

УДК 502.057

## Измерение потоков CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O методом турбулентных пульсаций: использование мобильной установки и учет изменяющейся зоны охвата

Л.А. Кривенко<sup>1,2</sup>, Г.Г. Суворов<sup>1</sup>, В.К. Авилов<sup>3</sup>, А.А. Сирин<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Институт лесоведения РАН

143030, Московская обл., с. Успенское, ул. Советская, 21

<sup>2</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

119017, г. Москва, пер. Пыжевский, 3

<sup>3</sup> Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН

119071, г. Москва, пр. Ленинский, 33

Поступила в редакцию 25.06.2019 г.

Показана информативность кратковременных (1–2 сут) измерений удельных потоков парниковых газов (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O) методом турбулентных пульсаций с использованием мобильного комплекса оборудования, а также с учетом критерия дальности зоны охвата и направления ветра для выделения потоков с конкретного участка. Работа выполнена на примере осушенного торфяника в Московской обл. с разными вариантами вторичного обводнения. Полученные удельные потоки CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>O позволяют рассмотреть их изменения в течение суток, а при смене направления ветра – оценить их на разных прилегающих объектах. Применение многоступенчатой фильтрации данных после основной обработки позволяет выделить осредненные за 30-минутные интервалы удельные потоки для анализа их связи с экологическими параметрами, моделирования, получения средних оценок за более длительные периоды, сравнения с данными измерений камерным методом для задач инвентаризации источников и стоков парниковых газов.

**Ключевые слова:** метод турбулентных пульсаций, торфяник, удельные потоки, метан, диоксид углерода, водяной пар, зона охвата, дальность зоны охвата, фильтрация данных; eddy covariance method, peatland, fluxes, methane, carbon dioxide, water vapor, footprint, fetch, data filtering.

### Введение

Определение удельных потоков (УП) парниковых газов – актуальная задача для оценки функционирования экосистем и влияния антропогенных факторов в связи с проблемой изменения климата. В немалой степени это касается торфяных болот, их антропогенно-измененных производных – торфяников – и мер, принимаемых для восстановления болотных экосистем путем вторичного обводнения для смягчения изменений климата [1–3] и адаптации к ним [4]. Из газов наибольший интерес представляют диоксид углерода и метан, а также водяной пар.

Для натуральных измерений УП парниковых газов (строго говоря, речь идет об измерениях концентраций *in situ* и последующем расчете УП) из различных объектов широко применяется метод камер [5] с использованием их статических, динамических и автоматических модификаций с непосредственным (на объекте) или последующим (в лаборатории) определением концентраций ИК-анализаторами или

методами газовой хроматографии. Камерный метод сложен для измерений, длительных по времени или проводимых с высокой частотой; исключение – автоматические камеры, имеющие, однако, свои ограничения. Также этим методом трудно изучать внутрисезонную и внутрисезонную динамику УП, фиксировать кратковременные «выбросы» парниковых газов. Возникают методические проблемы, связанные с запотеванием прозрачных камер, искусственным отклонением в них концентраций парниковых газов, температуры и влажности воздуха, механическим повреждением растений внутри камеры и др. С другой стороны, камерный метод имеет широкий диапазон технических и стоимостных вариантов реализации и, что важно, позволяет соотнести УП с экологическими условиями в точке измерений.

Метод турбулентных пульсаций (МТП; англ. eddy covariance method, в русскоязычной литературе – метод микровихревых пульсаций, пульсационных наблюдений [6–8]) – один из наиболее теоретически обоснованных для измерения газовых потоков между экосистемами и атмосферой. Он достаточно давно используется для измерения потоков CO<sub>2</sub> [9] и CH<sub>4</sub> [10, 11] и позволяет получить оценки потоков с разных участков, протяженностью от сотни метров до нескольких километров [12]; обычно производятся долго-

\* Людмила Алексеевна Кривенко (krivenok\_lyudmila@mail.ru); Геннадий Геннадьевич Суворов (suvorovg@gmail.com); Виталий Константинович Авилов (vit.avilov@sevin.ru); Андрей Артурович Сирин (sirin@ilan.ras.ru).

временные наблюдения с целью получения сезонных, годовых и более длительных оценок баланса  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и паров  $\text{H}_2\text{O}$  ([13–19] и др.). При долговременных измерениях возникают вопросы сохранности оборудования и – самое проблематичное – его стабильного энергообеспечения. Полученные оценки УП характеризуют территорию, не всегда однородную по экосистемным характеристикам и в границах, которые меняются в течение периода интегрирования.

Современное развитие технической базы и методов математической обработки данных обеспечило возможность кратковременного использования МТП с мобильной доставкой оборудования и организацией наблюдений для периода от нескольких дней или даже часов [20–21]. Однако работ, посвященных кратковременным измерениям МТП, немного, а особенности применения метода в таком варианте рассмотрены недостаточно. Это касается таких аспектов кратковременных измерений МТП, как выбор объекта, организация измерений, математическая обработка данных, в частности, учет показателя дальности зоны охвата (англ. fetch), а также направления ветра как критерия пространственной фильтрации в случае неоднородных участков и при необходимости отделять потоки с разных объектов или их частей.

Решение этих вопросов создает предпосылки для оценки УП парниковых газов с исследуемого участка с высокой частотой измерений и с пространственной дискретностью в случае неоднородности объекта, исключая многие вопросы организации длительных наблюдений (стационарное энергообеспечение, охрана оборудования и пр.). Таким образом, цель настоящей работы – тестирование МТП в режиме кратковременных измерений потоков  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  с использованием мобильного измерительного комплекса и с учетом дальности зоны охвата для анализа информативности данных, получаемых за один или серию кратковременных выездов, для характеристики УП парниковых газов на примере исследуемого объекта.

## Объект исследования

Эксперимент проходил на Дубненском болотном массиве (Талдомский р-н Московской обл.,  $56^\circ 42'$  с.ш.,  $37^\circ 50'$  в.д.), который является характерным примером частично освоенного торфяника, где на небольшом удалении друг от друга представлены последствия осушения и хозяйственного использования болот: участки добычи торфа (разной степени выработанности), рекультивированные после частичной выработки торфа для сельского хозяйства (сенокосы, пропашные культуры, неиспользуемые) и оставленные без рекультивации, участки лесосушения, сохранившаяся часть естественного болота [22, 23].

Измерения проводились в апреле, мае 2016 г. и мае 2017 г. на участке бывшей добычи торфа, оставленной без рекультивации примерно 20 лет назад. Измерительный комплекс устанавливался в одной точке на обочине насыпной грунтовой дороги, ориентированной с запада на восток параллельно осушительным каналам, которые расположены в 40 м друг от друга, глубиной 0,8–1,0 м. Участок был подтоплен в 2012 г. путем строительства пере-

ливной плотины на магистральном канале к востоку от точки измерений в ходе программы обводнения более 73 тыс. га пожароопасных торфяников Московской обл. в 2010–2013 гг. [24].

В отличие от участка к северу от дороги (далее – «северный») на противоположном, «южном» участке в 2015 г. на четырех осушительных каналах были сделаны дополнительные земляные перемычки для ускорения обводнения и восстановления болотной растительности. На «северном» участке уровни почвенно-грунтовых вод находятся в летний сухой период на глубине ~20–30 см, а на «южном» – 5–30 см; во влажные периоды различие выражено слабее. На «северном» участке в древесно-кустарниковом ярусе при сомкнутости крон 80% доминируют ивы (~90%), доля березы – примерно 10%. На «южном» средняя сомкнутость крон составляет 60%, соотношение ив и берез – примерно 60/40%, встречается единичный подрост сосны. В период измерений на обоих участках средняя высота древесно-кустарникового яруса составляла ~2 м, проективное покрытие травяного яруса – 10–90%, мохового – 0–80%. Травяно-моховой покров был наиболее выражен на открытых прогалинах максимальной площадью 8 м<sup>2</sup> («северный» участок) и 30 м<sup>2</sup> («южный» участок). Летом водная поверхность осушительных каналов частично покрывалась ряской.

Место расположения измерительной установки (рис. 1) выбиралось таким образом, чтобы была потенциальная возможность фиксации УП  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}$  с «северного» и «южного» участков (различных по увлажнению) в зависимости от направления ветра.

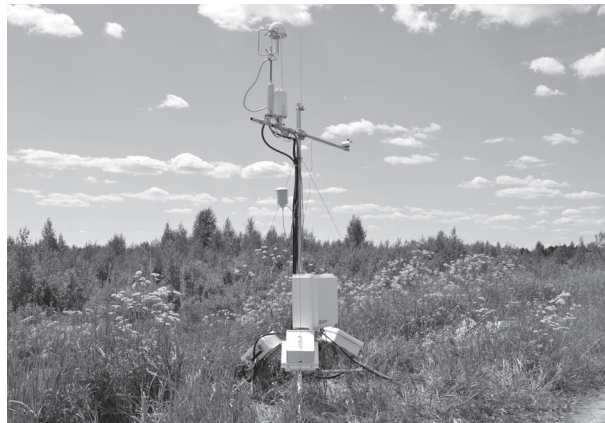


Рис. 1. Измерительный комплекс, установленный на обочине насыпной дороги, разделяющей два различных по увлажнению и растительности участка вторично обводненного осушенного торфяника; вид на «южный» участок

## Теоретические основы используемой методики

Теоретическая основа МТП [25–28] предполагает, что чистый перенос вещества между плоской гомогенной поверхностью и атмосферой происходит в одном измерении и плотность вертикального потока может быть рассчитана как ковариация между турбулентными изменениями вертикальной скорости ветра и интересующего параметра (в нашем случае – кон-

центрации исследуемых газов). Аналогично происходит обмен теплом и энергией. В приземном слое воздуха потоки вещества относительно постоянны с высотой, а турбулентный транспорт является основным механизмом переноса. Поэтому измерения МТП позволяют получить репрезентативные оценки потоков с поверхности, основанные на определении корреляции между изменениями вертикальной скорости ветра и отклонениями скалярных величин интересующих параметров. Из-за атмосферной турбулентности для фиксации этих изменений необходимы измерения с высокой частотой 1–10 Гц [29]. Принцип МТП заключается в вычислении осредненного произведения пульсаций (ковариации) концентраций исследуемого газа и вертикальной скорости ветра в воздушных вихрях. Говоря об измерении потоков МТП, мы имеем в виду концентрации и скорость ветра *in situ* и последующую оценку потоков на их основе [8].

Ключевыми для МТП являются понятия зона охвата (англ. footprint) и дальность зоны охвата (рис. 2). Функция зоны охвата, или взвешенная функция источника, описывает связь между пространственным распределением поверхностных источников/стоков и измеренным на соответствующей высоте сигналом [12]. То есть функция зоны охвата описывает вклад УП с каждого элемента поверхности, находящейся с наветренной стороны, в поток, измеренный сенсором [30]. Под дальностью зоны охвата в общем случае понимается протяженность области, на которой ведутся измерения МТП [7]. Этот термин также используется в значении расстояния, отложенного в наветренную сторону от измерительной установки до границы зоны охвата [8].  $N\%$ -я дальность зоны охвата — дальность, с которой диффундировали молекулы исследуемого вещества, осуществившие  $N\%$  вклада в поток [31].

## Измерительное оборудование

На мобильной вышке устанавливались: газоанализатор закрытого типа для определения concentra-

ций  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  LI-7200 (LI-COR, США); газоанализатор открытого типа для определения концентрации  $\text{CH}_4$  LI-7700 (LI-COR, США); 3D акустический анемометр R3-50 (Gill Instruments, Великобритания) для измерения трех компонент скорости и направления ветра; датчик определения фотосинтетической активной радиации LI-190 (LI-COR, США); осадкомер TR-525M (Texas Electronics, США); датчик температуры и влажности воздуха HygroClip2 (Rotronic AG, Швейцария).

Газоанализаторы, анемометр, датчик LI-190 были установлены на металлической штанге на высоте ~3,8 м, датчик HygroClip2 — 2 м, осадкомер — 1 м. Частота записи данных анемометра и сенсоров  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  — 10 Гц. Электропитание обеспечивали четыре гелевых аккумулятора GX 12-150 (DELTA, Китай) суммарной емкостью 600 А/ч, гарантирующих бесперебойные измерения длительностью до 4 сут. Установка и запуск всего оборудования занимали до 4 ч, демонтаж — 1 ч.

## Обработка данных

Расчет турбулентных потоков производился с усреднением до 30-минутных значений с использованием программного пакета EddyPro® 6.2.0 (LI-COR, Inc., США). Высота растительности ( $h$ ) определялась непосредственно на участках с использованием лазерного уровня и мерной рейки. При расчете применялись необходимые коррекции, большинство которых заданы в программе по умолчанию. Коэффициент шероховатости ( $z_0$ ) и высота слоя вытеснения ( $d$ ) были оценены согласно [32], исходя из высоты растительности ( $z_0 = 0,15h$ ,  $d = 0,67h$ ), и приняты одинаковыми для «северного» и «южного» участков ввиду сходной средней высоты растительности. Использование приведенного выше выражения для расчета  $z_0$  обосновывается в [33]. Тестовые расчеты с коэффициентом шероховатости, вычисленным согласно эмпирической формуле  $z_0 = 0,1213h^{0,9054}$ , полученной в работе [34] на основе множества значений

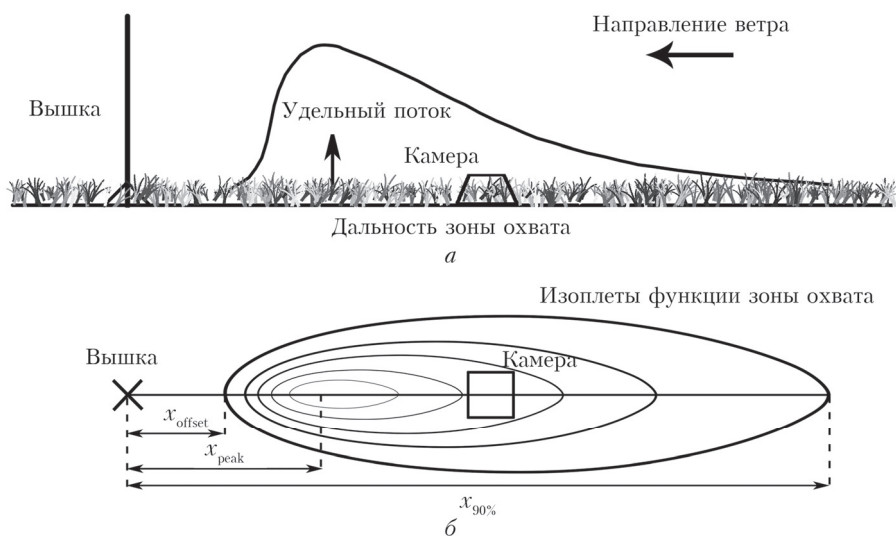


Рис. 2. Общая концепция МТП (по [30]):  $a$  — вид участка измерений в профиль;  $b$  — вид сверху;  $x_{\text{offset}}$ ,  $x_{\text{peak}}$  и  $x_{90\%}$  — соответствующие дальности зоны охвата; для примерного сравнения охватываемых площадей показана камера для измерения УП газов

высот препятствий и соответствующих им коэффициентов шероховатости, дали те же значения УП.

При расчетах проводились: поворот координат для поправки на положение оси анемометра (метод двойного поворота); удаление тренда турбулентных флуктуаций; учет временного запаздывания; вводились поправки на флуктуации плотности воздуха и для частотных характеристик. Был проведен тест на наличие выбивающихся пиковых значений по алгоритму [35], пики удалены линейной интерполяцией соседних значений. При расчете дальности зоны охвата в EddyPro по умолчанию используется модель [36], которая при несоблюдении условий применимости автоматически заменяется на модель [37]. В результате расчетов получены: так называемая пиковая дальность зоны охвата  $x_{peak}$ , представляющая расстояние, отложенное от вышки (анемометра) в наветренную сторону до источника с наибольшим относительным вкладом в общий поток; дальность зоны охвата  $x_{N\%}$ , которая представляет собой протяженность территории в наветренную сторону от анемометра, осуществляющей интегральный вклад  $N\%$  в поток (рассчитываются дальности зон охвата для  $N = 10, 30, 50, 70, 90\%$ ); величина  $x_{offset}$ , характеризующая расстояние от измерительной установки, осуществляющее вклад в интегральный поток менее 1% [32].

При фильтрации данных, следующей за расчетами в EddyPro, для выбора репрезентативных УП газов из полученного массива нами были удалены значения: 1) с  $quality\ flag = 2$  (параметр, рассчитанный в EddyPro на основе двух тестов: устойчивого состояния и развитых турбулентных условий, затем объединенных по системе [38]; он характеризует качество УП; значение «2» свидетельствует о необходимости удаления соответствующего УП из набора данных [32]); 2) полученные при низкой турбулентности (пороговое значение динамической скорости трения  $u^*$  рассчитывалось при помощи программного пакета FREddyPro (<https://CRAN.R-project.org/package=FREddyPro>) и составило  $0,031\ м \cdot с^{-1}$  для 16–18 апреля 2016 г.,  $0,042\ м \cdot с^{-1}$  для 26–27 мая 2016 г.,  $0,028\ м \cdot с^{-1}$  для 30–31 мая 2017 г.); 3) при направлении ветра вдоль дороги и когда дальность зоны охвата была равна или значительно превышала протяженность «северного» или «южного» участков

(на этапе фильтрации по дальности зоны охвата). В завершение последнего этапа значения УП были отнесены к «северному» или «южному» участку в зависимости от преобладающего направления ветра (направления ветра в градусах были соотношены с географическим расположением соответствующих секторов).

## Результаты и обсуждение

Для измерений МТП не существует единой схемы контроля качества [39]. Количество значений УП исследуемых газов, оставшихся после последовательно примененных уровней фильтрации, дано в таблице. По критерию  $quality\ flag$  для разных периодов измерений было отбраковано от 11 до 24% значений, по критерию динамической скорости трения – еще 5–15% значений от предыдущего количества. Основная часть УП была исключена по дальности зоны охвата – в случае превышения размера участка или, наоборот, при невыходе за пределы дороги. На этом уровне было исключено еще 26–43% значений. В итоге многоступенчатая фильтрация позволила получить требуемые данные, несмотря на сложность и неоднородность исследуемого объекта с точки зрения измерений МТП.

На рис. 3 дана гистограмма абсолютных частот 90%-й дальности зоны охвата за три периода измерений. Большая часть ее значений находится в диапазоне 0–100 м с преобладанием: 16–18 апреля 2016 г. и 30–31 мая 2017 г. в интервале 80–90 м, 26–27 мая 2016 г. – 60–70 м. При слабой турбулентности единичные дальности зоны охвата 16–18 апреля 2016 г. и 30–31 мая 2017 г. достигают 700–1600 м (на рис. 3 не показаны). При сильной турбулентности ее значение  $x_{offset}$  может стать отрицательным («уходит» в подветренную сторону от измерительной установки), а изоплеты функции зоны охвата будут смещаться ближе к установке. Количество таких расчетных отрицательных значений  $x_{offset}$  за апрель 2016, май 2016, май 2017 г. составило 42, 31 и 40% соответственно.

Дальность зоны охвата и динамическая скорость трения менялись в течение суток. В ночные часы (в основном с 21:00 до 3:00) преимущественно увеличивалась дальность зоны охвата и уменьшалась  $u^*$ ;

Количество значений УП изучаемых газов после разных критериев фильтрации

Период измерений	Длительность измерений, ч	Газ	Количество значений УП (за 30-минутные интервалы)				
			Исходное	После фильтрации по		После разделения на участки	
				quality flag	$u^*$	«северный»	«южный»
16–18.04.2016 г.	44,5	CO <sub>2</sub>	85	74	66	0	43
		CH <sub>4</sub>		69	66	1	41
		H <sub>2</sub> O		67	63	0	44
26–27.05.2016 г.	22	CO <sub>2</sub>	45	40	34	19	4
		CH <sub>4</sub>		34	32	16	6
		H <sub>2</sub> O		38	36	18	7
30–31.05.2017 г.	18,5	CO <sub>2</sub>	38	33	30	9	8
		CH <sub>4</sub>		30	27	9	11
		H <sub>2</sub> O		32	29	10	11

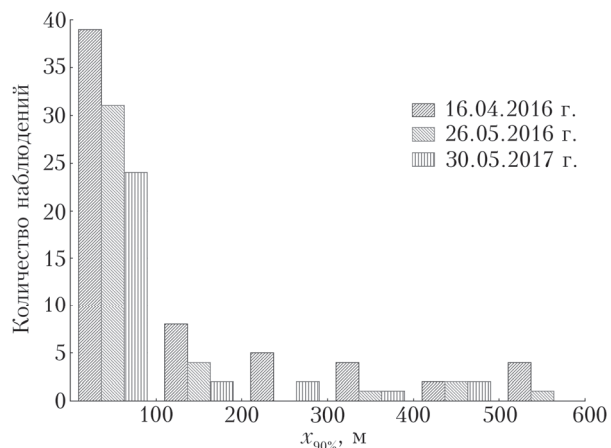


Рис. 3. Абсолютная частота дальности зоны охвата  $x_{90\%}$ , наблюдаемая при измерениях за соответствующие периоды

после применения фильтрации за все три периода в эти часы остались лишь отдельные значения. В дневное время наблюдалась развитая турбулентность (для периодов 16–18 апреля 2016 г. и 30–31 мая

2017 г. локальные максимумы  $u^*$  соответствовали ~12:00, для периода 26–27 мая 2016 г. линейный тренд этого параметра возростал).

Направления ветра в периоды измерений отличались (рис. 4). В апреле 2016 г. были зафиксированы ветры только с «южного» участка (преобладал ветер южного направления), в мае 2016 г. — с «северного», а в мае 2017 г. благодаря изменению направления ветра удалось получить сопоставимое количество данных с обоих участков. На рис. 5 показаны дальности зоны охвата для УП метана в мае 2017 г.

Согласно полученным данным прослеживаются изменения УП  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в зависимости от времени суток (рис. 6, 7). Положительный УП (эмиссия) означает потерю углерода экосистемой, а отрицательный — поглощение и, следовательно, накопление. Для наблюдений в апреле 2016 г. (рис. 6, а) характерна только эмиссия  $\text{CO}_2$ , что связано с отсутствием активного фотосинтеза в это время года. Низкие температуры в этот период стали причиной относительно невысокой эмиссии  $\text{CO}_2$  на «южном» участке (медиана УП  $47,3 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ ). В мае 2016 и 2017 г.

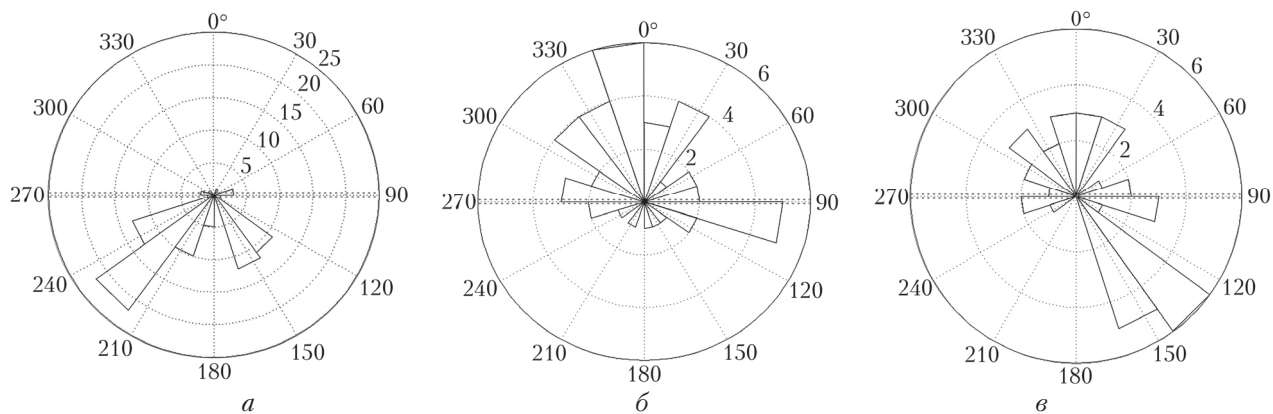


Рис. 4. Розы ветров в периоды измерений: а — 16–18 апреля 2016 г.; б — 26–27 мая 2016 г.; в — 30–31 мая 2017 г.; показаны частоты и направления ветров; двойная пунктирная линия — дорога, разделяющая «северный» и «южный» участки (вне масштаба)

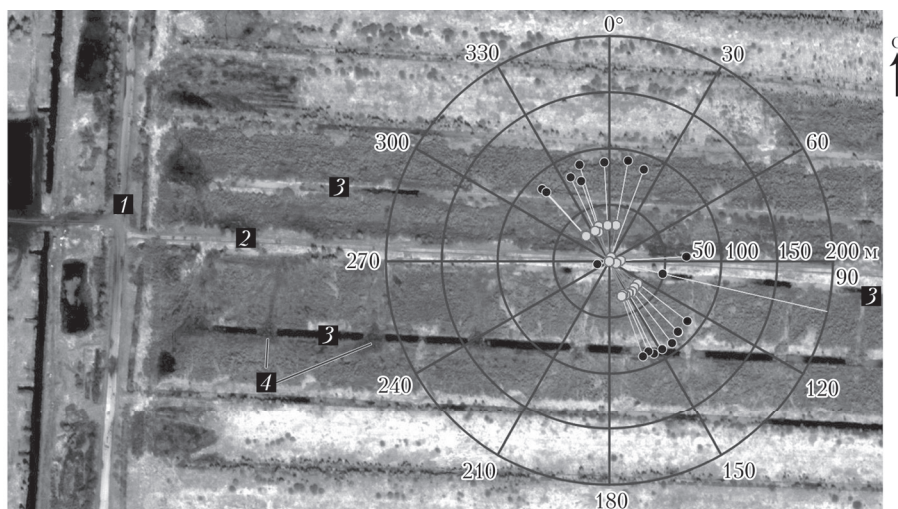


Рис. 5. Дальности зоны охвата (для наглядности — не более 200 м) турбулентных удельных потоков метана (измерения в мае 2017 г.): светлыми точками ограничены  $x_{\text{peak}}$ , темными —  $x_{90\%}$ ; перекрестье координатной сетки соответствует положению вышки; 1 — основная подъездная дорога; 2 — насыпная дорога; 3 — осушительные каналы; 4 — перемычки. Спутниковый снимок от 19.05.2017 г. © 2017 DigitalGlobe, Inc., распространяется ИТЦ «СКАНЭКС»

(рис. 6, б–в) наблюдалось поглощение  $\text{CO}_2$  в дневные часы (сказывается фотосинтез) и его эмиссия – в вечерние и ночные часы ввиду преобладания процессов дыхания. В вечерние и ночные часы для всех периодов измерений из-за неподходящих для МТП метеорологических и турбулентных условий большая часть УП была неудовлетворительного качества.

Оставшихся после фильтрации данных было достаточно для выявления внутрисуточных изменений УП метана. Они были хорошо выражены с 7:30 до 18:30 17 апреля 2016 г. (рис. 6, з): заметное увеличение эмиссии  $\text{CH}_4$  с утра к полудню и постепенное снижение к 18:00, что, вероятно, связано с изменениями температуры воздуха. Фрагментарно внутрисуточные изменения УП метана прослеживаются при измерениях в мае 2016 и 2017 гг. (рис. 6, д–е).

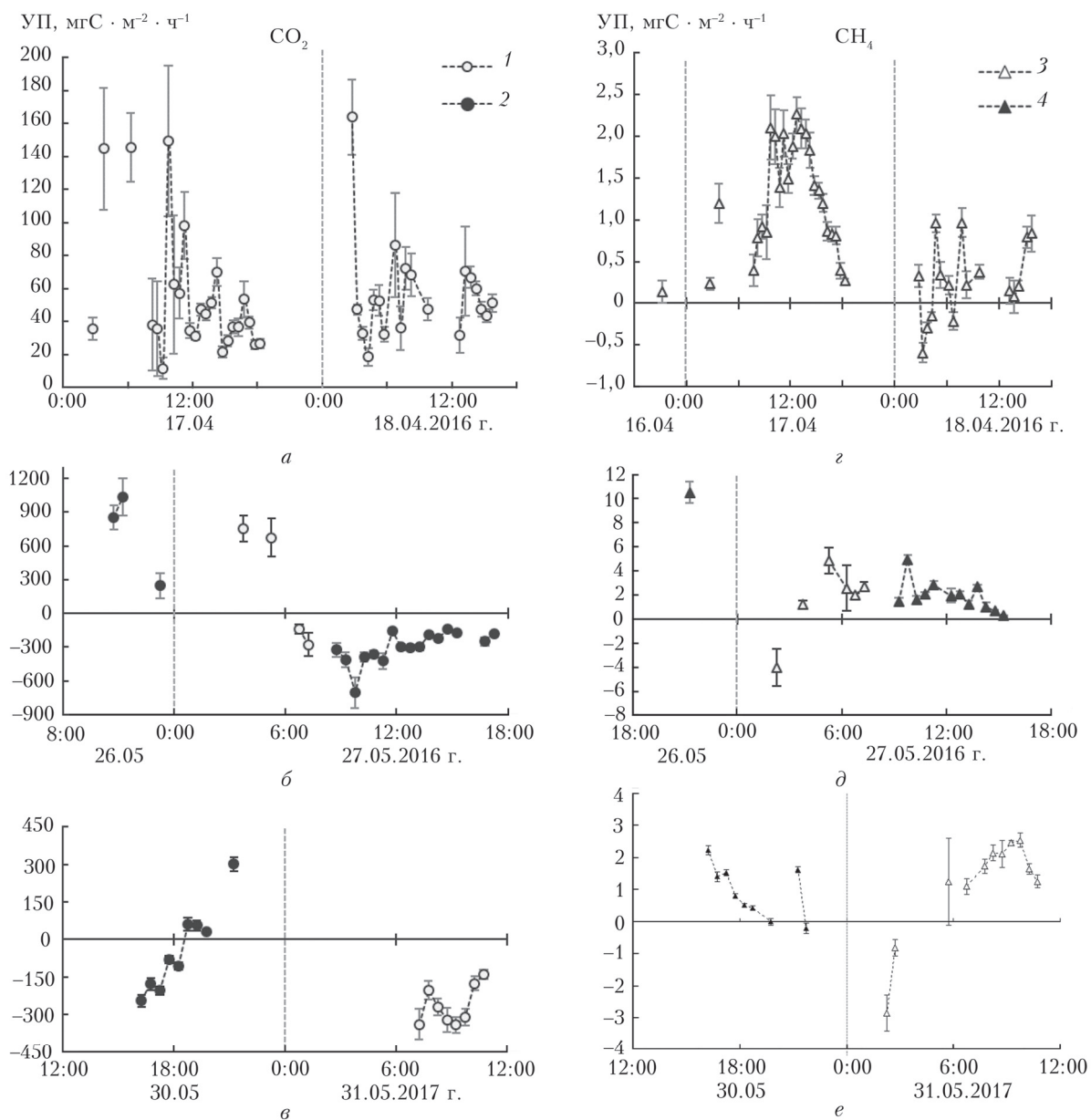


Рис. 6. УП  $\text{CO}_2$  с «южного» (1) и «северного» (2) участков и  $\text{CH}_4$  с «южного» (3) и «северного» (4) участков: а, з – апрель 2016 г.; б, д – май 2016 г.; в, е – май 2017 г. Значения УП отнесены к середине 30-минутного интервала усреднения; планки погрешностей соответствуют случайным погрешностям УП (см. алгоритм расчета в [32]); линии, соединяющие значения УП, даны для улучшения восприятия и не являются аппроксимацией (то же на рис. 7)

Ночью и утром для всех трех периодов измерений отмечается поглощение  $\text{CH}_4$ .

Изменение УП паров воды в дневное время выражено наиболее четко (рис. 7, а–в) и соответствует изменению фотосинтетически активной радиации (через процессы нагрева и испарения). Для измерений в апреле 2016 г. (рис. 7, а) локальный максимум УП приходится на интервал 11:00–11:30 («южный» участок), в мае 2016 г. – на 11:30–12:00 («северный» участок), а в мае 2017 г. наблюдается снижение значений УП с 16:00–16:30 для «северного» участка, постепенное увеличение до максимума в 9:00–9:30 и последующее снижение для «южного». Изменения фиксируются в течение суток, несмотря на смену направления ветра и, как следствие, смещение зоны охвата с одного участка на другой (рис. 7, б–в).

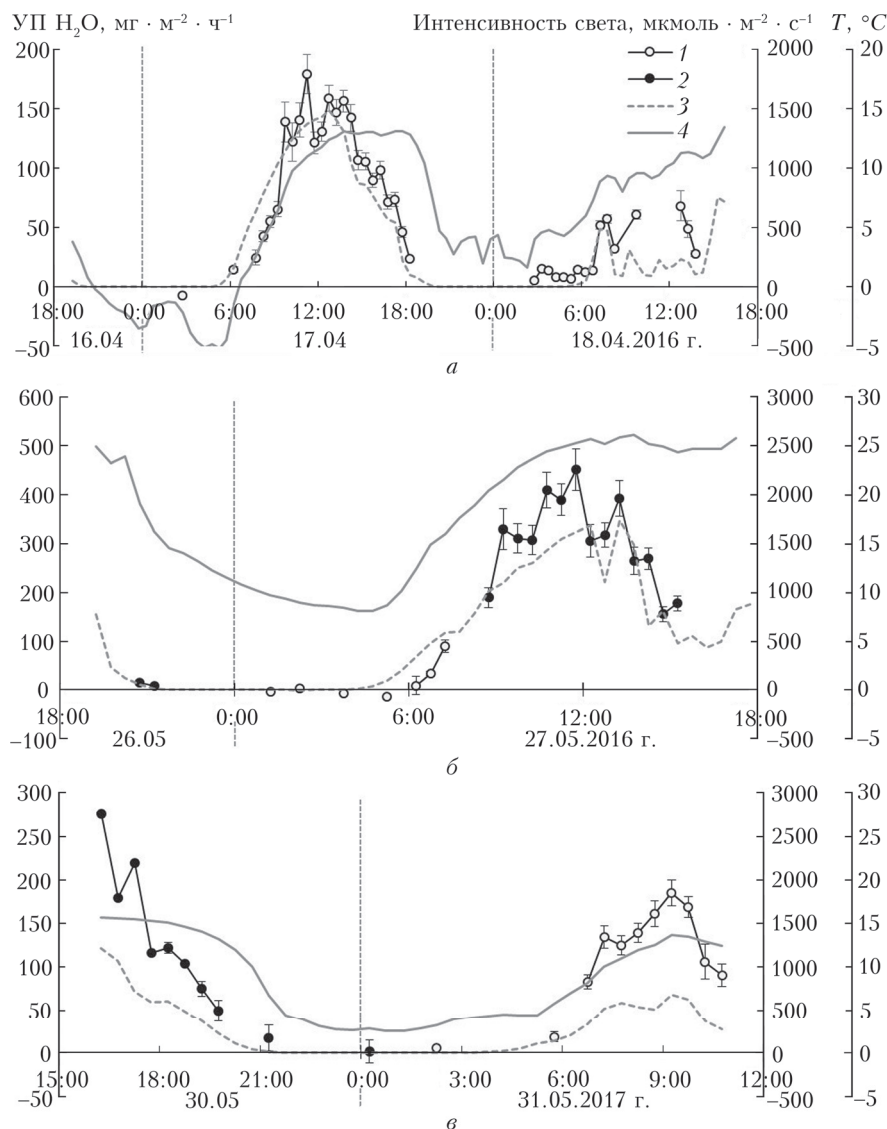


Рис. 7. УП  $\text{H}_2\text{O}$  с «южного» (1) и «северного» (2) участков; фотосинтетическая активная радиация (3); температура воздуха (4): а – апрель 2016 г.; б – май 2016 г.; в – май 2017 г.

Удалось сравнить УП для двух участков только для мая 2017 г. (период с близким количеством измеренных значений УП). На обоих участках наблюдается поглощение  $\text{CO}_2$  в светлое время суток: на «южном» участке медианное значение  $-290 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ , на «северном» —  $-93 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ . На более обводненном «южном» участке наблюдается большая ассимиляция углерода экосистемой, чем на «северном». Вероятно, более увлажненная торфяная залежь в меньшей мере минерализуется и теряет углерод в виде  $\text{CO}_2$  (см. рис. 6, в). Это показывает, что проведенное дополнительное обводнение на «южном» участке дало положительный эффект в виде снижения потерь углерода. Для паров воды существенных различий нет, но и здесь медиана УП немного выше для «южного» участка ( $125$  против  $110 \text{ mgH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ ), что также соответствует различиям в увлажнении участков и, следовательно, суммарном испарении (транспирации и физическому испарению с поверхности почвы

и каналов). Однако следует отметить, что на «южном» участке измеренные УП приходятся на утренние часы, а на «северном» — на вечерние. Увлажнение «южного» участка также объясняет большее медианное значение его УП  $\text{CH}_4$  за рассматриваемый период:  $1,2$  против  $0,8 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$  для «северного» участка.

Результаты показали информативность кратковременных измерений МТП для изменений УП  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  в течение суток (кроме ночного времени). Методика может дополнить камерный метод, которым трудно проводить измерения с высокой частотой, и помочь при получении оценок потоков парниковых газов, рассмотрении их связи с изменениями условий окружающей среды (температуры воздуха, облачности и др.). Получаемые МТП данные об УП  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}$  расширяют возможности изучения их внутрисуточных изменений, а при смене направления ветра позволяют оценить их на разных близкорялежащих объектах.

## Заключение

Протестированы технические и организационные возможности проведения кратковременных измерений УП CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>O методом турбулентных пульсаций с использованием мобильного комплекса. Использование только аккумуляторных батарей обеспечивало автономную работу оборудования до 4 сут без подзарядки. Скорость монтажа и запуска (до 4 ч), а также демонтажа (до 1 ч) измерительной установки позволила за 1–2 сут обеспечить длительность измерений от 20 до 40 ч и более. Применение многоступенчатой фильтрации данных после основной обработки дало возможность выделить осредненные за 30 мин УП изучаемых газов в достаточном объеме: при измерениях продолжительностью 20–40 ч было получено в среднем от 10 до 40 и более достоверных значений. В случае изменения направления ветра возможно получение УП с различных соседних участков.

Данные кратковременных измерений УП CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O с использованием мобильного комплекса позволяют оценить их изменения за разные временные интервалы с ограничением на неблагоприятные метеорологические и турбулентные условия. Полученные данные могут обеспечить анализ связи УП с изменениями параметров окружающей среды, включая построение соответствующих моделей, и в конечном итоге учет суточной динамики для получения оценок потоков изучаемых газов за более длительные периоды (неделю, месяц, сезон). Рассмотренный и апробированный подход может быть использован для сравнения УП с данными измерений камерным методом, а также он дополнит методологическую базу инвентаризации источников и стоков парниковых газов и информационную базу для анализа функционирования изучаемых экосистем.

Авторы признательны А.А. Маслову (ИЛАН РАН) за подбор и обработку спутниковых снимков территории исследования, Д.В. Ильясову, А.В. Маркиной, М.В. Левчуку (ИЛАН РАН), М.В. Чистотину (ВНИИ агрохимии) за помощь в проведении натурных работ и особенно Ю.А. Курбатовой (ИПЭЭ РАН) за консультации и советы по организации измерений и анализу результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта «Восстановление торфяных болот в России в целях предотвращения пожаров и смягчения изменений климата», финансируемого в рамках «Международной климатической инициативы» Федеральным министерством окружающей среды, охраны природы и безопасности ядерных реакторов Федеративной Республики Германия и управляемого через немецкий банк развития KfW (проект № 11 III 040 RUS K «Восстановление торфяных болот»), а переработанный вариант статьи – при финансовой поддержке РФНФ (проект № 19-74.20185).

1. 2014, 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands / T. Hiraiishi, T. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, T.G. Troxler (eds) // IPCC. Switzerland, 2014.

2. Wilson D., Blain D., Couwenberg J., Evans C.D., Muryarso D., Page S., Renou-Wilson F., Rieley J., Sirin A., Strack M., Tuittila E.-S. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils // Mires Peat. 2016. V. 17. P. 1–28.
3. Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P. The role of peatlands in climate regulation // Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. P. 66–79.
4. Минаева Т.Ю., Сурин А.А. Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Успехи совр. биол. 2011. Т. 131, № 4. С. 393–406.
5. Pavelka M., Acosta M., Kiese R., Altimir N., Pavelka M., Acosta M., Kiese R., Altimir N., Bruemmer C., Crill P., Darenova E., Fuss R., Gielen B., Graf A., Klemmedtsson L., Lohila A., Longdoz B., Lindroth A., Nilsson M., Jimenez S.M., Merbold L., Montagnani L., Peichl M., Pihlatie M., Pumpanen J., Ortiz P.S., Silvonen H., Skiba U., Vestin P., Weslien P., Janous D., Kutsch W. Standardisation of chamber technique for CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes measurements from terrestrial ecosystems // Int. Agrophys. 2018. V. 32, N 4. P. 569–587.
6. Nicolini G., Fratini G., Avilov V., Kurbatova J.A., Vassenev I., Valentini R. Performance of eddy-covariance measurements in fetch-limited applications // Theor. Appl. Climatol. 2015. V. 127, N 3–4. P. 829–840.
7. Foken T. Micrometeorology. Berlin, Heidelberg, Springer: 2017. 362 p.
8. Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авлов В.К., Мамкин В.В. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. М.: ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 2016. 223 с.
9. Desjardins R.L., Lemon E.R. Limitations of an eddy-correlation technique for the determination of the carbon dioxide and sensible heat fluxes // Bound.-Lay. Meteorol. 1974. V. 5, N 4. P. 475–488.
10. Fan S.M., Wofsy S.C., Bakwin P.S., Jacob D.J., Anderson S.M., Keibian P.L., McManus J.B., Kolb C.E. Micrometeorological measurements of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> exchange between the atmosphere and subarctic tundra // J. Geophys. Res. D. 1992. V. 97, N 15. P. 16627–16643.
11. Verma S.B., Ullman F.G., Billesbach D., Clement R.J., Kim J., Verry E.S. Eddy-correlation measurements of methane flux in a northern peatland ecosystem // Bound.-Lay. Meteorol. 1992. V. 58, N 3. P. 289–304.
12. Schmid H.P. Source areas for scalar and scalar fluxes // Bound.-Lay. Meteorol. 1994. N 67. P. 293–318.
13. Grelle A., Lindroth A. Eddy-correlation system for long-term monitoring of fluxes of heat, water vapour and CO<sub>2</sub> // Glob. Change Biol. 1996. V. 2, N 3. P. 297–307.
14. Parmentier F.J.W., van Huyssteden, van der Molen M.K., Schaepman-Strub G., Karsanaev S.A., Maximov T.C., Dolman A.J. Spatial and temporal dynamics in eddy covariance observations of methane fluxes at a tundra site in northeastern Siberia // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. DOI: 10.1029/2010JG001637.
15. Scott R.L., Biederman J.A. Partitioning evapotranspiration using long-term carbon dioxide and water vapor fluxes // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44, N 13. P. 6833–6840.
16. Замолодчиков Д.Г., Гитарский М.Л., Шилкин А.В., Марунчик А.С., Карелин Д.В., Блинов В.Г., Иващенко А.И. Мониторинг циклов диоксида углерода и водяного пара на полигоне «лог Таежный» (Валдайский национальный парк) // Фундам. и приклад. климатол. 2017. Т. 1. С. 54–68.
17. Fortuniak K., Pawlak W., Bednorz L., Grygoruk M., Siedlecki M., Zielinski M. 2017. Methane and carbon dioxide fluxes of a temperate mire in Central Europe // Agric. For. Meteorol. 2017. V. 232. P. 306–318.



18. Wang M., Wu J., Luan J., Lafleur P., Chen H., Zhu X. Near-zero methane emission from an abandoned boreal peatland pasture based on eddy covariance measurements // PLoS ONE. 2017. V. 12, N 12 URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189692> (last access: 25.05.2019)
19. Ge H.X., Zhang H.S., Zhang H., Cai X.H., Song Y., Kang L. The characteristics of methane flux from an irrigated rice farm in East China measured using the eddy covariance method // Agric. For. Meteorol. 2018. V. 249. P. 228–238.
20. Asaf D., Rotenberg E., Tatarinov F., Dicken U., Montzka S.A., Yakir D. Ecosystem photosynthesis inferred from measurements of carbonyl sulphide flux // Nat. Geosci. 2013. V. 6, N 3. P. 186.
21. Rohatyn S., Rotenberg E., Ramati E., Tatarinov F., Tas E., Yakir D. Differential impacts of land use and precipitation on “Ecosystem Water Yield” // Water Resour. Res. 2018. V. 54, N 8. P. 5457–5470.
22. Чистотин М.В., Сирин А.А., Дулов Л.Е. Сезонная динамика эмиссии углекислого газа и метана при осушении болота в Московской области для добычи торфа и сельскохозяйственного использования // Агрехимия. 2006. № 6. С. 54–62.
23. Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А. Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осушенного торфяника в Московской области // Агрехимия. 2015, № 11. С. 51–62.
24. Обводнение пожароопасных торфяников // Информационный выпуск «О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области в 2016 году». Министерство экологии и природопользования Московской области, 2017. С. 90–96.
25. Обухов А.М. Структура температурного поля в турбулентном потоке // Изв. АН СССР. Сер. Геофизика и география. 1949. Т. 13, № 1. С. 58–59.
26. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая механика. М.: Наука, 1965. 639 с.
27. Montgomery R.B. Vertical eddy flux of heat in the atmosphere // J. Meteorol. 1948. V. 5, № 6. P. 265–274.
28. Swinbank W.C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere // J. Meteorol. 1951. V. 8, N 3. P. 135–145.
29. Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis / M. Aubinet, T. Vesala, D. Papale (eds.). Springer Science & Business Media, 2012. 438 p.
30. Horst T.W., Weil J.C. How far is far enough?: The fetch requirements for micrometeorological measurement of surface fluxes // J. Atmos. Ocean. Technol. 1994. V. 11, № 4. P. 1018–1025.
31. Gash J.H. Observations of turbulence downwind of a forest-heath interface // Bound.-Lay. Meteorol. 1986. V. 36. P. 227–237.
32. LI-COR, Inc. 2016. EddyPro® version 6.2 Help and User’s Guide. LI-COR, Inc. Lincoln, NE [Electronic resource]. URL: <https://www.licor.com/env/support/EddyPro/home.html> (last access: 25.12.2018).
33. Plate E.J. Aerodynamic characteristics of atmospheric Boundary Layers. Oak Ridge, Tenn.: USAEC, 1971. 190 p.
34. Глаголев М.В., Суворов Г.Г. Эмиссия метана болотными почвами средней тайги Западной Сибири (на примере Ханты-Мансийского автономного округа) // Доклады по экологическому почвоведению. 2007. Т. 2, № 6. С. 90–162.
35. Vickers D., Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data // J. Atmos. Ocean. Technol. 1997. V. 14, N 3. P. 512–526.
36. Kljun N., Calanca P., Rotach M.W., Schmid H.P. A simple parameterisation for flux footprint predictions // Bound.-Lay. Meteorol. 2004. V. 112, № 3. P. 503–523.
37. Kormann R., Meixner F.X. An analytical footprint model for non-neutral stratification // Bound.-Lay. Meteorol. 2001. V. 99, N 2. P. 207–224.
38. Mauder M., Foken T. Documentation and instruction manual of the eddy covariance software package TK2. Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie, Arbeitsergebnisse 26. 44 p.
39. Handbook of Micrometeorology. A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis / X. Lee, W. Massman, B. Law (eds.). New York: Kluwer Academic Publishers, 2004. 164 p.

**L.A. Krivenok, G.G. Suvorov, V.K. Avilov, A.A. Sirin. Eddy covariance measurement of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and H<sub>2</sub>O fluxes: Use of a mobile tower and taking into account the changing fetch.**

A possibility of short-term (from 1–2 days) eddy covariance measurements with the use of mobile complex of equipment is shown as well as with fetch and wind direction as filtering parameters for flux separation from concrete site (the case of secondary waterlogged peatland in Moscow region). Obtained CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and H<sub>2</sub>O fluxes allow to deduce diurnal dynamics in different meteorological conditions and from different contiguous areas with one changes in the wind direction. Application of the multiple-stage filtering leads to separate representative amount of 30-minutes average values, which afterwards could be used for analyzing of the dependences between fluxes and ecological parameters, modeling, making estimates for longer periods, comparing with data obtained by chamber method and are complement for the inventory of greenhouse gas sources and sinks.