

APPLICATION OF THE AUTOMATED CHAMBER METHOD FOR LONG-TERM MEASUREMENTS OF CO₂ AND CH₄ FLUXES FROM WETLAND ECOSYSTEMS OF THE WEST SIBERIA

D.K. Davydov¹, A.V. Dyachkova¹, O.A. Krasnov¹, D.V. Simonenkov¹, A.V. Fofonov¹, S.S. Maksyutov²

¹ V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

² National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

Автор для переписки: A.V. Fofonov, e-mail: alenfo@iao.ru

Citation: Davydov D.K., Dyachkova A.V., Krasnov O.A., Simonenkov D.V., Fofonov A.V., Maksyutov S.S. 2021. Application of the automated chamber method for long-term measurements CO₂ and CH₄ fluxes from wetland ecosystems of the West Siberia // Environmental dynamics and global climate change. V. 12. N 1. P. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.17816/edgcc48700>

Автоматизированные камерные системы, работающие в закрытом динамическом режиме, рекомендованы в качестве основного метода для измерений потоков парниковых газов на границе «почва — атмосфера» для станций, входящих в систему ICOS (Integrated Carbon Observation System). В работе приводятся данные измерений сезонных потоков метана (CH₄) и углекислого газа (CO₂) в характерных растительных ассоциациях на Бакчарском болоте в Томской области в теплое время 2013–2019 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 комплекс для измерения газовых потоков; газообмен на границе «почва — атмосфера»; болотные экосистемы.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

WL — почвенные воды,
п.п. — проективное покрытие.

ВВЕДЕНИЕ

Понимание причин изменения климата Земли и планирование необходимых мероприятий по предотвращению катастрофических последствий требуют долгосрочных и высокоточных измерений выбросов и стоков парниковых газов и их эволюции. Стандартизированные измерения и расчет газовых потоков увеличивают доступность и удобство использования накопленных данных для моделирования происходящих процессов. Автоматизированные камерные системы, работающие в закрытом динамическом режиме, рекомендованы в качестве основного метода для измерений потоков парниковых газов на границе «почва — атмосфера» на станциях мониторинга входящих в систему ICOS (Integrated Carbon Observation System) [Pavelka et al., 2018].

Камерные измерения потоков малых газовых составляющих (trace gases) между поверхностью суши и атмосферой проводятся уже почти 100 лет [Вадюнина и Корчагина, 1961, с. 137–140; Pavelka et al., 2018]. Различные методы исследований, в том числе статические и динамические, применяются для фиксации потоков основных парниковых газов. Все они

имеют определенные недостатки, которые либо мешают дать адекватную оценку процессам обмена, либо ограничивают диапазон их использования. Однако камерные методы относительно дешевы и просты в эксплуатации и в сочетании с использованием методов математического моделирования могут быть адаптированы для широкого спектра исследований от локальных до глобальных пространственных масштабов. Стандартизация камерных измерений облегчает их применение в различных сетях мониторинга разнообразных наземных экосистем.

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 увеличилась на 40% — с 278 млн⁻¹ в 1750 до 406 млн⁻¹ в 2017 году [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 CH_4 , которые слабо изучены. К малоизученным территориям относятся и обширные районы Российской Арктики, где наличие природных водно-болотных угодий и использование ископаемого топлива приводят к значительным выбросам CH_4 в атмосферу. За тот же промежуток времени, что и наблюдаемый рост содержания CO_2 , концентрация CH_4 в атмосфере увеличилась на 150% — с 722 млрд⁻¹ в 1750 году до 1859 млрд⁻¹ в 2017 году [NOAA/ESRL, 2017].

Таким образом, концентрации CO_2 , CH_4 и других парниковых газов увеличились в атмосфере 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 CO_2 и CH_4 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].

Камерные измерения полезны при определении временных и пространственных неоднородностей потоков парниковых газов, 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.

Анализ литературы показывает, что 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. Стоит отметить, что большинство исследователей отдают предпочтение камерам пневматической конструкции, поскольку использование электродвигателей постоянного тока сопряжено с рядом проблем.

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 российских и японских ученых под общим руководством проф. Г. Иноуэ (G. Inoue) [Глаголев, 2010, с. 3]. Первый автоматический комплекс-прототип был установлен на территории Бакчарского болота (Томская обл.) в 1997 году [Nakano et al., 1998]. С тех пор, структура измерительного комплекса претерпела многочисленные изменения как в аппаратном составе, так и в обеспечении непрерывности автономных измерений.

В результате выполненных работ, сконструированный автоматизированный комплекс получил собственное название «Flux-NIES». В данной статье приводится актуальное описание структуры комплекса и обсуждаются результаты измерения сезонных газовых потоков в болотных экосистемах южно-таежной зоны Западной Сибири, полученных по данным многолетних наблюдений.

СРЕДСТВА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерительный комплекс «Flux-NIES» с 6 автоматическими камерами разработан совместно National Institute for Environmental Studies (NIES, Цукуба, Япония) и Институтом оптики атмосферы СО РАН (ИОА, Томск, Россия) в конце 1990-х — начале 2000-х гг. для исследования потоков метана и диоксида углерода на границе «почва-атмосфера» [Maksyutov et al., 1999; Краснов и др., 2013]. С тех пор его состав неоднократно изменялся и модернизировался. В настоящее время на полевом стационаре «Plotnikovo» эксплуатируются два почти идентичных комплекса (рис. 1).

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 — касситерита (SnO_2) [Suto and Inoue, 2010]. Для измерения концентрации CO_2 используется недисперсионный 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 дата-логгер CR1000 (Campbell Sci., США).

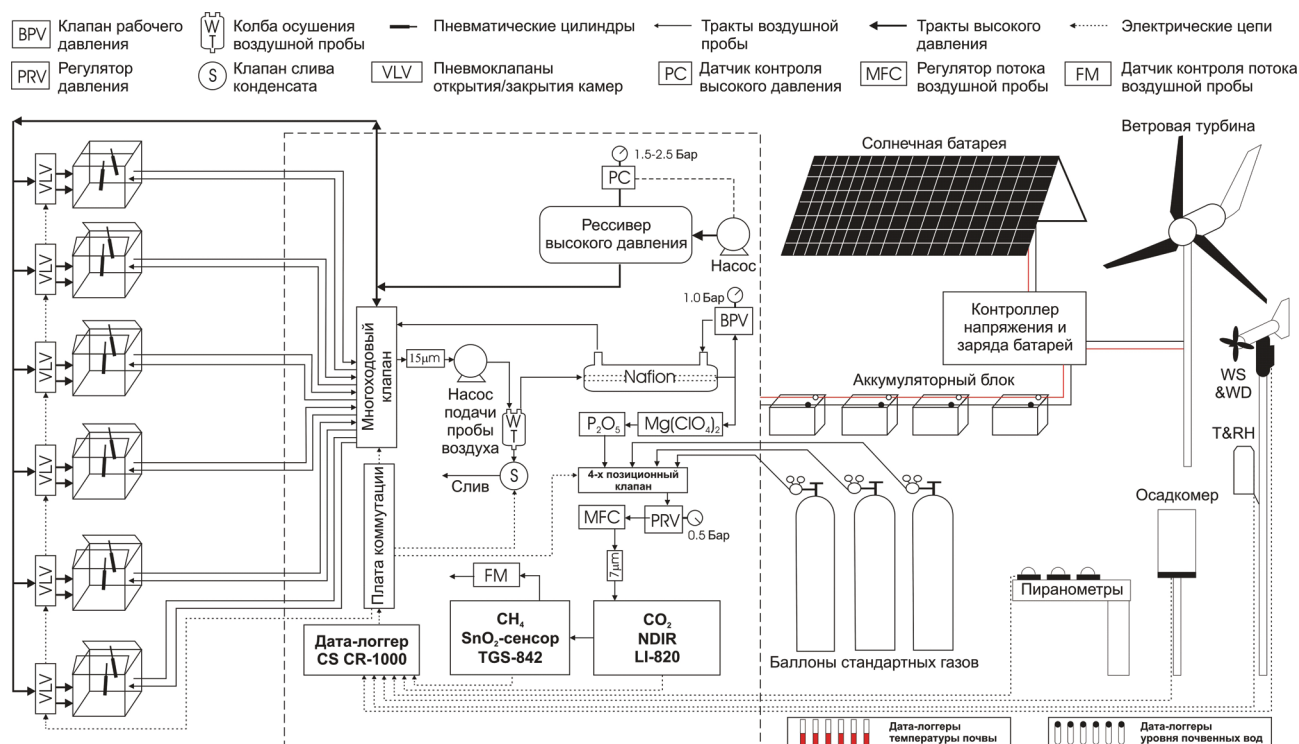


Рис. 1. Схема автоматического камерного комплекса «Flux-NIES»

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 (рис. 1): фильтры тонкой очистки (15 и 7 мкм), регулятор давления (RPV), регулятор потока воздушной пробы (MFC), система сбора и слива конденсата (WT и S), нафионовый осушитель (Nafion), и финальные химические порошковые осушители ($Mg(ClO_4)_2$ и P_2O_5).

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

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; 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 термомехронами iButton DS1921G (Maxim Integrated,

США), а уровень грунтовых вод измеряется датчиками HOBO U20-001-04 (Oneset Comp. США) на различных болотных участках.

Методика измерений основана на регистрации изменения концентрации исследуемого газа внутри кратковременно изолируемой от атмосферы камеры (рис. 1). Анализируемый воздух по трубкам через управляемый многоходовый клапан выбора камеры подается на вход блока газоанализа со скоростью 3 л/мин. Клапан высокого давления (BPV) разделяет поток воздуха из рабочей камеры на два, меньший из которых (20–30 мл/мин) поступает в газоанализаторы и контролируется датчиком воздушного потока (FM), а оставшаяся часть через внешний контур Nafion-осушителя по обратной трубке возвращается в камеру, чем достигается постоянство давления воздуха внутри ее изолируемого объема [Краснов и др., 2013]. Учитывая, что максимальная длина трубок в измерительном комплексе не превышает 100 метров, время доставки воздушной пробы к системе газоанализа составляет не более 0,5 минуты.

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 логгере. Как правило, использовался режим пятиминутного экспонирования рабочей камеры с пятиминутным интервалом в ее 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) были подобраны таким образом, чтобы в первом случае они заведомо превышали наибольшие концентрации этих газов, достижимые в рабочих (закрытых) автоматических камерах (и в разные годы составляли для CO_2 от 450 до 612 млн⁻¹, а для CH_4 — от 5 до 10 млн⁻¹), во втором сопоставимы с атмосферными фоновыми значениями, а в третьем являлись очень низкими (для CO_2 — от 0 до 318 млн⁻¹, для CH_4 — от 1,7 до 1,8 млн⁻¹). По изменению сигналов газоанализаторов $dC(t)$, в зависимости от известных концентраций в газовых смесях, определяется текущее значение коэффициента калибровки прибора $S(t)$ (млн⁻¹/мВ), которое в идеале должно быть постоянным. Однако, анализ циклов калибровки (в течении всего периода измерений) показал, что полученные значения $S(t)$ для используемых газоанализаторов непостоянны и зависят от внешних погодных условий, поэтому возможна дополнительная их коррекция (причем для CO_2 -анализатора она незначительна, тогда как датчик метана нуждается в ней постоянно).

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 (°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:

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

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/°C) эмпирические коэффициенты, $P_0 = 1000$ гПа и $T_0 = 0$ °C исходные давление и температура окружающей среды.

Для наиболее точного определения величин газовых потоков при обработке изменения выходных сигналов газоанализаторов $dC(t)/dt$ (мВ·сек⁻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 исследуемых газов на границе «почва — атмосфера». Так как использовалось двадцатисекундное усреднение данных измерений сигналов приборов газоанализа, размер окон фильтрации составлял от 2 до 4 минут (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 (мг·м⁻²·час⁻¹), которые вычисляются по известной формуле [Ivanov et al., 2017]:

$$F(t) = S_n(t) \cdot dC(t)/dt \cdot 100 \cdot P / (273,15 + T) \times M / 8312,6 \cdot V / S \cdot 3600, \quad (2)$$

где $S_n(t)$ — коэффициенты калибровки прибора — см. выше формулу (1), P — атмосферное давление (гПа), T — средняя температура воздуха во время экспозиции камеры (°C), M — молярная масса газа (г·моль⁻¹), 8312,6 — универсальная газовая постоянная (Дж·кмоль⁻¹·К⁻¹), V и S объем и площадь основания применяемых камер (м³ и м², соответственно), 3600 — число секунд в часе.

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводились на полевом стационаре «Plotnikovo» Института почвоведения и агрохимии СО РАН (ИПА, Новосибирск, Россия) на Бакчарском болоте в Томской области в теплое время года (с мая по октябрь). Измерительная площадка, обозначенная литерой «Е», находится примерно в 16 км от поселка Плотниково Бакчарского района [Maksyutov et al., 1999; Краснов и др., 2013]. Координаты площадки 56°51' с.ш., 82°51' в.д.

На рис. 2 представлены спутниковый снимок и схема расположения автоматических камер на измерительной площадке.

Удельные потоки метана определялись при помощи автоматического метода закрывающихся динамических камер (*non-steady-state through-flow systems*) согласно рекомендациям ICOS [Pavelka et al., 2018]: шесть одинаковых камер из прозрачного оргстекла (0,9·0,9·0,5 м³) с пневматическим приводом верхних крышек были установлены на увлажненной части открытого мезотрофного болота, покрытого в основном травой и мхом. Они были расставлены на различных участках болотного микро рельефа таким образом, чтобы тип подстилающей поверхности на каждом из них соответствовал характерной растительной ассоциации.

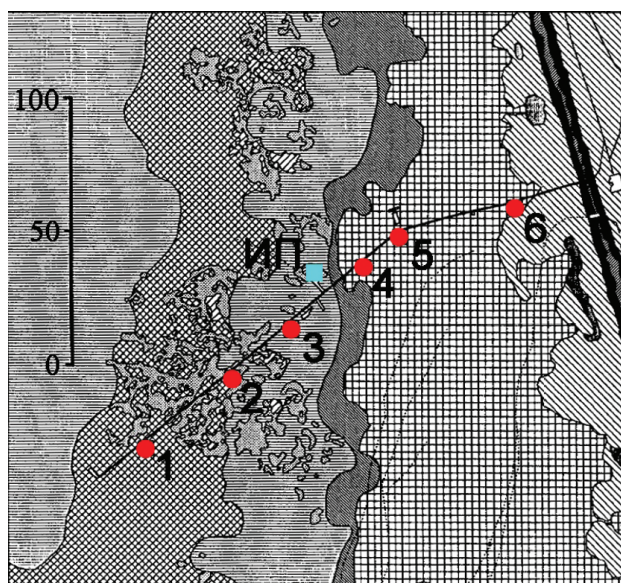
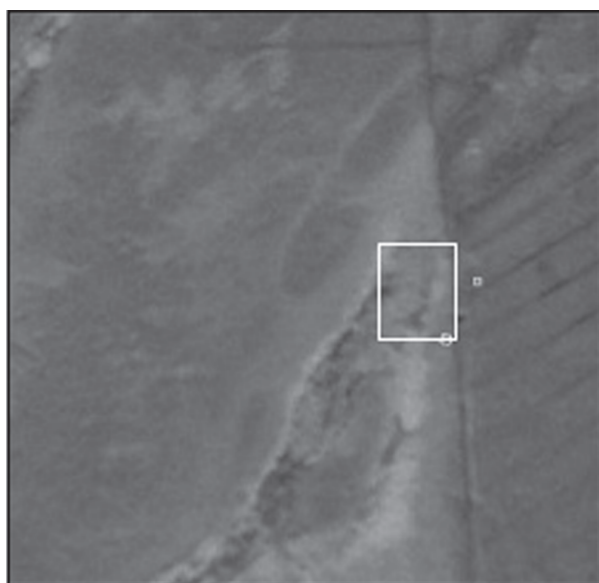


Рис. 2. Космический снимок местности и схема расположения автоматизированного комплекса «Flux-NIES» на болотной площадке «Е» согласно [Максютов et al., 1999]. (●) точки установки измерительных камер и их номера; (■) местоположение измерительного поста (ИП) для газоанализа и регистрации метеопараметров

Формируемый камерами профиль из точек наблюдений проложен от обводненной топи к сосново-кустарничково-сфагновому фитоценозу.

Первая и вторая точки наблюдений соответствуют пушицево-сфагновому фитоценозу. Камера 1 расположена на некотором повышении, травяной ярус представлен кочками пушицы (*Eriophorum vaginatum* L.) — проективное покрытие (п.п.) 50%, хвощом болотным (*Equisetum palustre*) — п.п. 30%, осокой (*Carex limosa*) — п.п. 5%, также встречаются единичные растения вахты (*Menyanthes trifoliata*). Моховой покров состоит в основном из *Sphagnum angustifolium* (п.п. 80%). Камера 2 отличается более высокой степенью обводненности, травянистая растительность представлена пушицей — п.п. 50%, единичными экземплярами вахты, осоки и хвоща. Моховой покров состоит в основном из *S. cuspidatum* — п.п. 70%.

Третья и четвертая точки наблюдений расположены в осоково-сфагновом фитоценозе, растительный покров которого состоит из осок (*Carex rostrata*, *Carex limosa*) — п.п. 50%, встречаются единичные растения вахты и клюквы (*Oxycoccus microcarpus* Turcz.). В камере 3 моховой покров представлен *Sphagnum angustifolium* (п.п. 100%), в камере 4 — *S. angustifolium* и *S. papillosum* (п.п. 80%).

По мере продвижения к облесенной части болотной окраины в растительном покрове появляются кустарнички кассандры (*Chamaedaphne calyculata*) — п.п. 10%, встречаются единичные экземпляры андромеды (*Andromeda polifolia*),

в травяном ярусе преобладает *Carex limosa* (п.п. 40%) в сочетании с пушицей (п.п. 20%). В моховом покрове камеры 5 встречаются *Sphagnum angustifolium* и *S. lindbergii* (п.п. 80%).

Шестая точка наблюдений расположена в сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе. Древесный ярус разреженный и представлен *Pinus silvestris* f. *Litwinowii* высотой 2–3 м. В кустарничковом ярусе доминирует кассандра (п.п. 10%), встречаются единичные кустики багульника (*Ledum palustre* L.), довольно обильно растет на кочках клюква (п.п. 15%), в травяном ярусе преобладает пушица (п.п. 40%), встречается морошка (*Rubus chamaemorus*) — п.п. 3%. Моховой покров в камере 6 мозаичный, представлен несколькими видами сфагновых мхов (*Sphagnum fuscum*, *S. angustifolium*, *S. magellanicum*) с вкраплениями зеленого мха (*Polytrichum strictum*).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рисунке 3 представлены результирующие газовые удельные потоки на границе «почва-атмосфера», полученные в ходе измерительных кампаний последних лет. Анализ данных показывает, что наиболее продуктивная эмиссия и поглощение CO₂ в болотных растительных ассоциациях наблюдались для камер 1–3, относящихся к центральному участку открытой топи. Меньшие значения удельных потоков CO₂ зафиксированы на окраине болота в камерах 5 и 6.

Среднее сезонное поглощение CO₂ из атмосферы значительно варьируется год от года, как

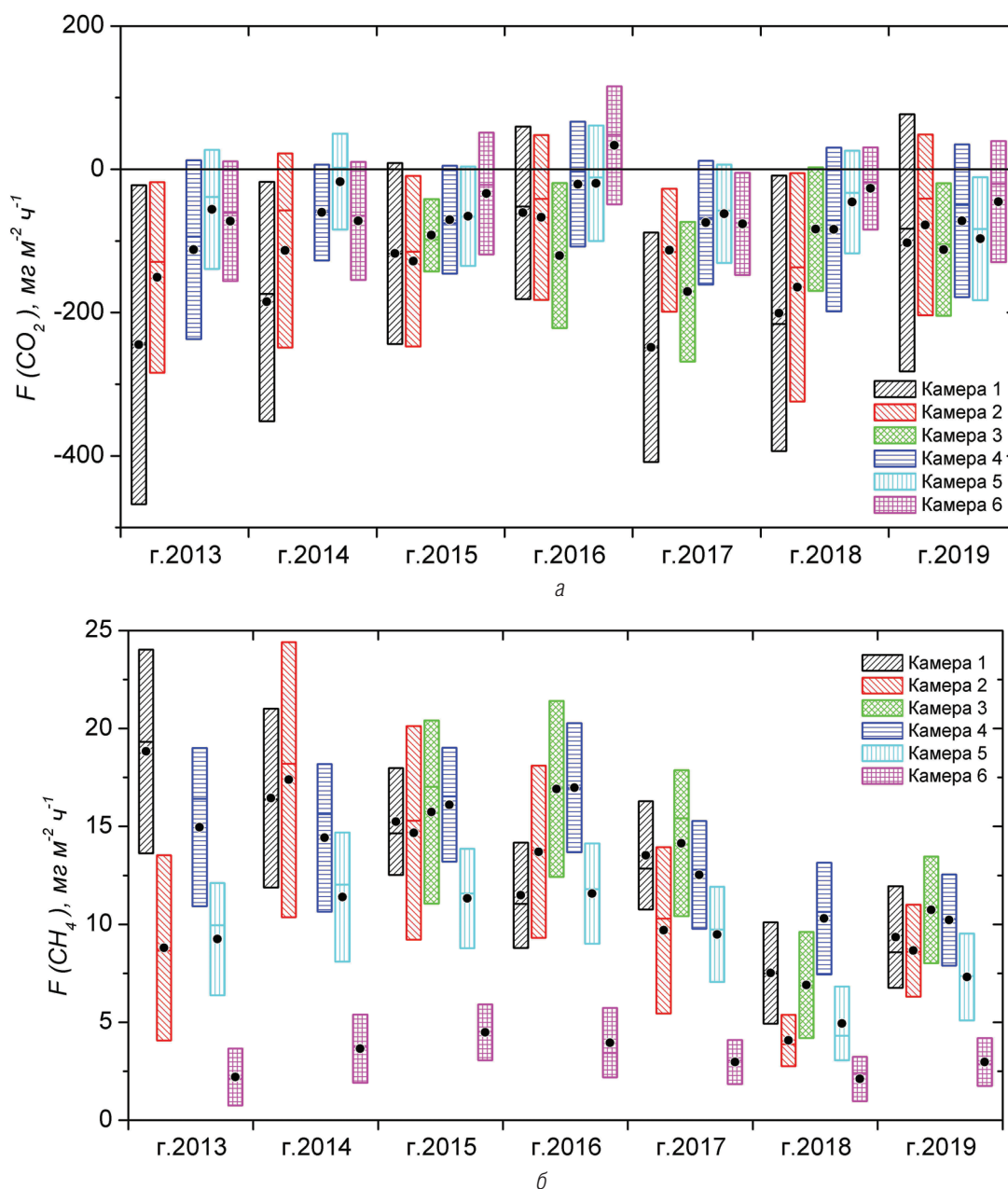


Рис. 3. Среднесезонные (июнь – сентябрь) удельные потоки CO_2 (а) и CH_4 (б) на границе болотная «почва – атмосфера» на Бакчарском болоте в 2013–2019 гг. (•) средние суточные значения; (—) медианные суточные значения; (▭) области среднеквадратических отклонений

Таблица 1

Корреляционный анализ данных и среднесезонные значения по увлажнению болотной топи в 2014–2019 гг.

Годы	2015	2016	2017	2018	2019	WL сред. ± СКО, м	WL min, м	WL max, м	$T_{130 \text{ см}}$ сред., °C
2014	0,570	0,369	0,872	0,688	0,698	$-0,125 \pm 0,083$	-0,252	0,054	+6,21
2015	1	-0,26	0,286	0,199	-0,06	$-0,120 \pm 0,059$	-0,261	-0,002	+6,88
2016		1	0,519	0,481	0,752	$-0,166 \pm 0,068$	-0,298	-0,052	+6,42
2017			1	0,690	0,771	$-0,141 \pm 0,062$	-0,263	-0,018	+6,92
2018				1	0,803	$-0,038 \pm 0,042$	-0,114	0,075	+5,96
2019					1	$-0,132 \pm 0,083$	-0,264	-0,004	+6,40

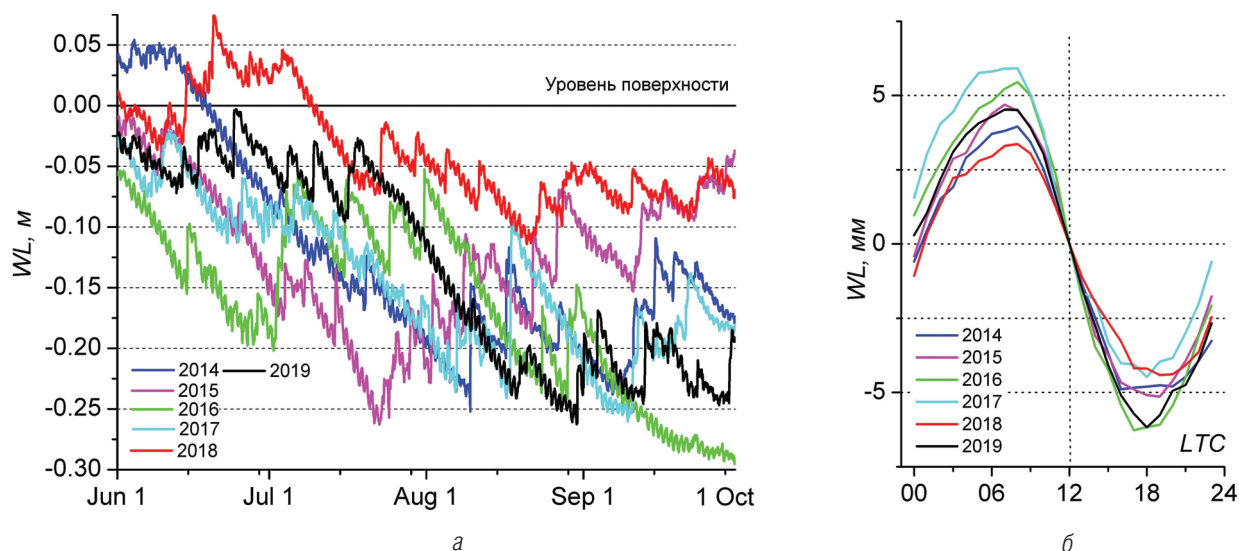


Рис. 4. Многолетнее сезонное поведение уровня почвенных вод (а) и его суточный ход, нормированный на среднесуточное значение и приведенный к 12-ти часам местного времени (LTC). (Бакчарское болото, 2014-2019 гг.)

для отдельных растительных ассоциаций, так и для экосистемы в целом. Например, суммарные показатели стока CO_2 на болотную поверхность в 2017 году значительно превысили величины, наблюдавшиеся в измерительном сезоне 2016 (рис. 3, а).

Причины такого разброса в поглощении атмосферного углерода болотной поверхностью кроются в погодных условиях конкретного года наблюдений. Хотя болота трудно рассматривать как страдающие от засухи территории, сезоны пониженного уровня стояния почвенных вод здесь так же наблюдаются, что сказывается на продуктивности местных растительных ассоциаций.

На рисунке 4, а приведена запись многолетних сезонных показателей уровня почвенных вод (WL) по данным датчика НОВО U20-001-04, установленного в центре измерительной площадки «Е» на глубине 130 см. Подробный межсезонный анализ данных WL в таблице 1 выявил высокую значимую корреляцию поведения почвенных вод в 2014 и 2017 гг., когда наблюдался наиболее эффективный сток CO_2 в болотных экосистемах (рис. 3, а).

Однако, для средних показателей потоков углеродного обмена критерий сезонных колебаний WL не столь надежен. Например, при схожих значениях стока CO_2 в 2015 и 2019 гг. корреляции в поведении почвенных вод за эти годы не наблюдалось. Вместе с тем в 2019 году колебания WL показали исключительную корреляцию с другими измерительными сезонами, что заставляет считать его эталонным по данной характеристике исследуемой болотной экосистемы (табл. 1).

Стоит отметить наличие устойчивого суточного хода у WL (рис. 4, б), определяемого дневным испарением из торфяной залежи и ночной адвекцией вод по всей площади болота [Eppinga et al., 2008]. Для наблюдавшегося в 2016 году спада поглощения CO_2 в болотных экосистемах было зафиксировано повышенное испарение почвенной влаги по сравнению с другими сезонами (рис. 4, б).

Зафиксированное межгодное поведение потоков метана в исследуемой экосистеме показывало достаточно стабильные величины эмиссии CH_4 в 2013–2017 гг., причем суммарное выделение метана в открытой топи (камеры 1–5) оказалась значительно выше по сравнению с участком рям (камера 6). Однако, в сезоне 2018 г. значения эмиссии CH_4 показали почти повсеместное падение в 1,5–2 раза (рис. 3, б).

Причины такого критического изменения в газообмене с поверхности болотной экосистемы были связаны с наблюдавшимися аномальными количествами осадков и высокими значениями WL в период выхода процессов метаногенеза на сезонный максимум в конце июня – начале июля 2018 г. (рис. 4, а). Приток избыточной атмосферной влаги мог вызвать вымывание и вынос за пределы болота питательного субстрата необходимого для жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов, а также нарушить баланс биохимических процессов, отвечающих за окисление CH_4 в болотных экосистемах [Калужный, 2018]. Суточный ход WL в 2018 году показал наименьшую амплитуду колебаний (рис. 4, б).

Влияние погодной аномалии 2018 г. на газообмен в болотных экосистемах подробно рассматривается в работе [Дьячкова и др., 2019].

Величина газовых потоков в болотных экосистемах определяется не только уровнем почвенных вод, но и сезонным поведением таких характеристик окружающей среды как инсоляция подстилающей поверхности и прогрев торфяной залежи. В работе [Краснов и др., 2015] приводятся подробные данные измерений температуры болотной почвы на различной глубине для двух участков измерительной площадки «Е» на полевом стационаре «Plotnikovo»: с повышенной (камера 2) и пониженной (камера 5) увлажненностью. С использованием теории теплопроводности Фурье было определено время запаздывания проникновения импульса тепла в торфяной толще для периода активного развития процессов метаногенеза в июне 2014 г. К сожалению, в данной работе удельные потоки CH_4 были рассчитаны по завышенным коэффициентам калибровки (из-за выхода характеристики сенсора метана в область нелинейности), так что можно проследить лишь качественную зависимость их величины от температуры прогрева торфяной залежи в отдельные дни измерительной кампании.

С другой стороны, авторы работы [Веретенникова и Дюкарев, 2017] подробно описали взаимосвязь поведения эмиссии метана и температуры торфа для открытой топи на другом участке Бакчарского болота в 2013–2014 гг., но получили явно заниженные медианные значения суточных удельных потоков CH_4 (менее $2 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$). Следует отметить, что в данном исследовании для измерений использовался метод переносных статических камер, который не позволяет охватить достаточно длительный временной период.

В работах [Sabrekov et al., 2013; Глаголев и др., 2017] приведены данные крупномасштабных исследований удельных потоков CH_4 (тем же методом статических камер) и температур верхнего почвенного слоя на Бакчарском болоте в 2008, 2011 и 2015 гг. На участке открытой топи, сравнимого с условиями для камер 1–5 измерительного комплекса «Flux-NIES», измеренные потоки метана в июле 2008 г. составляли $10,5\text{--}36 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ (или $14\text{--}48 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$). На участке рьяма в сосново-кустарничково-сфагновом сообществе (микрорельеф с доминированием *Pinus sylvestris*), сравнимого с условиями для камеры 6 измерительного комплекса «Flux-NIES», в августе 2015 г. была зарегистрирована слабая эмиссия CH_4 с медианным значением $0,3 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ (или $0,4 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$).

Наконец, авторы работы [Friborg et al., 2003] проводили исследования газовых потоков непосредственно на полевом стационаре «Plotnikovo» методом турбулентных пульсаций (*eddy covariance*). На основании данных трех измеритель-

ных кампаний в мае, июле и сентябре 1999 г. были получены следующие среднесезонные удельные потоки: $-2247 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ (или около $-100 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$) для CO_2 ; $136 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ (или $\sim 6 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$) для CH_4 . Сравнивая результаты исследований газовых потоков в данной болотной экосистеме двумя автоматическими методами, получаем хорошее их совпадение, если взять за точку турбулентных измерений (т. н. *footprint*) микрорельеф между камерами 5 и 6.

ВЫВОДЫ

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

Интегральные значения потоков CO_2 за весь период измерений показывают, что поверхности западносибирских болот являются мощным «поглотителем» атмосферного углерода. При этом, величины эмиссии CH_4 из различных участков болотных почв зависят от типа растительности, уровня увлажнения и прогрева торфяной залежи. Наибольшие величины эмиссии CH_4 из болот наблюдаются в июле и достигают довольно больших величин в открытой топи ($15\text{--}25 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$). Наименьшими значениями эмиссии CH_4 характеризовался участок рьяма ($2\text{--}3 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$).

Отмечено значительное снижение показателей эмиссии CH_4 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.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-45-700020 р_а. Для выполнения гранта использовалась инфраструктура ИОА СО РАН, созданная и эксплуатируемая по госзаданию № АААА-А17-117021310142-5, включая ЦКП «Атмосфера». Обеспечение полевых измерений осуществлялось при участии Фонда глобальных исследований окружающей среды для Национальных институтов Министерства окружающей среды Японии.

Авторы статьи благодарят Головацкую Е.А. за предоставленное подробное описание растительных ассоциаций исследуемой болотной экосистемы; Аршинова М.Ю. за помощь в составлении стандартизированной блок-схемы измерительного комплекса; Плотникова А.А. за

техническую поддержку непрерывных измерений в течении многих лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Козлов А.В., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А. 2017. Автоматическая камера для измерения потоков парниковых газов на поверхности раздела почва-атмосфера // Патент на полезную модель № 169373. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
2. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. 1961. Методы определения физических свойств почв и грунтов в поле и лаборатории. М.: Высшая школа. С. 345.
3. Веретенникова Е.Э., Дюкарев Е.А. 2017. Суточные вариации эмиссии метана с поверхности болотных экосистем Западной Сибири в летний период // Метеорол. и гидрол. № 5. С. 69-79.
4. Глаголев М.В. 2010. Аннотированный список литературных источников по результатам измерений потоков CH_4 и CO_2 на болотах России // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 1. № 2. DOI: 10.17816/edgcc121.
5. Глаголев М.В., Ильясов Д.В., Терентьева И.Е., Сабреков А.Ф., Краснов О.А., Максюттов Ш.Ш. 2017. Потоки метана и диоксида углерода в заболоченных лесах южной и средней тайги Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. Т. 30. № 4. С. 301-309. DOI: 10.15372/A0020170407.
6. Дьячкова А.В., Давыдов Д.К., Фофанов А.В., Краснов О.А., Головацкая Е.А., Симоненков Д.В., Nakayama T., Максюттов Ш.Ш. 2019. Влияние аномальных факторов среды на эмиссию метана на Бакчарском болоте в районе п. Плотниково летом 2018 г. // Оптика атмосф. и океана. Т. 32. № 6. С. 482-489. DOI: 10.15372/A0020190611.
7. Калюжный И.Л. 2018. Общие черты формирования гидрохимического режима основных типов болот России // Метеорол. и гидрол. № 8. С. 72-81.
8. Краснов О.А., Maksyutov S., Глаголев М.В., Катаев М.Ю., Inoue G., Надеев А.И., Шелевой В.Д. 2013. Автоматизированный комплекс «Flux-NIES» для измерения потоков метана и диоксида углерода // Оптика атмосф. и океана. Т. 26. № 12. С. 1090-1097.
9. Краснов О.А., Maksyutov S., Давыдов Д.К., Фофанов А.В., Глаголев М.В., Inoue G. 2015. Мониторинг эмиссии метана и двуоксида углерода из почвы в атмосферу и параметры почвы. Бакчарское болото Томской области (2014 г.) // Оптика атмосф. и океана. Т. 28. № 7. С. 644-654. DOI: 10.15372/A0020150707.
10. Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Ваганов Е.А., Верховец С.В., Рубцов А.В. 2016. Динамика потоков CO_2 с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. Т. 3. № 9. С. 338-357.
11. Молчанов А.Г. 2017. Газообмен диоксида углерода с поверхности сфагнома в заболоченном сосняке южной тайги // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 8. № 1. С. 43-54.
12. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Quirry C. Le, Myneni R.B., Piao S., Thornton P. 2013. 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. P. 570. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107415324.015
13. Dyukarev E., Godovnikov E., Karpov D., Kurakov S., Lapshina E., Filippov I., Filippova N., Zarov E. 2019. Net ecosystem exchange, gross primary production and ecosystem respiration in ridge-hollow complex at Mukhrino bog // Geography Environment Sustainability. V. 12. N. 2. P. 227-244. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-77.
14. Eppinga M.B., Rietkerk M., Borren W., Lapshina E.D., Bleuten W., Wassen M.J. 2008. Regular surface patterning of peatlands: Confronting theory with field data // Ecosystems. V. 11. P. 520-536. DOI: 10.1007/s10021-008-9138-z.
15. Friberg T., Soegaard H., Christensen T.R., Lloyd C.R., Panikov N.S. 2003. Siberian wetlands: Where a sink is a source // Geophysical Research Letters V. 30. N. 21. P. 2129. DOI: 10.1029/2003GL017797.
16. Ivanov D.G., Avilov V.K., Kurbatova Y.A. 2017. CO_2 fluxes at south taiga bog in the European part of Russia in summer // Contemporary Problems of Ecology. V. 10. N. 2. P. 97-104. DOI: 10.1134/s1995425517020056.
17. 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. 2012. Carbon budget in forest and tundra permafrost ecosystems of north-east Russia // Proceedings of the 5th International Workshop on $\text{C}/\text{H}_2\text{O}$ /Energy balance and climate over boreal and arctic regions with special emphasis on eastern Eurasia (11-13 November 2010, Wageningen, The Netherlands). Amsterdam. P. 21-24.
18. Maksyutov S., Inoue G., Sorokin M., Nakano T., Krasnov O., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N., Vasiliev S. 1999. 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. P. 115-124.
19. Nakano T., Inoue G., Maksyutov S., Sorokin M. 1999. 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. P. 211-215.
20. NOAA/ESRL. 2017. URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> (the date of access: 01.12.2020).
21. Suto H., Inoue G. 2010. 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. V. 27. P. 1175-1184.
22. Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Machida T., Maksyutov S.S. 2013. Methane Emission from Mires of the West Siberian Taiga // Eurasian Soil Science. V. 46. No. 12. P. 1182-1193. DOI: 10.1134/S1064229314010098.

23. Pavelka M., Acosta M., Kiese R., Altimir N., Врѣммер С., Crill P., Darenova E., FuЯ R., Gielen B., Graf A., Klemedtsson L., Lohila A., Longdoz B., Lindroth A., Nilsson M., Jimйnez S.M., Merbold L., Montagnani L. Peichl M. Pihlatie M. Pumpanen J., Ortiz P.S., SilvennoinenH., Skiba U., Vestin P.,

Janous D., Kutsch W. 2018. Standardisation of chamber technique for CO₂, N₂O and CH₄ fluxes measurements from terrestrial ecosystems // *Int. Agrophys.* V. 32. P. 569-587. DOI: 10.1515/intag-2017-0045.

Поступила: 19.04.2021

Одобрена: 15.05.2021

Принята: 20.06.2021

