

## Агроэкология

УДК 631.433:631.445.12(470.57)

# ЛЕТНИЕ ПОТОКИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И МЕТАНА НА ОСУШЕННОМ ТОРФЯНИКЕ В УСЛОВИЯХ ЛЕСОСТЕПИ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН\*

© 2017 г. Д.В. Ильясов<sup>1</sup>, А.А. Сирин<sup>1</sup>, Г.Г. Суворов<sup>1</sup>, В.Б. Мартыненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт лесоведения РАН

143030 Московская обл., Одинцовский р-н, с. Успенское, ул. Советская, 21, Россия

<sup>2</sup> Уфимский Институт биологии РАН

450054 Уфа, просп. Октября, 69, Республика Башкортостан, Россия

E-mail: danila\_ilyasov@mail.ru

Поступила в редакцию 13.07.2016 г.

Исследованы потоки CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, измеренные камерным методом в летний бездождный период 2015 г. на осушенном торфянике Берказан-Камыш в условиях лесостепи Башкортостана. Полученные данные характеризуют 3 типа растительных сообществ с характерными уровнями грунтовых вод (УГВ): солончаковатые луговые (–100...–60 см), влажно-луговые слабо солончаковатые (–60...–30 см) и увлажненные тростниково-осоковые, включая участки избыточно увлажненных тростниково-рогозовых сообществ (–30–0 см). Средние величины потоков (в мг С/м<sup>2</sup>·ч ± стандартная ошибка) для этих сообществ составили: чистый обмен CO<sub>2</sub> между экосистемой и атмосферой (NEE) – 74.2±0.2, –134.2±0.6 и –200.4±1.3, дыхание экосистемы (R<sub>eco</sub>) – 260.1±0.3, 370.1±0.2 и 398.1±0.2, поток CH<sub>4</sub> в прозрачных камерах (ПК) – 0.018±0.005, 0.002±0.000 и 0.264±0.001, в непрозрачных камерах (НК) – 0.018±0.009, 0.001±0.000 и 0.258±0.001 соответственно. Коэффициент детерминации для связи NEE и потока CH<sub>4</sub> с УГВ составил 0.92 и 0.80.

*Ключевые слова:* летние потоки, диоксид углерода, метан, осушенный торфяник, лесостепь, Башкортостан.

## ВВЕДЕНИЕ

Торфяные болота России образуют крупнейший в мире национальный запас углерода торфа, и с ними связаны потоки таких ключевых парниковых газов, как диоксид углерода и метан [1]. В совокупности с мелкоотторфованными землями они занимают >20% территории страны [2], отличаются широким природным разнообразием и приуроченностью к различным географическим условиям [3–5]. В ряде регионов, особенно в Европейской части России (ЕЧР), болота были в значительной части осушены для добычи торфа, сельского и лесного хозяйства и существенно изменены хозяйственной деятельностью человека [5, 6]. Осушение и другие антропогенные воздействия способствуют потере углерода болот [1, 7, 8], снижают их устойчивость к изменению климата [9], теплые периоды которого для них неблагоприятны [10], увеличивают вероятность торфяных пожаров [11, 12] и других экстремальных воздействий. При это ускоряется

деструкция торфяных почв и, как следствие, поступление в атмосферу диоксида углерода, который усиливает парниковый эффект.

Особенно чувствительны к изменению климата в сочетании с антропогенной нагрузкой торфяные болота в критических условиях распространения. Только по данным учета торфяных месторождений в лесостепной зоне ЕЧР, имеется более 3000 болот. Их совокупная площадь, несмотря на сравнительно небольшие размеры, превышает 100 тыс. га [13]. Они выполняют важные природные функции, включая сохранение биологического разнообразия и запасов углерода, регулирование гидрологических процессов и др. Однако после детальных обзоров болот этих регионов [14, 15] они практически не рассматривались в региональном аспекте. Расположенные на южной границе распространения в условиях недостаточного атмосферного увлажнения болота лесостепной и степной зон отмечены на международном [1] и национальном [16, 17] уровнях как наиболее уязвимые в условиях изменения климата.

Работа выполнена при поддержке Проекта «Охрана и устойчивое использование торфяников в Российской Федерации с целью снижения эмиссии CO<sub>2</sub> и содействия в адаптации экосистем к изменениям климата» программы ЕС ClimaEast, реализуемого в рамках Проекта ПРООН/ГЭФ № 00072294 «Совершенствование системы и механизмов управления ООПТ в степном биоме России».

В то же время торфяные болота лесостепи привлекали внимание как более увлажненные и продуктивные местообитания, источник органического удобрения для сельского хозяйства. Особый интерес вызывали болота речных долин, имеющие большие размеры и лучшее водно-минеральное питание за счет поемных вод. В результате значительная часть торфяных болот лесостепной зоны ЕЧР (в подавляющем большинстве они относятся к категории земель сельскохозяйственного назначения [5]) за последние 50–60 лет была осушена для сельского хозяйства и добычи торфа. Сейчас многие из них заброшены, часто зарастают сорной растительностью, местами используются как пастбища, отличаясь большей продуктивностью, особенно при повышении аридности климата, по сравнению с окружающими минеральными землями.

Осушенные торфяные почвы даже при прекращении их использования продолжают терять углерод и характеризуются значительной эмиссией диоксида углерода в атмосферу [8]. Может происходить и эмиссия метана в периоды увлажнения [18], а из дренажной сети — постоянно [19]. В условиях климата лесостепи эти потери могут быть высокими. При этом на фоне и так ограниченного числа измерений потоков диоксида углерода и метана на осушенных торфяных болотах в России [8, 20, 21] исследования в южных регионах страны представлены еще в меньшей степени. В целом в мире данные по осушенным торфяникам семиаридных территорий ограничены [1], что усложняет оценку как эмиссии парниковых газов с этих объектов, так и ее снижения после обводнения для восстановления водно-болотных угодий [22].

Цель работы — оценить потоки диоксида углерода и метана с осушенного торфяника в условиях лесостепи Республики Башкортостан в летний, наиболее биогеохимически активный период года. Приоритетная задача — выявление влияния уровней грунтовых вод как основного индикатора интенсивности осушения. Это позволило не только оценить влияние последнего на потоки углеродсодержащих парниковых газов и потенциальную потерю углерода торфа, но и сделать прогноз о возможных их изменениях при проведении работ по обводнению и восстановлению неиспользуемого деградирующего пожароопасного торфяника в условиях лесостепи.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на осушенном торфяном болоте Берказан-Камыш (центр 54°15'30" с.ш., 54°40'04" в.д.) в Природном парке «Аслы-Куль» [23]. Сумма активных температур — 2100–2500 °С,

сумма осадков за период с температурой воздуха >10°C — 200–250 мм, за год — 450–500 мм [24]. Протяженность исследованного торфяника — 5.8 км с запада на восток и 1.9 км с севера на юг, площадь — >900 га. Торфяник дренируется рекой Тюлянь, часть русла которой в пределах массива является магистральным каналом (рис. 1). Согласно данным торфоразведки [25], площадь торфяного месторождения составляла 267 га по нулевой глубине и 185 га по промышленной глубине залежи торфа, максимальная глубина залежи — 3.9 м, средняя — 2.2 м. Запасы низинного торфа оценивали в 1298 тыс. т. После интенсивного осушения в начале 1970-х гг. здесь вели добычу торфа, а после ее прекращения торфяник использовали для выпаса и сенокосения. Периодически происходили торфяные пожары, для предотвращения которых в 1990-х гг. была построена дамба для обводнения неиспользуемой части торфяника, которая, по данным местного населения, показала свою эффективность. Однако в дальнейшем плотина на магистральном канале была размыва паводком, задержание воды практически прекратилось. Планируется ее реконструкция для повторного обводнения торфяника с целью восстановления болотных экосистем [13].

Большую часть торфяника Берказан-Камыш занимают солончаковатые луговые сообщества (*Festuca regeliana*, *Hordeum nevskianum*, *Poa angustifolia*, *Hordeum jubatum*, *Plantago salsa*), ниже по рельефу располагаются влажно-луговые слабо солончаковатые сообщества (*Alopecurus arundinaceus*, *Calamagrostis epigejos*, *Festuca regeliana*, *Poa pratensis*, *Cirsium esculentum*, *Agrostis stolonifera*), пониженные части массива заняты увлажненными тростниково-осоковыми сообществами (*Phragmites australis*, *Bolboschoenus maritimus*, *Carex riparia*, *Carex diluta*, *Agrostis stolonifera*), а непосредственно вдоль осушительных каналов и в локальных понижениях рельефа расположены участки избыточно увлажненных тростниково-рогозовых сообществ (*Phragmites australis*, *Agrostis stolonifera*, *Typha angustifolia*, *Scirpus tabernaemontani*).

Измерения дыхания экосистемы ( $R_{eco}$ ) проводили в 2 этапа: 1-й — с 23 по 27 июня, 2-й — с 26 по 28 июля 2015 г. На 1-м этапе было выбрано 7 сайтов измерений (1.1–1.7) в восточной части осушенного торфяника (уч. 1), охватывающих спектр присутствующих растительных ассоциаций и условий увлажнения. На 2-м этапе измерения в восточной части были повторены сайты (1.1–1.7) и дополнены одним новым сайтом (1.8). Были также заложены 6 новых сайтов (2.1–2.6) в западной части торфяника (уч. 2) (рис. 1, табл. 1). В связи со спецификой метода, измерения на 1-м этапе проводили на каждом сайте в двукратной повторности. Основные измерения

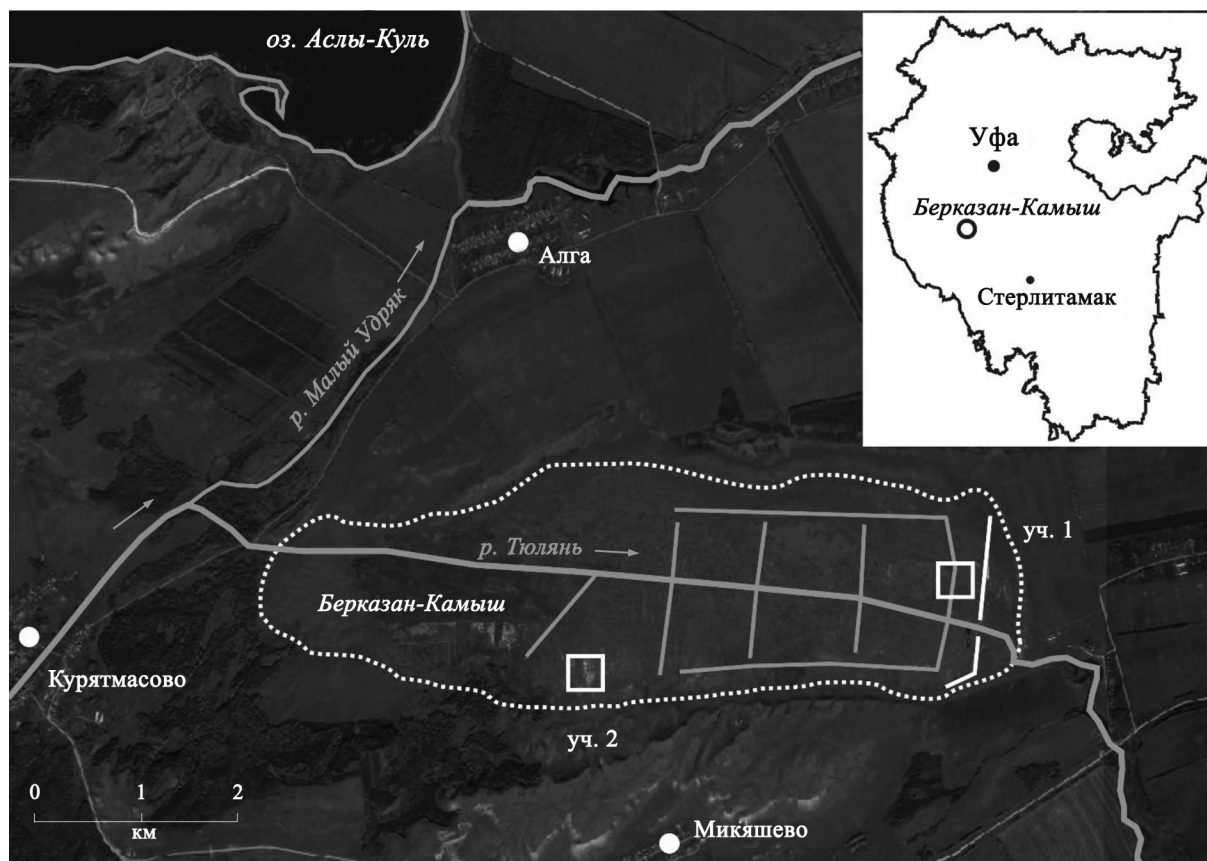


Рис. 1. Расположение торфяника Берказан-Камыш. Пунктирная линия – граница торфяника, сплошная линия – дамба, квадраты – расположение участков измерений.

проводили в светлое время суток с 8 до 22 ч. В ходе 2-го этапа (28 июля) на сайте 1.3 были проведены измерения динамики  $NEE$ ,  $R_{eco}$  и потока  $CH_4$  в светлое время суток (8:30, 11:00, 13:30, 15:20, 17:10, 19:00).

На обоих этапах использовали камерный метод измерения потоков. Камеры были изготовлены из прозрачного оргстекла толщиной 4 мм и для отбора проб снабжались пробоотборниками с силиконовыми шлангами. Их устанавливали на квадратные металлические основания площадью  $0.16 \text{ м}^2$  с глубиной врезки в почву 10 см. В желоб основания, функционирующий как гидрозатвор, наливали отстоянную колодезную воду. Использовали камеры 2-х видов: трапециевидные (высота – 0.35 м, объем –  $0.056 \text{ м}^3$ ) и в форме параллелепипеда (высота – 1 и 2 м, объем –  $0.16$  и  $0.32 \text{ м}^3$ ). Камера высотой 2 м была сборной: состояла из камеры высотой 1 м и устанавливаемого снизу удлинителя той же высоты, герметичность сочленения которых обеспечивали резиновые уплотнители по периметру контакта. Воздух в камерах перемешивался вентиляторами с расходом воздуха  $0.88 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Размер камер зависел от высоты растений доминирующих видов в том или ином сообществе растительности. Для сообществ

с *Carex riparia*, *Poa angustifolia* и *Hordeum jubatum* использовали камеры высотой 0.35 м; с *Phragmites australis*, *Potentilla anserina* и *Calamagrostis epigejos* – 1 м; с *Typha angustifolia* – 2 м.

На 1-м этапе работ использовали камерный метод в статическом исполнении [26]. Время экспозиции – 20–40 мин. При помощи шприца объемом 150 мл из камеры отбирали 5 проб воздуха через равные интервалы времени. Через иглу пробы объемом 100 мл под давлением перекачивали в предварительно вакуумированные стеклянные флаконы объемом 60 мл путем прокалывания резиновой пробки. Концентрации  $CO_2$  и  $CH_4$  в пробах определяли в ИЛАН РАН на газовом хроматографе «Кристалл 5000.2» (ЗАО СКБ «Хроматэк», Россия) с пламенно-ионизационным детектором. Газ-носитель – азот; длина колонки – 3 м, внутренний диаметр – 2 мм; сорбент – Porapak Q 80/100 mesh; температура колонки –  $40^\circ\text{C}$ , метанатора –  $325^\circ\text{C}$ , детектора –  $200^\circ\text{C}$ ; анализируемый объем пробы –  $1 \text{ см}^3$ .

На 2-м этапе измерения проводили динамическим камерным методом с использованием портативного газоанализатора LGR UGGA (Los Gatos Research, США); точность измерения концентрации  $CH_4$  –  $2 \cdot 10^{-7}$ ,  $CO_2$  –  $3 \cdot 10^{-5}$ ,  $H_2O$  –  $2 \cdot 10^{-2} \text{ мг/м}^3$ .



Таблица 1. Характеристика сайтов измерений

Сайт, №*	Координаты	Доминантные виды растительности	УГВ, см	Надземная фитомасса, г/м <sup>2</sup>	
1.1	N54°15'16.3" E54°42'03.9"	<i>Phragmites australis</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Typha angustifolia</i>	-25,-20**	682	
1.2	N54°15'16.7" E54°42'04.0"		-8,-30**	452	
1.3	N54°15'15.4" E54°42'03.0"	<i>Carex riparia</i> <i>Potentilla anserina</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Bolboschoenus maritimus</i> , <i>Eleocharis palustris</i>	-60...-30	324	
1.4	N54°15'15.8" E54°42'02.7"			<i>Carex diluta</i> <i>Scirpus tabernaemontani</i> , <i>Trichophorum pumilum</i>	323
1.5	N54°15'15.0" E54°42'01.8"	<i>Poa angustifolia</i> , <i>Artemisia nitrosa</i> , <i>Elymus fibrosus</i>	-100...-60	62	
1.6	N54°15'15.5" E54°42'00.3"			<i>Calamagrostis epigejos</i> , <i>Poa palustris</i>	170
1.7	N54°15'14.1" E54°42' 02.1"			<i>Hordeum jubatum</i> , <i>Poa angustifolia</i>	227
1.8	N54°15'15.1" E54°41'58.5"	<i>Typha angustifolia</i>	-30-0	793 184	
2.1	N54°14'47.1" E54° 38'26.2"	<i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Atriplex patens</i>	-60...-30	203	
2.2	N54°14'46.9" E54°38'25.9"			378	
2.3	N54°14'46.9" E54°38'25.5"			520	
2.4	N54°14'46.8" E54°38'25.7"			-30-0	299
2.5	N54°14'47.4" E54°38'26.1"	<i>Hordeum nevkianum</i> , <i>Saussurea amara</i>	-100...-60	381	
2.6	N54°14'45.2" E54°38'22.7"	<i>Betula pubescens</i> (степень покрытия 5–25%), <i>Calamagrostis epigejos</i> , <i>Agrostis stolonifera</i>	-60...-30	682	

\*Первая цифра в обозначении сайтов соответствует номеру участка.

\*\*Первое число – величина УГВ в июле, второе – в июне.

Газоанализатор снабжен встроенным воздушным насосом, обеспечивающим прокачку анализируемого воздуха через аналитическую ячейку прибора, и Wi-Fi-роутером для визуализации получаемой информации и управления прибором посредством планшетного компьютера. Частота измерения концентраций составляла 1 раз/сек, продолжительность экспозиции – от 3 до 10 мин в зависимости от величины потока.

Для оценки скорости  $dc/dt$  (мг/(кг·ч)) изменения концентрации  $CO_2$  и  $CH_4$  в камере использовали метод наименьших квадратов, исходя из допущения о стационарности этого показателя в течение экспозиции. Поток ( $E$ , мг С/(м<sup>2</sup>·ч)) рассчитывали по формуле  $E = (dc/dt \times V \times 12 \times 22.4^{-1})/s$ , где  $V$  – объем воздуха в камере (м<sup>3</sup>),  $s$  – площадь горизонтального сечения камеры (м<sup>2</sup>). Для определения средних величин потока с учетом их погрешностей

применяли метод бутстрапа [27], количество повторений – 5000. В каждом повторении были получены реализации случайных величин, заданных оценками и стандартными отклонениями полученных данных, с допущением о нормальном распределении этих случайных величин и вычислено среднее арифметическое реализаций. Далее были рассчитаны среднее арифметическое и стандартное отклонение величин среднего, полученных в отдельных повторениях. Для выполнения расчетов использовали программный пакет MATLAB R2010b.

Измерения проводили прозрачными камерами и светонепроницаемыми, закрытыми чехлами из фольгированного пенополиэтилена, который дополнительно снижал их нагрев. Прозрачные камеры использовали для измерения чистого обмена диоксида углерода между экосистемой и атмосферой (нетто-экосистемного

обмена — Net Ecosystem Exchange) (*NEE*), непрозрачные — для измерения дыхания экосистемы ( $R_{eco}$ ), или валового дыхания (Ecosystem Respiration) [28]. Поток метана оценивали по данным обоих типов камер.

Уровень грунтовых вод (*УГВ*) определяли прямым и косвенным путем. В 1-м случае (сайты 1.1, 1.2, 1.8, 2.1–2.6) производили вскрытие почвенного профиля до *УГВ* на удалении не менее 1 м от точки измерений потоков после их завершения. Измерения *УГВ* проводили спустя 15–30 мин (после стабилизации уровня) рулеткой. Второй способ (сайты 1.3–1.7) представлял собой расчет *УГВ* на основе данных, полученных 1-м способом на ближайших точках измерений, с поправкой на рельеф местности и учетом растительности как индикатора. Полученные величины *УГВ* представлены в виде диапазонов (табл. 1).

Температуру почвы измеряли портативным электронным термометром «Checktemp HI 98501» (Hanna Instruments, США) на глубине 0, 2 и 10 см. Кислотность и электропроводность грунтовых вод определяли рН-метром HI 98129 Combo (Hanna Instruments, США). Для круглогодичного мониторинга температуры почвы на глубине 2, 10 и 20 см были установлены автономные датчики Thermochron iButton DS1921 (Dallas Semiconductor, США) с заданной периодичностью измерения 3 ч и точностью  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Для круглогодичного мониторинга *УГВ* в обводненных понижениях рельефа были установлены автоматические датчики Mini и BaroDiver (Schlumberger, Нидерланды).

Геоботанические описания были проведены 26.08.2015 г. на каждом сайте измерений на площадках  $10 \times 10$  м с учетом видового состава растительности, проективного покрытия (деревьев, кустарников, трав, мхов), средней, минимальной и максимальной высоты трав. При определении видов растений использовали «Определитель высших растений Башкирской АССР» [29, 30]. Видовые названия всех растений даны в соответствии со сводкой [31] и другими современными таксономическими работами. Надземную фитомассу определяли в ходе 2-го этапа измерений методом «укожных квадратов» площадью  $0.16 \text{ м}^2$  (по одному на каждом сайте измерений). Образцы высушивали в течение 1 сут до абсолютно сухого состояния в сушильном шкафу при температуре  $96^\circ\text{C}$ , затем взвешивали.

На 2-м этапе наблюдений измеряли интенсивность суммарной солнечной радиации (*ССР*) термоэлектрическим пиранометром Янишевского, подключенным к записывающему устройству EMS32A (Environmental Measuring Systems, Czech Republic), с непрерывной регистрацией данных во время светового дня с частотой 20 раз/мин. В период измерений была преимущественно безоблачная погода,

поэтому использовали единые коэффициенты перехода сначала от вольт к  $\text{ккал}/\text{см}^2\cdot\text{мин}$  (калибровочный коэффициент — 0.12), а затем к  $\text{Вт}/\text{м}^2$  (коэффициент 698) [32].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Метеорологические условия периода измерений.* В дни проведения измерений (23.06–27.06 и 26.07–28.07) осадков не было. Всего летом 2015 г. на исследованной территории выпало 87 мм осадков (метеостанция пос. Аксаково), в 2014 г. — 127 мм, в 2013 г. — 187 мм (рис. 2). По данным метеостанции г. Уфа, в летние периоды 2015–2011 гг. выпало 114, 168, 132, 155 и 168 мм осадков соответственно. За исключением июня распределение осадков в летние месяцы 2015 г. отличалось незначительно. По данным метеостанции пос. Аксаково, в июне, июле и августе выпало: в 2015 г. — 9, 42 и 36 мм; в 2014 — 68, 27, 33; в 2013 — 42, 60, 85 мм осадков. В г. Уфе количество осадков составило соответственно, мм: 21, 48, 45 (2015 г.); 65, 28, 75 (2014 г.); 19, 36, 77 (2013 г.); 70, 17, 67 (2012 г.); 85, 44, 39 (2011 г.). Средняя температура воздуха летом 2015 г. была равна  $17.4^\circ\text{C}$  (пос. Аксаково), в предшествующий период (2014–2011 гг.) — 17.2, 18.7, 20.1,  $17.9^\circ\text{C}$  соответственно. Средние температуры за июнь, июль и август:  $20.9$ ,  $16.8$ ,  $14.6^\circ\text{C}$  (2015 г.);  $16.9$ ,  $16.1$ ,  $18.7^\circ\text{C}$  (2014 г.);  $19.0$ ,  $19.2$ ,  $17.9^\circ\text{C}$  (2013 г.);  $19.6$ ,  $20.9$ ,  $19.7^\circ\text{C}$  (2012 г.);  $15.6$ ,  $21.8$ ,  $16.1^\circ\text{C}$  (2011 г.) [33].

Динамика *ССР* в течение периода измерений была следующей: утром (7:00–9:00) —  $800$ – $900 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , далее плавный рост до  $1000$ – $1200 \text{ Вт}/\text{м}^2$  (12:00–13:00) и плавное снижение до нулевых величин к 19:00. 26.07 в период с 10:30 до 11:00 и с 12:30 до 14:30 периодически интенсивность *ССР* уменьшалась из-за появления отдельных облаков, однако общий ход не отличался от других суток. Концентрация диоксида углерода в камерах на начало измерений в среднем составляла 0.0636%, к моменту окончания измерений в случае поглощения — 0.0534% и в случае выделения — 0.0749%.

*Чистый обмен  $\text{CO}_2$  между экосистемой и атмосферой и связь с *УГВ*.* Чистый обмен  $\text{CO}_2$  (*NEE*) по данным измерений в июле сильно варьировал между растительными ассоциациями ( $\text{мг С}/\text{м}^2\cdot\text{ч} \pm$  стандартная ошибка (*стд*)): от  $-540 \pm 2$  в рогозовом сообществе (сайт 1.8) до  $93 \pm 0$  в солончаково-луговом (1.7) (табл. 2), в июне — от  $-131 \pm 20$  (1.1) до  $378 \pm 8$  (1.3 в вечернее время). Наибольшие средние величины *NEE* зафиксированы на более дренированных сайтах с более низкими *УГВ*. В июле средняя величина *NEE* ( $\text{мг С}/\text{м}^2\cdot\text{ч} \pm$

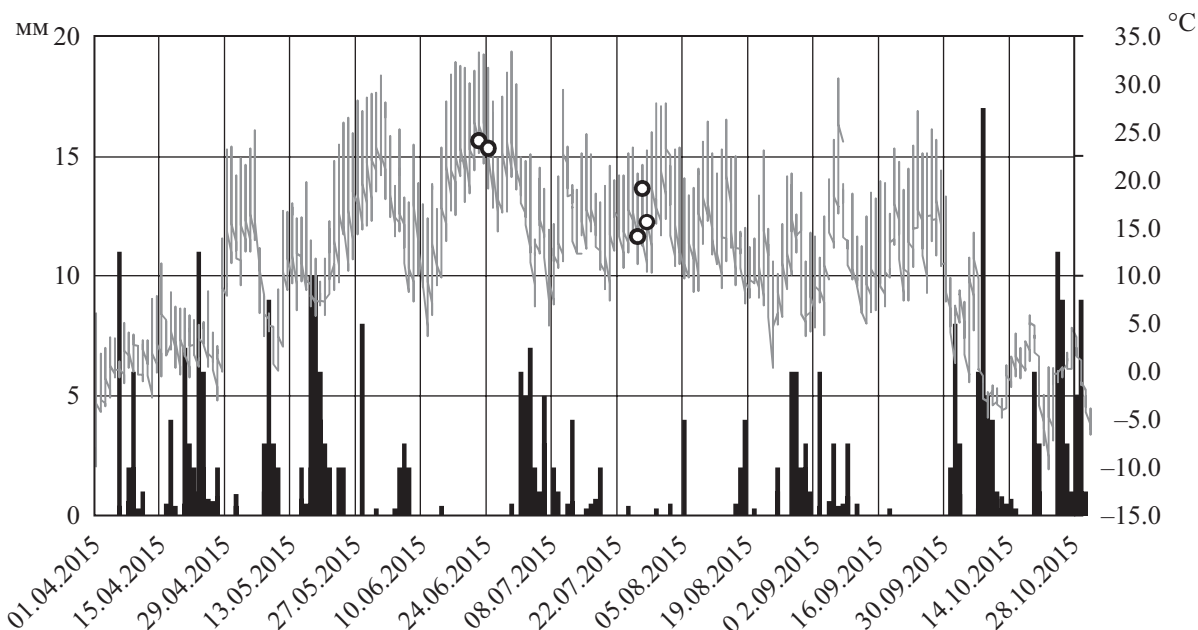
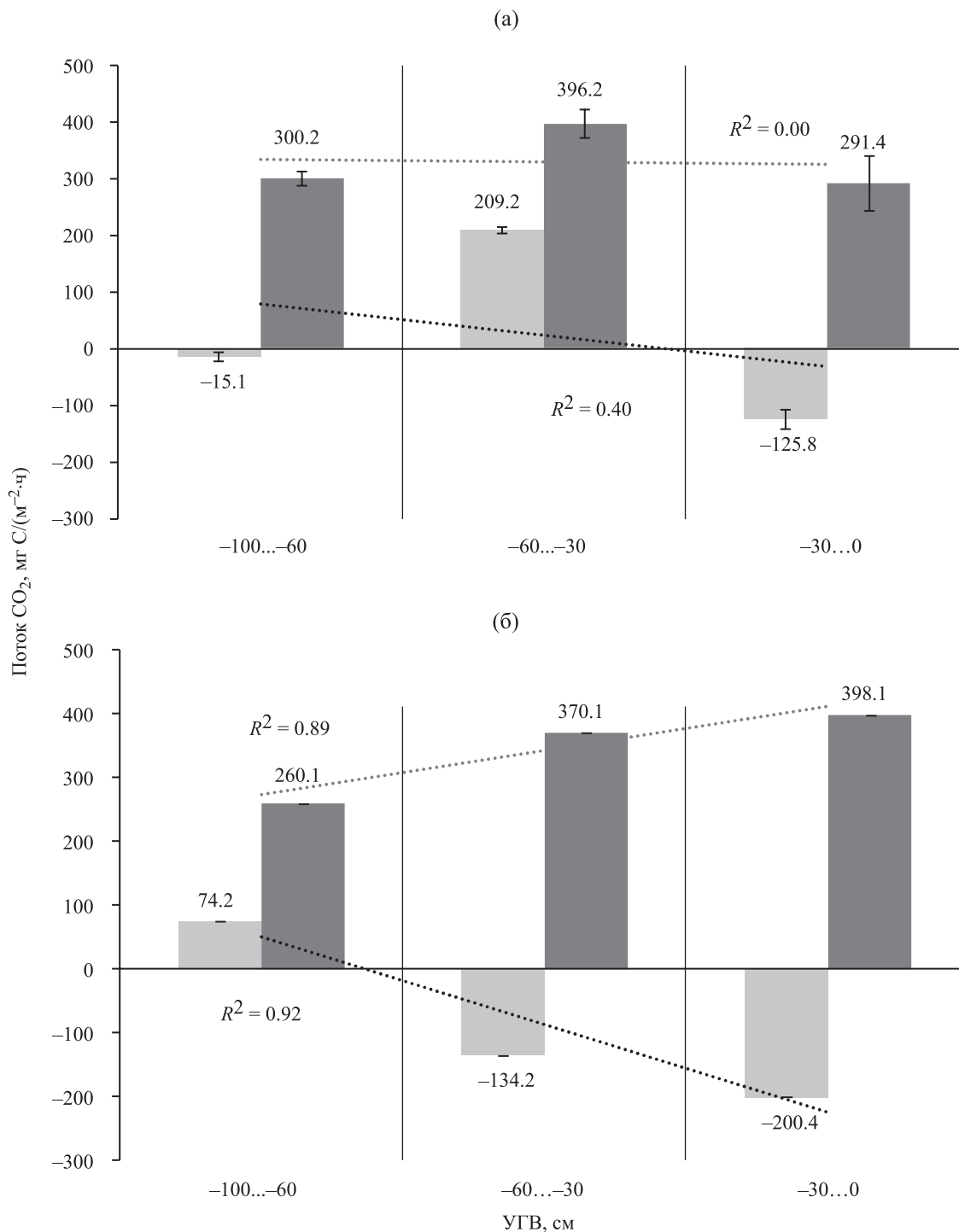


Рис. 2. Осадки и температура воздуха в период с апреля по октябрь 2015 г. (метеостанция пос. Аксаково, Республика Башкортостан). Точки соответствуют датам измерений на торфянике Берказан-Камыш.

Таблица 2. Удельные потоки диоксида углерода и метана, мг С/(м<sup>2</sup>·ч)

Сайт, №	CO <sub>2</sub>		CH <sub>4</sub>	
	варианты камер			
	прозрачные	непрозрачные	прозрачные	непрозрачные
Измерения 23.06–27.06 2015 г.				
1.1	-131 ± 20	269 ± 89	0.374 ± 0.094	0.27 ± 0.17
1.2	-120 ± 28	314 ± 36	0.207 ± 0.062	0.197 ± 0.081
1.3	378 ± 8	527 ± 41	-0.056 ± 0.035	-0.125 ± 0.082
1.4	41 ± 11	266 ± 31	0.036 ± 0.050	-0.017 ± 0.019
1.5	22 ± 11	313 ± 33	-0.042 ± 0.016	-0.112 ± 0.031
1.6	-47 ± 20	430 ± 11	-0.017 ± 0.053	0.025 ± 0.021
1.7	-20 ± 8	157 ± 8	-0.006 ± 0.012	-0.032 ± 0.033
Измерения 26.07–28.07 2015 г.				
1.1	-192 ± 5	467 ± 1	0.182 ± 0.002	0.108 ± 0.002
1.2	39 ± 1	445 ± 1	0.055 ± 0.002	-0.010 ± 0.001
1.3	-208 ± 2	417 ± 0	-0.002 ± 0.000	-0.011 ± 0.001
1.4	-204 ± 1	336 ± 0	0.003 ± 0.000	-0.004 ± 0.000
1.5	63 ± 0	214 ± 0	-0.049 ± 0.010	-0.057 ± 0.035
1.6	59 ± 0	264 ± 0	-0.009 ± 0.000	0.000 ± 0.001
1.7	93 ± 0	180 ± 0	-0.011 ± 0.015	-0.004 ± 0.001
1.8	-540 ± 2	458 ± 1	0.818 ± 0.002	0.934 ± 0.004
2.1	-286 ± 3	520 ± 1	-0.008 ± 0.001	0.010 ± 0.000
2.2	42 ± 1	531 ± 1	0.021 ± 0.000	0.010 ± 0.000
2.3	-208 ± 1	183 ± 1	-0.005 ± 0.000	-0.002 ± 0.000
2.4	-109 ± 1	223 ± 0	0.003 ± 0.000	0.001 ± 0.000
2.5	82 ± 1	383 ± 1	-0.002 ± 0.000	-0.009 ± 0.000
2.6	59 ± 0	235 ± 1	0.004 ± 0.000	0.002 ± 0.001

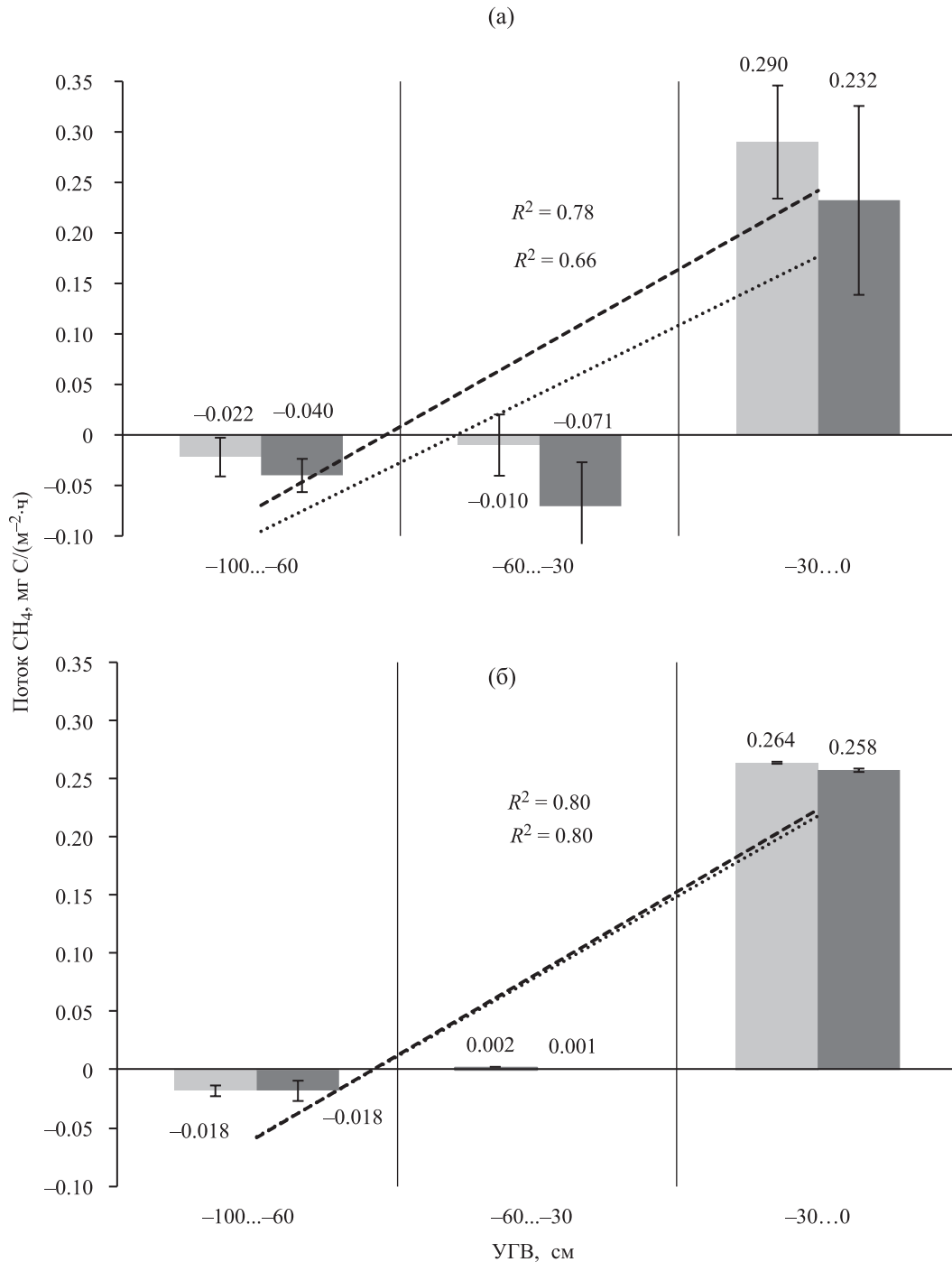
Примечание. ± – стандартная ошибка (n = 2).



**Рис. 3.** Средние потоки диоксида углерода для трех категорий УГВ. Темно-серые столбцы – потоки в непрозрачных камерах ( $R_{eco}$ ), светло-серые – в прозрачных ( $NEE$ ). Даты проведения измерений в 2015 г.: (а) – 23–27.06, (б) – 26–28.07.

$\pm$  std) составила на участках: солончаковато-луговых сообществ с УГВ в диапазоне  $-100...-60$  см (сайты 1.5–1.7, 2.5) –  $74.2 \pm 0.2$ , с влажно-луговой слабо солончаковатой растительностью и УГВ от  $-60$  до  $-30$  см (сайты 1.3, 1.4, 2.1–2.3, 2.6) –  $-134 \pm 1$ , увлажненных тростниково-осоковых сообществ, включая участки избыточно увлажненных

тростниково-рогозовых сообществ (1.1, 1.2, 1.8, 2.4) с УГВ от  $-30$  до  $0$  см –  $-201 \pm 1$  (рис. 3). Коэффициент детерминации  $R^2$  между  $NEE$  и УГВ варьировал от 0.40 по результатам измерений в июне до 0.92 в июле. При УГВ  $-100...-60$  см отмечены положительные величины потока диоксида углерода. При расчете коэффициентов детерминации



**Рис. 4.** Средние потоки метана для 3-х категорий УГВ. Темно-серые столбцы – потоки в непрозрачных камерах, светло-серые – в прозрачных. Даты проведения измерений в 2015 г.: (а) – 23–27.06, (б) – 26–28.07.

величин потоков с УГВ были использованы средние для 3-х групп сайтов. При повышении УГВ до  $-60\text{...}-30$  см происходила смена потери углерода на его ассимиляцию. При дальнейшем повышении УГВ до уровней выше поверхности почвы поток  $\text{CO}_2$  становился заметно отрицательным. В целом полученные данные не противоречили существующим обзорным оценкам чистого обмена  $\text{CO}_2$  между торфяниками и атмосферой

в условиях умеренного климата [1, 22, 34], но отличались более высокими величинами.

*Дыхание экосистемы и его связь с УГВ.* Поток  $\text{CO}_2$  ( $\text{мг С}/(\text{м}^2\cdot\text{ч}) \pm \text{стд}$ ) в непрозрачных камерах ( $R_{\text{eco}}$ ) по результатам измерений в июле варьировал от  $180 \pm 0.1$  (сайт 1.7) до  $531 \pm 1$  (сайт 2.2) соответственно. Наибольшая величина  $R_{\text{eco}}$  ( $531 \pm 1$ ) отмечена на участке бывшей торфодобычи (2.2) с доминированием *Agrostis stolonifera*. Средняя величина  $R_{\text{eco}}$  среди



всех сайтов составила  $347 \pm 0.1$  мг С/(м<sup>2</sup>·ч). По результатам измерений в июне средняя величина  $R_{\text{eco}}$  (мг С/(м<sup>2</sup>·ч)  $\pm$  std) среди всех сайтов составила  $326 \pm 17$  с варьированием от  $157 \pm 8$  (сайт 1.7, доминант *Hordeum jubatum*) до  $527 \pm 41$  (сайт 1.3, доминант *Carex riparia*). Для сравнения, поток CO<sub>2</sub>, полученный статическими непрозрачными камерами в лесостепной зоне Западной Сибири, в сообществах (с доминированием *Carex acuta* и *Carex lasiocarpa*) [35] варьировал в пределах от  $259 \pm 56$  до  $798 \pm 70$  мг С/(м<sup>2</sup>·ч).

Дыхание экосистемы, по данным измерений в июле, показало явную тенденцию к увеличению с ростом увлажненности. Интенсивность  $R_{\text{eco}}$  (мг С/(м<sup>2</sup>·ч)  $\pm$  std) на наиболее дренированных сайтах (1.5–1.7, 13; УГВ от –100 до –60 см) была в среднем равна  $260 \pm 0.3$ , на сайтах с УГВ от –60 до –30 см (1.3, 1.4, 2.1–2.3 и 2.6) –  $370 \pm 0.2$ , а на наиболее влажных сайтах (1.1, 1.2, 1.8, 2.4; УГВ от –30 до 0 см) –  $398 \pm 0.2$ . По результатам измерений в июне эта закономерность так явно не проявлялась. Интенсивность  $R_{\text{eco}}$  (мг С/(м<sup>2</sup>·ч)  $\pm$  std) на сайтах 1.1–1.7 с разным УГВ составила:  $300 \pm 12$  (УГВ = –100...–60 см),  $396 \pm 26$  (УГВ = –60...–30 см),  $291 \pm 48$  (УГВ = –30–0 см). Несмотря на погрешность использованного в июне статического камерного метода и различие в количестве сайтов в 1-й и 2-й периоды измерений, можно сделать общее заключение о более интенсивном дыхании экосистемы на более влажных участках и меньшем – на более дренированных.

**Потоки метана и их связь с УГВ.** Средняя величина потока CH<sub>4</sub> (мг С/(м<sup>2</sup>·ч)  $\pm$  std) по результатам измерений в июне варьировала в пределах от  $-0.125 \pm 0.082$  (сайт 1.3) до  $0.27 \pm 0.17$  (сайт 1.1). На тех же сайтах по измерениям в июле она составила  $-0.011 \pm 0.001$  и  $0.108 \pm 0.002$  соответственно. Наибольшая скорость поглощения метана ( $-0.057 \pm 0.035$  мг С/(м<sup>2</sup>·ч)) была отмечена в июле на сайте 1.5 с доминированием *Poa angustifolia*, а наибольшая скорость выделения ( $0.934 \pm 0.004$  мг С/(м<sup>2</sup>·ч) – на сайте 1.8 с доминированием *Typha angustifolia*.

На участках с УГВ от –100 до –60 см наблюдали поглощение метана от  $-0.018 \pm 0.005$  (прозрачные камеры, июль) до  $-0.040 \pm 0.017$  мг С/(м<sup>2</sup>·ч) (непрозрачные камеры, июнь); при повышении УГВ поток метана мог быть как положительным  $0.002 \pm 0.000$  мг С/(м<sup>2</sup>·ч) (прозрачные камеры, июль) так и отрицательным  $-0.071 \pm 0.042$  мг С/(м<sup>2</sup>·ч) (непрозрачные камеры, июнь); при УГВ у поверхности почвы эмиссия метана достигала  $0.290 \pm 0.056$  мг С/(м<sup>2</sup>·ч) (прозрачные камеры, июнь) (рис. 3).

Для сравнения, эмиссия метана в естественных травяно-моховых болотах лесостепной зоны Западной Сибири варьировала шире: от  $-0.2 \pm 0.3$  до

$33.8 \pm 0.6$  мг С/(м<sup>2</sup>·ч) [35], но это может быть объяснено более высокими УГВ (–20–0 см). В естественных тростниковых сообществах лесостепи Западной Сибири медианы эмиссии метана [36] варьировали от 0.08 до 2.7 мг С/(м<sup>2</sup>·ч), что частично согласовалось с данными сайта 1.8.

Потоки метана, измеренные в прозрачных камерах, и в июне, и в июле в среднем были больше, чем в непрозрачных. На сайтах с УГВ от –30 до 0 см со средней эмиссией метана 0.23–0.29 мг С/(м<sup>2</sup>·ч) в прозрачных камерах она была больше на 2 (июль) и на 24% (июнь). При поглощении CH<sub>4</sub> на сайтах с УГВ от –100 до –60 см различия в величине потоков между прозрачными и светонепроницаемыми камерами отмечены не были (рис. 4). Показана [37] светочувствительность эмиссии метана, которая возрастала до 2 раз в отсутствие света, что показано и в других работах на таком же [38, 39] или гораздо более скромном уровне [40].

**Динамика потоков диоксида углерода и метана в светлое время суток.** Величина потока  $NEE$  (мг С/(м<sup>2</sup>·ч)  $\pm$  std) на сайте 1.3 варьировала в светлое время суток от  $-472 \pm 5$  до  $349 \pm 1$  (рис. 5). Максимальное поглощение CO<sub>2</sub> было отмечено в середине суток (11:00, 13:30) при наибольшей интенсивности солнечной радиации (797 и 824 Вт/м<sup>2</sup> соответственно). По мере снижения солнечной радиации до 150–200 Вт/м<sup>2</sup> (15:20, 17:10) происходила смена поглощения CO<sub>2</sub> на его выделение, которое достигало  $349 \pm 1$  мг С/(м<sup>2</sup>·ч) к 19:00.

$R_{\text{eco}}$  (мг С/(м<sup>2</sup>·ч)  $\pm$  std) менялось в течение суток от  $561 \pm 2$  до  $392 \pm 2$  с максимумом утром (8:30) и минимумом вечером (19:00). В течение светового дня отмечено слабое снижение интенсивности дыхания экосистемы, которое сказывалось на изменении  $NEE$  незначительно. Изменение  $R_{\text{eco}}$  в течение суток частично совпадало с ходом температуры почвы на глубине 10 см (рис. 5), что хорошо прослеживалось до 13:30, но практически исчезало позднее. Возможно, это было связано со снижением температуры воздуха (с 27.8 до 15.2°C), что могло объяснить уменьшение интенсивности дыхания экосистемы. При этом температура почвы осталась практически неизменной.

Поток метана (мг С/(м<sup>2</sup>·ч)  $\pm$  std) в течение суток был незначительным и варьировал в диапазоне от  $-0.015 \pm 0.000$  до  $0.004 \pm 0.000$ . В утренние и дневные часы (8:30–15:20) зафиксировано поглощение метана с минимумом в 11:00, которое сменялось его выделением после 17:00, достигая  $0.004 \pm 0.000$  в 19:00. Величина потока метана коррелировала ( $R = 0.55$ ) с температурой почвы на глубине 10 см.

**Связь  $NEE$  с интенсивностью солнечной радиации.**  $NEE$  по результатам измерений в июле демонстрировал слабую корреляцию ( $R^2 = 0.40$ ) с интенсивностью солнечной радиации (рис. 5). Динамика

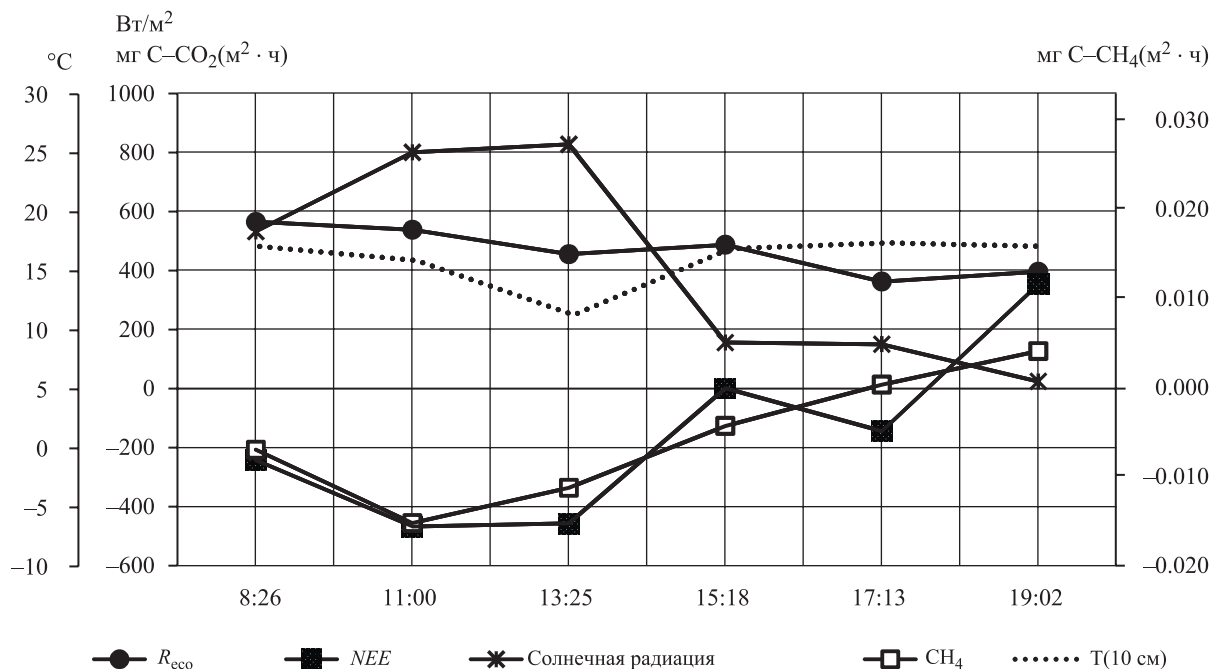


Рис. 5. Потоки  $CO_2$  ( $NEE$  и  $R_{eco}$ ), эмиссия  $CH_4$  и суммарная солнечная радиация в светлое время суток 28.07 на сайте 2.3.

потока  $NEE$  была обратно пропорциональна интенсивности суммарной солнечной радиации: с уменьшением  $ССР$  снижался фотосинтез, доля  $R_{eco}$  в  $NEE$  увеличивались. Лучшая зависимость ( $R^2 = 0.58$ ) отмечена между  $NEE$  за вычетом  $R_{eco}$  и интенсивностью солнечной радиации.

**Связь  $NEE$  с надземной фитомассой.** Величина надземной фитомассы на изученных участках в июле варьировала в пределах от 62 (на участке с *Poa angustifolia*) до 793 г/м<sup>2</sup> (на участке с *Typha angustifolia*).  $NEE$  (мг С/(м<sup>2</sup>·ч)  $\pm$  стд) на данных участках составил в среднем  $63 \pm 0.2$  и  $-540 \pm 2$  соответственно. Наибольшая величина  $NEE$  (93 мг С/(м<sup>2</sup>·ч)) была отмечена на участке с *Hordeum jubatum*. Надземная фитомасса достаточно слабо ( $R^2 = 0.38$ ) коррелировала с  $NEE$ . Низкий коэффициент детерминации, вероятно, обусловлен тем, что подземная фитомасса (ее учет не входил в задачу данного этапа работ) вносила существенный вклад в  $NEE$ . При вычитании  $R_{eco}$  из величины  $NEE$  получим Gross Primary Productivity ( $GPP$ ) – валовую первичную продуктивность (общая скорость фотосинтеза с учетом тех органических веществ, которые были израсходованы в процессе дыхания) [41, 42]. Коэффициент детерминации между  $GPP$  и фитомассой повышался до 0.57.

**Множественная корреляция и регрессия.** При расчете множественной корреляции была рассмотрена взаимосвязь между величинами, определенными на всех точках измерений в июле:  $NEE$  (мг С/(м<sup>2</sup>·ч)) – зависимая переменная  $Y$ , УГВ (см) – независимая переменная  $X_1$  и надземная

фитомассо (г/м<sup>2</sup>) – независимая переменная  $X_2$  (рис. 6). Коэффициент частной корреляции между  $NEE$  и УГВ составил  $-0.65$ , что подтвердило гипотезу об увеличении  $NEE$  по мере понижения УГВ и наоборот. Коэффициент частной корреляции между величинами  $NEE$  и надземной фитомассы также был отрицательным и составил  $-0.62$ , что указывало на сдвиг чистого обмена  $CO_2$  между экосистемой и атмосферой в сторону положительных величин по мере уменьшения биомассы. Коэффициент частной корреляции между независимыми переменными оказался положительным ( $R = 0.81$ ). Это свидетельствовало о сильной положительной взаимосвязи между величиной надземной фитомассы растений и уровнем грунтовых вод.

В процессе регрессионного анализа в отношении тех же факторов получено следующее уравнение:

$$Y = -166.4 - 3.4X_1 - 0.25X_2.$$

Множественный коэффициент корреляции  $R$  был равен 0.67. Фактическая величина  $F$ -статистики Фишера составила 4.4 при  $F$ -теоретической ( $\alpha = 0.05$ ), равной 0.04. Учитывая, что критическая величина  $F$ -статистики меньше эмпирической, гипотезу о зависимости  $NEE$  от рассмотренных факторов предположительно можно обосновать.

## ВЫВОДЫ

1. Измеренные потоки  $CO_2$  и  $CH_4$  в летний бездождный период 2015 г. на осушенном торфянике Берказан-Камыш (лесостепь Республики

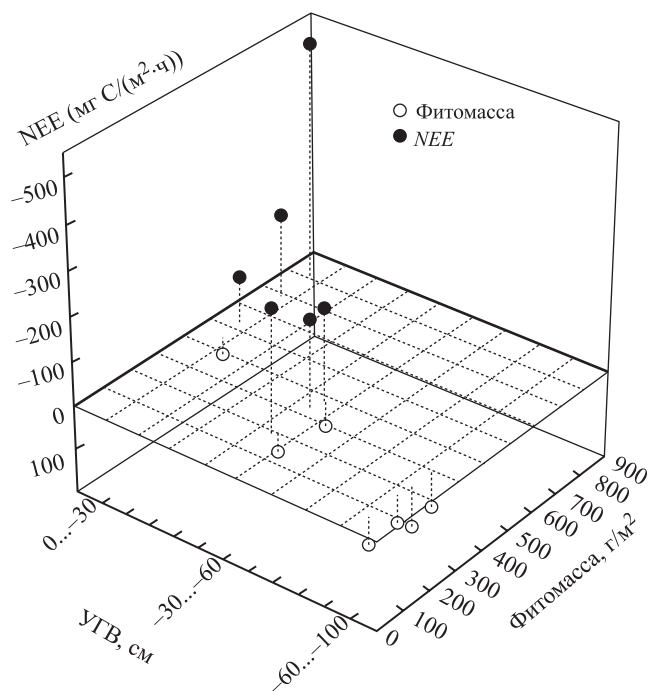


Рис. 6. Зависимость  $NEE$  от УГВ и надземной фитомассы растений на сайтах измерений.

Башкортостан) характеризовали площади с различной растительностью и характерными уровнями грунтовых вод (УГВ): солончаковыми луговыми (УГВ =  $-100...-60$  см), влажно луговыми слабо солончаковыми (УГВ =  $-60...-30$  см), увлажненными тростниково-осоковыми и избыточно увлажненными тростниково-рогозовыми ( $-30-0$  см) сообществами. Средние величины потоков составили ( $\text{мг C}/(\text{м}^2\cdot\text{ч}) \pm \text{стд}$ ): чистый обмен  $\text{CO}_2$  между экосистемой и атмосферой ( $NEE$ )  $-74.2 \pm 0.2$ ,  $-134 \pm 0.6$  и  $-200 \pm 1$ ; дыхание экосистемы ( $R_{\text{eco}}$ )  $-260 \pm 0.3$ ,  $370 \pm 0.2$  и  $398 \pm 0.2$ ; удельный поток  $\text{CH}_4$  в прозрачных камерах  $-0.018 \pm 0.005$ ,  $0.002 \pm 0.000$  и  $0.264 \pm 0.001$  соответственно. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) для связей  $NEE$  и потока  $\text{CH}_4$  с УГВ составил 0.92 и 0.80 соответственно.

2. Чистый обмен  $\text{CO}_2$  между экосистемой и атмосферой ( $NEE$ ) осушенного торфяника Берказан-Камыш варьировал в течение 2-х периодов измерений на отдельных сайтах от  $-540 \pm 2$  до  $378 \pm 8$   $\text{мг C}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ . На увлажненных участках (УГВ от  $-60$  до  $0$  см)  $NEE$  был отрицательным, на более дренированных участках с УГВ ниже  $-60$  см — положительным.  $R_{\text{eco}}$ , в отличие от  $NEE$ , демонстрировал прямую зависимость по отношению к УГВ: на наиболее увлажненных участках торфяника (УГВ у поверхности) его величина была наибольшей  $-592 \pm 50$ , на дренированных она составляла лишь  $136 \pm 20$   $\text{мг C}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ .

3. Потоки метана прямо коррелировали с УГВ ( $R^2 = 0.80$ ), но на большинстве участков они были близкими к нулю. Наибольшая эмиссия  $\text{CH}_4$  (до  $0.934 \pm 0.004$   $\text{мг C}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ ) отмечена на сайтах с УГВ, близким к поверхности почвы, и доминированием гигрофильных видов (*Phragmites australis*, *Typha angustifolia*). На сайтах со средней эмиссией метана  $0.23-0.29$   $\text{мг C}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$  в прозрачных камерах она была больше на 2 (июль) —  $-24\%$  (июнь). Средний поток  $\text{CH}_4$  изменялся от  $-0.039 \pm 0.016$  до  $-0.018 \pm 0.009$  (солончаковые луговые сообщества), от  $-0.071 \pm 0.042$  до  $0.001 \pm 0.000$  (влажно-луговые слабо солончаковые сообщества) и от  $0.23 \pm 0.01$  до  $0.258 \pm 0.001$  (влажные и избыточно увлажненные тростниково-осоковые сообщества).

4. Важными факторами, влиявшими на чистый обмен  $\text{CO}_2$  между экосистемой и атмосферой, являлись УГВ ( $R = -0.65$ ) и величина надземной фитомассы растений ( $R = -0.62$ ). Абсолютный максимальный отрицательный чистый обмен  $\text{CO}_2$  (до  $-540 \pm 2$   $\text{мг C}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ ) наблюдали на сайтах с доминированием *Typha angustifolia*. Наибольший положительный чистый обмен  $\text{CO}_2$  (до  $92.9 \pm 0.1$   $\text{мг C}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ ) зафиксирован на наиболее дренированных участках с солончаково-луговой растительностью (*Hordeum jubatum*, *Poa angustifolia*).

5. Вероятно, изменение водного режима торфяника Берказан-Камыш в процессе обводнения приведет к смещению чистого обмена  $\text{CO}_2$  между экосистемой и атмосферой в сторону аккумуляции углерода вследствие повышения уровня грунтовых вод. Также можно предположить более широкое распространение влаголюбивой растительности, что может уменьшить эмиссию углерода в атмосферу. Необходимо отметить, что по мере роста уровня грунтовых вод эмиссия метана возрастает, однако вклад данного парникового газа в потерю углерода крайне незначителен и может быть компенсирован уменьшением потерь за счет снижения эмиссии диоксида углерода.

Авторы признательны за помощь П.С. Широких и А.А. Мулдашеву (УИБ РАН) в проведении геоботанических описаний, М.В. Смагиной (ИЛАН РАН) в анализе полевых материалов, О.В. Фирсовой (ИЛАН РАН) за проведение хроматографических работ, Б.М. Хамидуллину (фермерское хозяйство ООО «Берказан») в проведении полевых исследований, М.В. Глаголеву (МГУ им. М.В. Ломоносова, ИЛАН РАН), М.В. Чистотину (ВНИИ агрохимии, ИЛАН РАН) за консультации по обработке данных, М. Минке (Greifswald Mire Centre, Германия) за замечания по содержанию статьи, менеджеру проекта ПРООН/ГЭФ Е.А. Кузнецову за помощь и поддержку.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Main report / Eds Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T., Silvius M., Stringer L. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, 2008. 179 p. <http://www.gec.org.my/index.cfm?&menuid=48&parentid=63>.
2. *Вомперский С.Э., Иванов А.И., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Глухова Т.В., Дубинин А.И., Глухов А.И., Маркелова Л.Г.* Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // Почвоведение. 1994. № 12. С. 17–25.
3. *Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А.* Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. геогр. 2005. № 5. С. 21–33.
4. *Вомперский С.Э., Сирин А.А., Сальников А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А.* Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 3–11.
5. Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / Под ред. Сирина А.А., Минаевой Т.Ю. М.: Геос, 2001. 190 с.
6. A Quick scan of peatlands in central and eastern Europe / Eds Minayeva T., Sirin A., Bragg O. The Netherlands, Wageningen: Wetlands International, 2009. 132 p. (<http://www.wetlands.org/LinkClick.aspx?fileticket=Az8K7KVj%2bhk%3d&tabid=56>).
7. Peatlands and climate change / Ed. Strack M. Finland, Saarijärven Offset Oy, Saarijärvi: International Peat Society, 2010. P. 44–69.
8. *Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А.* Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осушенного торфяника в Московской области // Агрохимия. 2015. № 11. С. 51–62.
9. *Минаева Т.Ю., Сирин А.А.* Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Усп. совр. биол. 2011. Т. 131. № 4. С. 393–406.
10. *Климанов В.А., Сирин А.А.* Динамика торфонакопления болотами Северной Евразии за последние 3000 лет // Докл. РАН. 1997. Т. 354. № 5. С. 683–686.
11. *Сирин А., Минаева Т., Возбранная А., Барталев С.* Как избежать торфяных пожаров? // Наука в России. 2011. № 2. С. 13–21.
12. *Minayeva T., Sirin A.A., Stracher G.B.* The peat fires of Russia // Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Amsterdam: Elsevier, 2013. P. 376–394.
13. *Sirin A., Minayeva T., Plyasov D., Suvorov G., Martynenko V., Fedotov Yu., Glukhova T., Valuayeva N., Tsuganova O., Maslov A., Muldashev A., Shirokikh P., Kuznetsov E.* Peatlands in sub humid regions under changing climate and human activities // Proceed. 15<sup>th</sup> Inter. Peat Congress, Sarawak, Malaysia. 15–19 August 2016. Poster presentations. P. 406–413.
14. *Пьявченко Н.И.* Торфяники Русской лесостепи. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 190 с.
15. *Хмелев К.Ф.* Закономерности развития болотных экосистем Центрального Черноземья. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1985. 168 с.
16. *Вомперский С.Э., Минаева Т.Ю., Сирин А.А.* Экосистемы болот. Гл. 7 // Состояние биоразнообразия природных экосистем России / Под ред. Орлова В.А., Тишкова А.А. М.: НИИ-Природа, 2004. С. 103–113.
17. *Инсаров Г.Э., Борисова О.К., Корзухин М.Д., Кудеяров В.Н., Минин А.А., Ольчев А.В., Семенов С.М., Сирин А.А., Харук В.И.* Природные экосистемы суши // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Гл. 6. М.: Росгидромет, 2012. С. 190–265.
18. *Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А.* Влияние растительности и режима увлажнения на эмиссию метана из осушенной торфяной почвы // Агрохимия. 2010. № 12. С. 40–49.
19. *Сирин А.А., Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Глаголев М.В.* О значениях эмиссии метана из осушительных каналов // Динамика окр. среды и глобал. изменений климата. 2012. Т. 3. № 2(6). С. 34–42.
20. *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 // Агрохимия. 2006. № 6. С. 54–62.
21. *Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сирин А.А.* Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрохимия. 2008. № 5. С. 56–68.
22. *Wilson D., Blain D., Couwenberg J., Evans C. D., Murdiyaro 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 and Peat. 2016. V. 17. Art. 04. P. 1–28. <http://www.mires-and-peat.net/>.
23. *Мулдашев А.А., Позднякова Э.П., Едренкина Л.А., Сагитов Ш.З., Волков А.М., Богдан Е.А., Хизбуллин Ф.Ф., Косарев М.Н., Гареев Э.З., Мартыненко В.Б., Яныбаева В.А., Султангареева Л.А.* Реестр особо охраняемых природных территорий Республики Башкортостан. Изд. 2-е, перераб. Уфа: Изд. центр «МедиаПринт», 2010. 414 с.
24. *Гареев А.М., Галимова Р.Г.* Справочник по климату Республики Башкортостан // Уфа: Кафедра гидрологии и геоэкологии БГУ, 2010. 63 с.
25. *Гуленок Г.Е., Ильичева Ю.А., Кислова В.П., Кузьмичева В.Г., Серова Е.К.* Торфяные месторождения Башкирской АССР. Справ.-к. М.: Мин-во геологии СССР, 1989. 321 с.
26. *Mosier A.R.* Chamber and isotope techniques // Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Chichester, N.Y.: Wiley, 1989. P. 175–187.

27. Davison A.C., Hinkley D.V. Bootstrap methods and their application. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 582 p.
28. Глаголев М.В. Аннотированный список литературных источников по результатам измерений потоков  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  из болот России // Динамика окружающей среды и глобал. изменений климата. 2010. Т. 1. № 2. С. 5–57.
29. Алексеев Ю.Е., Алексеев Е.Б., Габбасов К.К. Определитель высших растений Башкирской АССР Сем. Onocleaceae–Fumariaceae. М.: Наука, 1988. 316 с.
30. Алексеев Ю.Е., Галева А.Х., Губанов И.А. // Определитель высших растений Башкирской АССР Сем. Brassicaceae–Asteraceae. М.: Наука, 1989. 375 с.
31. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). Рус. изд.-е. СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
32. Фотосинтез и биопродуктивность: методы определения. Пер. с англ. / Под ред. Мокроносова А.Т. М.: Агропромиздат, 1989. 460 с.
33. Архив погоды в Аксаково / [Электр. ресурс] ООО «Расписание Погоды». Режим доступа: [www.rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Аксаково](http://www.rp5.ru/Архив_погоды_в_Аксаково).
34. Drösler M., Adelman W., Augustin J., Bergman L., Beyer C., Chojnick B., Förster C., Freibauer A., Giebels M., Görlitz S., Höper H. Klimaschutz durch Moorschutz. Schlussbericht des BMBF-Vorhabens: Klimaschutz-Moornutzungsstrategien, 2006–2010. P. 7–9. (URL <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb13/735500762.pdf>).
35. Сабреков А.Ф., Филиппов И.В., Терентьева И.Е., Глаголев М.В., Ильясов Д.В., Смоленцев Б.А., Максюттов Ш. Ш. Пространственная вариабельность эмиссии метана из травяно-моховых болот подтайги и лесостепи Западной Сибири // Изв. РАН. Сер. биол. 2016. № 2. С. 199–206.
36. Sabrekov A.F., Filippov I.V., Glagolev M.V., Teren'teva I.E., Ilyasov D.V., Kosyurbenko O.P., Maksyutov S.S. Methane emission from West Siberian forest-steppe and subtaiga reed fens // Rus. Meteorol. Hydrol. 2016. V. 41. № 1. P. 37–42.
37. King J.Y., Reeburgh W.S. A pulse-labeling experiment to determine the contribution of recent plant photosynthates to net methane emission in arctic wet sedge tundra // Soil Biol. Biochem. 2002. V. 34. № 2. P. 173–180.
38. Куличевская И.С., Паников Н.С. Разложение целлюлозы и метаногенез в сфагновом болоте Западной Сибири // Тез. докл. Международ. конф. «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 20–24 ноября. Пушино, 2000. С. 89.
39. Naumov A.V. To the question of nature of methanotrophic complex in peat bog soils // Мат-лы Международ. полевого симп. «Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее», г. Ноябрьск, 18–22 августа 2001 г. / Под ред. Васильева С.В., Титляновой А.А., Величко А.А. Новосибирск: ООО «Агентство Сибпринт», С. 113–115.
40. Глаголев М.В. Эмиссия  $\text{CH}_4$  болотными почвами Западной Сибири: от почвенного профиля до региона: Дис. ... канд. биол. наук. М.: Изд-во МГУ, 2010. 211 с.
41. Одум Ю. Экология. Т. 1. М.: Мир, 1986. 328 с.
42. Chapin III F.S., Woodwell G.M., Randerson J.T., Rastetter E.B., Lovett G.M., Baldocchi D.D., Clark D.A. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods // Ecosystems. 2006. V. 9. № 7. P. 1041–1050.

## The Summer Carbon Dioxide and Methane Fluxes on Drained Peatland in Forest-Steppe of Bashkortostan

D.V. Ilyasov<sup>1</sup>, A.A. Sirin<sup>1</sup>, G.G. Suvorov<sup>1</sup>, V.B. Martynenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Forest Sciences

ul. Sovetskaya 21, Moscow region, Uspenshoye 143030, Russia

<sup>2</sup> Ufa Institute of Biology of RAS

prosp. Octjabrja 69, Ufa 450054, Russia

E-mail: [danila\\_ilyasov@mail.ru](mailto:danila_ilyasov@mail.ru)

$\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  fluxes measured during rainless periods of summer 2015 on drained peatland Berkazan-Kamysh in forest-steppe of Republic of Bashkortostan are under discussion. The data characterizes three types of plant communities with characteristic groundwater levels (GWL): saline meadow (–100...–60 cm), wet-meadow low saline (–60...–30 cm) and wet reed-sedge, including sites waterlogged reed-cattail communities (–30...0 cm). The average values of the flows ( $\text{mg C}/(\text{m}^2\cdot\text{h}) \pm \text{std}$ ) for these communities were as follows: net ecosystem exchange (NEE)  $74.2 \pm 0.2$ ,  $-134.2 \pm 0.6$  and  $-200.4 \pm 1.3$ , ecosystem respiration ( $R_{\text{eco}}$ )  $260.1 \pm 0.3$ ,  $370.1 \pm 0.2$  and  $398.1 \pm 0.2$ , the flux of  $\text{CH}_4$  in transparent chambers  $-0.018 \pm 0.005$ ,  $0.000 \pm 0.000$  and  $0.264 \pm 0.001$ , in dark chambers  $-0.018 \pm 0.009$ ,  $0.001 \pm 0.002$  and  $0.258 \pm 0.001$ , respectively. The coefficient of determination of NEE and  $\text{CH}_4$  flux with the groundwater level was 0.92 and 0.80, respectively.

Key words: summer fluxes, carbon dioxide, methane, drained peatland, forest-steppe, Bashkortostan.