

УДК 631.433:581.55:631.432.25:631.445.12

## ВЛИЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И РЕЖИМА УВЛАЖНЕНИЯ НА ЭМИССИЮ МЕТАНА ИЗ ОСУШЕННОЙ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЫ\*

© 2010 г. Г.Г. Суворов<sup>1</sup>, М.В. Чистотин<sup>2</sup>, А.А. Сири<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт лесоведения РАН

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

E-mail: suvorovg@gmail.com

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова  
127550 Москва, ул. Прянишникова 31а, Россия

Поступила в редакцию 08.06.2010 г.

В вегетационном опыте, моделирующем стадии формирования сенокоса на осушенной торфяной почве, эмиссия метана под сенокосом 20-летнего возраста была на 1–2 порядка больше по сравнению с открытым торфом и первым годом после посева многолетних трав. Для всех стадий залужения отмечено большее выделение  $\text{CH}_4$  при постоянно высокой влажности почвы по сравнению с переменной. Полученные данные могут быть полезными для оптимизации технологии обводнения и рекультивации осушенных и неиспользуемых в настоящее время торфяных почв.

*Ключевые слова:* растительность, режим увлажнения, эмиссия метана, осушенная торфяная почва.

### ВВЕДЕНИЕ

Торфяные сильно увлажненные почвы являются одним из основных естественных источников метана, второго по значимости после  $\text{CO}_2$  парникового газа. Ежегодный вклад северных (нетропических) торфяных болот может составлять по разным оценкам до 5% общего поступления метана в атмосферу [1, 2]. Метан имеет существенно больший потенциал глобального потепления (ПГП), чем диоксид углерода: в 25 и 72 раза при 100- и 20-летнем сроках осреднения соответственно [3]. В связи с этим торфяные болота нередко рассматриваются в отрицательном контексте с точки зрения их влияния на газовый состав атмосферы и изменение климата. Применимость ПГП в отношении естественных болот, длительность существования которых многократно превышает сроки осреднения, является дискуссионной [1]. Вместе с тем учитывая депонирование углерода атмосферы в торфе, долговременная положительная климатическая роль болот не вызывает сомнения. Однако это не касается хозяйственных воздействий на болота, имеющих временной масштаб, соизмеримый с используемыми сроками осреднения. В этом случае учет ПГП парниковых газов является необходимым, что повышает относительную значимость метана для оценки климатических последствий воздействия на торфяные почвы.

Наиболее заметные антропогенные изменения потоков метана из торфяных почв связаны с осушением и освоением болот для добычи торфа и сельскохозяйственного использования. По данным земельного учета, площадь нарушенных торфоразработками и не рекультивированных земель в России составляет  $< 1/4$  млн. га [4]. Эта оценка занижена за счет недоучета небольших участков и брошенных в начале 1990-х гг. невыработанных месторождений, переданных позднее без рекультивации в земли запаса и других категорий. Ранее, большую часть использованных месторождений торфа после частичной выработки рекультивировали и использовали как сенокосы, пастбища, для выращивания овощных культур, поскольку увеличение сельскохозяйственных площадей являлось приоритетным. Большую площадь болот непосредственно осушали и осваивали для этих целей. В России насчитывается  $> 5$  млн. га мелиорированных для сельского хозяйства избыточно увлажненных земель, большей частью представленных торфяными почвами [4]. Значительная их часть заброшена, не используется и вряд ли будет вовлечена в сельскохозяйственный оборот. Интенсивный дренаж обеспечивает глубокое стояние грунтовых вод и низкую влажность торфяных почв. Зброшенне торфоразработки – это главным образом интенсивно дренированные поля фрезерной добычи, которые плохо заселяются растительностью: после 10-летнего периода неиспользования и более они во многих случаях имеют участки открытого торфа и сильно высыхают при засухе. На заброшенных полях добычи торфа

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 09-05-01113а.

и неиспользуемых сельскохозяйственных угодьях происходит интенсивная деструкция и разложение торфа и торфяных почв, водная и ветровая эрозия, велика вероятность торфяных пожаров [5]. Для ограничения этих неблагоприятных процессов необходимо подтопление таких участков и изменение водного режима торфяных почв.

Осушенные торфяные почвы обычно рассматривают как интенсивный источник диоксида углерода. В случае почв, богатых азотными соединениями, возможно поступление в атмосферу закиси азота. Эмиссию метана с площадей торфодобычи [6] и сельскохозяйственных угодий [7] связывают исключительно с осушительными каналами. Так как площадь каналов невелика, считается, что даже значительные потоки метана из них не компенсируют снижение эмиссии метана при осушении торфяных почв. Как результат, осушенные торфяные почвы обычно рассматривают как “нулевые” источники или слабые поглотители  $\text{CH}_4$  [6, 7].

Однако имеются свидетельства об эмиссии метана с поверхности осушенного торфа и торфяных почв [8–14]. Наблюдения на осушенном участке Дубненского болотного массива в Московской обл. показали наличие периодической эмиссии с заброшенных участков фрезерной добычи торфа и неиспользуемых сенокосов на осушенных торфяных почвах [15]. Оба типа площадей требуют первоочередных мер по возобновлению хозяйственного использования либо обводнению для снижения пожарной опасности. Возможно, обводнение усилит эмиссию метана, этот факт следует учитывать при планировании таких мероприятий [16].

Разрабатываемые и брошенные поля торфодобычи, осушенные для сельского хозяйства угодья и затапливаемые земли являются объектами добровольного, а в перспективе и обязательного учета как источники и поглотители парниковых газов [17]. Несмотря на то, что моделирование почвенных характеристик и параметров среды могло бы существенно дополнить ограниченные данные натурных измерений, известно немного вегетационных экспериментов по эмиссии метана из торфяных почв [18–21].

Цель работы – оценить влияние растительности и режима влажности на эмиссию метана из торфяной почвы в ходе вегетационного эксперимента.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

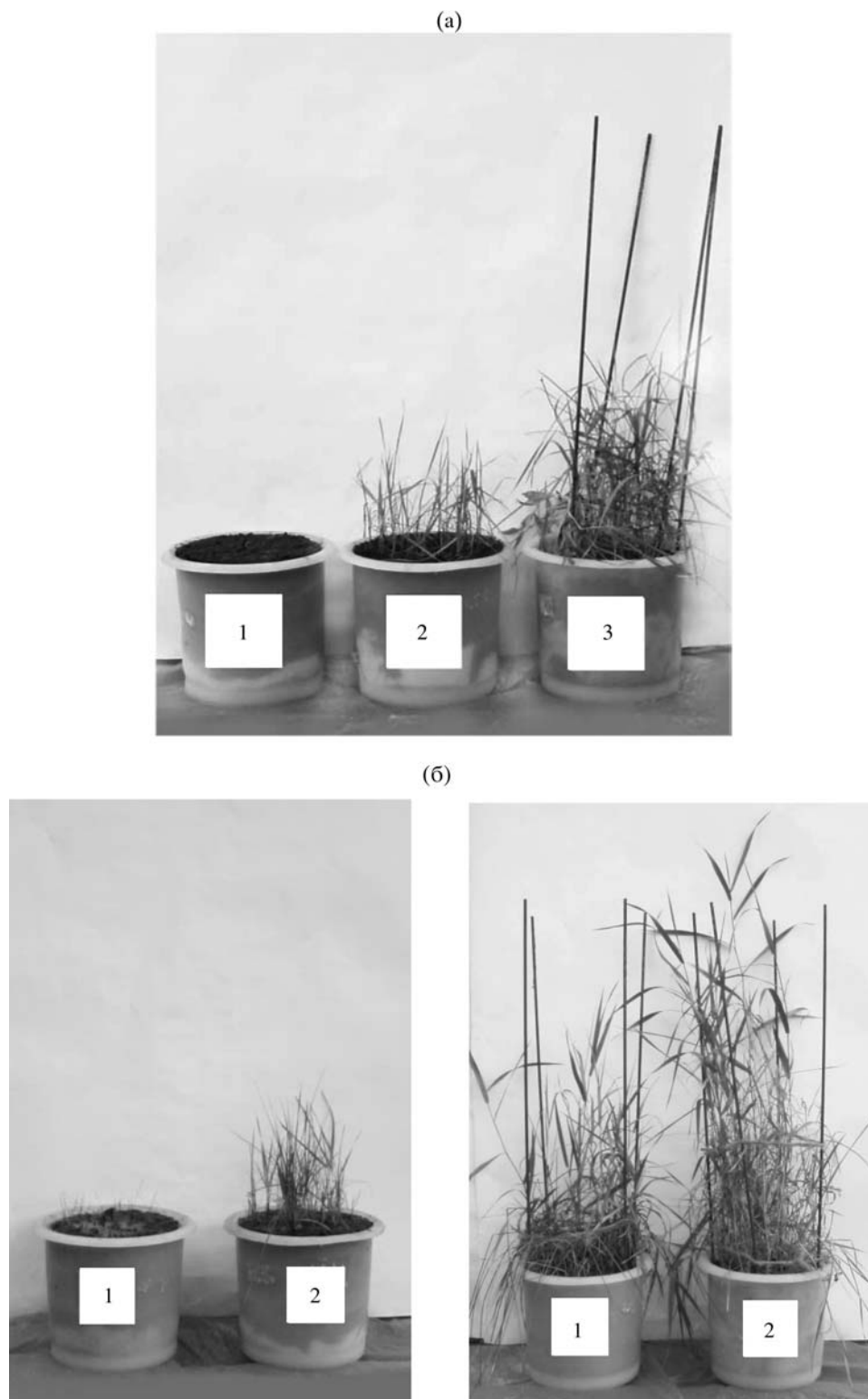
Вегетационный опыт проводили в вегетационном домике кафедры агрохимии Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К.А. Тимирязева (г. Москва). В опыте использовали сосуды Вагнера, снабженные керамзитовым дренажем, которые позволяли поддерживать влаж-

ность почвы на любом уровне до полной влагоемкости (ПВ). Диаметр и высота сосуда 18 см. Вегетационные сосуды были размещены в секции домика, огороженной решеткой и закрытой сверху прозрачным навесом, предохраняющим от атмосферных осадков.

Отбор почвы и закладку опыта проводили в мае 2008 г. Почва была взята на осушенной части Дубненского болотного массива в Талдомском р-не Московской обл. ( $56^{\circ}42'$  с.ш.  $37^{\circ}50'$  в.д.). Массив был частично осушен в 1979 г. для добычи торфа и сельскохозяйственного использования. Добыча торфа сократила залежь на глубину 0.5–1.0 м. В настоящее время добыча торфа ведется на нескольких участках, большая часть торфоразработок была залужена и сейчас частично используется для сенокоса и выращивания овощных культур. Почва была отобрана с тех участков, на которых в течение 5 лет проводили полевые измерения эмиссии углеродсодержащих парниковых газов (результаты частично изложены в [15]).

В опыте моделировали 3 стадии залужения торфяной почвы: стадия 1 – открытый торф, стадия 2 – 1-й год после залужения, стадия 3 – 20 лет после залужения (рис. 1). Для моделирования стадий 1 и 2 был использован торф, отобранный без сохранения естественного сложения на участке современной фрезерной добычи. Моделью стадии 3 служили почвенные монолиты с луговой растительностью, отобранные на смежном участке, который после частичной выработки залежи и прекращения добычи торфа был залужен с проведением известкования. Этот участок использовали 20 лет для сенокоса, которое последние 2 года не проводили. На обоих участках поверхностные слои залежи в настоящее время представлены переходными, а на участке торфодобычи – местами низинными осоково-древесными и древесно-осоковыми торфами. Степень разложения торфа поверхностного слоя на участке торфодобычи была меньше, чем на сенокосном – примерно 40 и 50% соответственно [15].

В опыте были заложены контрастные варианты в двукратной повторности: вариант 1 – открытый торф, 2 – торф с посевом многолетних трав, 3 – торфяная почва сенокоса с луговой растительностью. В этих вариантах создавали 2 режима влажности – переменный и постоянно высокий: переменная влажность от 50 до 90% ПВ – периодическое сильное увлажнение и последующее высыхание, моделирующее естественные условия насыщения почвы атмосферной влагой при летне-осенних дождях; постоянно высокая влажность 90% ПВ, моделирующая искусственное подтопление осушенных торфяников. Для поддержания влажности почвы применяли полив отстоянной водопроводной водой с поверхности. Влажность почвы в сосудах (% ПВ)



**Рис. 1.** Варианты залужения (а): 1 – открытый торф, 2 – 1-й год залужения, 3 – луговая растительность 20-летнего возраста; варианты увлажнения (б): 1 – переменное, 2 – постоянно высокое (слева – почва с нарушенным сложением, справа – монолиты).

контролировали взвешиванием. При этом учитывали массу сухой почвы в сосуде, массу пустого сосуда с дренажем, а также надземную биомассу и мортмассу на начало опыта. Изменение биомассы в течение вегетации не учитывали.

В вариантах с переменным увлажнением до 7 июня 2008 г. поддерживали влажность 90% ПВ. В последующий период проводили только выборочный полив, который обеспечил одинаковую влажность во всех сосудах. 21 июля влажность

была повышена поливом до 90% ПВ. Второй период снижения влажности продолжался до 24 сентября, затем ее поддерживали на уровне 90% ПВ как и в вариантах с постоянным увлажнением.

Почву с участка торфодобычи высушивали в лаборатории при комнатной температуре до состояния, оптимального для набивки сосудов. Измерения показали, что этому состоянию соответствует влажность 212%. Торф был просеян через сито с ячейей диаметром 5 мм, перемешан и использован для набивки сосудов. Масса сухого торфа в сосуде составляла 1.0 кг. Для стадии 1 торф оставили открытым, для моделирования стадии 2 была посеяна тимофеевка (*Phleum pratense* L., сорт ВИК 85). Этот вид был выбран как наиболее используемый многолетний злак при создании сеяных кормовых угодий в Центральном р-не России. Посев проводили на глубину 0.5–1 см, после появления всходов в каждом сосуде оставили по 24 растения, что соответствовало оптимальной густоте для производственных посевов тимофеевки. Почвенные монолиты помещали в вегетационные сосуды сразу после отбора. Диаметр монолита 18 см, высота 15 см, масса сухой почвы 0.7–1.0 кг. В составе луговой растительности на монолитах присутствовали ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), молиния голубая (*Molinia caerulea* (L.) Moench), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), лапчатка гусиная (*Potentilla anserina* L.). Достоверно установить наличие тимофеевки луговой на отобранных монолитах не удалось, определение проводили до фазы цветения. В целом на участке сенокоса, где отбирали монолиты, присутствовали следующие виды: тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.), пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), полевица тонкая (*Agrostis tenuis* Sibth.), манник складчатый (*Glyceria notata* Chevall.), вейник тростниковидный (*Calamagrostis langsdorffii* (Link) Trin.), кострец береговой (*Bromopsis riparia* (Rehm.) Holub), ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), вероника длиннолистная (*Veronica longifolia* L.), колокольчик раскидистый (*Campanula patula* L.), пикульник двунадрезанный (*Galeopsis bifida* Boenn.), валериана лекарственная (*Valeriana officinalis* L.), канареечник канарский (*Phalaris canariensis* L.).

Перед закладкой опыта из монолитов и почвы нарушенного сложения были взяты образцы для определения  $pH_{KCl}$  и зольности (определение провели в двукратной повторности). Для определения кислотности к навескам торфяной почвы (из расчета 1 г сухой массы) добавляли 25 см<sup>3</sup> 1 н. KCl. pH вытяжки определяли через 1 ч на иономере ЭВ-74 (завод измерительных приборов, Гомель, СССР) с измерительным электродом ЭСЛ-43-07. Зольность почвы определяли гравиметрическим методом. Методом цилиндров для почвы нарушенного и естественного сложения была определена наименьшая

и полная влагоемкость. Для этого почву монолитов помещали в цилиндры с сохранением естественного сложения, а почву нарушенного сложения – при плотности, равной плотности при набивке сосудов. Измерения влагоемкости проводили в двукратной повторности. Для почвы нарушенного и естественного сложения определили тип торфа.

Для наблюдения за температурным режимом в один сосуд каждого варианта опыта на глубину 10 см были помещены электронные датчики температуры Thermochron iButton DS1921 (Dallas Semiconductor, США) с заданной периодичностью записи 3 ч и точностью  $\pm 0.5$  °C.

Начало наблюдений за эмиссией метана – в начале июня 2008 г. сразу после появления всходов тимофеевки, окончание – в конце ноября. В зимний период 2008–2009 гг. наблюдения не проводили, сосуды поместили в условия, близкие к полевым, весной наблюдения были продолжены. В статью приведены данные за лето–осень 2008 г.

Для измерения нетто-эмиссии (нетто-поглощения) CH<sub>4</sub> использовали метод статических камер. Для герметичного соединения каждый вегетационный сосуд помещали в поддон с отстоянной водопроводной водой, который накрывали камерой. Длительность отстаивания воды (1 сут) была определена путем измерений потока CH<sub>4</sub> при ее дегазации. Камеры были оборудованы вентиляторами для перемешивания воздуха и покрыты сверху чехлами из фольги для уменьшения нагрева. Объем воздуха в камерах – 38 л. Длительность экспозиции составляла 23–25 ч. В течение этого периода отбирали в двукратной повторности 3 пробы воздуха в шприцы объемом 10 мл.

Концентрацию метана измеряли через 1–4 ч после отбора пробы на газовом хроматографе “Кристалл 2000М” (СКБ “Хроматэк”, Россия) с пламенно-ионизационным детектором (длина колонки 2 м, внутренний диаметр 2 мм, сорбент Hayesep Q 80/100, температура колонки 65°C, детектора – 160°C, расход газа-носителя (He) – 35, H<sub>2</sub> – 30, воздуха – 300 мл мин<sup>-1</sup>, анализируемый объем 1 см<sup>3</sup>).

Для оценки скорости  $dc/dt$  (млн.<sup>-1</sup>/ч) изменения концентрации метана в камере использовали метод наименьших квадратов, исходя из допущения о стационарности этого показателя в течение экспозиции. Эмиссию CH<sub>4</sub> ( $E$ , мкг CH<sub>4</sub>/кг сухой почвы/ч) рассчитывали по формуле  $E = (dc/dt \cdot V \cdot \rho) / m$ , где  $V$  – объем воздуха в камере (м<sup>3</sup>),  $\rho$  – плотность метана (г/м<sup>3</sup>),  $m$  – масса сухой почвы (кг).

Сезонную динамику выделения метана из торфяной почвы в каждом вегетационном сосуде аппроксимировали интерполяционным параболическим

сплайном [22]. Узлы  $t'_i$  сплайна задавали следующим образом:

$$t'_0 = t_0, t'_i = (t_{i-1} + t_i)/2 \quad (i = 1, \dots, n-1), t'_{n+1} = t_n,$$

где  $t_i$  – узел интерполяции,  $i$  (1, ...,  $n$ ) – порядковый номер измерения. Были заданы граничные условия о непрерывности второй производной сплайн-функции в точках  $t'_1$  и  $t'_n$ . Сплайн-функция была проинтегрирована для трех периодов: летний (июнь–август), осенний (сентябрь–октябрь), суммарный период (июнь–октябрь) и период с температурой почвы  $>10^\circ\text{C}$ . По величинам для отдельных сосудов были рассчитаны средние для вариантов и стандартные ошибки.

В октябре растения в сосудах были срезаны на высоте 5 см, их биомассу определили после высушивания при температуре  $105^\circ\text{C}$ . В конце опыта для каждого сосуда с растениями была определена подземная биомасса. Почву промыли через сито с диаметром ячеек 2 мм, на котором остались крупные корни и торфяная крошка с примесью мелких корней. Крупные корни были высушены при температуре  $105^\circ\text{C}$  и взвешены. Учет мелких корней в торфяной крошке проводили методом навесок. Из навески торфяной крошки массой 1 г отобрали все корни, и для пересчета их массы на сухое вещество использовали полученные ранее данные о влажности крупных корней.

Температурные условия лета 2008 г. были относительно репрезентативными. В первых декадах июня и августа средняя декадная температура воздуха была ниже среднесуточной. Теплыми были 2-я декада августа и 1-я декада сентября. Начиная с 1-й декады октября среднедекадная температура воздуха была устойчиво выше среднесуточной.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По химическим и физико-химическим показателям образцы торфяного грунта торфоразработок и почвенных монолитов, отобранных на сенокос-

ном участке, были близкими:  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  4.1, зольность различалась незначительно и составила в среднем 7.7%. Наименьшая и полная влагоемкость для торфяного грунта торфоразработок была 313 и 405%, для монолитов – 372 и 474% соответственно.

Варианты, моделирующие стадии залужения, существенно различались по величине подземной биомассы. В вариантах с посевом тимофеевки она составила в среднем 2 г сухой массы/сосуд и была больше в варианте с постоянно высокой влажностью, чем с переменной – 3 и 1 г/сосуд соответственно. Для монолитов с луговой растительностью эта величина была на порядок больше – 19 г/сосуд, ее зависимость от влажности не выявлена. Аналогичные закономерности были характерны и для надземной биомассы. Для стадии первого года после залужения средняя надземная биомасса составила в вариантах переменной и постоянной влажности 0.4 и 2.8 г сухой массы/сосуд соответственно, в варианте двадцатилетнего залужения ее величина мало зависела от условий увлажнения – 8.5 и 10.0 г/сосуд.

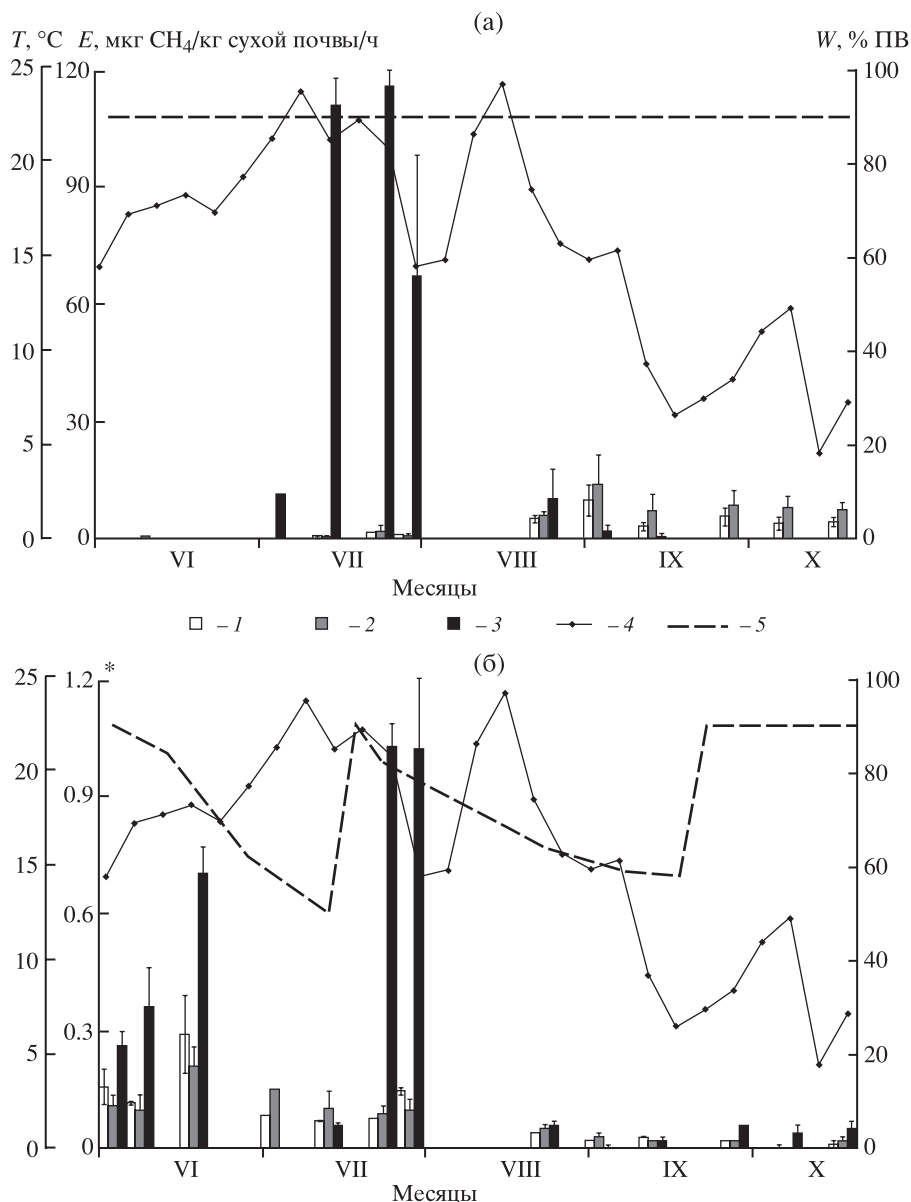
Наблюдения показали устойчивую эмиссию метана во всех вариантах в течение вегетационного периода. Эмиссия метана существенно различалась по величине и динамике в вариантах стадий залужения и влажности (рис. 2). Суммарная (кумулятивная) эмиссия за периоды наблюдений также была различной (таблица). Слабое поглощение  $\text{CH}_4$  наблюдали только для почвенных монолитов в варианте с постоянно высокой влажностью в конце периода вегетации в сентябре–октябре.

Эмиссия метана из почвенных монолитов, моделирующих стадию 20-летнего залужения, была существенно больше, чем для открытого торфа и стадии 1-го года после залужения. Разница была многократной при переменной влажности и достигла нескольких десятков раз в вариантах с постоянно высокой влажностью. Учитывая близкие физические и химические показатели образцов почвы в разных вариантах опыта, можно предположить, что

Суммарная эмиссия метана за период наблюдений, мг  $\text{CH}_4$ /кг сухой почвы

Период	Переменное увлажнение 50–90% ПВ			Постоянно высокая влажность 90% ПВ		
	Открытый торф	Посев тимофеевки	Луговая растительность	Открытый торф	Посев тимофеевки	Луговая растительность
Лето (VI–VIII)	0.30±0.06	0.25±0.08	0.93±0.37	2.5±0.2	2.5±0.2	88±12
Осень (IX–X)	0.02±0.01	0.02±0.01	0.04±0.01	6.4±2.4	10.6±5.0	0.8±0.8
Летне-осенний период (VI–X)	0.32±0.06	0.27±0.08	0.97±0.37	8.9±2.6	13.1±4.8	89±11
Период с температурой почвы $>10^\circ\text{C}$ *	0.31±0.06	0.25±0.07	0.94±0.37	5.7±1.5	7.3±2.2	89±11

\* Период с начала наблюдений (01.06.2008 г.) до момента снижения среднесуточной температуры почвы  $<10^\circ\text{C}$  (06.09.2008 г.).



**Рис. 2.** Изменение эмиссии метана и параметров среды в ходе вегетационного эксперимента. Варианты залужения: 1 – открытый торф, 2 – 1-й год залужения, 3 – луговая растительность 20-летнего возраста. Условия среды: 4 – среднесуточная температура почвы (T), °С, 5 – влажность почвы (W), % ПВ. Варианты увлажнения: (а) – постоянно высокое увлажнение, 90% ПВ, (б) – переменное увлажнение, 50–90 % ПВ. \* Варианты с меньшим масштабом эмиссии.

различия в эмиссии метана были связаны со стадией залужения. Известно, что исходным материалом метаногенеза является в первую очередь свежее органическое вещество, поступающее из корнеобитаемого слоя торфяной почвы [2]. Развитие корневых систем растений в условиях старого залужения обеспечивало образование метана в благоприятных условиях постоянно высокой влажности почвы.

В июне эмиссия из монолитов была низкой даже при постоянно высокой влажности (~0.1 мкг  $\text{CH}_4/\text{кг}$  сухой почвы/ч). Вероятно, это было связано с воздействием на почву перед началом опыта. Контакт образцов с атмосферой мог существенно повлиять

на метаногенные микроорганизмы [23]. Для монолитов нарушение естественных условий было менее значительным, чем для почвы нарушенного сложения, где подсушивание и просеивание на воздухе могло ингибировать анаэробное микробное сообщество. Однако и потенциальные условия для метаногенеза в почве торфоразработки принципиально хуже, и на этом фоне нарушения могли проявиться не так сильно. Низкая эмиссия  $\text{CH}_4$  из монолитов могла быть связана со слабым прогревом почвы. По мере ее прогрева и восстановления метаногенного сообщества эмиссия к июлю усилилась, а после снижения температуры к концу лета снова

уменьшилась. Недостаток наблюдений в начале августа затруднил анализ спада эмиссии.

Для всех стадий залужения выделение метана было значительно выше в вариантах с постоянно высокой влажностью по сравнению с переменной. Разница достигала 1–2 порядков. При прочих равных условиях уровень увлажнения почвы является важнейшим фактором эмиссии метана из торфяной почвы [2].

В вариантах с открытым торфом и посевом тимофеевки уровень эмиссии метана и ее временной ход, в том числе периоды максимальной эмиссии, различались незначительно при одинаковых условиях влажности. При переменной влажности максимальная эмиссия была во второй половине июня – 0.3 и 0.2 мкг  $\text{CH}_4/\text{кг}$  сухой почвы/ч для почвы без растений и почвы с посевом тимофеевки соответственно (рис. 2б). При постоянно высокой влажности максимальной эмиссия была в начале сентября: 10 и 14 мкг  $\text{CH}_4/\text{кг}$  сухой почвы/ч (рис. 2а).

Для почвенных монолитов с луговой растительностью максимум эмиссии метана совпадал в вариантах разной влажности, и его наблюдали во второй половине июля. В варианте с переменным увлажнением максимум эмиссии приходился на период увлажнения почвы до 90% ПВ, когда поток  $\text{CH}_4$  возрос на порядок в течение 5 сут после полива. Пик эмиссии составил 1 – при переменном увлажнении и 115 мкг  $\text{CH}_4/\text{кг}$  сухой почвы/ч при постоянно высоком увлажнении.

Величина суммарного выделения метана в вариантах была того же порядка, что и моментальных потоков во время измерения эмиссии (таблица). Для летне-осеннего периода наибольшее суммарное выделение было в варианте двадцатилетнего залужения при постоянно высокой влажности – 89 мг  $\text{CH}_4/\text{кг}$  сухой почвы, наименьшее – для открытого торфа и варианта 1-го года после залужения при переменной влажности: 0.32 и 0.27 мг  $\text{CH}_4/\text{кг}$  сухой почвы соответственно. Для всех стадий залужения суммарное выделение метана при постоянно высоком увлажнении было на 2 порядка больше, чем при переменном.

Суммарные величины эмиссии показали различия в величине потока  $\text{CH}_4$  летнего и осеннего периодов, что было особенно заметно в условиях постоянно высокого увлажнения. Если летом суммарная эмиссия из монолитов в десятки раз превышала выделение метана из нарушенной почвы, то осенью ситуация менялась на противоположную. В вариантах переменного увлажнения такой динамики не наблюдали. На основе имеющихся данных объяснить увеличение осенних потоков метана из почвы с нарушенным сложением по сравнению с монолитами затруднительно.

На стадии двадцатилетнего залужения в варианте постоянно высокого увлажнения сезонный ход выделения метана соответствовал изменению температуры почвы (рис. 2а). Начиная с августа эмиссия уменьшалась вместе с температурой, в конце вегетационного сезона наблюдали даже слабое поглощение  $\text{CH}_4$ . Известно, что изменение температуры в большей степени влияет на активность метаногенеза, чем на окисление метана [24], и что результирующая температурная зависимость эмиссии  $\text{CH}_4$  является положительной [25]. Возможно, это объясняет динамику поглощения метана в монолитах с луговой растительностью. Однако в других вариантах опыта при той же температуре наблюдали выделение  $\text{CH}_4$ . В вариантах открытого торфа и посева тимофеевки при постоянно высоком увлажнении эмиссия увеличивалась до начала сентября, несмотря на снижение температуры почвы.

В варианте с переменным увлажнением при 20-летнем залужении эмиссию метана сначала лимитировала влажность почвы (эмиссия уменьшалась вместе с высыханием почвы и резко возрастала после полива 21 июля) (рис. 2б). В течение следующего периода высыхания почвы эмиссия снова снижалась, после полива 24 сентября наблюдали повышение эмиссии, но незначительное, очевидно, из-за низкой температуры почвы. Для первых двух стадий залужения зависимость выделения метана от изменяющейся влажности не выявлена. Возможно, это было следствием сильного угнетения метаногенных микроорганизмов. В этих вариантах эмиссия была низкой, уменьшалась к концу сезона соответственно уменьшению температуры почвы.

Полученные данные свидетельствовали о влиянии залужения на потоки метана из осушенных торфяных почв. Разница между выделением  $\text{CH}_4$  из открытой и только что залуженной торфяной почвы с одной стороны, и покрытой луговой растительностью – с другой, была очевидной. Отсутствие значительных различий химических и физических показателей образцов почвы указывало на то, что фактор растительности являлся ведущим. Это проявлялось как при переменном увлажнении, когда эмиссия метана под луговой растительностью была в несколько раз больше, чем из открытой или недавно залуженной почвы. Эта разница возрастала в десятки раз при постоянно высоком увлажнении.

Вегетационный опыт подтвердил имеющиеся немногочисленные данные полевых измерений эмиссии метана из осушенных торфяных почв. Это касается как открытого торфа участков торфопроизводств, так и торфяных почв, используемых в сельском хозяйстве. Это дополнительный аргумент

в пользу учета метана при рассмотрении таких земель как источников и поглотителей парниковых газов. Величина эмиссии может быть небольшой, однако при значительных площадях суммарный вклад нельзя не учитывать. Это касается старозалуженных сенокосных и пастбищных угодий, а также брошенных без рекультивации торфоразработок со сформированным плотным травянистым покровом.

В условиях переменного увлажнения, как это происходит после выпадения осадков, эмиссия метана из указанных выше земель будет невысокой и непостоянной. Такие земли требуют рекультивации, основной способ которой – обводнение. Мощная дренажная сеть затрудняет затопление большинства площадей, и обводнение может обеспечить лишь поднятие уровня болотных вод и увеличение влажности торфяных почв. Результаты проведенного вегетационного опыта свидетельствуют, что это может резко усилить эмиссию метана, особенно в случае развитой луговой растительности, которая будет служить не только источником материала для метаногенеза, но и препятствовать внедрению гигрофильной флоры, необходимой для восстановления естественных болотных почв. В этом случае участки с открытым торфом имеют ряд преимуществ. Фактор залужения требует учета при планировании мероприятий по обводнению и рекультивации неиспользуемых освоенных торфяников и осушенных торфяных почв.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При моделировании в вегетационном опыте 3-х стадий залужения осушенной торфяной почвы (открытый торф, 1-й год залужения и 20-летняя луговая растительность) наблюдали устойчивую эмиссию метана (от 0.01 до 100 мкг  $\text{CH}_4/\text{кг}$  сухой почвы/ч) на протяжении всего летне-осеннего периода. В варианте 20-летнего залужения при постоянном высоком увлажнении в сентябре–октябре наблюдали слабое поглощение метана (от  $-0.01$  до  $-0.1$  мкг  $\text{CH}_4/\text{кг}$  сухой почвы/ч). Суммарная эмиссия метана за летне-осенний период была в 10 раз больше при моделировании стадии 20-летнего залужения, чем на стадиях открытого торфа или 1-го года после залужения.

В вариантах с постоянно высоким увлажнением эмиссия метана была на 1–2 порядка больше, чем в вариантах с переменным увлажнением. В первом случае эмиссия за летне-осенний период была равна 1.0–100 мг  $\text{CH}_4$  и 0.1–1.0 мг  $\text{CH}_4/\text{кг}$  сухой почвы – во втором. При увеличении влажности почвы с 50 до 90% ПВ в почвенных монолитах с луговой растительностью в течение 5 сут наблюдали увеличение эмиссии метана на порядок. В вариантах открытого торфа и 1-го года залужения такой реакции выявлено не было.

Эмиссия  $\text{CH}_4$  увеличивалась со степенью залужения торфяной почвы как при высоком (8.9, 13.1 и 89 в вариантах открытого торфа, 1-го года залужения и 20-летней луговой растительности), так и переменном увлажнении, но при другом уровне величин (0.32, 0.27, 0.97 мг  $\text{CH}_4/\text{кг}$  сухой почвы соответственно).

Подтопление залуженных торфяных почв может способствовать увеличению эмиссии  $\text{CH}_4$ . Это необходимо учитывать при планировании, разработке технологии и проведении мероприятий по обводнению и рекультивации осушенных и неиспользуемых в настоящее время торфяных почв.

Авторы выражают благодарность Э.А. Томутовой, К.П. Хайдукову за участие в проведении измерений; Н.М. Власенко, Л.К. Шевцовой (Всероссийский НИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова), В.В. Говориной, В.В. Кидину (Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева), Л.Е. Дулову (ИНМИ РАН им. С.Н. Виноградского), М.В. Глаголеву (Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова) и Т.Ю. Минаевой (Федеральный центр геоэкологических систем МПР России) – за практическое содействие и помощь, без которых работа не могла бы быть выполнена; И.К. Кравченко (ИНМИ РАН им. С.Н. Виноградского) за ценные советы при обсуждении результатов работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sirin A., Laine J.* Peatlands and greenhouse gases // Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Main report / Eds. Parish F., Sirin A., Charman D., et al. Kuala Lumpur: Wetlands International, Wageningen: Global Environment Centre, 2008. P. 118–138.
2. *Strack M., Waddington J.M., Turetsky M., Roulet N.T., Byrne K.A.* Northern peatlands, greenhouse gas exchange and climate change // Peatlands and climate change / Ed. Strack M. Saarijärvi: Saarijärven Offset Oy, 2008. P. 44–69.
3. Доклад “Изменение климата, 2007: физическая научная основа”. Мат-л рабочей группы I к 4-му докладу Межправит. группы экспертов по изменению климата / Под ред. Соломон С., Чин Д., Мэннинг М., и др. Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, 2007. 164 с.
4. Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / Под ред. Сирина А.А., Минаевой Т.Ю. М.: Геос, 2001. 190 с.
5. *Минаева Т.Ю., Сирин А.А.* Торфяные пожары – причины и пути предотвращения // Наука и пром-ть России. 2002. № 9. 2002. С. 3–8.
6. *Holmgren K., Kirkinen J., Savolainen I.* Climate impact of peat fuel utilization // Peatlands and Climate Change / Ed. Strack M. Saarijärvi: Saarijärven Offset Oy, 2008. P. 123–147.



7. Oleszczuk R., Regina K., Szajdak L., Höper H., Maryganova V. Impacts of agricultural utilization of peat soils on the greenhouse gas balance // Там же. P. 70–97.
8. Van den Pol-van Dasselaar A., Van Beusichem M.L., Oenema O. Effects of grassland management on the emission intensively managed grasslands on peat soil // Plant and Soil. 1997. V. 189. № 1. P. 1–9.
9. Van den Pol-van Dasselaar A., Van Beusichem M.L., Oenema O. Methane emissions from wet grasslands on peat soil in a nature preserve // Biogeochem. 1999. V. 44. № 2. P. 205–220.
10. Sundh I., Nilsson M., Mikkelä C., Granberg G., Svensson B.H. Fluxes of methane and carbon dioxide on peat-mining areas in Sweden // Ambio. 2000. V. 29. P. 499–503.
11. Von Arnold K., Weslien P., Nilsson M., Svensson B.H., Klemedtsson L. Fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from drained coniferous forests on organic soils // Forest Ecol. Manag. 2005. V. 210. № 1–3. P. 239–254.
12. Von Arnold K., Nilsson M., Hänell B., Weslien P., Klemedtsson L. Fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from drained organic soils in deciduous forests // Soil Biol. Biochem. 2005. V. 37. № 6. P. 1059–1071.
13. Regina K., Pihlatie M., Esala M., Alukukku L. Methane fluxes on boreal arable soils // Agricult. Ecosyst. Environ. 2007. V. 119. P. 346–352.
14. Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сири́н А.А. Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрехимия. 2008. № 5. С. 56–68.
15. Чистотин М.В., Сири́н А.А., Дулов Л.Е. Сезонная динамика эмиссии углекислого газа и метана при осушении болота в Московской области для добычи торфа и сельскохозяйственного использования // Агрехимия. 2006. № 6. С. 54–62.
16. Höper H., Augustin J., Cagampang J.P., Drösler M., Lundin L., Moors E., Vasander H., Waddington M.J., Wilson D. Restoration of peatlands and greenhouse gas balances // Peatlands and Climate Change / Ed. Strack M. Saarijärvi: Saarijärven Offset Oy, 2008. P. 182–210.
17. Blain D., Row C., Alm J. et al. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories 2006. Vol. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 7: Wetlands. P. 7.1–7.23.
18. Kettunen R., Saarnio S., Martikainen P., Silvola J. Elevated CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen fertilisation effects on N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes and biomass production of Phleum pratense on farmed peat soil // Soil Biol. Biochem. 2005. V. 37. № 4. P. 739–750.
19. 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.
20. Knorr K.H., Oosterwoud M.R., Blodau C. Experimental drought alters rates of soil respiration and methanogenesis but not carbon exchange in soil of a temperate fen // Soil Biol. Biochem. 2008. V. 40. № 7. P. 1781–1791.
21. White J.R., Shannon R.D., Weltzin J.F., Pastor J., Bridgham S.D. Effects of soil warming and drying on methane cycling in a northern peatland mesocosm study // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. G00A06.
22. Стечкин С.Б., Субботин Ю.Н. Сплайны в вычислительной математике. М.: Наука, 1976. 248 с.
23. Hungate R.E. A roll tube method for cultivation of strict anaerobes // Method. Microbiol. V. 3B. N.Y.: Academic Press, 1969. P. 117–132.
24. Dunfield P., Knowles R., Dumont R., Moore T.R. Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: Response to temperature and pH // Soil Biol. Biochem. 1993. V. 25. P. 321–326.
25. Christensen T.R., Ekberg A., Ström L., Mastepanov M., Panikov N., Öquist M., Svensson B.H., Nykänen H., Martikainen P.J., Oskarsson H. Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. 1414. doi:10.1029/2002GL016848.

## Effect of Vegetation and Moisture Conditions on the Emission of Methane from Drained Peat Soil

G.G. Suvorov<sup>1</sup>, M.V. Chistotin<sup>2</sup>, and A.A. Sirin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya 21, Uspenskoe, Odintsovo raion, Moscow oblast, 143030 Russia, E-mail: suvorovg@gmail.com

<sup>2</sup>Pryanishnikov Research Institute of Agricultural Chemistry, Russian Academy of Agricultural Sciences, ul. Pryanishnikova 31a, Moscow, 127550 Russia

In a pot experiment simulating the grassing of drained peat soil, the methane emission under the 20-year-old meadow vegetation was higher than that from the bare peat and soil under perennial grasses of the first year of growth by one–two orders of magnitude. For all stages of meadow formation, higher values of CH<sub>4</sub> emission were observed under high moisture conditions as compared to those varying from high to low. The results obtained could be useful to optimize technology for the rewetting and reclamation of drained and unused peat soils.

*Keywords:* vegetation, moisture conditions, methane emission, drained peat soil.