

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 502.057; 502.501

doi: 10.17223/25421379/25/4

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ (УЧАСТОК ПЛОТНИКОВО БАКЧАРСКОГО БОЛОТА)



Денис Константинович Давыдов¹, Олег Александрович Краснов²,
Денис Валентинович Симоненков³, Александр Владиславович Фофонов⁴,
Евгения Александровна Головацкая⁵, Шамиль Шавратович Максютлов⁶

^{1, 2, 3, 4} Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

⁵ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

⁶ Национальный институт исследований окружающей среды, Цукуба, Япония

¹ denis@iao.ru

² krasnov@iao.ru

³ simon@iao.ru

⁴ alenfo@iao.ru

⁵ golovatskaya@imces.ru

⁶ maksyutov@yahoo.com

Аннотация. Приводятся данные измерений сезонных потоков метана и углекислого газа в характерных растительных ассоциациях на Бакчарском болоте в Томской области в теплое время 2016–2020 гг. с использованием автоматического камерного комплекса Flux-NIES. Обсуждается межгодовая и пространственная изменчивость поглощения атмосферного углерода болотной растительностью и его эмиссии из торфяной залежи. Наблюдается связь этих процессов с уровнем увлажнения в болотных экосистемах.

Ключевые слова: автоматизированный камерный метод, газообмен на границе «почва – атмосфера», болотные экосистемы

Благодарности: авторы благодарят М.Ю. Аршинова за помощь в реконструкции измерительных комплексов, А.А. Плотникова за техническую поддержку непрерывных измерений в течение многих лет.

Источник финансирования: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области (проект № 18-45-700020). Для выполнения гранта использовалась инфраструктура ИОА СО РАН, созданная и эксплуатируемая по госзаданию № 121031500342-0, включая ЦКП «Атмосфера». Обеспечение полевых измерений осуществлялось при участии Фонда глобальных исследований окружающей среды для Национальных институтов Министерства окружающей среды Японии.

Для цитирования: Давыдов Д.К., Краснов О.А., Симоненков Д.В., Фофонов А.В., Головацкая Е.А., Максютлов Ш.Ш. Исследования потоков парниковых газов в болотных экосистемах (участок Плотниково Бакчарского болота) // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 67–75. doi: 10.17223/25421379/25/4

Original article

doi: 10.17223/25421379/25/4

LONG-TERM MEASUREMENTS GASES FLUXES FROM THE WETLAND ECOSYSTEMS (PLOTNIKOVO FIELD STATION, BAKCHAR BOG)

Denis K. Davydov¹, Oleg A. Krasnov², Denis V. Simonenkov³, Aleksander V. Fofonov⁴,
Eugenia A. Golovatskaya⁵, Shamil Sh. Maksyutov⁶

^{1, 2, 3, 4} V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

⁵ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

⁶ National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

¹ denis@iao.ru

² krasnov@iao.ru

³ simon@iao.ru

⁴ alenfo@iao.ru

⁵ golovatskaya@imces.ru

⁶ maksyutov@yahoo.com

Abstract. The use of automated systems when studying greenhouse gases (GHG) fluxes allows accurate measurements at minimal disturbance of the soil surface to be carried out and high resolution datasets for extended periods of time to be obtained. Due to the above advantages, chamber measurements play an important role while establishing long-term observations in the framework of such research infrastructures as Integrated Carbon Observation System (ICOS).

CO₂ and CH₄ fluxes from Bakchar bog nearby Plotnikovo, West Siberia, were measured by means of a solar powered automated system (Flux-NIES) consisted of six static chambers installed along the transect and connected to the LI-820 NDIR analyzer and modified commercial methane sensor TGS-842, respectively.

The water vapor can significantly affect the measurement accuracy of most gas-analyzers. It is recommended the ambient air to be completely or moderately dehumidified before supplying it to a measurement cell. We used a three-stage drying unit before supplying the air sample to the analyzers: an auto drain water trap, the Nafion dryer, and the chemical desiccants.

The least square adjustment method with determining the linearity of the process by the pair correlation coefficient R was applied with the purpose of the most accurate determination of the gases fluxes value when processing changes in the output signals of the gas-analyzers in the closed chamber mode. The width of the data filtering window was determined by the maximum value of R² which corresponded to the highest values of the detected emission / uptake of the studied GHG at the soil – atmosphere boundary.

Observations were carried out during the growing season (from May to October) in 2016-2020 at the hollow-ridge complex (O-site) oligotrophic bog. Correlation analysis made it possible to derive the dependences of CO₂ and CH₄ fluxes on the local hydrometeorological conditions of the surface.

The seasonally integrated net CO₂ uptake shows that Siberian wetland ecosystems are a strong sink of atmospheric carbon. Gases fluxes were correlated spatially: higher net uptake CO₂ and lower CH₄ emissions are observed at forested ridge with higher photosynthesis and respiration rates and drier surface conditions; lower net uptake CO₂ and higher CH₄ emissions were observed into wet hollow landscape. Constant high emission for CO₂ and CH₄ were observed on the surface tiny bog lake.

Keywords: *automated chamber method; surface-atmosphere GHG exchange, water content in peatlands*

Acknowledgments: The authors thank Michael Yu. Arshinov for help in the reconstruction of measuring automated systems and Aleksander A. Plotnikov for technical support of continuous measurements for many years.

Source of financing: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Administration of the Tomsk Region (project No. 18-45-700020). The infrastructure of the IOA SB RAS was used (state order No. 121031500342-0), including the Atmosfera Center for Collective Use. The supply of field measurements was carried out with the participation of the Global Environmental Research Foundation for the National Institutes of the Ministry of the Environment of Japan.

For citation: Davydov D.K., Fofonov A.V., Krasnov O.A., Simonenkov D.V., Golovatskaya E.A., Maksyutov Sh.Sh. (2022) Long-term measurements gases fluxes from the wetland ecosystems (Plotnikovo field station, Bakchar Bog). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 67–75. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/25/4

Введение

Углекислый газ (CO₂) и метан (CH₄) являются парниковыми газами, которые чаще всего контролируются с использованием камерного метода. CO₂ является одним из наиболее распространенных и важных газов в системе «суша – океан – атмосфера». Он имеет как природные, так и антропогенные источники. В естественном углеродном цикле CO₂ играет ключевую роль в ряде биологических процессов (фотосинтез, дыхание и т.д.). Концентрация CO₂ в атмосфере Земли увеличилась на 40 % – с 278 млн⁻¹ в 1750 г. до 406 млн⁻¹ в 2017 г. [NOAA/ESRL, 2017].

CH₄ также обладает сильным парниковым эффектом и играет важную роль в определении окислительной способности тропосферы и истощении стратосферного озона. Он имеет как природные, так и антропогенные источники. По-прежнему существует много регионов с источниками CH₄, которые слабо изучены. К малоизученным территориям относятся и обширные районы Сибири, где наличие природных водно-болотных угодий и использование ископаемого топли-

ва приводят к значительным выбросам CH₄ в атмосферу. За тот же промежуток времени, что и наблюдаемый рост содержания CO₂, концентрация CH₄ в атмосфере Земли увеличилась на 150 % – с 722 млрд⁻¹ в 1750 г. до 1 859 млрд⁻¹ в 2017 г. [NOAA/ESRL, 2017].

Концентрации CO₂, CH₄ и других парниковых газов увеличились в атмосфере Земли с доиндустриальных времен из-за антропогенных выбросов, связанных со сжиганием ископаемого топлива, используемого в качестве источника энергии, и с изменениями в землепользовании. Наблюдаемые изменения в концентрации CO₂ и CH₄ в атмосфере являются результатом нарушения динамического баланса между антропогенными выбросами и естественными процессами, которые приводят к частичному удалению этих газов из атмосферы [Ciais et al., 2013].

Понимание причин изменения климата Земли и планирование необходимых мероприятий по предотвращению катастрофических последствий требуют долгосрочных и высокоточных измерений выбросов – стоков парниковых газов и их эволюции. Стандартизированные измерения и расчет газовых

потоков увеличивают доступность и удобство использования накопленных данных для моделирования происходящих процессов и инвентаризации углеродного бюджета территорий.

Камерные измерения потоков парниковых газов полезны при определении временных и пространственных неоднородностей, например при разделении суммарных потоков CO_2 на их компоненты (дыхание/поглощение) и т.д. Использование автоматизированных систем для изучения газовых потоков на границе «почва – атмосфера» позволяет проводить точные измерения независимо от погоды и времени суток, с минимальными нарушениями поверхности почвы, и получать данные с высоким разрешением в течение продолжительных периодов времени.

В данной статье обсуждаются результаты исследования сезонных газовых потоков в болотных экосистемах южно-таежной зоны Западной Сибири, полученные по данным многолетних наблюдений, а также приводится краткое описание оборудования и принципа камерных измерений.

Средства и методика измерений

Автоматизированные камерные системы, работающие в закрытом динамическом режиме, наряду с методом турбулентных пульсаций (*eddy covariance method*) рекомендованы для измерений потоков парниковых газов на границе «почва – атмосфера» на станциях мониторинга, входящих в систему ICOS (Integrated Carbon Observation System) [Pavelka et al., 2018].

Российские научные группы для измерений газовых потоков используют автоматические камеры различных конструкций. Например, широко применяются газоанализаторы LI-8100A (Licor Inc., США) со встроенной камерой небольшого объема в виде перевернутой чаши [Махныкина и др., 2016; Ivanov et al., 2017]. Другие исследователи сами разрабатывают и изготавливают камеры под конкретные задачи [Maximov et al., 2012; Молчанов, 2017].

Автоматизация непосредственно самих камер заключается в создании механизма, способного открывать и закрывать отдельную камеру по заданному временному циклу. Для этого обычно применяют либо пневматический привод, либо электромеханический. Для проветривания внутреннего объема камер также применяют два решения. Первое – поднятие верхней крышки-колпака, второе – поднятие всего колпака над основанием [Белан и др., 2017; Dyukarev et al., 2019].

Пионерами же применения автоматизированного камерного метода для исследования газовых потоков на границе «почва – атмосфера» на территории России (Западная Сибирь) следует признать группу рос-

сийских и японских ученых под общим руководством проф. Г. Иноуэ (G. Inoue) [Глаголев, 2010].

Измерительный комплекс Flux-NIES с шестью автоматическими камерами разработан совместно National Institute for Environmental Studies (NIES, Цукуба, Япония) и Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА, Томск, Россия) в конце 1990-х – начале 2000-х гг. для исследования потоков CH_4 и CO_2 на границе «болотная почва – атмосфера» [Nakano et al., 1998; Maksyutov et al., 1999; Краснов и др., 2013]. В настоящее время на полевом стационаре Plotnikovo Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия) на Бакчарском болоте эксплуатируются два почти идентичных комплекса. Измерения проводятся ежегодно в теплый сезон (с мая по октябрь).

В качестве газоанализатора CH_4 в состав измерительного оборудования включен модифицированный полупроводниковый сенсор TGS-842 (Figaro Inc., США) с чувствительным элементом на основе кристалла диоксида олова (SnO_2) [Suto, Inoue, 2010]. Для измерения концентрации 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 хранение информации осуществляются через даталоггер CR1000 (Campbell Sci., США).

Большое внимание при осуществлении газоанализа уделяется подготовке воздушной пробы: очистке от твердых аэрозольных фракций, осушению и стабилизации потока и температуры в приборах. Для этого в измерительный комплекс Flux-NIES последовательно включены: фильтры тонкой очистки, система сбора и слива конденсата, нафтионовый осушитель и финальные химические порошковые осушители ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ и P_2O_5).

Контроль основных параметров окружающей среды осуществляется датчиком атмосферного давления RX2760 (OMEGA, США), датчиком температуры и относительной влажности атмосферного воздуха HMP45A (VAISALA, Финляндия), датчиком скорости/направления ветра 05103VM и датчиком осадков 52202H (R.M. Young Com., США), пиргеометр-, радиометром PIR (Eppley Lab., США), пиранометрами солнечной интегральной радиации PCM-21 и фотосинтетически активной радиации PQS-1 (Kipp&zonen, Нидерланды). Дополнительные измерения температуры почвы на глубинах 5, 10, 20, 30, 40 см регистрируются отдельно термохронами iButton DS1921G (Maxim Integrated, США), а

уровень болотных вод измеряется датчиками НОВО U20-001-04 (Oneset Comp., США) на 10 различных участках.

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

Методика измерений основана на регистрации изменения концентрации исследуемого газа внутри кратковременно изолируемой от атмосферы камеры. Анализируемый воздух по трубкам подается на вход блока газоанализа со скоростью 3 л/мин. Далее поток воздуха из рабочей камеры разделяется на два, меньший из которых (20–30 мл/мин) поступает в газоанализаторы, а оставшаяся часть по обратной трубке возвращается в камеру, чем достигается постоянство давления воздуха внутри ее изолируемого объема [Краснов и др., 2013].

В нормальном состоянии все камеры открыты, кроме одной (рабочей), из которой производится отбор воздушной пробы. Очередность работы камер, продолжительность и время их открытия-закрытия определяются программой управления в дате-логгере. Как правило, используется режим 20-минутного экспонирования рабочей камеры с 5-минутным интервалом в закрытом состоянии.

Для определения чувствительности газоанализаторов в измерительном комплексе FluxNIES 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, чтобы 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 являются очень низкими. По изменению сигналов газоанализаторов $dC(t)$, в зависимости от известных концентраций в газовых смесях, 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 полученные значения $S(t)$ для используемых газоанализаторов «плавают» и зависят от внешних погодных условий, поэтому возможна дополнительная их коррекция.

Для NDIR CO_2 -газоанализаторов найдена значимая корреляция сигнала с атмосферным давлением P (гПа). 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 $S(t)$ результаты всех измерений были скорректированы с использованием найденных зависимостей по следующим формулам:

$$\begin{aligned} S_{\text{CO}_2}(t_k) &= \Delta C_{\text{CO}_2} / (dC_{\text{CO}_2}(t_k) + K_{\text{CO}_2} \times (P_0 - P(t_k))), \\ S_{\text{CH}_4}(t_k) &= \Delta C_{\text{CH}_4} / (dC_{\text{CH}_4}(t_k) + K_{\text{CH}_4} \times (T_0 - T(t_k))), \end{aligned} \quad (1)$$

где t_k время калибровки, ΔC_{CO_2} и ΔC_{CH_4} максимальные разности концентраций в стандартных газовых смесях (млн^{-1}), $dC_{\text{CO}_2}(t_k)$ и $dC_{\text{CH}_4}(t_k)$ – соответствующие им разности сигналов газоанализаторов (мВ), K_{CO_2} (мВ/гПа) и K_{CH_4} (мВ/ $^{\circ}\text{C}$) эмпирические коэффициенты, $P_0 = 1\,000$ гПа и $T_0 = 0$ $^{\circ}\text{C}$ исходные давление и температура окружающей среды.

Для наиболее точного определения величины газовых потоков при обработке изменения выходных сигналов газоанализаторов $dC(t)/dt$ ($\text{мВ} \times \text{с}^{-1}$) в режиме закрытой камеры используется метод наименьших квадратов с определением линейности процесса по коэффициенту парной корреляции R . Ширина окна фильтрации данных определяется по максимальному значению R^2 , что соответствует наибольшим значениям фиксируемых эмиссии/стока исследуемых газов на границе «почва – атмосфера». Так как использовалось 20-секундное усреднение данных измерений сигналов приборов газоанализа, размер окон фильтрации составляет от 2 до 4 мин (или 6–12 точек отсчета) из-за разности в длине воздушных трактов для отдельных камер комплекса.

Для удобства дальнейшего анализа данных в измерении газовых потоков принято переходить к весовым характеристикам ($\text{мг} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$), которые вычисляются по известной формуле [Ivanov et al., 2017]:

$$F(t) = S_n(t) \times dC(t)/dt \times 100 \times P / (273,15 + T) \times M / 8312,6 \times V / S \times 3\,600, \quad (2)$$

где $S_n(t)$ – коэффициенты калибровки прибора – см. выше формулу (1), P – атмосферное давление (гПа), T – средняя температура воздуха во время экспозиции камеры ($^{\circ}\text{C}$), M – молярная масса газа ($\text{г} \times \text{моль}^{-1}$), 8312,6 – универсальная газовая постоянная ($\text{Дж} \times \text{кмоль}^{-1} \times \text{К}^{-1}$), V и S – объем и площадь основания применяемых камер (м^3 и м^2 соответственно), 3600 – число секунд в часе.

Место проведения измерений

Измерительная площадка, обозначенная литерой «О», находится примерно в 16 км от поселка Плотниково Бакcharского района Томской области [Maksyutov et al., 1999; Краснов и др., 2013]. Координаты площадки 56°49' с.ш., 82°51' в.д. На рис. 1 представлены спутниковый снимок и схема расположения автоматических камер на измерительной площадке.

Удельные потоки метана определяются при помощи автоматического метода закрывающихся динамических камер (*non-steady-state through-flow sys-*

tems) согласно рекомендациям ICOS [Pavelka et al., 2018]: шесть одинаковых камер из прозрачного оргстекла ($0,9 \times 0,9 \times 0,5 \text{ м}^3$) с пневматическим приводом верхних крышек установлены на грядово-мочажинном комплексе олиготрофного болота.

Они расставлены на различных участках болотного микрорельефа таким образом, чтобы тип подстилающей поверхности на каждом из них соответствовал характерной растительной ассоциации.

Профиль измерительного участка расположен от сосново-кустарничково-сфагновой гряды к зарастающему озеру. Камера 1 расположена на северном краю гряды и соответствует сосново-кустарничково-сфагновому фитоценозу. В составе растительного покрова присутствуют низкорослые сосны (*Pinus sylvestris* f. *willkommii*) высотой 50 см, проективное покрытие (п. п.) 30 %. Травяно-кустарничковый ярус представлен багульником (*Ledum palustre* L.), п. п. 30 %, и кочками пушицы (*Eriophorum vaginatum* L.), п. п. 40 %, встречается клюква (*Oxycoccus microcarpus* Turcz.), п. п. не более 5 %. Моховой покров сплошной состоит в основном из *Sphagnum fuscum* Klinggr. и *Sph. angustifolium* C. Jens.

Камера 2 расположена также на краю гряды (на южной ее стороне и ближе к краю мочажины по направлению к озеру) и характеризуется как сосново-пушицево-сфагновый фитоценоз. Участие сосны в растительном покрове снижается до 10 %, в травяно-кустарничковом ярусе преобладает пушица (п. п. 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-сфагновой мочажине. Микрорельеф мочажины слабо выражен, разница высот составляет не более 10 см. На участке камеры 3 в травяно-кустарничковом ярусе встречаются низкорослые растения андромеды (высота 5 см, п. п. 5 %), кочки пушицы (п. п. 5 %), осока (*Carex limosa* L.), п. п. 5 %, клюква (п. п. 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 участка камеры 4 несколько увеличивается участие андромеды (п. п. 10 %), появляются ринхоспора (*Rhynchospora alba* (L.) Vahl), осока (*Carex pauciflora* Liggtf), п. п. травяного яруса достигает 50 %. Моховой покров состоит из *Sph. compactum*, *Sph. Pappilosum* Lindb (п. п. 100 %).

Растительный покров камеры 5, расположенной ближе всего к озеру, характеризуется как сфагновая

топь. В растительном покрове не более 10 % занимают *Carex pauciflora* и андромеда. Сплошной моховой покров (п. п. 100 %) состоит из *Sph. pappilosum*. На границе мочажины и озера обильно растет вахта (*Menyanthes trifoliata* L.).

Камера 6 расположена непосредственно на озере.

Результаты измерений и их анализ

На рис. 2 представлены результирующие газовые потоки на границе «болотная почва – атмосфера», полученные на измерительной площадке «О» в ходе весенне-летне-осенних кампаний 2016–2020 гг.

Анализ данных показывает, что наиболее продуктивное поглощение CO_2 в болотных растительных ассоциациях наблюдается для камер 1 и 2, находящихся на облесенной гряде и соседствующей мочажине, тогда как на моховом покрытии открытой мочажины сток CO_2 падает (камеры 3–5).

Сезонное поглощение CO_2 из атмосферы значительно варьируется год от года как для отдельных растительных ассоциаций, так и для экосистемы в целом. Например, суммарные показатели стока CO_2 на болотную поверхность в 2018 г. значительно превышают его величины, наблюдавшиеся в измерительных сезонах 2016 и 2020 гг. для всех наземных камер комплекса (рис. 2, а).

Причины такого разброса в поглощении атмосферного углерода болотной поверхностью кроются в погодных условиях конкретного года наблюдений.

В таблице приводятся среднесезонные показатели уровня болотных вод (WL) и температуры почвы на глубине 130 см ($T_{130 \text{ см}}$) по данным датчика НОВО U20-001-04 (Oneset Comp., США), установленного на измерительной площадке «О». Подробный межсезонный корреляционный анализ выявил высокую значимую корреляцию поведения болотных вод в 2018 и 2019 гг., когда наблюдался наиболее эффективный сток CO_2 в исследуемой экосистеме.

Однако для средних показателей потоков углеродного обмена критерий сезонных колебаний WL не столь надежен. Например, при схожих пониженных значениях стока CO_2 в 2016 и 2020 гг. корреляции в поведении болотных вод не наблюдалось. Вместе с тем в эти годы отмечен наименьший среднесезонный уровень WL : $-0,166$ и $-0,182$ м соответственно (см. таблицу).

Зафиксированное межгодовое поведение потоков метана в исследуемой болотной экосистеме показывает достаточно стабильные величины эмиссии CH_4 (рис. 2, б), причем суммарная продуктивность метаногенеза на мочажине (камеры 2–5) оказалась выше, чем в облесенной части гряды (камера 1).

Отдельно стоит отметить процессы газообмена, наблюдаемые в камере 6, плавающей в небольшом вну-

триболотном озере (см. рис. 3, а). Здесь постоянно фиксируются высокие значения эмиссии CO_2 и CH_4 (рис. 2).

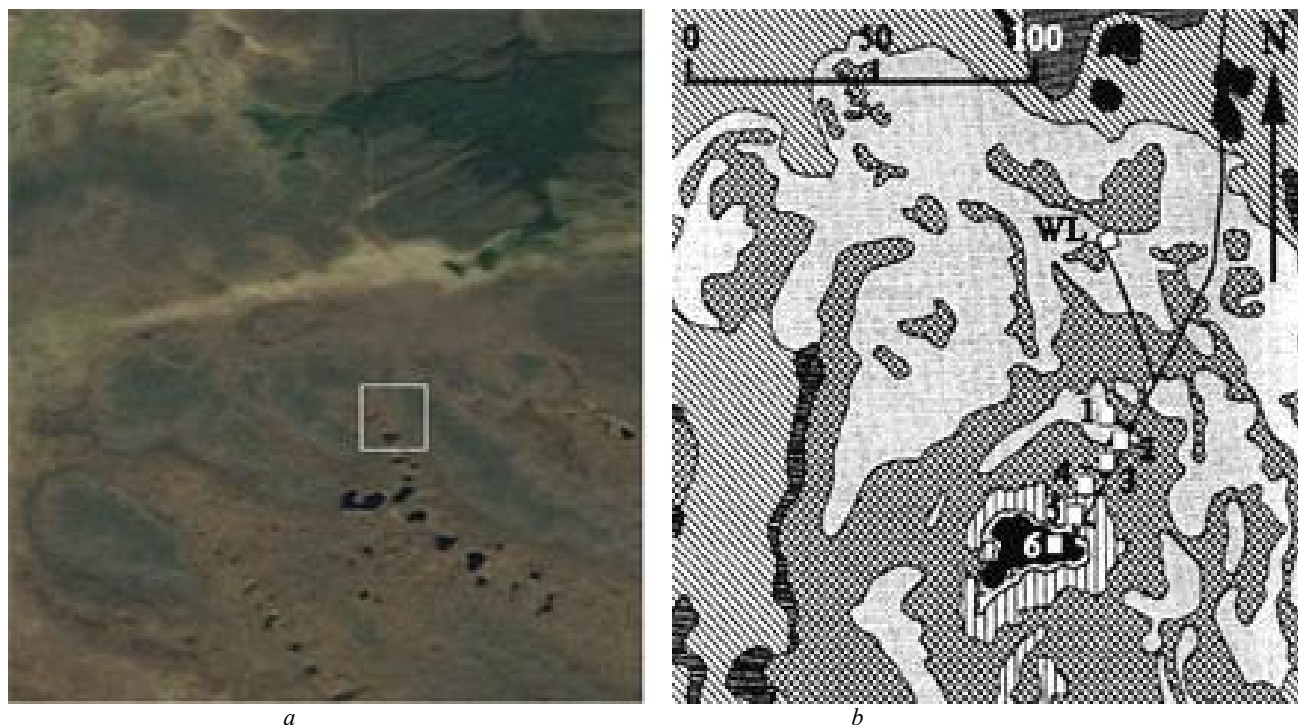


Рис. 1. Космический снимок местности (а) и схема расположения автоматизированного комплекса Flux-NIES (b) для измерительной площадки «О» на Бакчарском болоте

Fig. 1. Satellite image of the area (a) and the layout of the automated system Flux-NIES (b) on the Bakchar bog site "O", (□) installation points of the measuring chambers by number and location of the water level logger (WL)

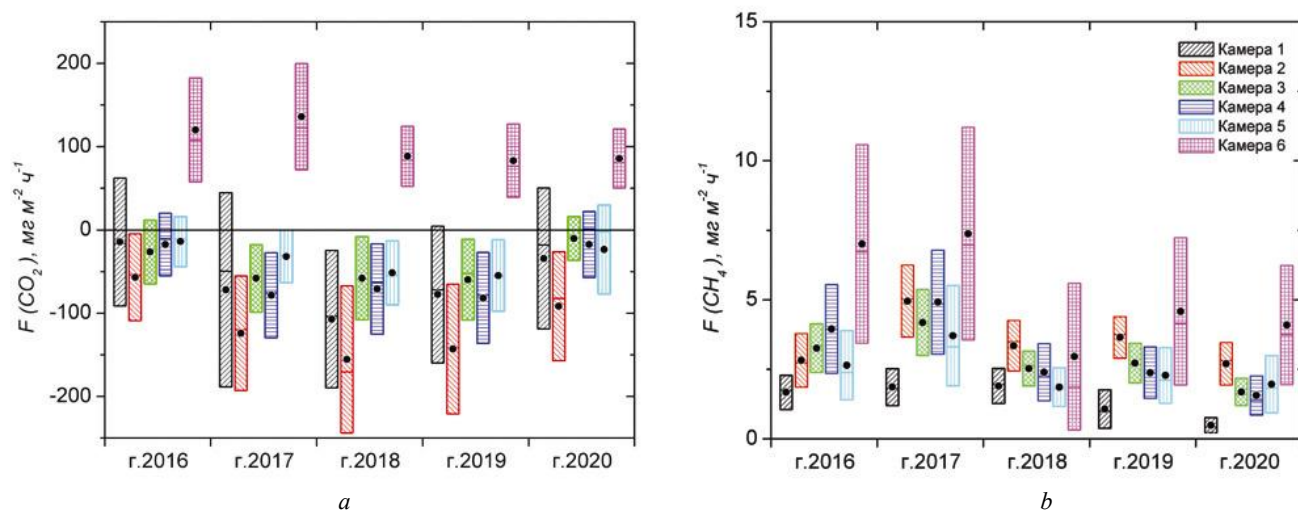


Рис. 2. Среднесезонные (июнь–сентябрь) потоки: а – CO_2 ; б – CH_4 на границе «почва – атмосфера» на Бакчарском болоте (измерительная площадка «О») в 2016–2020 гг.

(●) средние суточные значения; (–) медианные суточные значения; (■) области среднеквадратических отклонений

Fig. 2. Average seasonal (June–September) fluxes CO_2 and CH_4 at the wetland soil – atmosphere boundary on the Bakchar bog in 2016–2020

(●) average daily value; (–) median daily value; (■) area of standard deviation

Корреляционный анализ данных ежегодных измерений уровня болотных вод (июнь–сентябрь) и среднесезонные значения по увлажнению торфяной залежи на Бакcharском болоте в 2014–2020 гг. (измерительная площадка «О», дата-логгер НОВО U20-001-04)

Correlation data analysis and seasonal average values for peatland moistening in 2014–2020 (Bakchar bog, site "O")

Год	2015	2016	2017	2018	2019	2020	WL, м сред.±СКО	WL, м min	WL, м max	T _{130 см} ср., °C
2014	0,570	0,369	0,872	0,688	0,698	0,809	-0,125±0,083	-0,252	0,054	+6,21
2015	1	-0,26	0,286	0,199	-0,06	0,440	-0,120±0,059	-0,261	-0,002	+6,88
2016		1	0,519	0,481	0,752	0,368	-0,166±0,068	-0,298	-0,052	+6,42
2017			1	0,690	0,771	0,749	-0,141±0,062	-0,263	-0,018	+6,92
2018				1	0,803	0,696	-0,038±0,042	-0,114	0,075	+5,96
2019					1	0,689	-0,132±0,083	-0,264	-0,004	+6,40
2020						1	-0,182±0,071	-0,331	-0,048	+6,97

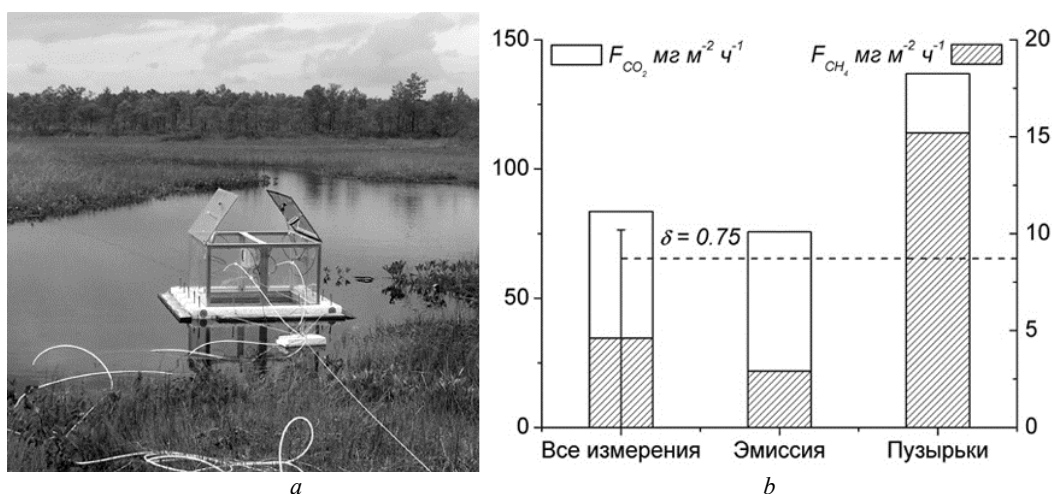


Рис. 3. Вид плавающей камеры (а) и распределение измеренных на озерной поверхности потоков CO₂ (шкала слева) и CH₄ (шкала справа) по характеру процессов газообмена (b)

Fig. 3. Imagination of the floating chamber (a) and distribution by type of the gases exchange at the water – atmosphere boundary for CO₂ and CH₄ (left and right scale, respectively) (b)

Механизм газообмена на границе «болотное озеро – атмосфера» характеризуется сосуществованием поверхностной эмиссии и процесса «бурления» – выхода на поверхность газовых пузырьков.

На рисунке 3, b приводится соотношение величин потоков CO₂ и CH₄ с озерной поверхности для указанных типов газообмена.

Разделение процессов проведено статистически на основании среднесезонных показателей эмиссии CH₄ и ее среднеквадратических отклонений по границе

$$\bar{F}_{CH_4} + 0,75\delta.$$

Обнаружено, что выход метана в пузырьковой фракции значительно превышает процесс эмиссии CH₄ с водной поверхности (в 5 раз), в то время как увеличение выхода в пузырьках легко растворимого водой CO₂ составило менее 2 раз (рис. 3, b).

Закключение

Результаты измерений позволяют определить вклад болотных экосистем в углеродный бюджет территории. Интегральные значения потоков CO₂ за все время измерений показывают, что поверхности западносибирских болот в теплый период года являются мощным «поглотителем» атмосферного углерода. При этом величины эмиссии CH₄ из различных участков болотных почв зависят от типа растительности, уровня увлажнения и прогрева торфяной залежи.

Отмечено существование значительной постоянной эмиссии CO₂ и CH₄ с поверхности болотных озер.

Многолетнее использование автоматизированного камерного метода показало эффективность его применения для исследований поведения газовых потоков на болотной поверхности во временном и пространственном масштабах.

Список источников

Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Козлов А.В., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А. Автоматическая камера для измерения потоков парниковых газов на поверхности раздела почва–атмосфера // Патент на полезную модель. 2017. № 169373. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).

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

Краснов О.А., Maksyutov S., Глаголев М.В., Катаев М.Ю., Inoue G., Надеев 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.

Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Ваганов Е.А., Верховец С.В., Рубцов А.В. Динамика потоков CO₂ с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2016. Т. 9, № 3. С. 338–357. doi: 10.17516/1997-1389-2016-9-3-338-357.

Молчанов А.Г. Газообмен диоксида углерода с поверхности сфагнома в заболоченном сосняке южной тайги // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2017. Т. 8, № 1. С. 43–54.

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: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press, 2013. 570 p.

Dyukarev E., Godovnikov E., Karpov D., Kurakov S., Lapshina E., Filippov I., Filippova N., Zarov E. Net ecosystem exchange, gross primary production and ecosystem respiration in ridge-hollow complex at Mukhrino bog // Geography Environment Sustainability. 2019. V. 12, No. 2. P. 227–244. doi: 10.24057/2071-9388-2018-77.

Ivanov D.G., Avilov V.K., Kurbatova Y.A. CO₂ fluxes at south taiga bog in the European part of Russia in summer // Contemporary Problems of Ecology. 2017. V. 10, No. 2. P. 97–104. doi: 10.1134/s1995425517020056.

Maximov T.C., Dolman A.J., van Huissteden J., Ohta T., Sugimoto A., Maximov A.P., Kononov A.P., Petrov R.E., Ivanov B.I. Carbon budget in forest and tundra permafrost ecosystems of north-east Russia // Proceedings of the 5th International Workshop on C/H₂O/Energy balance and climate over boreal and arctic regions with special emphasis on eastern Eurasia (11–13 November 2010, Wageningen, The Netherlands). Amsterdam, 2012. P. 21–24.

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 Sympos. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba : Isebu, 1999. P. 115–124.

Nakano T., Inoue G., Maksyutov S., Sorokin M. Automatic measurements of methane flux in West Siberian wetlands in 1997 summer // Proceedings of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba : Isebu, 1998. P. 211–215.

NOAA/ESRL. 2017. URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> (date of accessed: 01.12.2020).

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.

Pavelka M., Acosta M., Kiese R., Altimir N., Brümmer C., Crill P., Darenova E., Fuß R., Gielen B., Graf A., Klemetsson L., Lohila A., Longdoz B., Lindroth A., Nilsson M., Jiménez S.M., Merbold L., Montagnani L., Peichl M., Pihlatie M., Pumpanen J., Ortiz P.S., Silvennoinen H., Skiba U., Vestin P., Weslien P., Janous D., Kutsch W. Standardisation of chamber technique for CO₂, N₂O and CH₄ fluxes measurements from terrestrial ecosystems // Int. Agrophys. 2018. V. 32. P. 569–587. doi: 10.1515/intag-2017-0045.

References

Belan B.D., Arshinov M.Yu., Kozlov A.V., Davydov D.K., Ivlev G.A. *Avtomaticheskaya camera dlya izmereniya potokov parnikovih gazov na poverhnosti razdela pochva-atmosfera* [Automated chamber for measurements of the greenhouse gases fluxes at the soil – atmosphere boundary] // Patent na polezni model. 2017. № 169373. Pravoobladatel: IAO SB RAS (RU). In Russian.

Glagolev M.V. Annotated reference list of CH₄ and CO₂ flux measurements from Russia mires // Environmental dynamics and global climate change. 2010. V. 1. No. 2. doi: 10.17816/edgcc121-. In Russian

Krasnov O.A., Maksyutov S., Glagolev M.V., Kataev M.Yu., Inoue G., Nadeev A.I., Shelevoi V.D. Automated complex “Flux-NIES” for measurement of methane and carbon dioxide fluxes // Optika Atmosfery i Okeana. 2013. V. 26. No. 12. pp. 1090–1097. In Russian

Makhnykina A.V., Prokushkin A.S., Vaganov E.A., Verkhovets S.V., Rubtsov A.V. Dynamics of the CO₂ Fluxes from the Soil Surface in Pine Forests in Central Siberia // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2016. V. 9, No. 3. pp. 338–357. doi: 10.17516/1997-1389-2016-9-3-338-357. In Russian

Molchanov A.G. Gasexchange of carbon dioxide from the surface of Sphagnum in boggy pine forests in southern taiga // Environmental dynamics and global climate change. 2017. V. 8. No. 1. pp. 43–54. In Russian

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: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York. NY. USA. 2013. 570 pp.

Dyukarev E., Godovnikov E., Karpov D., Kurakov S., Lapshina E., Filippov I., Filippova N., Zarov E. Net ecosystem exchange, gross primary production and ecosystem respiration in ridge-hollow complex at Mukhrino bog // Geography Environment Sustainability. 2019. V. 12. No. 2. pp. 227–244. doi: 10.24057/2071-9388-2018-77

Ivanov D.G., Avilov V.K., Kurbatova Y.A. CO₂ fluxes at south taiga bog in the European part of Russia in summer // Contemporary Problems of Ecology. 2017. V. 10. No. 2. pp. 97–104. doi: 10.1134/s1995425517020056

Maximov T.C., Dolman A.J., van Huissteden J., Ohta T., Sugimoto A., Maximov A.P., Kononov A.P., Petrov R.E., Ivanov B.I. Carbon budget in forest and tundra permafrost ecosystems of north-east Russia // Proceedings of the 5th International Workshop on C/H₂O/Energy balance and climate over boreal and arctic regions with special emphasis on eastern Eurasia (11–13 November 2010, Wageningen, The Netherlands). Amsterdam. 2012. pp. 21–24.

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 Sympos. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba: Isebu. 1999. pp. 115–124.

Nakano T., Inoue G., Maksyutov S., Sorokin M. Automatic measurements of methane flux in West Siberian wetlands in 1997 summer // Proceedings of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba: Isebu. 1998. pp. 211–215.

NOAA/ESRL. 2017. URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> (Data of accessed: 01.12.2020).

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. pp. 1175–1184.

Pavelka M., Acosta M., Kiese R., Altimir N., Brümmer C., Crill P., Darenova E., Fuß R., Gielen B., Graf A., Klemetsson L., Lohila A., Longdoz B., Lindroth A., Nilsson M., Jiménez S.M., Merbold L., Montagnani L., Peichl M., Pihlatie M., Pumpanen J., Ortiz P.S., Silvennoinen H., Skiba U., Vestin P., Weslien P., Janous D., Kutsch W. Standardisation of chamber technique for CO₂, N₂O and CH₄ fluxes measurements from terrestrial ecosystems // Int. Agrophys. 2018. V. 32. pp. 569–587. doi: 10.1515/intag-2017-0045

Информация об авторах:

Давыдов Д.К., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: denis@iao.ru

Краснов О.А., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: krasnov@iao.ru

Симоненков Д.В., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: simon@iao.ru

Фофанов А.В., научный сотрудник, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: alenfo@iao.ru

Головатская Е.А., доктор биологических наук, профессор РАН, директор Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: golovatskaya@imces.ru

Максютов Ш.Ш., кандидат физико-математических наук, исследователь, Национальный институт исследований окружающей среды, Цукуба, Япония.

E-mail: maksyutov@yahoo.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Davydov D.K., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: denis@iao.ru

Krasnov O.A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: krasnov@iao.ru

Simonenkov D.V., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: simon@iao.ru

Fofonov A.V., Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: alenfo@iao.ru

Golovatskaya E.A., Dr. Sci. (Biol.), Professor RAS, Director, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: golovatskaya@imces.ru

Maksyutov Sh.Sh., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan.

E-mail: maksyutov@yahoo.com

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.08.2021; одобрена после рецензирования 14.06.2022; принята к публикации 06.11.2022

The article was submitted 17.08.2021; approved after reviewing 14.06.2022; accepted for publication 06.11.2022