

*На правах рукописи*

**Суворов Геннадий Геннадьевич**

**ИЗМЕНЕНИЕ ПОТОКОВ CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> И ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА  
ЛЕСОБОЛОТНОЙ ЭКОСИСТЕМОЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДОБЫЧИ  
ТОРФА И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
(НА ПРИМЕРЕ ДУБНЕНСКОГО МАССИВА  
МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ)**

Специальность 03.02.08 – экология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении  
науки Институте лесоведения Российской академии наук

Научный руководитель: **Сирин Андрей Артурович**  
доктор биологических наук

Официальные оппоненты: **Загирова Светлана Витальевна**  
доктор биологических наук, старший научный  
сотрудник, заведующая отделом лесобиологи-  
ческих проблем Севера ФГБУН Института био-  
логии Коми НЦ УрО РАН, заведующая кафедр-  
рой биологии Института естественных наук  
ФГБОУ ВПО Сыктывкарский Государственный  
Университет, г. Сыктывкар

**Курбатова Юлия Александровна**  
кандидат биологических наук, доцент, врио  
заведующего лаборатории биогеоценологии им.  
В.Н. Сукачева ФГБУН Института проблем эко-  
логии и эволюции им. А.Н. Северцова

Ведущая организация: **ФГБУН Институт физико-химических  
и биологических проблем почвоведения  
Российской академии наук**

Защита диссертации состоится 22 марта 2018 г. в 10:00 на заседании диссер-  
тационного совета Д 002.054.01 при Институте лесоведения РАН по адресу:  
143030 Московская обл., Одинцовский р-н, с. Успенское, ул. Советская, д.  
21. Тел./факс +7 (495) 634-52-57. E-mail: [root@ilan.ras.ru](mailto:root@ilan.ras.ru) .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института лесоведения  
РАН и на сайте <http://ilan.ras.ru> (дата размещения 08.01.2018 г.).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертаци-  
онного совета, к.б.н.



Уткина И.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Торфяные болота – один из ключевых резервуаров углерода суши, а их осушение и последующее использование – наиболее значительные антропогенные факторы, влияющие на углеродный баланс этих экосистем (Assessment ..., 2008, Strack, 2008). Торфяные болота занимают более 8% территории страны (Вомперский и др., 1994, 1999, 2005, Торфяные ..., 2001), большей частью расположены в лесной зоне, многие облесены (Вомперский и др., 2011) и являются лесоболотными экосистемами.

Наиболее активное осушение и хозяйственное освоение болот происходило на Европейской территории России (ЕТР). К концу XX века добычей торфа было изменено до 1.5 млн. га, а осушенные сельскохозяйственные земли достигли 5 млн. га. Во многих случаях именно частично выработанные торфяники использовались далее для сельского хозяйства. С начала 1990–х годов было заброшено без рекультивации много полей фрезерной добычи торфа, перестали использоваться многие сельскохозяйственные земли с торфяными почвами (Торфяные ..., 2001, Minayeva et al., 2009). При этом неиспользуемые осушенные торфяники наиболее уязвимы к изменению климата (Assessment ..., 2008, Экосистемы ..., 2004). Это наиболее пожароопасные объекты, которые необходимо либо возвращать в хозяйственный оборот, либо обводнять для искусственного заболачивания (Сирин и др., 2011).

Эмиссия парниковых газов (ПГ), особенно диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), при осушении и использовании болот – один из основных антропогенных источников парниковых газов, связанных с землепользованием, который оценивается в 5% всех антропогенных эмиссий ПГ. Учет ПГ из антропогенно измененных торфяников рассмотрен в специальном руководстве Межправительственной группы экспертов по изменению климата – IPCC (IPCC 2014, 2013 Supplement ..., 2014). При растущем числе измерений потоков  $\text{CO}_2$  и метана ( $\text{CH}_4$ ) на естественных болотах, в нашей стране крайне мало данных по освоенным торфяникам (Чистотин и др., 2006, Глаголев и др., 2008, Глухова и др., 2014 и др.).

Охрана, восстановление и разумное использование болот – необходимые компоненты смягчения изменения климата, а обводнение и искусственное заболачивание неиспользуемых торфяников – приоритетная мера по снижению эмиссии  $\text{CO}_2$  при деструкции торфа и торфяных пожарах, обеспечивающая сохранение запасов углерода (С) торфяных залежей и возобновление его накопления. Московская область с заболоченностью выше 6% (Сирин и др., 2014) лидирует по площади брошенных полей фрезерной добычи торфа – основных объектов торфяных пожаров 2002 и 2010 гг. (Сирин и др., 2011). Это определило необходимость обводнения пожароопасных торфяников, проведенного в 2010–2013 гг. на площади более 73 тыс. га (Информационный ..., 2015, 2016).

Оценка потерь углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании необходима для прогноза антропогенного влияния на запасы углерода торфяных болот и эффективности мероприятий по обводнению не-

используемых осушенных торфяников с точки зрения изменения климата.

**Цель работы** – оценить изменение потоков  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и запасов углерода в результате добычи торфа и сельскохозяйственного использования репрезентативной для центра Европейской части России лесоболотной экосистемы, в т.ч. для прогноза их возможных изменений при вторичном обводнении. Для этого были поставлены следующие **задачи исследований**:

- Изучить пространственно-временные особенности потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  при характерном использовании: добыча торфа и сельское хозяйство (сенокос);
- Смоделировать в вегетационном опыте влияние увлажнения и растительности на эмиссию метана из осушенной торфяной почвы;
- Оценить основные потери углерода на разных стадиях освоения и сельскохозяйственного использования лесоболотной экосистемы.

**Защищаемые положения.**

- Осушенные торфяники являются источником не только диоксида углерода, но и метана, который выделяется из осушительных каналов и, при достаточном увлажнении, с поверхности осушенных торфяных почв;
- При увлажнении осушенных торфяных почв может возникать эмиссия метана, на величину которой влияет наличие и характер растительности;
- Освоение и использование лесоболотных экосистем для добычи торфа и сельского хозяйства характеризуются разными потерями углерода;
- Неиспользуемые осушенные торфяники продолжают терять запасы углерода и являются значительными источниками парниковых газов.

**Научная новизна.** Впервые отечественными исследованиями на основе многолетних наблюдений дана оценка потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  для наиболее характерных типов использования осушенных торфяных болот. Оценены основные потери запасов углерода при освоении и последующем использовании лесоболотной экосистемы. Показана значительная потеря углерода и эмиссия  $\text{CO}_2$  с заброшенных торфоразработок и участков сенокоса. Установлена значительная эмиссия  $\text{CH}_4$  из осушительных каналов, а при достаточном увлажнении и с поверхности осушенных торфяных почв, что впервые подтверждено вегетационным экспериментом продолжительностью в один год, показано влияние растительности на поток метана.

**Практическая значимость.** Полученные оценки коэффициентов эмиссии  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  для основных типов осушенных торфяников необходимы для национальной отчетности РККИК ООН (Рамочная конвенция ООН об изменении климата – UNFCCC). Данные о потерях углерода неиспользуемыми осушенными болотами являются дополнительным (с точки зрения смягчения изменения климата) аргументом необходимости их обводнения и искусственного заболачивания. Полученные данные об эмиссии  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  с осушенных торфяников, включая осушительные каналы, были учтены в Дополнении по водно-болотным угодьям 2014, 2013 (IPCC 2014, 2013 Supplement ..., 2014) к Руководству 2006 IPCC по инвентаризации парниковых газов. Обнаруженное влияние растительности на эмиссию  $\text{CH}_4$  из осушенных торфяных

почв является обоснованием мер по ее снижению при разработке мероприятий по обводнению и искусственному заболачиванию.

**Апробация работы.** Результаты работы были доложены и представлены на 12-ой и 13-ой междунар. Пушкинской школе-конф. молодых ученых «Биология – наука XXI века» (Пушино, 2008, 2009), Всеросс. научн. конф. «Биосферные функции почвенного покрова» (Пушино, 2010), 3-м (Ханты-Мансийск, 2011) и 4-м (Новосибирск, 2014) междунар. полевых симп-мах «Западно-сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее», Междунар. научн. конф-циях «Резервуары и потоки углерода в лесных и болотных экосистемах бореальной зоны» (Сыктывкар, 2011) и «XV Докучаевские молодежные чтения: почва как природная биогеомембрана» (С-Петербург, 2012), 14-м (Стокгольм, Швеция, 2012) и 15-м (Малайзия, 2016) Междунар. конгрессах по торфу, 10-м Сибирском совещ. по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2013), Всеросс. научн. конф. по лесному почвоведению «Фундаментальные и прикладные вопросы лесного почвоведения» (Сыктывкар, 2015), Всеросс. совещ. «Стационарные экологические исследования: опыт, цели, методология, проблемы, организации» (Тверская обл., 2016) и др.

**Проекты.** Работа проводилась при выполнении бюджетных тем Института лесоведения РАН (2009–2017), проектов РФФИ 09-05-01113-а, 12-05-01029-а, 16-05-00762-а, Российско-Германского 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, строительства и безопасности ядерных реакторов ФРГ и управляемого через немецкий банк развития KfW (проект № 11 III 040 RUS K Восстановление торфяных болот) (2011–2017).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано более 20 работ, в том числе 3 статьи в журналах из списка ВАК.

**Личный вклад автора.** Автор участвовал в организации и проведении полевых наблюдений, вегетационного эксперимента, лабораторных анализов, статистической обработке и анализе полученных данных.

**Структура и объем диссертационной работы.** Работа состоит из введения, 5 глав, выводов, словаря терминов, приложения, изложена на 128 страницах, содержит 43 рисунка, 10 таблиц. Список литературы включает 178 источников, в том числе иностранных 60.

**Благодарности.** Автор признателен научному руководителю А.А. Сирину за идею работы и поддержку, М.В. Чистотину (ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова) за помощь в сборе и обработке данных, О.Н. Успенской (ВНИИ овощных культур) за определение ботанического состава и степени разложения торфа и Т.Ю. Минаевой – флористического состава растительности, М.В. Глаголеву (ф-т почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова) за консультации по обработке и анализу данных измерений, А.Ф. Сабрекову (Томский государственный университет) за подготовку программы для расчета годовых

потоков ПГ, И.К. Кравченко (ИНМИ РАН им. С.Н. Виноградского) за обсуждение результатов работы, Т.В. Глухой, А.В. Маркиной, А.П. Кулешову, Я.И. Гульбе (ИЛАН РАН), О.С. Гринченко (ИВП РАН) за помощь в работе.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Осушенные лесоболотные экосистемы: состояние проблемы

Рассмотрены современные представления о роли торфяных болот в цикле углерода и метана, их значении в формировании газового состава атмосферы и изменении климата. Показано распространение болот в нашей стране и масштабы их изменения в результате хозяйственной деятельности. Отмечено, что добыча торфа, особенно фрезерным (наиболее распространенным) способом и сельскохозяйственное осушение являются наиболее масштабным и глубоким воздействием на болота. С учетом залесенности многие осушенные и освоенные болота были исходно лесоболотными экосистемами. Рассмотрены основные аспекты изменения потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , а также запасов углерода при осушении и использовании болот. Показано отмечаемое РКИК ООН, МГЭИК и другими международными институтами влияние осушения и освоения торфяных болот на изменение климата. Отмечена нехватка данных по проблеме особенно для нашей страны. Критически распространено мнение об отсутствии эмиссии метана с осушенных болот, недоучтен вклад дренажных каналов и возможность эмиссии метана при периодическом увлажнении торфяной почвы, что может быть выявлено натурными измерениями и проверено вегетационными экспериментами. Рассмотрено состояние вопроса о запасах углерода болот и их потере при использовании.

### Глава 2. Объекты и методы исследования

**Объекты исследования.** Исследования проводились на Дубненском болотном массиве в Талдомском районе Московской области ( $56^{\circ}42'$  с. ш.,  $37^{\circ}50'$  в. д.). В 1979 г. участок массива был осушен для добычи торфа. После частичной выработки залежи ряд площадей был залужен под сенокосы или рекультивирован для посадки овощных культур. Изучались три участка, расположенные в исходно однотипной части массива (рис. 1): 1) естественный (контроль); 2) рекультивированный под посев многолетних трав и использовавшийся  $\approx 20$  лет как сенокос; 3) заброшенный после торфодобычи (растительность практически отсутствует). Стационарные точки измерений (по одной на каждом участке) расположены на расстоянии 150–300 м друг от друга.

Неосушенный участок болота гипсометрически выше осушенных площадей, в направлении которых направлен сток, осушение на него практически не повлияло. Измерения проводились на облесенном склоне с сосняком кустарничково-сфагновым (Уровень болотных вод (УБВ) – от 0 до –60 см) и на более открытой части с отдельными соснами и местами выраженными кочками и мочажинами (УБВ – от 0 до –40 см). Участок сенокоса имеет ровную поверхность с достаточно уплотненной сверху торфяной почвой, на ко-

торой сформировалась влажно-луговая растительность с участием рудеральных видов (УБВ – от –60 до –100 см.). Измерения проводились в двух точках, на межканавье и на картовом канале. В 2011 г. здесь были проведены противопожарные мероприятия: расчищены магистральные каналы, ниже участка измерений сооружены переливные дамбы, противопожарный пруд. На участке торфодобычи растительность практически отсутствует, начинает формироваться на более увлажненных понижениях и развита на бровках каналов. Измерения проводились на повышениях и понижениях микрорельефа амплитудой 20–30 см, и в канале. УБВ от 0 до –70 см, в зависимости от формы рельефа.



Рис. 1 – Общий вид исследованных участков. Слева направо: естественное болото (контроль), сенокос, добыча торфа.

**Методы исследования.** *Потоки  $CO_2$  и  $CH_4$*  измерялись статическим камерным методом в каждой точке на 1–3 сайтах удаленных друг от друга на 0.5–3 м. Преимущественно с 11 до 18 часов дня. Камеры устанавливались на металлическое основание, заглубляемое в почву или снег на 10 см и оборудованное гидрозатвором. Использовались камеры: в 2005–11 гг. темные круглого сечения ( $0.09 \text{ м}^2$ ) объемом  $15 \text{ дм}^3$ ; в 2012–15 гг. – прозрачные и темные квадратного сечения ( $0.49 \text{ м}^2$ ) объемом  $206 \text{ дм}^3$ . Темными камерами измерялся удельный поток (далее поток) метана, дыхание почвы (Soil respiration ( $R_{\text{soil}}$ ) при удалении наземной растительности) и дыхание экосистемы (Ecosystem respiration ( $R_{\text{eco}}$ )), прозрачными – чистый обмен  $CO_2$  между экосистемой и атмосферой – Net Ecosystem Exchange (NEE). На каналах использовали круглые камеры на плавающих основаниях. Все камеры имели вентиляторы для перемешивания воздуха (Суворов и др., 2015).

До 2015 г. при экспозиции камеры 20–130 мин (в зависимости от величины потока) отбирали 4–6 проб воздуха в герметичные стеклянные флаконы объемом  $60 \text{ см}^3$ . Объемную долю  $CH_4$  и  $CO_2$  в пробах определяли на газовом хроматографе «Кристалл 2000М» с пламенно-ионизационным детектором и метанатором. Позднее для измерения скорости изменения концентрации газа в камере использовался портативный газоанализатор «UGGA  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ » (Los Gatos Research, США), точность измерения  $CH_4$  –  $2 \text{ млрд}^{-1}$ ,  $CO_2$  –  $300 \text{ млрд}^{-1}$ , частота 1 Гц, экспозиция камеры 3–10 мин. Для оценки скорости  $dc/dt$  ( $\text{млн.}^{-1}/\text{ч}$ ) изменения концентрации газа в камере использовали метод наименьших квадратов, допуская стационарность этого показателя в течение экспозиции. Эмиссию ( $E$ ,  $\text{мг С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ ) рассчитывали по формуле:  $E = (dc/dt \cdot V \cdot M \cdot V_m^{-1})/s$ , где  $V$  – объем воздуха в камере ( $\text{м}^3$ ),  $M$  – молярная масса

углерода (г моль<sup>-1</sup>),  $V_m$  – молярный объем (г моль<sup>-1</sup>),  $s$  – площадь основания (м<sup>2</sup>).

Расчет интегральных потоков CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> был проведен отдельно для бесснежного и зимнего периодов. Использовали климатические показатели с сайта [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru) (ООО «Расписание Погоды», Санкт-Петербург, Россия) для г. Дмитрова. За сход снежного покрова принимали дату с 50% покрытием полей снегом, за установление – формирование устойчивого снежного покрова. Зимние потоки CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> рассчитывали как произведение числа зимних дней в году на медиану потока по данным зимних измерений за все годы наблюдений. Для получения оценок интегральных потоков CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> и их погрешностей применяли метод бутстрапа, количество повторений 50 000. При аппроксимации динамики эмиссии применяли линейную интерполяцию. Использовали программный пакет MATLAB R2010b.

Для наблюдения за температурой почвы на глубинах 2, 5, 10, 25 см были установлены электронные датчики температуры Thermochron iButton DS1921 (Dallas Semiconductor, США), периодичность записи 3 часа, точность ±0.5°C. pH и электропроводность воды в каналах и на естественном болоте измерялись pH-метром HI 98129 Combo (Hanna Instruments, США).

*Вегетационный эксперимент* проводился в вегетационном домике кафедры агрохимии Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К.А. Тимирязева. Сосуды Вагнера с керамзитовым дренажем были установлены под прозрачным навесом, защищающим от атмосферных осадков. Отбор почвы и закладка опыта проведены в мае 2008 г. Моделировались три стадии залужения торфяной почвы: (1) открытый торф и (2) первый год после залужения (для стадии (1) и (2) использован торф, взятый без сохранения сложения с участка его добычи), (3) 20 лет после залужения (почвенные монолиты с луговой растительностью, взяты на сенокосе). Торф был высушен при комнатной температуре до влажности 212%, просеян через сито (ячейка Ø 5 мм) и перемешан перед набивкой сосудов (масса сухого торфа в сосуде – 1.0 кг). Для стадии (1) торф был оставлен открытым, для стадии (2) засеян тимофеевкой (*Phleum pratense* L., сорт ВИК 85). Почвенные монолиты (Ø 18, высота 15 см, масса сухой почвы 0.7–1.0 кг) с луговой растительностью (ежа сборная *Dactylis glomerata* L., молиния голубая *Molinia caerulea* (L.) Moench, мятлик луговой *Poa pratensis* L., лапчатка гусиная *Potentilla anserina* L.) были помещены в вегетационные сосуды сразу после отбора. Для торфа и почвы в 2-кратной повторности были определены рН<sub>KCl</sub>, зольность (прокаливанием при 525°C), наименьшая и полная влагоемкость (НВ и ПВ), методом цилиндров. На указанные градации почвы и растительности были наложены два варианта увлажнения: (I) переменная влажность от 50 до 90% ПВ, моделирующая естественные условия, (II) постоянно высокая влажность 90% ПВ – искусственное обводнение осушенных торфяников. Каждый вариант имел 2-кратную повторность. Температура регистрировалась датчиками Thermochron iButton DS1921. Влажность регулировали поливом сверху по массе. В вариантах с переменным увлажнением до 7.06.2008 года ее под-

держивали равной 90% ПВ, далее снижали равномерно для всех сосудов, 21.07.2008 подняли до 90% ПВ, далее снижение к 24.09.2008 и затем поддерживали 90% ПВ (Суворов и др., 2010).

Измерения потоков  $\text{CH}_4$  проводили с июня 2008 г. по июль 2009 г. с перерывом на ноябрь–март (сосуды промерзали). Сосуды помещали в поддон с отстоянной водой и накрывали камерой с вентилятором и светоотражающим чехлом. За 23–25 ч отбирали по 6 проб воздуха в шприцы объемом 10 мл. В июле 2008 г. за 3 суток было проведено 15 измерений с экспозицией 2.6–3.3 ч. Концентрации  $\text{CH}_4$  определяли на хроматографе через 1–4 ч после отбора проб.

После окончания опыта в июле 2009 г. был выполнен учет сухой надземной и подземной фитомассы. При определении подземной фитомассы почва была промыта через сито ( $\varnothing$  ячеей 2 мм) с отделением торфяной крошки и крупных корней; последние взвешивали после высушивания при 105°C. Учет мелких корней в торфяной крошке проводили методом навесок; для каждого сосуда в 2-кратной повторности. Из навески в 1 г отбирали все корни, для пересчета на сухое вещество использовали данные о влажности крупных корней. По завершению опыта были определены потенциальные активности образования и аэробного окисления  $\text{CH}_4$  для открытой почвы и монолитов (1 сосуд каждого варианта). Инкубацию проб почвы (3.7–5.2 г) в течение 5 сут проводили в стеклянных флаконах (60 см<sup>3</sup>) при температуре 25°C в 3-кратной повторности. Объемную долю  $\text{CH}_4$  за время инкубации определяли 3 раза (Чистотин и др., 2016).

*Определение потерь углерода.* Относительная высота полевых точек наблюдений была определена нивелированием. Для характеристики стратиграфии и запасов углерода в торфе на каждом участке были взяты образцы по профилю залежи торфяным буром ТБГ–1. Ботанический состав и степень разложения торфа определяли стандартными методами, объемную массу – после высушивания при 105°. Содержание С в торфе определяли на  $\text{CHN}$ -анализаторе «Carlo Erba 1106» (CE Instruments, Италия) с 3-кратной повторностью. Возраст торфа по <sup>14</sup>С был определен в Институте геологии РАН и калиброван (cal BP) программой Calib Rev 5.1 (Stuiver, Reimer, 1993). Запасы С в надземной фитомассе контрольного участка определяли в октябре 2011 г. на трех пробных площадях (п/п): открытая часть (п/п 1 и 2) и облесенный склон (п/п 3) болотного массива. Надземную фитомассу определяли: древесный ярус – на п/п (25 м<sup>2</sup>), травяно-кустарничковый – на укосных квадратах (у/к) 1 м<sup>2</sup> (1 на каждой п/п), моховой яруса (с очесом) отбирали стальным цилиндром ( $\varnothing$  20 см) на каждой п/п, в понижении и на повышении микрорельефа. Подземную фитомассу оценили по литературным данным. Фитомассу на сенокосе определяли в сентябре 2008 г.: надземную – на у/к (1 м<sup>2</sup>, 4-кратная повторность), подземную – по монолиту 30×30×30 см для слоев 0–10, 10–20 и 20–30 см (методика как в вегетационном опыте). Содержание С определяли на  $\text{CHNS}$ -анализаторе «Vario Micro Cube» (Elementar, Германия) с 3-кратной повторностью.

### Глава 3. Потоки углекислого газа и метана с участка торфодобычи, сенокоса и естественного болота

*Климатические характеристики лет наблюдений.* Наиболее обеспеченными осадками были 2008, 2013, и 2015 гг., в период май-сентябрь выпало порядка 450 мм осадков (табл. 1). Наиболее засушливыми были 2010 и 2014 годы с количеством осадков в период май-сентябрь – 256 мм. Наиболее теплыми были 2010, 2013, 2014 года, с температурой май-сентябрь от 16 до 18°C, умеренно теплыми были 2005, 2009 и 2015 годы с температурой май-сентябрь 15°C. Самым холодным годом с температурой 14°C в период май-сентябрь был 2008 год. Термические условия бесснежных периодов лет наблюдений были похожи, пики средних декадных температур воздуха ( $\approx 20^\circ\text{C}$ ) пришлось на июль. Исключение – экстремально жаркий 2010 год со среднедекадными температурами августа до  $30^\circ\text{C}$ . Осадки бесснежного периода 2008, 2013, 2014 гг. распределены равномерно в течении лета, достигая 50–60 мм в отдельные декады; 2014 г. был экстремально засушливым; 2005 г. имел сухую осень; 2009 – сухое лето и влажную осень; 2010 был экстремально засушливым, с основными осадками ближе к осени.

*Потоки  $\text{CO}_2$  для объектов наблюдений даны в табл. 2.* На участке добычи торфа  $R_{\text{soil}}$  в бесснежный период менялось от 0.4 до  $2.4 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ . В 2008 и 2014 гг. на повышении поток  $\text{CO}_2$  был выше, чем на понижениях в 4 и 1.5 раза, соответственно. Возможно, более влажные условия снижают гетеротрофное дыхание. Наибольшая разница была в 2008 году с максимальными осадками – 810 мм (табл. 1). В 2013 и 2015 гг. картина была обратная:  $R_{\text{soil}}$  было в 1.4 и 1.8 раз выше на понижении. Вероятно, при пересыхании на повышении дыхание снижается, а в увлажненном понижении продолжает идти.  $R_{\text{soil}}$  на повышении было сопоставимо с  $R_{\text{soil}}$  среднего элемента микрорельефа на естественном болоте. Исключение 2014 г.:  $R_{\text{soil}}$  на повышении было в 2 раза ниже.  $R_{\text{soil}}$  с понижений была сопоставимо или ниже в 2–3 раза эмиссии на естественном болоте (среднем элементе рельефа между повышением и понижением).

$R_{\text{soil}}$  на сенокосе было  $3\text{--}5 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ : из-за большого содержания корней примерно в 2–4 раза выше, чем на повышении, и в 1.5–8.0 раз, чем на понижении участка торфодобычи, лишённого растительности. А также в 1.5–4.0 раза выше средних значений на естественном болоте. Максимальные значения  $R_{\text{soil}}$  на сенокосе были в 2010 и 2013 гг. Несмотря на отличие в количестве осадков за год и за май-сентябрь (548/257 в 2010 и 731/452 в 2013) в оба года  $R_{\text{soil}} \approx 5 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  (табл. 2). Возможно сказалась относительно высокая температура в мае-сентябре ( $18.4$  и  $16.2^\circ\text{C}$  соответственно).

*Суточная динамика NEE.* В период с 26 по 27.08.2015 г. проведены измерения суточного хода нетто-экосистемного обмена  $\text{CO}_2$  на всех изучаемых участках (рис. 2). Поглощение  $\text{CO}_2$  наблюдалось только на естественном болоте: в дневные часы  $100 \text{ мг С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , ночью была эмиссия до  $130 \text{ мг С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ . На сенокосе в дневное время эмиссия  $\text{CO}_2$  была  $10 \text{ мг С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , а в ночное достигала  $400 \text{ мг С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ . На участке добычи торфа суточное изменение NEE было

Таблица 1 – Климатические характеристики лет наблюдений

Параметр	2005	2008	2009	2010	2013	2014	2015
Бесснежный/зимний период, дней	214/151	229/136	240/125	234/131	223/142	239/126	224/141
Осадки за год/май–сентябрь, мм	574/330	810/490	751/351	548/257	731/452	468/256	656/429
T <sub>ср.</sub> воздуха за год/май–сентябрь, °C	+6.4/+15.5	+6.6/+14.1	+5.5/+15.0	+5.8/+18.4	+6.0/+16.2	+6.1/+16.1	+6.6/+15.3

Примечание: данные приведены для г. Дмитров, исключение составляет 2015 г., где данные приведены для г. Клин

Таблица 2 – Средние значения дыхания почвы и потока метана в бесснежный период, мг С м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>

Период	Торфодобыча			Сенокос		Естественное болото*	
	Канал	Межканавье		Канал	Межканавье	Повышение	Понижение
		повышение	понижение				
03.04.08–18.11.08	–	1650±0.07	410±90	–	3150±130	2580±280	290±80
	565.5±87.9	–	–	378.3±76.5	–	3.00±1.40	25.28±2.91
12.04.09–08.12.09	–	1200±60	–	–	3160±130	2630±190	340±80
	390.9±11.7	0.65±0.15	–	198.3±10.3	0.25±0.28	3.45±0.69	5.50±0.26
01.04.10–21.11.10	–	1910±70	–	–	4840±80	–	–
	507.3±44.4	–0.07±0.05	–	218.5±41.0	–0.11±0.03	–	–
17.04.13–26.11.13	–	1450±90	2010±90	–	5060±80	1950±80	–
	403.9±47.5	–0.37±0.70	1.09±0.22	413.4±21.5	–0.35±0.09	12.65±1.29	–
07.04.14–02.12.14	–	910±80	640±80	–	3480±130	2090±120	–
	143.5±9.7	–0.51±0.14	1.11±0.12	55.8±6.8	–0.59±0.11	15.10±1.90	–
05.04.15–15.11.15	–	1320±20	2430±20	–	3390±10	1670±10	–
	305.3±11.9	–0.08±0.01	0.36±0.09	87.2±2.9	–0.23±0.04	39.97±0.28	–

Примечание: верхнее значение – CO<sub>2</sub>, нижнее – CH<sub>4</sub>. \* – после 2010 г. точка перенесена на открытую часть болота, на среднюю по высоте часть микрорельефа. Здесь и далее приведено среднее значение ± стандартное отклонение.

выражено слабо, на повышении микрорельефа эмиссия  $\text{CO}_2$  была выше, чем на понижении  $\approx 100$  и  $50 \text{ мг С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$  соответственно. Возможно, на дренированном повышении  $R_{\text{soil}}$  формируется в более мощном слое торфа.

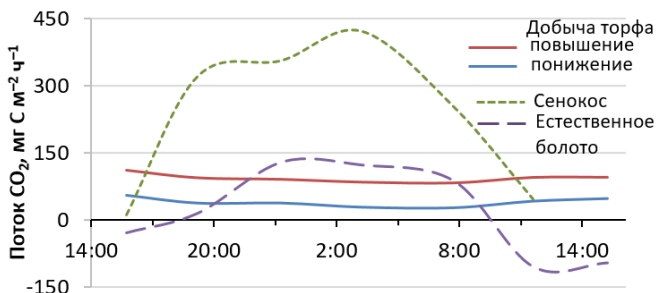


Рис. 2 – Суточная динамика НЕЕ на нарушенных и естественном участках

С учетом суточной динамики были рассчитаны значения НЕЕ для изучаемых участков за бесснежный период 2015 г. (рис. 3). Поглощение  $\text{CO}_2$  наблюдалось только на естественном болоте, на обоих нарушенных участках – эмиссия. Среднее между повышением и понижением участка торфодобычи значение НЕЕ составило  $\approx 2.9 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ , или почти в 2 раза больше, чем на сенокосе. В 2015 г. потери С на сенокосе были вдвое меньше, чем на заброшенном участке добычи торфа. Предполагаем, что залужение выработанных торфяников может снизить потери С от минерализации торфяной залежи.

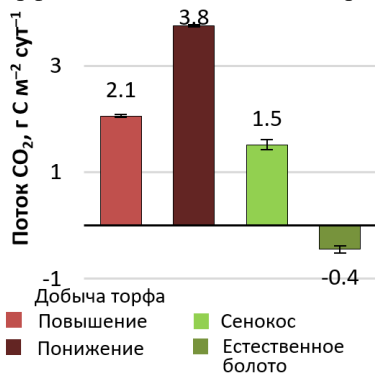


Рис. 3 – НЕЕ за бесснежный период 2015 на нарушенных и естественном участках болота

торфодобычи преобладало потребление  $\text{CH}_4$ , но в понижении – эмиссия. На участке сенокоса в межканавье наблюдалось потребление  $\text{CH}_4$ , сопоставимое с повышением на торфоразработке (рис. 4).

Из канала на торфоразработках эмиссия  $\text{CH}_4$  была в 1.5–3 раза выше, чем из канала сенокоса (рис. 5). Это может быть связано с более интенсивным

водным транспортом растворенного и газообразного  $\text{CH}_4$  в каналы из прилегающей торфяной залежи. Осадки не задерживаются растительностью, больше воды фильтруется вниз по профилю. Вынос  $\text{CH}_4$  болотными водами из залежи уже отмечался (Sirin et al., 1998). Возможно также интенсивное образование  $\text{CH}_4$  непосредственно в донных отложениях (Кизилова и др., 2011). При меньшей затененности древесно-кустарниковой растительностью канал на торфоразработках лучше прогревается, чем на сенокосе. Развитие водной растительности способствует поступлению свежей органики для метаногенеза (Сирин и др., 2012). После противопожарных мероприятий 2012 года эмиссия  $\text{CH}_4$  из канала сенокоса возросла к 2013 г. до  $413 \text{ мг С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ , но снизилась в 2014 и 2015 гг. до  $56$  и  $87 \text{ мг С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ , соответственно (табл. 2, рис. 5).

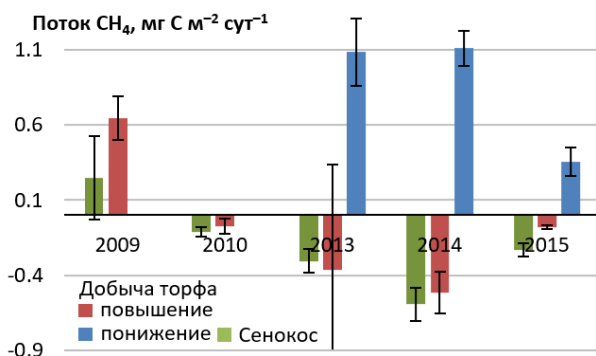


Рис. 4 – Средний за бесснежный период поток метана с межканавий участка торфодобычи и сенокоса

На естественном болоте эмиссия  $\text{CH}_4$  была значительно выше в понижении, чем на более сухом повышении: в 2008 году в 8 раз, но в 2009 г. только в 1.5 раза. За май-сентябрь в 2008 году выпало на 140 мм больше осадков, чем за аналогичный период 2009 г. (табл. 2). С 2013 по 2015 г. эмиссия  $\text{CH}_4$  составляла порядка  $10 \text{ мг С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  (табл. 2).

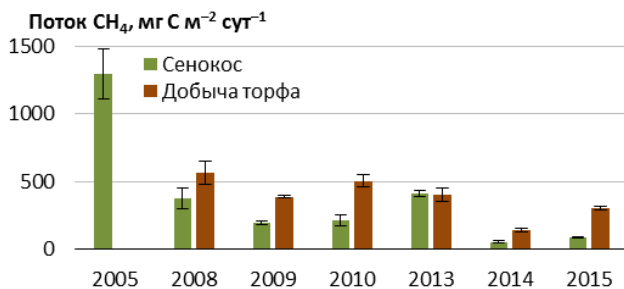


Рис. 5 – Средний за бесснежный период поток метана из каналов участка торфодобычи и сенокоса

Расстояние между осушительными каналами на изучаемых объектах – 40 м, на каждые 1000 м их длины приходится еще 40 м магистральных каналов. Ширина водного зеркала первых 1–2 м, вторых 2–3 м. На каналы приходится

4% площади объектов. На основании этого, а также соотношения понижений и повышений на участке торфодобычи (принято 1:1) и значений потоков из каналов и межканавий (табл. 2) можно оценить средние потоки по объектам (рис. 6).

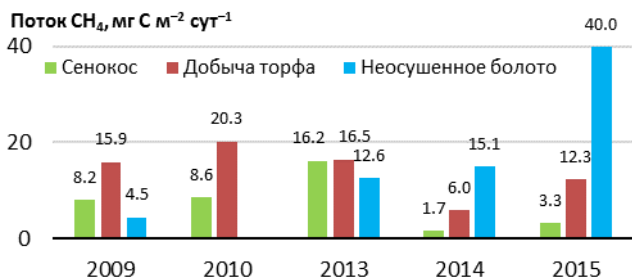


Рис. 6 – Средний за бесснежный период поток метана с неосушенного болота и осушенных объектов с учетом вклада каналов за 2009–2015 гг.

В 2009 и 2010 гг. эмиссия  $\text{CH}_4$  с сенокоса была в 2 раза ниже, чем с участка добычи торфа, а в 2013 году на обоих нарушенных участках была сопоставима с неосушенным болотом. Возможная причина – значительные осадки в мае-сентябре 2013 (табл. 1). Для сенокоса это может быть связано и с повышением уровня болотных вод в среднем с 80 до 40 см после противопожарных мероприятий в 2012 году. В 2014 и 2015 гг. эмиссия  $\text{CH}_4$  с сенокоса была в 3–4 раза ниже, чем с добычи торфа. Возможно, залужение выработанного торфяника может способствовать снижению эмиссии  $\text{CH}_4$  с осушенных площадей.

#### Глава 4. Влияние растительности и увлажнения на эмиссию метана из торфяной почвы (вегетационный опыт)

*Предпосылки проведения вегетационного опыта.* Полевые наблюдения на Дубненском болотном массиве выявили положительные потоки  $\text{CH}_4$  из осушенных торфяных почв. Поток имел непостоянный характер и был трудно уловим эпизодическими наблюдениями. Вегетационный эксперимент с торфяной почвой исследованных объектов был призван смоделировать различные условия, трудно контролируемые в естественной среде. Полевые объекты имели разный характер растительности (отсутствие на торфодобыче и залужение на сенокосе), поэтому в вегетационном эксперименте было уделено внимание влиянию различных вариантов растительности на эмиссию  $\text{CH}_4$ . В связи с актуальностью обводнения брошенных торфяников были рассмотрены разные варианты режима увлажнения. Переменное увлажнение имитировало естественные колебания влажности почвы, постоянно высокая влажность – подтопление.

Перед закладкой вегетационного опыта был проведен анализ химических и физических свойств верхнего слоя (0–20 см) торфяной почвы обоих осушенных участков, который не выявил кардинальных различий, что дало возможность сравнивать эти почвы при различных условиях, моделируемых в опыте. Проведенный инкубационный эксперимент с торфяной почвой не показал влияние подготовки почвы к вегетационному опыту (нарушение

сложения, сушка) на микробное сообщество. Была выявлена сезонная и суточная динамика эмиссии  $\text{CH}_4$ , с различными особенностями, связанными с условиями увлажнения и залужения.

*Характеристика торфяной почвы и величина фитомассы.* Физико-химические характеристики торфяного субстрата и почвы были весьма близки:  $\text{pH}_{\text{КС1}}$  – 4.1–4.2, зольность – 7.6–7.7%, НВ и ПВ для торфяного субстрата 313% и 405%, для монолитов 372% и 474%, соответственно. Надземная фитомасса в конце опыта при переменной и постоянной влажности была для тимофеевки 0.4 и 2.8, для монолитов – 8.5 и 10.0 г сухой массы на сосуд, соответственно. Подземная фитомасса при постоянной и переменной влажности составила 3 и 1 г на сосуд, для монолитов – 19 г (вне зависимости от влажности). Величина фитомассы характеризует степень залужения (Суворов и др., 2010).

*Сезонная динамика эмиссии  $\text{CH}_4$ .* Во всех вариантах наблюдалось преобладание эмиссии  $\text{CH}_4$  в течение эксперимента. Потоки (далее по тексту потоки приводятся на 1 кг сухой почвы) сильно различались по величине и динамике между стадиями залужения и вариантами влажности. Это видно по отдельным измерениям (рис. 7а,б) и по среднесуточным значениям (табл. 3). В летний период эмиссия  $\text{CH}_4$  из монолитов была существенно выше, чем для открытого торфа и тимофеевки: многократно при переменной влажности и до нескольких десятков раз при постоянной. Вероятно, эти различия в потоках связаны с залужением. Основной исходный материал метаногенеза – свежая органика, поступающая из корнеобитаемого слоя (Strack et al., 2008). При старом залужении это обеспечивает образование  $\text{CH}_4$ , которое усиливается при постоянно высокой влажности (Суворов и др., 2010).

При одинаковых условиях по влажности эмиссия  $\text{CH}_4$  незначительно различалась между вариантами без растений и с посевом тимофеевки (Чистотин и др., 2016). Для (1) и (2) стадии залужения поток  $\text{CH}_4$  был выше на 1–2 порядка при постоянной влажности (рис. 7а,б; табл. 3). Переменные условия подтвердили ключевое значение влажности для эмиссии  $\text{CH}_4$ . При постоянной влажности средняя летняя эмиссия  $\text{CH}_4$  из монолитов в 2008 г. в десятки раз превышала значения для других вариантов –  $32 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  и  $1.5\text{--}1.6 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  (табл. 3). Осенью и в 2009 г. монолиты, напротив, имели более низкое среднее выделение (Чистотин и др., 2016). Зафиксирован отклик эмиссии  $\text{CH}_4$  на увлажнение почвы после полива до 90% ПВ: рост на порядок в течение 5 дней. Это говорит о возможности всплеска эмиссии  $\text{CH}_4$  из осушенных торфяных почв при увлажнении, что может не фиксироваться эпизодическими и даже периодическими наблюдениями.

При переменной влажности поток  $\text{CH}_4$  из монолитов летом 2008 г. был выше в 3 раза, чем при двух других вариантах (табл. 3). Далее в тех же вариантах поддерживалась постоянно высокая влажность. В 2009 году эмиссия из монолитов экспоненциально росла до июня, следуя ходу температуры. Вероятно, при избыточном увлажнении возникли благоприятные условия для метаногенеза при наличии доступного органического вещества из почвы. В июле

2009 г. эмиссия снизилась на порядок: из-за сработки доступного материала или по другим причинам (Чистотин и др., 2016).

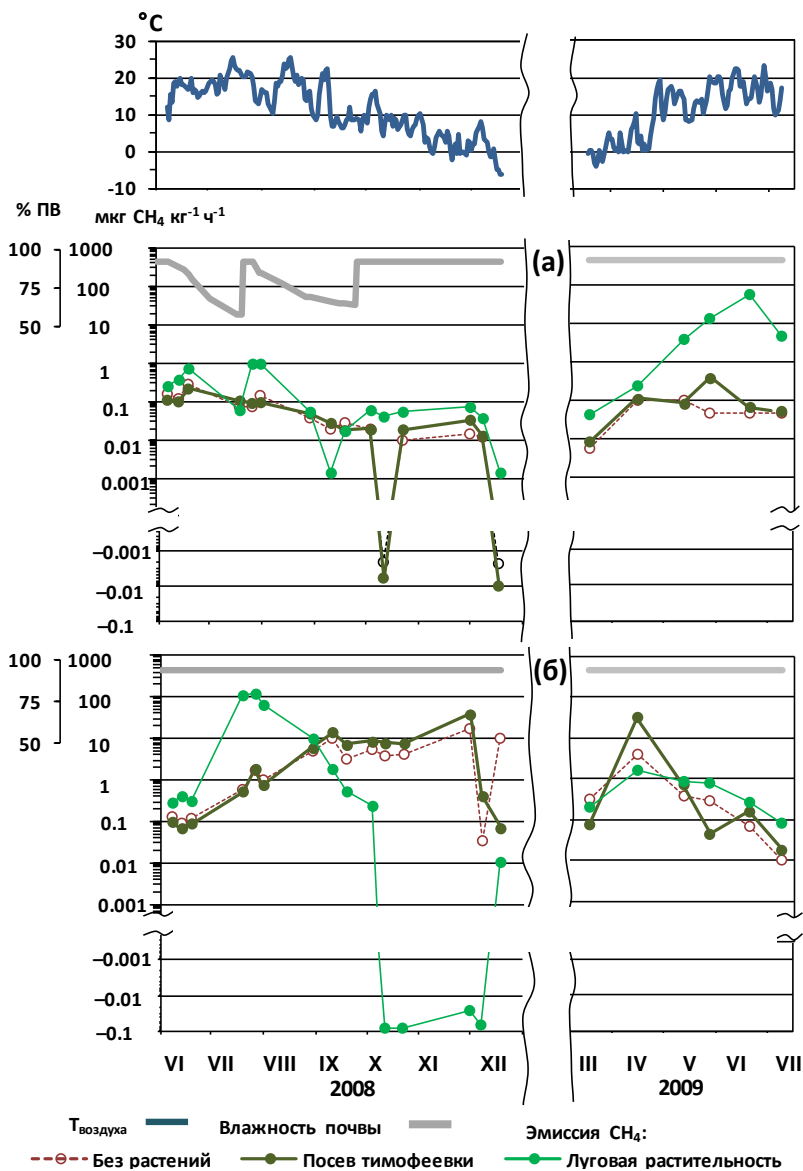


Рис. 7 – Сезонная динамика выделения (поглощения) метана при переменной (а) и при постоянно высокой (б) влажности (Чистотин и др., 2016).

*Суточная динамика потоков  $CH_4$ .* При суточных измерениях эмиссия  $CH_4$ , следовала ходу температуры: более отчетливо при переменной влажности и менее при высокой (рис. 8). При переменной влажности проявлялись вечерние максимумы, утренние минимумы эмиссии и снижающийся тренд, следующий ходу температуры. Но для монолитов этот тренд выражен не был. В вариантах с переменной влажностью (около 60% ПВ) при пониженной температуре наблюдалось нетто-поглощение  $CH_4$ , наиболее выраженное для монолитов. Связь между потоком  $CH_4$  и температурой почвы была значимой для открытого торфа при высокой влажности, и для тимофеевки (при обоих типах влажности), значения  $Q_{10}$  составили 4.6–6.2 (Чистотин и др., 2016).

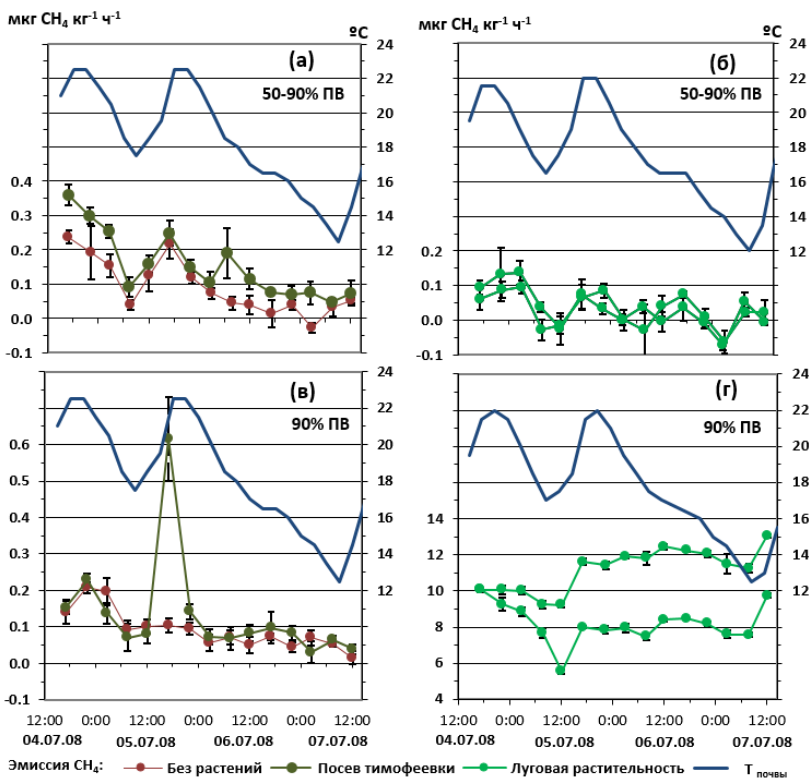


Рис. 8 – Суточная динамика выделения (поглощения)  $CH_4$  при переменной (а, б) и при постоянно высокой (в, г) влажности (Чистотин и др., 2016).

*Связь потоков  $CH_4$  с температурой и влажностью почвы.* Был проведен корреляционный анализ данных при переменной влажности с июня по сентябрь 2008 г. Независимые переменные – средняя за 10 сут. перед измерением влажность почвы и средняя за экспозицию температура почвы. Для всех вариантов залужения выявлена значимая экспоненциальная зависимость от этих факто-

ров (рис. 9): множественный коэффициент корреляции для отдельных вариантов – от 0.83 до 0.86; частные коэффициенты корреляции 0.59–0.75 и 0.66–0.81 для температуры и влажности, соответственно (Чистотин и др., 2016).

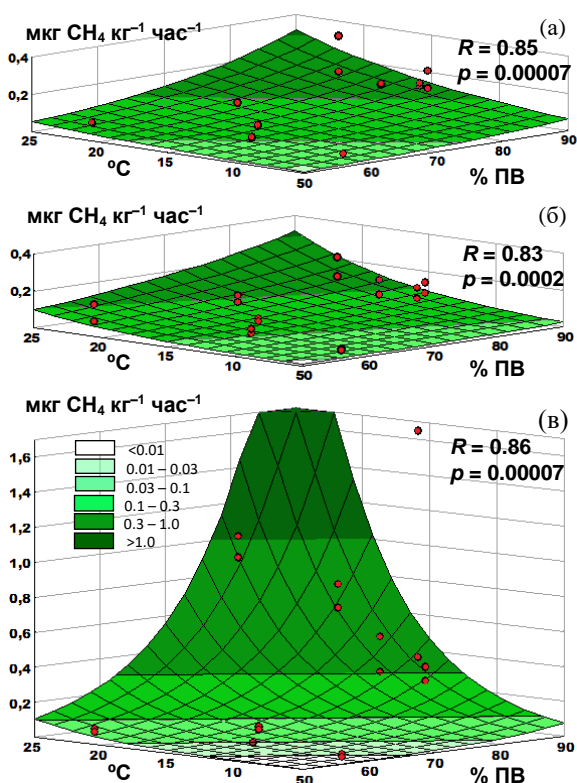


Рис. 9 – Выделение метана ( $q$ ,  $\text{мг кг}^{-1} \text{ч}^{-1}$ ) в зависимости от влажности ( $w$ , % ПВ) и температуры ( $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) почвы: (а) без растений, (б) посев тимофеевки, (в) луговая растительность.  $R$  – линейный коэффициент множественной корреляции,  $p$  – уровень значимости (Чистотин и др., 2016).

онный эксперимент все же зафиксировал (рис. 7) выделение (Чистотин и др., 2016).

*Влияние растительности на поток метана.* Среднее за весь период выделение  $\text{CH}_4$  при постоянно высокой влажности в вариантах открытого торфа, тимофеевки и монолитов было одного порядка – 3.3, 8.0 и 9.3  $\text{мг м}^{-2} \text{сут}^{-1}$ , при переменной влажности – 0.06, 0.08 и 4.3  $\text{мг м}^{-2} \text{сут}^{-1}$ . В обоих случаях средняя эмиссия увеличивалась от степени залуженности, но имела разный порядок. Вегетационный опыт не может полностью смоделировать полевые условия (температурный и водный режимы, сложение почвы), но его результаты

*Образование и потребление  $\text{CH}_4$  в конце опыта.* Для монолитов потенциальная активность метаногенеза была на два порядка выше, чем для открытого торфа:  $580 \pm 350$  и  $1.8 \pm 0.1$  (при переменной влажности);  $220 \pm 180$  и  $1.2 \pm 0.8$  (при постоянной)  $\text{нг CH}_4$  на 1 г сухой почвы в сутки. Для монолитов при переменном (в первый год) увлажнении активность метаногенеза в конце опыта была выше, что соответствует более высокой нетто-эмиссии во второй год. При инкубации открытого торфа в атмосфере воздуха наблюдался рост концентрации  $\text{CH}_4$ . Почва монолитов потребляла  $\text{CH}_4$ : образование  $\text{CH}_4$  перекрывалось высокой активностью метанооксиляющих микроорганизмов. Однако вегетационный

Таблица 3 – Поток CH<sub>4</sub> в зависимости от залужения и увлажнения. Вегетационный опыт (Чистотин и др., 2016)

Период	Длительность, сут	Средний удельный поток CH <sub>4</sub> за период, мг м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup>					
		Переменная влажность (50–90% ПВ)			Постоянно высокая влажность (90% ПВ)		
		без растений*	первый год залужения*	20 лет залужения**	без растений *	первый год залужения*	20 лет залужения**
Весь период наблюдений	306	0.064±0.010	0.084±0.007	4.3±3.2	3.3±1.3	8.0±4.0	9.3±1.3
2008 г. (06.06–17.12)	194	0.064±0.009	0.059±0.014	0.183±0.021	4.6±1.7	8.2±3.0	14.4±2.2
2009 г. (17.03–07.07)	112	0.065±0.011	0.128±0.005	11.5±8.8	1.12±0.48	7.7±5.7	0.54±0.19
Лето 2008 г. (06.06–31.08)	86	0.127±0.024	0.109±0.032	0.369±0.051	1.46±0.20	1.60±0.04	32.0±5.4
Осень 2008 г. (01.09–30.11)	91	0.014±0.003	0.021±0.003	0.037±0.005	7.4±2.7	14.8±5.9	0.45±0.43
Весна 2009 г. (17.03–31.05)	75	0.074±0.013	0.130±0.003	2.7±1.1	1.63±0.72	11.4±8.5	0.69±0.19

Примечание: приведены средние по вариантам и их стандартные ошибки. \* Почва участка добычи торфа. \*\* Почва сенокосного участка

Таблица 5 – Интегральные величины дыхания почвы в бесснежный период, г С-СО<sub>2</sub> м<sup>-2</sup> (Суворов и др., 2015)

Участок		2005	2008	2009	2010	2013	2014
Бесснежный/зимний период, дни		214/151	229/136	240/125	234/131	223/142	239/126
Осадки за год/май-сент., мм		574/330	810/490	751/351	548/257	731/452	468/256
T <sub>возд.</sub> средняя за год/ май-сент., °C		+6.4/+15.5	+6.6/+14.1	+5.5/+15.0	+5.8/+18.4	+6.0/+16.1	+6.1/+16.1
Добыча торфа	повышение	138.4±13.9	377.3±15.9	288.3±14.5	447.4±17.1	322.4±20.5	217.3±18.7
	понижение	148.3±29.6	93.3±20.8	–	–	447.6±20.6	152.7±18.6
Сенокос	межканавье	1127.0±45.1	721.2±29.3	–	1131.7±17.9	1128.2±18.3	832.3±30.2
Естественное болото	повышение	313.7±132.1	592.0±64.9	631.7±46.6	647.1±67.5	434.3±17.8*	498.4±29.6*
	понижение	250.2±12.5	66.8±18.6	82.3±19.7	107.7±42.0		

Примечание: \* – до 2010 г. измерения проводились в облесенной части болотного массива (на повышении и на понижении микрорельефа), после 2010 – на открытой части массива между повышением и понижением микрорельефа

свидетельствуют о влиянии растительности на потоки  $\text{CH}_4$  из осушенных торфяных почв. Разница между выделением  $\text{CH}_4$  из открытой, залуженной и покрытой луговой растительностью почвы очевидна (Чистотин и др., 2016).

Вегетационный опыт подтвердил данные измерений о выделении  $\text{CH}_4$  из осушенных торфяных почв при определенном увлажнении. Поэтому необходим учет осушенных торфяников как источников метана (IPCC ..., 2014, Wilson et al., 2016, Joosten et al., 2016). Эмиссия небольшая, но площадь таких земель значительна, и их вклад может быть весомым. Увеличение эмиссии метана при обводнении – один из частых аргументов оппонентов этих мероприятий, и более обоснованный учет эмиссии метана из осушенных торфяных почв до обводнения поможет скорректировать эти опасения (Чистотин и др., 2016).

## Глава 5. Потери углерода при хозяйственном использовании лесоболотной экосистемы

*Исходный запас и скорость накопления углерода в торфе.* На неосушенном участке торфяная залежь мощностью 263 см на 65% состоит из низинных торфов, последовательно перекрытых сверху переходными и верховыми (рис. 10). На осушенных участках ее верхняя часть мощностью  $>0.5$  м (сенокос) и  $>1$  м (торфодобыча) была удалена при разработке. По строению сохранившейся части залежи осушенные участки не имеют принципиальных отличий от неосушенного (рис. 10). Все три рассматриваемых участка генетически близки и, соответственно, сравнимы по скорости накопления и запасу углерода до осушения.

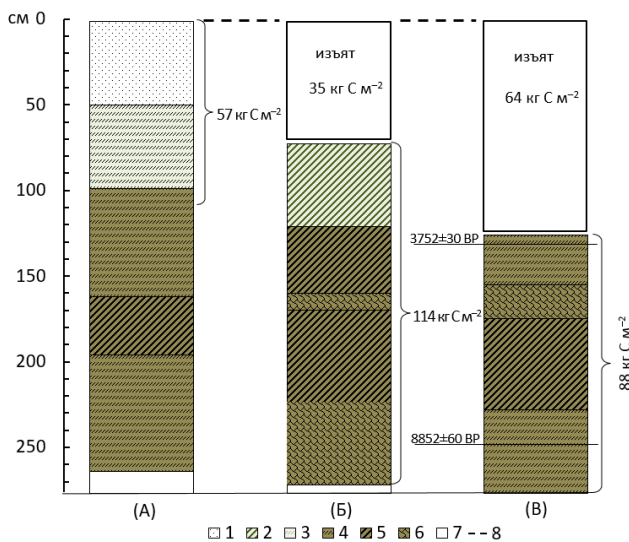


Рис. 10 – Стратиграфия торфяной залежи: А – естественное болото; Б – сенокос; В – торфодобыча. Торфа: верховой: 1 – сосново-сфагновый; переходные: 2 – древесный, 3 – травяной; низинные: 4 – травяной; 5 – древесный; 6 – древесно-травяной. 7 – изъятый слой торфа, 8 – исходная дневная поверхность.

Расчет исходного запаса  $\text{C}$  в торфяной залежи и его потерь при добыче был основан на допущениях: уровень поверхности для всех участков был

одинаков до осушения и остался неизменным на ненарушенном участке; запасы С в сохранившейся залежи соответствуют исходным до осушения (потери при минерализации не учитываются); запас С в сработанных горизонтах равен запасу аналогичных горизонтов ненарушенного участка (Суворов и др., 2014). Исходные запасы С составили для участков естественного болота, сенокоса и добычи торфа 145, 149 и 152 кг С м<sup>-2</sup> соответственно. Возраст торфа для отметок 150 см и 30 см от подошвы залежи был определен как 3752±30 и 8852±60 лет (cal BP) соответственно. Кажущаяся скорость накопления (LORCA) составила 14–17 г С м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>, что соотносится с имеющимися значениями долговременного накопления торфа для этой природной зоны (Минаева и др., 2008).

*Потери углерода на стадии осушения и подготовки территории.* Исходя из допущения об исходной близости рассматриваемых участков были использованы данные о запасах С фитомассы на неосушенном болоте (табл. 4). Число деревьев на п/п 1, 2 и 3 – 8,0, 3,2, 8,4 тыс. шт./га, средний диаметр – 19, 16, 54 мм, средняя приведенная по диаметру высота – 118, 100, 300 см соответственно. Возраст – от 10 до 40 лет. Доля подземной части от общей фитомассы сосны в болотных биогеоценозах оценивается от 10 до 38% (Базилевич, 1967, Вомперский, Иванов, 1982, Валетов и др., 1985, Finer, 1989, Махатков и др., 2007, Коронатова, Косых, 2014), достигая 44,9% (Vasander, 1982). Было использовано значение 25% как наиболее близкое рассматриваемым объектам. Доля подземной фитомассы травяно-кустарничкового яруса сосново-кустарничково-сфагновых биогеоценозов оценивается от 44 до 85% (Базилевич, 1967, Махатков и др., 2007, Головацкая, 2009). В наших расчетах было принято 70%. Запас С фитомассы типичных участков верхового болотного массива – облесенного склона (п/п 3) и более открытой его части (п/п 1 и 2) различается незначительно, составляя ≈ 20 т С га<sup>-1</sup> (табл. 4). Для добычи торфа часто осваиваются более облесенные болота и потери С фитомассы могут быть больше.

Таблица 4 – Запас углерода в фитомассе на неосушенном участке

Фракция фитомассы	Запас углерода по пробным площадям, т С га <sup>-1</sup>		
	1	2	3
<i>Мох*</i> повыш. / пониж. / среднее	17.9/12.8/15.4	10.3/15.7/13.0	12.3/9.1/10.7
<i>Травяно-кустарничковый ярус</i> надземн. / подземн. / всего	1.6/(3.6)**/(5.2)	2.0/(4.6)/(6.6)	0.7/(1.5)/(2.2)
<i>Древесный ярус</i> надземн. / подземн. / всего	0.7/(0.2)/(0.9)	0.2/(0.1)/(0.3)	7.1/(2.3)/(9.4)
<i>Вся фитомасса</i> надземн. / подземн. / всего	17.7/(3.8)/(21.5)	15.2/(4.7)/(19.9)	18.5/(3.8)/(22.3)

Примечание: \* – включая очес, \*\* – в скобках приведены значения, рассчитанные с использованием литературных данных.

*Потери углерода при добыче торфа.* Для участков торфодобычи и сенокоса было удалено 121 и 66 см торфа, что соответствует изъятию 640 и 350 т С га<sup>-1</sup>. Разработка этих участков началась примерно в 1980 году: в первом случае активно велась до 2006 года, во втором вероятно до 1991 г. При

периоде добычи 26 и 11 лет средние потери С составляли 25 и 32 т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>, соответственно. Это соответствует изъятию  $\approx 5$  см торфа год<sup>-1</sup>, что многократно меньше нормативной добычи (Соколов, 1982), и ее активное ведение может приводить к существенно большим потерям углерода.

*Потери углерода при минерализации торфяной залежи.* Для их оценки измерялось дыхание почвы, которое на участке торфоразработки, где нет растений, характеризует потерю С от минерализации; на сенокосе возникает задача разделения автотрофного и гетеротрофного дыхания. Дыхание почвы измерялось с 2005 по 2014 г. в основном в бесснежный период (табл. 5, стр. 17). Суточная динамика не учитывалась. Зимние потоки CO<sub>2</sub> измерялись эпизодически; медиана его значения для участка торфодобычи, сенокоса и естественного болота составила 6.4, 33.8 и 12.0 мг С-CO<sub>2</sub> м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup> соответственно. Последнее значение сопоставимо с зимним среднесуточным потоком CO<sub>2</sub>, полученным методом микровихревых пульсаций на мезо-олиготрофном болоте в Республике Коми – 14 мг С-CO<sub>2</sub> м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup> (Михайлов и др., 2013). Исходя из средних значений эмиссии CO<sub>2</sub> в зимний период и его продолжительности, были сделаны оценки для каждого года наблюдений. Их средние значения для изучаемых объектов составили  $\approx 20$ , 110 и 40 мг С-CO<sub>2</sub> м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup> соответственно.

*Оценки баланса углерода на участке сенокоса и торфодобычи.* Для участка торфодобычи эмиссия CO<sub>2</sub> с учетом зимнего периода составляла от 160 до 470 г С м<sup>-2</sup> (1.6–4.7 т С га<sup>-1</sup>). Без учета водной и ветровой эрозии это основные текущие потери С при данном землепользовании. Они в 10–30 раз превышают среднюю скорость накопления (LORCA) С в торфе 0.14–0.17 т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>. На участке заброшенной торфодобычи за 10 лет минерализуется слой торфа, равный изымаемому за год при не очень активной его разработке.

По данным на 5.09.2008 г. надземная фитомасса на сенокосе была 490, подземная (в слое 0–30 см) – 1099 г сухого вещества м<sup>-2</sup> с распределением между слоями 0–10, 10–20, 20–30 см – 914 (83%), 144 (13%) и 41(4%) г м<sup>-2</sup> соответственно. Значения занижены по причине снижения подземной фитомассы к моменту определения по сравнению с максимальной за вегетационный период, неполного учета корней в слое 0–30 см и неучтенных подземных органов в слое >30 см. Согласно оценкам скорости оборота подземной фитомассы (подземная чистая первичная продуктивность / максимальная подземная фитомасса) для ряда экосистем (Gill, Jackson, 2000), нижний и верхний квартили скорости оборота для 13 луговых сообществ со среднегодовой температурой воздуха от –5 до 10°C составили 0.31 и 0.67 год<sup>-1</sup>. Принимая эти значения для оборота подземной фитомассы, 1 год<sup>-1</sup> для надземной, содержание С в сухой массе 50% и используя наши данные о фитомассе, получаем для сенокоса консервативную и повышенную оценки суммарной чистой первичной продуктивности – 415 и 613 г С м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>.

Дыхание почвы на сенокосе за 2008 г. с учетом зимнего периода составило 831 г С м<sup>-2</sup>. Согласно оценкам вклада дыхания гетеротрофов в дыхание почвы (Subke et al., 2006), для выборки из 12 травянистых сообществ боре-

ального и умеренно теплого поясов, нижний и верхний квартили этого показателя составили 60 и 68%. При использовании этих значений дыхание гетеротрофов на сенокосе составляет  $499\text{--}565 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ , а чистая продуктивность экосистемы сенокоса будет в интервале от  $-83$  до  $+48 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$  ( $-0.83 - +0.48 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ ): отрицательная часть интервала характеризует потерю С от минерализации торфа близкую  $1 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ . Измерения прозрачной камерой 23.08.2013 г. в 2-кратной повторности дали оценки NEE  $82 \pm 10$ ,  $50 \pm 25$  на сенокосе и  $-47 \pm 23$ ,  $-57 \pm 14 \text{ мг С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$  на естественном болоте. Полученные данные NEE дополнительно свидетельствуют об отрицательном балансе С (экосистема «источник» углерода) в первом случае и положительном (экосистема является «стоком» углерода) во втором.

Сенокосный участок на начало исследований имел среднюю интенсивность эксплуатации (сенокосение 1 раз в год и реже) при рекомендуемом среднем количестве укосов для влажных лугов лесной зоны 1.5 в год. Сенокосение изымает более половины надземной фитомассы (Ларин, 1969), а поступление опада и депонирование С в почве снижается по сравнению с неиспользуемыми лугами. При допущении об изъятии 50% наземной фитомассы, для условий 2008 г. отрицательный баланс С на сенокосе составит  $206$  и  $74 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$  ( $2.0$  и  $0.7 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ ). При интенсивном луговодстве потери С могут возрасти, а при использовании торфяников для выращивания зерновых или пропашных культур они могут быть выше на порядок: для Финляндии, Швеции и Голландии они составили от  $20$  до  $115 \text{ т CO}_2 \text{ га год}^{-1}$  или  $5.5\text{--}31.3 \text{ т С-CO}_2 \text{ га год}^{-1}$  (Klemetsson et al., 1997).

Даже с учетом изъятия части фитомассы при сенокосении, потери С на сенокосе близки к потерям на заброшенных торфоразработках или меньше их. Наличие луговой растительности может стимулировать минерализацию торфа, но одновременно снижает потери С при водной и ветровой эрозии. Поэтому рекультивация под сенокосные угодья – наиболее приемлемый вариант использования осушенных торфяников с точки зрения снижения потерь углерода торфяных залежей и его поступления в виде  $\text{CO}_2$  в атмосферу.

## Выводы

1. Изучены пространственно-временные особенности дыхания почвы, нетто-экосистемного обмена, эмиссии метана, а также потери углерода при осушении и использовании лесоболотной экосистемы для добычи торфа и сельского хозяйства (сенокос). Натурные данные о возможной эмиссии метана из межканавий осушенных торфяников подтверждены вегетационным опытом, моделирующим влияние увлажнения и растительности на эмиссию метана.
2. Дыхание почвы на сенокосе было 2.7 раз выше (диапазон и среднее за годы наблюдений –  $3.1\text{--}5.1$  и  $3.8 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ), чем на участке добычи торфа (повышение –  $0.9\text{--}1.9$  и  $1.4 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ; понижение –  $0.4\text{--}2.4$  и те же  $1.4 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ). На естественном болоте оно составляет  $2.6$ ,  $0.3$  и  $2.0 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  на повышении, понижении и промежуточном положении соответственно.

3. Эмиссия метана из осушительных каналов на участке торфодобычи была выше в 1.5–3.0 раза, чем на сенокосе. При доле занимаемой площади на изучаемых объектах 4% их среднесуточная эмиссия  $\text{CH}_4$  в бесснежный период может достигать  $n \times 100 \text{ мг С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ . С учетом вклада каналов осушенные торфяники являются источником метана, а во влажные годы значения их эмиссии могут быть сопоставимы с потоками из естественных болот. Установлено, что межканавные пространства осушенных торфяников также могут быть источниками  $\text{CH}_4$ . С учетом вклада каналов поток  $\text{CH}_4$  с сенокоса был 2–4 раза ниже аналогичного показателя участка торфодобычи. Залужение может снижать эмиссию  $\text{CH}_4$  из осушенных торфяников при стабильном увлажнении.

4. Вегетационный опыт с осушенной торфяной почвой, моделирующий три стадии залужения (открытый торф, первый год залужения, 20 лет залужения) при двух вариантах увлажнения (переменное и постоянно высокое), показал положительный поток метана в летний период для всех вариантов эксперимента (от 0.01 до 100  $\text{мкг CH}_4 \text{ кг}^{-1} \text{ ч}^{-1}$ ). При постоянном и переменном увлажнении эмиссия  $\text{CH}_4$  увеличивалась по мере залужения торфяной почвы. При переменном увлажнении эмиссия  $\text{CH}_4$  за весь период наблюдений была на два порядка выше при моделировании стадии двадцатилетнего залужения, чем на стадиях открытого торфа или первого года после залужения. При постоянном увлажнении эмиссия  $\text{CH}_4$  за весь период наблюдений между стадиями залужения были одного порядка. Поток  $\text{CH}_4$  между вариантами увлажнения различался на два порядка. Вегетационный опыт подтвердил данные полевых измерений о возможном выделении метана из осушенных торфяных почв. Эмиссия  $\text{CH}_4$  может быть небольшой и непостоянной, но с учетом площадей должна учитываться как для торфоразработок, так и сельскохозяйственных земель.

5. Интенсивное подтопление залуженных торфяных почв может способствовать бóльшей эмиссии  $\text{CH}_4$ , чем открытого торфяного грунта. Это необходимо учитывать при проведении мероприятий по обводнению и рекультивации осушенных и не используемых в настоящее время торфяных почв.

6. При удалении растительного покрова после осушения было потеряно 20  $\text{т С га}^{-1}$ . В зависимости от длительности добычи торфа было изъято  $\approx 350$  и 640  $\text{т С га}^{-1}$  или 23 и 42% от исходного запаса С залежи. Потери С при разложении торфа на участке брошенной торфодобычи составили от 1.6 до 4.7  $\text{т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ , что на порядок выше средней скорости торфонакопления за период существования изученной лесоболотной экосистемы (0.14–0.17  $\text{т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ ). В результате минерализации за 10 лет терялось количество С, изымаемое за 1 средний год добычи торфа. На примере 2008 года чистая продуктивность экосистемы для сенокоса была оценена от –0.8 до +0.5  $\text{т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ . С учетом изъятия при сенокосении 50% наземной фитомассы, потери С могли составить от 2.06 до 0.74  $\text{т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ , а при интенсивном луговодстве могли быть и больше. Для участка торфодобычи в тот же год потери С только с эмиссией  $\text{CO}_2$  были в 2–4 раза больше  $\approx 4.0 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ .

7. Сенокосы на осушенных и частично выработанных торфяниках могут рассматриваться как щадящая форма использования этих земель как с точки зрения потерь углерода в результате минерализации, так и эмиссии метана. Неиспользуемые осушенные торфяники продолжают терять углерод, накопленный в торфе, который в виде CO<sub>2</sub> поступает в атмосферу. При отсутствии оснований возвращения в хозяйственный оборот их необходимо обводнять для искусственного заболачивания, в том числе с целью снижения потерь углерода.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах из списка ВАК:*

**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.

**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.

Чистотин М.В., **Суворов Г.Г.**, Сирин А.А. Динамика эмиссии метана из осушенной торфяной почвы в зависимости от растительности и режима увлажнения: результаты вегетационного эксперимента // *Агрохимия*. 2016. № 12. С. 20–33.

*Другие публикации:*

**Суворов Г.Г.**, Чистотин М.В. Эмиссия метана из торфяной почвы торфо-разработок разных стадий залужения (вегетационный опыт) // Тез. докл. 13-ая международная пушинская школа-конференция молодых ученых «Биология – наука XXI века» (28 сентября – 2 октября 2009). Пушино. 2009. С. 275.

Sirin A., Chistotin M., **Suvorov G.** et al. Drained peatlands used for extraction and agriculture: biogeochemical status with special attention to greenhouse gas fluxes and rewetting. *Geophysical Research Abstracts*, 2010. Vol. 12, EGU2010-11623.

**Суворов Г.Г.**, Чистотин М.В. Сирин А.А. Потенциальная активность метаногенеза и метаноокисления в осушенной и естественной торфяной почве. // Биосферные функции почвенного покрова. Мат-лы Всеросс. научной конф. 8–12 ноября 2010: Тез. докл. Пушино. С. 296.

Sirin A.A., **Suvorov G.G.**, Glagolev M.V., Chistotin M.V. Methane emission from canals of anthropogenically changed peatlands // Вомперский С.Э. (ред.). Мат-лы третьего между. полевого симп. «Западно-сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее» (Ханты-Мансийск, 27 июня – 5 июля 2011 г.). Новосибирск: ООО «Талер-Пресс». С. 135–136.

Сирин А.А., **Суворов Г.Г.**, Глаголев М.В. и др. Антропогенные изменения торфяных болот в России: возможные последствия для эмиссии и поглощения парниковых газов. Там же. С. 200–201.

Чистотин М.В., **Суворов Г.Г.**, Сирин А.А., Минаева Т.Ю. Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осушенного боло-

та в Московской области // Тез. докл. межд. научн. конф. «Резервуары и потоки углерода в лесных и болотных экосистемах бореальной зоны» (Сыктывкар, 26-30 сент. 2011 г.). Сыктывкар: Коми НЦ Уро РАН. С. 114–115.

Sirin A., **Suvorov G.**, Glagolev M. et al. Biogeochemical role and greenhouse gas emissions from hydrological elements of anthropogenically changed peatlands. Geophysical Research Abstracts. Vol. 13, EGU2011-12677, 2011. P.1.

Sirin A., **Suvorov G.**, Glagolev M. et al. Considering methane emissions from abandoned drained peatlands reduce negative effect of their potential rise after rewetting // Abstr. 14th Intern. Peat Congr. Stockholm, June 3–8. 2012. P. 297–298.

Сирин А.А., **Суворов Г.Г.**, Чистотин М.В., Глаголев М.В. О значениях эмиссии метана из осушительных каналов // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2012. Т. 3. № 2(6). с. EDCCr0005.

**Суворов Г.Г.**, Чистотин М.В., Сирин А.А., Минаева Т.Ю. Потери углерода лесоболотной экосистемой при хозяйственном использовании (на примере Дубненского болотного массива, Московская область) // Тез. докл. десятого Сибирского совещ. по климатологическому мониторингу (Томск, 14–17 окт. 2013 г.) С. 267–269.

Minayeva T., Silvius M., Bednar J., Schrier A., Sirin A., **Suvorov G.**, Maslov A. et al. The experience of a large scale rewetting project for climate change mitigation and adaptation. In: Tolvanen A. & Hekkala A-M. (eds.). 2014. The 9th European Conference on Ecological Restoration – Abstracts. P. 99.

Sirin A., **Suvorov G.**, Glagolev M. et al. Zero methane-emitting peatlands: biogeochemical features and forecasting response to environmental change // Geophysical Research Abstracts. 2014. V. 16. P. EGU2014-10610.

**Суворов Г.Г.**, Чистотин М.В., Сирин А.А. Потери углерода при осушении и хозяйственном использовании лесоболотных экосистем // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее. Мат-лы четвертого межд. полевого симп. (Новосибирск, 4–17 авг. 2014). Томск: Изд-во Том. унта. 2014. С. 223–225.

**Суворов Г.Г.**, Чистотин М.В., Сирин А.А. Потери углерода осушенным лесоболотным биогеоценозом при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании в Московской области // Мат-лы докл. VI Всеросс. научн. конф. «Фундаментальные и прикладные вопросы лесного почвоведения» (Сыктывкар, 14–19 сент. 2015). Сыктывкар: Коми НЦ Уро РАН. С. 221–223.

Сирин А.А., **Суворов Г.Г.**, Чистотин М.В. и др. Влияние использования и восстановления торфяных болот на составляющие их углеродного баланса: опыт поэтапного комплексного изучения // Всеросс. совещ. «Стационарные экологические исследования: опыт, цели, методология, проблемы организации» (Тверская обл., Нелидовский район, ЦЛГПБЗ, 15–19 августа 2016) М: Товарищество научных изданий КМК. 2016 С. 167–171.