часть по обратной трубке возвращается в камеру, чем достигается постоянство давления воздуха внутри камеры [7].

В нормальном состоянии все камеры открыты, кроме одной (рабочей), из которой производится отбор воздуха на газоанализ. Очередность работы камер, продолжительность и время их открытия-закрытия определяются программой управления в логгере.

Для определения чувствительности газоанализаторов в измерительном комплексе Flux-NIES дважды в сутки используется процедура калибровки по стандартным газовым смесям. Концентрации CO_2 и CH_4 в трех баллонах (в нейтральной среде чистого синтетического воздуха в атмосферных пропорциях) подобраны таким образом, что в первом случае они заведомо превышают наибольшие концентрации этих газов, достижимые в рабочих (закрытых) автоматических камерах, во втором сопоставимы с атмосферными фоновыми значениями, а в третьем очень низкие. По измеренной разности сигналов газоанализаторов $dC(t)$ определяется текущее значение коэффициента калибровки прибора $S(t)$ ($\text{млн}^{-1}/\text{мВ}$), которое в идеале должно быть постоянным. Однако анализ циклов калибровки (в течение всего периода измерений) показал, что значения $S(t)$ для используемых газоанализаторов непостоянны и зависят от внешних погодных условий, поэтому возможна дополнительная их коррекция.

На измерения CH_4 в большей степени влияют изменения температуры окружающей среды T ($^{\circ}\text{C}$) и связанные с ней флуктуации потока воздушной пробы через анализируемый объем.

Для уменьшения вариативности коэффициентов $S(t)$ результаты измерений были скорректированы с использованием найденных зависимостей по следующей формуле [9]:

$$S_{\text{CH}_4}(t_k) = \frac{\Delta C_{\text{CH}_4}}{dC_{\text{CH}_4}(t_k) + K_{\text{CH}_4}(T_0 - T(t_k))}, \quad (1)$$

где t_k – время калибровки; ΔC_{CH_4} – максимальная разность концентраций в стандартных газовых сме-

сях; K_{CH_4} — эмпирический коэффициент; T_0 — исходная температура окружающей среды.

Для более точного определения величины газовых потоков при обработке изменения выходных сигналов газоанализаторов $dC(t)/dt$ ($\text{мВ} \cdot \text{с}^{-1}$) в режиме закрытой камеры использовался метод наименьших квадратов с определением линейности процесса по коэффициенту парной корреляции R . Ширина окна фильтрации данных определялась по максимальному значению R^2 , что соответствовало наибольшим значениям фиксируемых эмиссии/стока CH_4 на границе «почва—атмосфера».

Так как в измерительных комплексах FluxNIES дважды в сутки (3:00 и 15:00) проводится процедура калибровки по стандартным газовым смесям, вычисление газовых потоков производилось по текущему коэффициенту калибровки прибора $S_{\text{CH}_4}(t)$ и разности изменения сигнала газоанализатора $dC_{\text{CH}_4}(t)$ при поступлении воздушной пробы из закрывающихся камер; затем полученные данные усреднялись за период до следующей процедуры калибровки. Статистическое обеспечение найденных усредненных полусуточных эмиссионных потоков CH_4 составило 5–6 измерений на камеру.

Для удобства дальнейшего анализа данных в измерении газовых потоков принято переходить к весовым характеристикам ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) по известной формуле

$$F(t) = \frac{S(t)dC(t)/dt \cdot MP \cdot 100v \cdot 3600}{8312,6(273,15 + T) \cdot s}, \quad (2)$$

где M — молярное число газа (для метана $M \approx 16$ г/моль); v и s — объем и площадь основания применяемых камер (м^3 и м^2 соответственно); P — атмосферное давление, гПа.

Для более полного понимания взаимосвязей между измеряемыми параметрами в приземном слое атмосферы была исследована корреляционная связь [10] шести массивов данных: усредненные потоки метана в пяти камерах и температуры почвы.

Достоверность корреляций оценивалась путем сравнения вычисленных коэффициентов с критиче-

скими табличными значениями, соответствующими уровню значимости 0,05 [11, 12].

Результаты измерений и их анализ

Рассмотрим результаты натуральных измерений потоков метана на границе «почва—атмосфера» на площадке «О» с 19 по 26.06.2018 г. Этот период характеризуется началом пика активности метаногенеза в болотных экосистемах, закладывающего основы в годовой бюджет CH_4 на исследуемой территории [13].

Вспомогательные измерения параметров окружающей среды показали следующие результаты. Среднесуточные значения температуры воздуха (T_{air}) составили $19,05$ °С со среднеквадратичным отклонением $1,70$ °С, минимумом $11,6$ °С и максимумом $29,2$ °С. Температура почвы на глубине 10–40 см (далее, T_{10} , ..., T_{40}) достигала $15,57 \pm 2,25$ °С. Минимум температуры T_{10} — 16 °С, максимум — 22 °С. Для T_{20} эти показатели составили $15,5$ и 18 °С соответственно; для T_{30} — 13 и 14 °С (за неполный временной период), а для T_{40} — 12 и $14,5$ °С в начале и конце рассматриваемого периода измерений соответственно (рис. 2).

На рисунке показано, что на глубинах 10 см изменения температуры почвы происходили синхронно с температурой воздуха, с некоторым временным запаздыванием отклика первой на внешние импульсы тепла. Ярко выраженная суточная динамика температуры T_{10} вполне согласуется с периодами максимального прогрева почвы после полудня и ее остыванием до предрассветных часов.

Результаты измерений почвенных температур на глубинах 20 см показывают, что амплитуда колебаний здесь гораздо меньше по сравнению с температурой воздуха и температурой почвы T_{10} . Возрастает и временное запаздывание отклика величин T_{20} на воздействие внешних импульсов тепла. Также рис. 2 демонстрирует, как постепенно уменьшаются температурные колебания с увеличением глубины измерений ($T_{20} \rightarrow T_{30} \rightarrow T_{40}$).

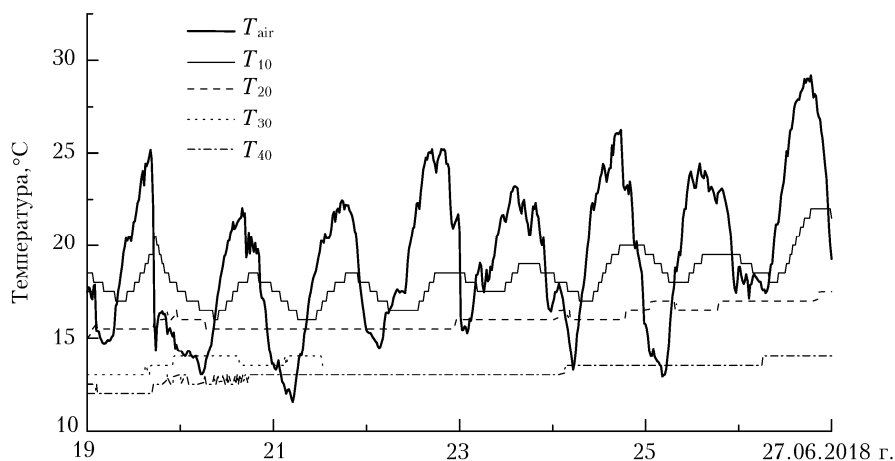


Рис. 2. График среднесуточных значений температуры воздуха (T_{air}) и почвы на глубинах 10–40 см (T_{10} , T_{20} , T_{30} , T_{40})

Уменьшение амплитуды колебаний температуры в почве и сдвиг их фазы при увеличении глубины достаточно хорошо объясняются в рамках классической теории теплопроводности Фурье, которая описывает этот процесс как экспоненциальный. С учетом высокой насыщенности болотной почвы водой вычисления показывают, что если амплитуда суточных колебаний над поверхностью составляет 20 °С, то на глубине 10 см она будет ≈ 4 °С [9], что согласуется с полученными нами данными (см. рис. 2).

Следует отметить, что 17–30.06.2018 г. в южных областях Западной Сибири стояла аномально жаркая погода с максимальными регистрируемыми значениями температуры 30–34 °С, местами 35–38 °С [14, 16].

Кроме того, по данным Росгидромета на юге Западной Сибири в это время проходила серия атмосферных фронтов, вследствие чего отмечались частое выпадение осадков и их избыток (в Томской обл. выпало 164% осадков, в Новосибирской – 175%). 19–20.06.2018 г. в Новосибирской, Томской и Кемеровской обл. наблюдались дожди, местами сильные (16–28 мм), грозы, град диаметром 5–19 мм, усиление ветра до 20–24 м/с [16].

Ближние к этим погодные условия наблюдались и в районе Бакчарского болота. Как результат, отводные каналы на автотрассе Плотниково – Бакчар долгое время были переполнены, а на ближайшей к месту мониторинга р. Иксе наблюдался продолжительный паводок.

Измеренные средние значения уровня болотных вод на площадке «О» оказались аномально высокими: $0,038 \pm 0,016$ м над уровнем поверхности. Дождевые осадки за указанный период составили 58 мм. На рис. 3 показаны устойчиво положительные значения стояния почвенных вод над поверхностью в конце июня. Небольшие суточные колебания уровня вод возникали в результате дневного испарения и ночной адвекции влаги по всей площади болота, а также утреннего выпадения росы.

Таким образом, в июне 2018 г. на Бакчарском болоте наблюдалось совпадение двух погодных аномалий – температурной и гидрологической. Эти факторы могли повлиять на биохимические процессы, участвующие в метаногенезе в почве, и эмиссию CH_4 с болотной поверхности.

В табл. 1 приводятся усредненные значения потоков CH_4 , определенные с помощью камер 1–5 в июне 2018 г. Самые продуктивные по эмиссии метана камеры 2–5 находятся на мочажинном и близком к нему микрорельефе. Наибольшие значения удельных потоков CH_4 были зарегистрированы в камере 2 (медиана 2,62 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$); наименьшие значения в камере 1, расположенной в низком яме «сухой» болотной гряды, где медиана составила 1,35 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$. Ярko выражены полусуточные колебания потоков метана, наблюдавшиеся в камерах 4 и 5. В начале, середине и конце измерительного периода отмечаются повышенные значения эмиссии метана, что согласуется с приведенными ранее температурными данными. Считается, что температура прогрева почвы оказывает более заметное влияние на интенсивность выделения метана, чем уровень болотных вод WL [9]. Атмосферное давление как относительно слабо меняющийся фактор практически не влияет на эмиссию CH_4 .

Очевидно, продуктивность метаногенеза спадает от периферии к центру мочажинного участка, что соответствует распределению толщины торфяной залежи и увлажнению почвы. Полученные величины неплохо согласуются с имеющимися литературными данными [5, 9, 15, 16].

Корреляционный анализ потоков метана, температуры воздуха и почвы на разных глубинах, атмосферного давления, уровня болотных вод позволяет качественно описать зависимости интенсивности эмиссии CH_4 от внешних факторов окружающей среды за рассматриваемый период.

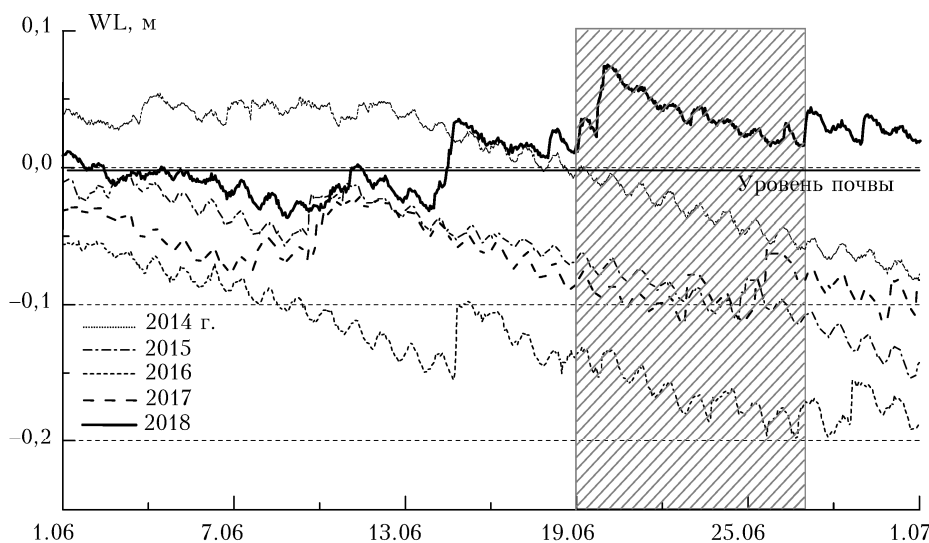


Рис. 3. Уровень болотных вод в июне 2014–2018 гг.

Таблица 1

Усредненные потоки эмиссии CH_4 $F(t)$, мг $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$, на участках болотной площадки «О» в июне 2018 г.

Дата (время суток)	Камера					Температура почвы T_{10} , °C
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	
19.06 (р.м.)	2,646	2,033	3,760	2,636	2,237	18,49
20.06 (а.м.)	1,811	2,310	1,704	1,510	1,222	16,70
20.06 (р.м.)	1,769	2,644	1,532	1,895	2,145	17,93
21.06 (а.м.)	1,343	2,448	1,319	1,578	1,247	16,47
21.06 (р.м.)	1,085	2,227	1,627	1,797	1,957	18,00
22.06 (а.м.)	0,908	2,364	2,147	1,524	1,739	16,67
22.06 (р.м.)	1,510	2,690	2,461	2,362	2,884	18,28
23.06 (а.м.)	1,283	2,959	2,119	2,062	2,315	17,77
23.06 (р.м.)	1,650	3,463	1,612	2,634	1,911	18,63
24.06 (а.м.)	0,545	2,058	1,928	2,356	1,652	18,46
25.06 (а.м.)	0,557	2,022	2,164	1,801	1,347	17,67
25.06 (р.м.)	0,798	2,852	1,672	1,898	1,668	19,39
26.06 (а.м.)	1,200	2,984	2,093	1,582	1,862	18,69
26.06 (р.м.)	1,761	3,554	3,475	3,115	2,994	21,61
Среднее \pm СКО за 19–26.06	1,35 \pm 0,57	2,62 \pm 0,50	2,12 \pm 0,71	2,05 \pm 0,50	1,94 \pm 0,54	18,20 \pm 1,29
Среднесезонное значение \pm СКО	1,89 \pm 0,78	3,44 \pm 1,09	2,57 \pm 0,86	2,47 \pm 1,14	1,91 \pm 0,86	—

Найденные значимые по уровню 0,05 коэффициенты корреляции выделены в табл. 2 полужирным. Из корреляционной матрицы видно, что имеются 7 связанных друг с другом групп массивов данных.

Таблица 2

Корреляционная матрица значений для временных рядов измерений эмиссий метана на различных участках болотной площадки «О» и температуры почвы на глубине 10 см

Участок площадки	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	T_{10} , °C
№ 1. Гряда	0,1873	0,5022	0,4128	0,4087	0,1420
№ 2. Край мочажины	1	0,0664	0,4404	0,5094	0,6047
№ 3. Мочажина		1	0,6626	0,6244	0,5449
№ 4. Мочажина			1	0,7155	0,7663
№ 5. Мочажина				1	0,6556

Достаточно высокая корреляция эмиссий CH_4 в камерах 3–5, очевидно, обусловлена в первую очередь близким расположением камер друг к другу на мочажинном микрорельефе и, соответственно, схожими условиями протекающих на этих участках процессов.

Также хорошо прослеживается зависимость потоков эмиссии CH_4 в камерах 2–5 от температурного режима поверхности почвы, т.е. чем выше температура почвы, тем больше выход метана. Исключение составляет камера 1, которая находится в несколько другом режиме почвенных температур. Приподнятая над поверхностью болота «сухая» гряда имеет воздушную прослойку в растительной подстилке, которая отличается пониженной теплопроводностью и увеличивает сдвиг фазы при проникновении в почву внешних импульсов тепла. Кроме того, в подобных условиях увеличенной аэрации следует ожидать усиления активности потребляющих CH_4 метанотрофных бактерий (как известно,

при повышении температуры их активность также сначала возрастает, но после превышения оптимальной температуры падает [17, 18]). Присутствие этих микроорганизмов непосредственно на Бакчарском болоте и относительно высокая метанотрофная активность были показаны ранее [19–22].

При рассмотрении сезонных бюджетов CH_4 на измерительной площадке «О» за последние годы отмечается значительное снижение показателей эмиссии метана почти для всех точек площадки. Особенно четко это видно при сравнении с экстремально высоким потоком CH_4 , наблюдавшимся в условиях температурной аномалии на данном участке в предыдущем сезоне, с середины лета и до начала осени 2017 г. [23].

Для камеры 2 измеренная величина потоков CH_4 упала, по сравнению с сезоном 2017 г., на 1,79 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$, или на 34%, хотя, по сравнению с 2016 г., эмиссия здесь немного подросла (+22%). По-видимому, сказывается пограничное положение этой камеры между мочажинной и болотной грядой.

Все камеры в мочажинном микрорельефе показали минимумы для трехлетних наблюдений за эмиссией метана. В камере 3 поток упал, по сравнению с сезоном 2017 г., на 1,75 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$ (–40%), в камере 4 – на 2,70 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$ (–52%), в камере 5 – на 1,88 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$ (–50%).

Максимальное падение выхода метана в 2018 г. наблюдалось в камере 6 на озерной поверхности – на 4,77 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$ (–61%). Величины потоков эмиссии CH_4 в камере 1, расположенной на болотной гряде, оставались на стабильно низком уровне в течение всех трех периодов измерений.

Обращает на себя внимание тот факт, что среднесезонные показатели эмиссии метана почти совпали с их величинами, наблюдавшимися в указанный выше период в конце июня (см. табл. 1). Следовательно, интенсивность метаногенеза не достигла своих оптимальных значений за период измерительной кампании 2018 г.

Причины наблюдавшегося изменения в газообмене на болотной поверхности авторы связывают с погодными аномалиями в период выхода процессов метаногенеза на сезонный максимум в конце июня – начале июля.

Приток избыточной атмосферной влаги мог вызвать вымывание и вынос за пределы болота питательного субстрата, необходимого для жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов.

Кроме того, значительное влияние на динамику общей минерализации болотных вод в течение годового цикла оказывает изменение содержания гидрокарбонатного иона (HCO_3^-). В кислых водах олиготрофных болот он полностью отсутствует, а в мезоолиготрофных болотах появляется в том случае, когда водородный показатель pH становится больше 5,0–5,05 [4]. Атмосферные осадки, выпадая на подстилающую поверхность и взаимодействуя с болотными водами, могут терять гидрокарбонатный ион, раскисляя почву, меняя гидрохимический режим территории и баланс биохимических процессов, отвечающих за метаногенез и окисление CH_4 в болотных экосистемах.

Таким образом, газообмен на заболоченных территориях Сибири может испытывать значительные изменения в рамках одного сезона, что влияет на годовую бюджет углерода в региональном масштабе.

Заключение

Показано, что величины эмиссии метана на различных участках болотных почв зависят от типа растительности и уровня прогрева торфяной залежи. Наибольшие значения удельных потоков метана были зарегистрированы на границе между грядой и мочажинной (камера 2), найдена медиана 2,615 $\text{mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Наименьшими значениями эмиссии CH_4 характеризовался низкий рям на гряде (камера 1), где медиана составила от 1,347 $\text{mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Удельные потоки CH_4 коррелируют с влагосодержанием болотных почв. Поэтому небольшие величины эмиссии метана на низком рьяме и повышенные ее значения в приозерной мочажине согласуются с распределением уровня увлажнения торфяной залежи в болотных экосистемах.

Отмечено значительное снижение показателей эмиссии метана с болотной поверхности почти на всех измерительных участках в 2018 г. Это увязывается с наблюдавшимися погодными аномалиями в период выхода процессов метаногенеза на максимальные сезонные показатели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-45-700020 p_a). Обеспечение полевых измерений осуществлялось при участии Фонда глобальных исследований окружающей среды для Национальных институтов Министерства окружающей среды Японии. Авторы выражают благодарность М.Ю. Аршинову за помощь в восстановлении измерительного комплекса на болотной площадке «О» и М.В. Глаголеву за полезные замечания к статье.

1. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Quéré C.Le., Myneni R.B., Piao S., Thornton P. Carbon and Other Biogeochemical Cycles // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). New York, USA: Cambridge University Press, 2013. 570 p.
2. Милько О.И. Планетарная газовая функция почвенного покрова // Почвоведение. 1988. № 7. С. 59–75.
3. Terenteva I.E., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Sambrekov A.F., Maksyutov S. Mapping of West Siberian taiga wetland complexes using Landsat imagery: Implications for methane emissions // Biogeosci. 2016. V. 13, N 16. P. 4615–4626. URL: <https://www.biogeosciences.net/13/4615/2016/> (last access: 22.01.2019).
4. Калужный И.Л. Общие черты формирования гидрохимического режима основных типов болот России // Метеорол. и гидрол. 2018. № 8. С. 72–81.
5. Maksyutov S., Inoue G., Sorokin M., Nakano T., Krasnov O., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N., Vasiliev S. Methane fluxes from wetland in West Siberia during April – October 1998 // Proc. Seventh Symp. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba: Isebu, 1999. P. 115–124.
6. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуэ Г., Краснов О.А., Мачида Т., Максюттов Ш., Недэлэк Ф., Рамонет М., Суас Ф., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Организация мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу компонентов над территорией Сибири и некоторые его результаты. 1. Газовый состав // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 11. С. 948–955.
7. Краснов О.А., Maksyutov S., Глаголев М.В., Катаев М.Ю., Inoue G., Надев А.И., Шелевой В.Д. Автоматизированный комплекс «Flux-NIES» для измерения потоков метана и диоксида углерода // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1090–1097.
8. Suto H., Inoue G. A New Portable Instrument for In Situ Measurement of Atmospheric Methane Mole Fraction by Applying an Improved Tin Dioxide-Base Gas Sensor // J. Atmos. Ocean. Technol. 2010. V. 27. P. 1175–1184.
9. Краснов О.А., Maksyutov S.S., Давыдов Д.К., Фофонов А.В., Глаголев М.В., Inoue G. Мониторинг эмиссии метана и двуокиси углерода из почвы в атмосферу и параметры почвы. Бакчарское болото Томской области (2014 г.) // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 7. С. 644–654.
10. Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Дучков А.Д., Казанцев С.А. Экспериментальное исследование температурного режима торфяной залежи Бакчарского болота (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 6. С. 745–754.
11. Кучеренко В.З. Применение методов статистического анализа для изучения общественного здоровья и здравоохранения. М.: ГЭОТАР-МЕД, 2004. 192 с.
12. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высшая школа, 1988. 239 с.
13. Zona D., Gioli B., Commane R., Lindaas J., Wofsy S.C., Miller C.E., Dinardo S.J., Dengel S., Sweeney C., Karion A., Chang R.Y.-W., Henderson J.M., Murphy P.C., Goodrich J.P., Moreaux V., Liljedahl A., Watts J.D., Kimball J.S., Lipson D.A., Oechel W.C. Cold season emissions dominate the Arctic tundra me-

- thane budget // Proc. NAS. 2016. V. 113, N 1. P. 40–45. DOI: 10.1073/pnas.1516017113.
14. URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201806> (last access: 22.01.2019).
 15. *Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov S., Machida T.* Regional methane emissions from West Siberia mire landscapes // Environ. Res. Lett. 2011. V. 6, N 4. 7 pp.
 16. *Рязанова Е.В.* Погода на территории Российской Федерации в июне 2018 г. // Метеорол. и гидрол. 2018. № 9. С. 129–132.
 17. *Хмеленина В.Н., Ешинимав Б.Ц., Решетников А.С., Сузина Н.Е., Троценко Ю.А.* Аэробные метанотрофы экстремальных экосистем // Тр. Ин-та микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН. Вып. XIII: К 100-летию открытия метанотрофии / под ред. В.Ф. Гальченко. М.: Наука, 2006. С. 147–171.
 18. *Белова С.Э., Ошкин И.Ю., Глаголев М.В., Лашина Е.Д., Максюттов Ш.Ш., Дедыш С.Н.* Метанотрофные бактерии грязевых микровулканов в поймах северных рек // Микробиология. 2013. Т. 82, № 6. С. 732–740.
 19. *Dedysh S.N.* Methanotrophic Bacteria of Acidic Sphagnum Peat Bogs // Microbiol. 2002. V. 71, N 6. P. 638–650.
 20. *Dedysh S.N., Dunfield P.F., Derakshani M., Stuber S., Heyer J., Liesack W.* Differential detection of type II methanotrophic bacteria in acidic peatlands using newly developed 16S rRNA-targeted fluorescent oligonucleotide probes // FEMS Microbiol. Ecol. 2003. V. 43. P. 299–308.
 21. *Глаголев М.В., Лебедев В.С., Смагин А.В., Ерохин В.Е., Оленев П.В., Большаков Е.А., Ножевинова А.Н.* Окисление метана в болотах Западной Сибири (на примере Большого Васюганского Болота) // Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии: тез. докл. национал. конф. с междунар. участием. 2000. С. 4–85.
 22. *Лебедев В.С., Глаголев М.В., Ерохин В.Е., Иванов Д.В.* Изменение изотопных параметров болотных газов при транспорте из очагов генерации в атмосферу (на примере болота в Западной Сибири) // Геоинформатика. Пушино. 2005. № 2. С. 34–42.
 23. *Glagolev M.V., Ilyasov D.V., Sabrekov A.F., Littl V., Goncharov V.M.* Response of Methane Emission to Temperature Anomalies of Mires: Case Study of the Southern Taiga in Western Siberia // Water Resour. 2018. V. 45, suppl. 2. P. 44–52.

A.V. Dyachkova, D.K. Davydov, A.V. Fofonov, O.A. Krasnov, E.A. Golovatskaya, D.V. Simonenkov, T. Nakayama, S.S. Maksyutov. **Effect of anomalous environmental conditions on methane emission on the Bakchar bog nearby Plotnikovo in summer 2018.**

The measurements of methane fluxes (CH₄) obtained by the automatic chamber method in the characteristic plant associations on the Plotnikovo section of the Bakchar bog (the Great Vasyugan Mires) in June 2018 are presented. Air sampling was carried out in wet phytocenoses on the hollow-ridge landscape. The period under consideration was characterized by anomalous weather conditions compared with the same periods of previous years: extreme precipitations and high air temperatures. On the basis of the research, the daily dynamics of CH₄ emission was revealed. The correlation analysis made it possible to describe the dependences of CH₄ fluxes on the hydrometeorological conditions of the surface and upper layers of the bog soil. The high flood of bog waters inhibits the methanogenesis during the period of observation.