Агрохимия, 2016, № 12, с. 20–33

Агроэкология

УДК 631.433:631.445.124:631.421.2

ДИНАМИКА ЭМИССИИ МЕТАНА ИЗ ОСУШЕННОЙ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И РЕЖИМА УВЛАЖНЕНИЯ (результаты вегетационного опыта)*

М.В. Чистотин[1, 2], Г.Г. Суворов[2], А.А. Сирин[2]

[1] *Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова 127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия*

E-mail: chistotinmv@yahoo.com

[2] *Институт лесоведения РАН 143030 с. Успенское, Одинцовский р-н, Московская обл., ул. Советская, 21, Россия*

E-mail: suvorov@ilan.ras.ru, sirin@ilan.ras.ru

Поступила в редакцию 12.06.2016 г.

В вегетационном опыте с осушенной торфяной почвой в вариантах без растений, с посевом многолетних трав и с 20-летним луговым фитоценозом эмиссия метана (до 100 мкг/кг сухой почвы · ч) преобладала над его поглощением (до –0.1 мкг/кг · ч). При постоянно высокой влажности почвы (90% ПВ) выделение CH_4 в атмосферу было на 1–2 порядка больше, чем при переменной (50–90% ПВ). Выявлена экспоненциальная зависимость эмиссии от температуры и влажности почвы. В условиях высокого увлажнения среднее выделение метана за один год проведения опыта было близким для вариантов с посевом многолетних трав и луговой растительностью. Зафиксировано снижение уровня эмиссии метана к концу опыта.

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

ВВЕДЕНИЕ

Увлажненные торфяные почвы – один из основных природных источников метана, потенциал глобального потепления которого неоднократно пересматривался в сторону увеличения [1]. Вклад торфяных почв в поступление метана в атмосферу имеет особое значение для России, где болота и заболоченные земли занимают более 1/5 территории страны [2–5]. При этом значительная часть торфяных почв в центре европейской части и ряде других регионов России была осушена для разных видов пользования [6]. Наиболее сильные антропогенные последствия были связаны с осушением и освоением болот для добычи торфа и для сельскохозяйственного использования. Большие площади частично выработанных торфяников после рекультивации использовали как пашню или сенокосы.

Многие такие земли сейчас заброшены, не используются и скорее всего не будут возвращены в хозяйственный оборот. Неиспользуемые сельскохозяйственные земли заняты луговой и сорной растительностью, зарастают кустарниками и деревьями. Интенсивный дренаж определяет глубокое стояние грунтовых вод и низкую влажность торфяных почв. Неиспользуемые торфоразработки, представленные, главным образом, интенсивно дренированными полями фрезерной добычи, плохо заселяются растительностью, сохраняют участки открытого торфа и сильно высыхают в периоды отсутствия осадков. На заброшенных полях добычи торфа и сельскохозяйственных угодьях происходят интенсивная деструкция и разложение торфа, водная и ветровая эрозия, велика вероятность торфяных пожаров [7]. Для ограничения этих неблагоприятных процессов необходимо обводнение как приоритетная мера рекультивации таких земель [8].

Осушенные торфяные почвы считаются интенсивным источником диоксида углерода, а эмиссия метана с торфоразработок [9] и сельскохозяйственных угодий [10] связывается исключительно с осушительными каналами [11]. Осушенные торфя-

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (№№ 09-05-01113-а, 12-05-01029-а) и 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»).

ные почвы рассматриваются как «нулевые» источники или слабые поглотители CH_4 [9, 10], однако имеется информация об эмиссии метана с их поверхности [12–19]. Вероятно, это происходит в периоды увлажнения. Искусственное обводнение таких участков может усилить эмиссию метана, что требует учета при планировании таких мероприятий [20].

Разрабатываемые и брошенные поля торфодобычи, земли, осушенные для сельского хозяйства, а также вторично обводняемые для восстановления болот площади с торфяными почвами являются объектами добровольного, а в перспективе, возможно, и обязательного учета как источники и поглотители парниковых газов [1]. Это определяет важность анализа проблемы и дополнения существующих ограниченных, часто противоречивых данных о потоках метана из осушенных торфяных почв, которые могут возникать при их увлажнении. Однако это непросто зафиксировать даже при регулярных натурных измерениях. Моделирование почвенных характеристик и параметров среды позволяет дополнить ограниченные данные натурных измерений. Однако известно немного вегетационных экспериментов, в которых исследовали эмиссию метана из торфяных почв [21–24].

Это стало основанием для постановки вегетационного опыта [25] для оценки влияния растительности и режима влажности на эмиссию метана из торфяной почвы на примере контрастных вариантов: открытого торфа, торфа с посевом многолетних трав и торфяной почвы сенокоса с луговой растительностью. Два режима влажности – переменный и постоянно высокий – моделировали соответственно изменения влажности осушенной торфяной почвы в естественных условиях и сильное увлажнение, возникающее при обводнении. Данные, полученные в ходе измерений летне-осеннего периода в первый год опыта, были опубликованы ранее [25]. В предлагаемой работе проанализированы итоги измерений выделения и поглощения метана за весь период вегетационного опыта, а также другие результаты, полученные при осуществлении эксперимента.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент проводили в вегетационном домике кафедры агрохимии Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К.А. Тимирязева (г. Москва) с мая 2008 по июль 2009 г.; сопутствующие инкубационные опыты – в период с 2009 по 2012 г. Для вегетационного опыта были использованы сосуды Вагнера внутренним диаметром и высотой 18 см с керамзитовым дренажем, которые были размещены в секции домика, огороженной решеткой и покрытой сверху прозрачным навесом, предохраняющим от атмосферных осадков. Торфяная почва была отобрана на осушенной части Дубненского болотного массива в Московской обл. (56°42′ с.ш., 37°50′ в.д.), который был частично осушен в 1979 г. для добычи торфа и сельскохозяйственного использования. Почва для опыта была взята с участка фрезерной добычи торфа и со смежного участка, который после прекращения добычи торфа был залужен с проведением известкования и его затем использовали ≈20 лет для сенокошения. Отбор почвы проводили вблизи стационарных точек полевых измерений потоков углеродсодержащих парниковых газов [17, 26]. Ботанический состав и степень разложения торфа были определены для этих точек микроскопическим методом в образцах, отобранных с помощью торфяного бура ТБГ-1.

В опыте моделировали 3 возможных стадии вторичной сукцессии в результате залужения осушенного торфяника: 1) открытый торф без растений, 2) первый год после посева многолетних трав, 3) 20 лет после залужения. В первых двух случаях была использована почва, отобранная из слоя 5–15 см на участке добычи торфа. Перед закладкой опыта она была подсушена в лаборатории при комнатной температуре до состояния, оптимального для просеивания и набивки сосудов (влажность почвы 212%), просеяна через сито с ячеей диаметром 5 мм и перемешана. Масса сухой почвы в сосуде составляла 1.0 кг. Двум названным стадиям соответствовали варианты без растений и с посевом тимофеевки (*Phleum pratense* L., сорт ВИК 85). Посев проводили на глубину 0.5–1 см, после всходов оставляли в каждом сосуде по 24 растения. Для моделирования 3-й стадии были использованы отобранные на сенокосном участке монолиты торфяной почвы диаметром 18 см и высотой 15 см (масса сухой почвы 0.7–1.0 кг) с луговой растительностью, в составе которой была ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), молиния голубая (*Molinia caerulea* (L.) Moench), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), лапчатка гусиная (*Potentilla anserina* L.). При отборе монолиты сразу помещали в вегетационные сосуды.

На три указанных варианта почвы и растительности в схеме опыта были наложены 2 градации режима увлажнения. Постоянно высокая влажность почвы в течение опыта, равная 90% полной влагоемкости (**ПВ**), моделировала искусственное обводнение осушенных торфяников. В вариантах с переменным увлажнением в начале опыта (26 мая–7 июня) влажность также поддерживали на уровне 90% ПВ. Затем были проведены 2 цикла снижения влажности до 50% ПВ, которые моделировали изменения увлажнения в естественных условиях в летний период. Полив до 90% ПВ был сделан 21 июля. С 25 сентября 2008 г. до конца опыта (7 июля 2009 г.) в этих вариантах вновь поддерживали постоянно высокую влажность (90% ПВ). Сосуды поливали отсто-

янной водопроводной водой по массе с поверхности. В вариантах с переменным увлажнением в периоды снижения влажности скорость высыхания в отдельных сосудах различалась, и для ее выравнивания производили выборочный полив. Каждый из 6 вариантов опыта (3 стадии залужения × 2 режима увлажнения) имел 2-кратную повторность.

Определение полной влагоемкости было выполнено при закладке опыта методом цилиндров в двукратной повторности. Для этого пробы просеянной почвы участка торфодобычи (плотность сложения соответствовала плотности набивки сосудов), а также пробы почвы сенокосного участка с ненарушенным сложением помещали в цилиндры объемом 116 см^3. Определение pH_{KCl} и зольности проводили в двукратной повторности в образцах, взятых при набивке сосудов и отборе монолитов. Для определения кислотности к навескам торфяной почвы (из расчета 1 г сухой массы) добавляли 25 см^3 1 н. раствора KCl, pH вытяжки определяли через 1 ч на иономере ЭВ-74 с измерительным электродом ЭСЛ-43-07. Зольность почвы была определена гравиметрическим методом.

Температуру почвы на глубине 10 см измеряли электронными датчиками Thermochron iButton DS1921 (Dallas Semiconductor, США) с интервалом записи 3 ч, точность ±0.5°C. При анализе результатов были использованы также данные измерений температуры воздуха на Метеорологической обсерватории им. В.А. Михельсона, расположенной на расстоянии 500 м от места проведения опыта.

Измерения нетто-выделения (нетто-поглощения) метана проводили методом статических камер. На время измерения каждый вегетационный сосуд помещали в поддон с отстоянной водопроводной водой, служившей гидрозатвором, и накрывали камерой. Камеры были оборудованы вентиляторами для перемешивания воздуха и покрыты сверху чехлами из светоотражающей фольги для уменьшения нагрева. Объем воздуха в камерах равен 38 дм^3. Каждое измерение начинали в 10–11 ч утра. За время экспозиции (23–25 ч) из камеры отбирали 6 проб воздуха в шприцы объемом 10 см^3. Использованная длительность экспозиции обеспечивала получение величин выделения (поглощения), интегрирующих внутрисуточную динамику этого показателя. Результаты измерений были проанализированы с целью выявить, снижалась ли в течение экспозиции скорость изменения концентрации CH_4 в камерах вследствие уменьшения разности концентрации с почвенным воздухом. Тенденции к такому снижению не наблюдали. За период опыта было выполнено 21 измерение для характеристики сезонной динамики эмиссии метана. С середины декабря до середины марта наблюдения не проводили. В это время сосуды были размещены на открытой площадке в условиях, близких к полевым: почва промерзала.

В июле 2008 г. были проведены наблюдения за суточным ходом эмиссии (поглощения) метана с использованием для отдельных опытных вариантов одного или двух сосудов. В течение 3 сут было выполнено 15 измерений с экспозицией 2.6–3.3 ч, остальные параметры методики были аналогичны приведенным выше.

Объемную долю CH_4 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_2 – 30, воздуха – 300 мл/мин, анализируемый объем – 1 см^3. Для оценки скорости $\boldsymbol{dc/dt}$ изменения объемной доли метана в камере использовали метод наименьших квадратов, исходя из допущения о постоянстве этого показателя в течение экспозиции. Эмиссию (поглощение) $\boldsymbol{q}$ метана рассчитывали по формуле

$$q = (dc/dt \cdot V \cdot \rho)/m,$$

где V – объем воздуха в камере, ρ – плотность CH_4, m – масса сухой почвы. Были также рассчитаны удельные величины потока метана на единицу площади почвы.

Интегральные величины нетто-выделения для отдельных сезонов года, а также для всех суток со среднесуточной температурой воздуха <10°C и >10°C рассчитывали с использованием метода бутстрепа [27], количество повторений – 50000. В каждом повторении для каждой даты измерения была получена реализация случайной величины, которая задана оценкой и стандартным отклонением наблюденной величины, с допущением о нормальном распределении этой случайной величины. При аппроксимации динамики эмиссии использовали линейную интерполяцию. Затем были рассчитаны среднее арифметическое и стандартное отклонение реализаций сезонной оценки, полученных в отдельных повторениях. Для выполнения расчетов использован программный пакет MATLAB R2010b.

Для вариантов с переменной влажностью проверена гипотеза о зависимости нетто-выделения CH_4 от температуры и влажности почвы в период с июня по сентябрь 2008 г. Для всех вариантов были использованы температуры, измеренные в одном из сосудов варианта с луговой растительностью. Была рассчитана средняя температура $\boldsymbol{t}$ почвы за время экспозиции камеры при каждом из 9 измерений, выполненных за этот период. Среднюю влажность $\boldsymbol{w}$ почвы для интервалов 10 сут. перед измерениями рассчитывали, выполняя линейную интерполяцию данных, полученных при взвешиваниях сосудов. Использова-

на модель $\ln q = A \cdot w + B \cdot t + C$, где A, B, C – постоянные. Каждый из массивов, для которых получены параметры линейной корреляции, включал величины q для 2-х сосудов одного варианта.

В октябре 2008 г. растения в сосудах были срезаны на высоте 5 см, их масса определена после высушивания при температуре 105ºС. По завершении опыта летом 2009 г. для каждого сосуда с растениями был вновь выполнен учет надземной массы, а также определена подземная биомасса. Почва была промыта через сито с диаметром ячеи 2 мм, на котором остались крупные корни и торфяная крошка с примесью мелких корней. Крупные корни были высушены при температуре 105°С и взвешены. Учет мелких корней в торфяной крошке проводили методом навесок для каждого сосуда в двухкратной повторности. Из навески массой 1 г отбирали все корни, и для пересчета их массы на сухое вещество использовали данные о влажности крупных корней.

Для определения исходной потенциальной активности образования метана пробы торфяной почвы (слой 10–20 см) сухой массой 2.5–5.6 г, взятые рядом с точками отбора почвы для вегетационного опыта, инкубировали в стеклянных флаконах объемом 60 см^3 в течение 4 сут, газовой фазой служил N_2.

Кроме того, с пробами (слой 10–15 см), взятыми на обоих участках торфяника, в непосредственной близости к местам отбора почвы для вегетационного опыта, был проведен инкубационный эксперимент продолжительностью 2.5 года для оценки возможного эффекта операций при закладке вегетационного опыта на микробные популяции, участвующие в цикле метана. Пробы по 29 см^3, отобранные на каждом из участков без нарушения естественного сложения в пластиковые шприцы объемом 67 см^3 (модель почвенных монолитов вегетационного опыта), увлажнили добавлением дистиллированной воды до влажности, равной 90% ПВ (441 и 354% массы сухой почвы соответственно для участка добычи торфа и сенокоса). Другая часть почвы была использована для моделирования воздействий при закладке вегетационного опыта в вариантах без растений и с посевом тимофеевки. Ее подсушили на воздухе в течение 5 сут до 26% ПВ (127 и 102% массы сухой почвы для участка добычи торфа и сенокоса соответственно), затем просеяли через сито с диаметром отверстий 5 мм и увлажнили до 90% ПВ. Пробы объемом 29 см^3 и плотностью сложения, равной естественной плотности данного слоя почвы при отборе образцов (сухая масса проб почвы двух участков 3.5 и 5.1 г соответственно), перенесли в шприцы. Повторность инкубационного эксперимента была трехкратной. Для поддержания влажности почвы шприцы в вертикальном положении поместили в закрытый сосуд, на дно которого была налита вода. Благодаря этому изменения влажности в течение инкубации не превышали 2% ПВ. Температура инкубации была равна 20–25°С. При измерении нетто-потребления (нетто-выделения) метана шприцы герметично закрывали; в течение 9 сут из газовой фазы каждого шприца отбирали по 5 проб. Анализируемый объем составлял 0.125 см^3, остальные параметры определения метана были аналогичны приведенным выше.

После завершения вегетационного опыта потенциальные активности образования и аэробного окисления CH_4 были определены для почвы вариантов без растений и с естественной растительностью (по одному сосуду каждого варианта). Глубина отбора проб из сосудов – 10–15 см, масса сухой почвы – 3.7–5.2 г. Инкубацию проводили в стеклянных флаконах объемом 60 см^3 при температурах 17 и 25°С в течение 5 сут. Газовой фазой в соответствующих вариантах служил N_2 или воздух. Повторность эксперимента трехкратная. В течение инкубации из газовой фазы каждого флакона отбирали по 3 пробы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика почвы. Для вегетационного и инкубационных экспериментов использовали торф с торфоразработки и торфяную почву сенокоса. В первом случае верхний горизонт был представлен осоковым низинным торфом (степень разложения 35–40%), во втором – древесным переходным (50–60%). Стратиграфия торфяной залежи этих близко расположенных участков весьма сходна, а указанные различия связаны с разным гипсометрическим положением современной дневной поверхности вследствие разной глубины выработки торфа – 120 и 70 см соответственно [17, 26]. Кроме того, торфяная почва сенокосного участка была подвергнута известкованию и другой агротехнической подготовке при рекультивации. Однако химические и физико-химические показатели торфа и торфяной почвы оказались близкими: средняя зольность – 7.7 и 7.6%, pH_{KCl} 4.10 и 4.15, полная влагоемкость – 405 и 474% соответственно.

Биомасса растений. Варианты, моделирующие стадии залужения, существенно различались по величине биомассы (табл. 1). Для луговой растительности она была больше для условий постоянно высокой влажности и дополнительно заметно возросла на 2-й год опыта по сравнению с первым: для переменной влажности – с 6.2 до 8.5, для постоянно высокой – с 7.6 до 10.0 г/сосуд соответственно. Различия в величине надземной биомассы в зависимости от условий увлажнения были еще бóльшими (в 7 раз, для посева тимофеевки: 0.4 и 2.8 г/сосуд соответственно). Подземная биомасса луговой растительности не различалась для двух режимов увлажнения.

Таблица 1. Влияние растительности и режима увлажнения на накопление биомассы

Дата определения	Растительность	Влажность почвы	Сухая масса, г/сосуд	
			надземная	подземная
08.10.2008	Луговая растительность**	Переменная	6.2 ± 0.2	–
		Высокая	7.6 ± 3.7	–
09.07.2009	Посев тимофеевки*	Переменная	0.4 ± 0.3	–
		Высокая	2.8 ± 0.0	2.9 ± 0.6
	Луговая растительность**	Переменная	8.5 ± 1.0	19.0 ± 0.3
		Высокая	10.0 ± 0.5	18.8 ± 2.4

Примечание. Приведены средние для вариантов и их стандартные ошибки. То же в табл. 2.
* Почва участка добычи торфа. То же в табл. 2.
** Почва сенокосного участка. То же в табл. 2.

В варианте с посевом тимофеевки и переменной влажностью этот показатель был определен только для одного сосуда, составив 1.0 г (данные не приведены в табл. 1). Для второго сосуда этого варианта величина, вероятно, была в несколько раз меньше, судя по величине надземной массы. Таким образом, как надземная, так и подземная биомасса тимофеевки во 2-й год после посева была существенно больше в том варианте, в котором высокую влажность поддерживали с начала опыта. В целом подтверждено значение вклада подземной биомассы: в случае луговой растительности она была в 2 раза больше, чем надземная, обеспечивая 65–70% от общей биомассы. Через год после залужения надземная и подземная биомасса тимофеевки была примерно равной, составляя в совокупности ощутимую величину – почти 6 г/сосуд. По данным учета 05.09.2008, на участке сенокоса вблизи точки взятия монолитов для вегетационного опыта надземная фитомасса составила 490, подземная (в слое 0–20 см) – 1060 г сухого вещества/м^2 [26]. С учетом площади монолитов 0.025 м^2 эти величины немного больше, чем полученные в вегетационном опыте (табл. 1).

Исходная метаногенная активность почвы опыта. Об исходных различиях верхнего слоя почвы 2-х участков, использованной для вегетационного опыта, по потенциальной активности метаногенеза позволяют судить результаты инкубационного эксперимента (рис. 1, «нарушенное сложение»). Была зафиксирована более высокая потенциальная ак-

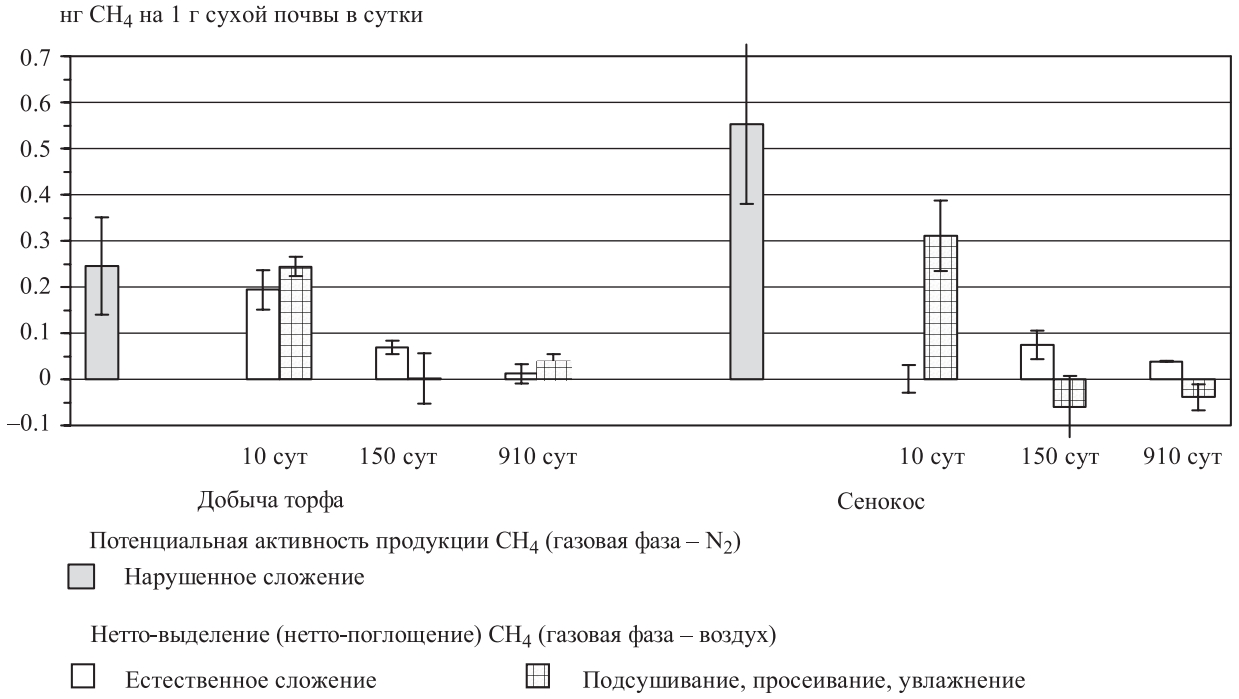

Рис. 1. Потенциальная активность продукции метана почвой осушенного торфяника и нетто-выделение (нетто-поглощение) метана в зависимости от воздействий на почву.

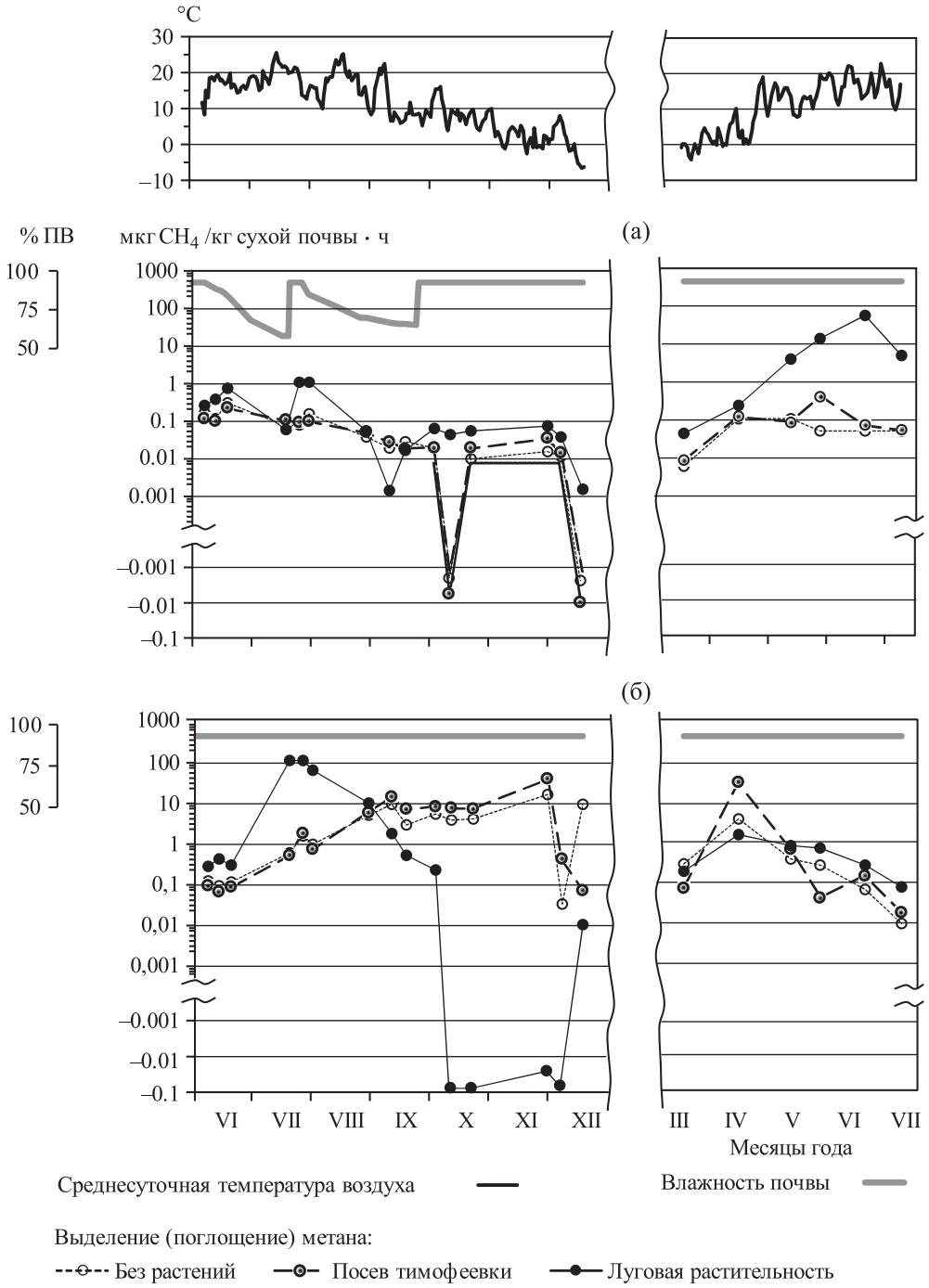

Рис. 2. Среднесуточная температура воздуха, сезонная динамика выделения (поглощения) метана при переменной (а) и постоянно высокой (б) влажности.

тивность продукции метана для верхнего слоя почвы сенокоса в сравнении с участком добычи торфа. Известно, что исходным материалом метаногенеза является в первую очередь свежее органическое вещество [28, 29], что определяет эффект развитой корневой системы растений на более поздней стадии сукцессии.

Влияние закладки вегетационного опыта на метаногенную активность почвы. Кроме анализируемых в работе различий растительности и режима влажности варианты вегетационного эксперимента отличались техникой закладки опыта: подсушивание и просеивание перед набивкой сосудов для открытого торфа и посева трав либо сохранение естественного сложения для монолитов. Эти варианты были предусмотрены с целью моделирования отдельных стадий рекультивации торфяника: после механической обработки перед посевом многолетних трав, в первый–второй годы после посева и приблизительно через 20 лет после залужения. Для оценки

возможного воздействия манипуляций при закладке опыта на процессы образования и потребления метана был проведен эксперимент с инкубацией образцов почвы (рис. 1, «естественное сложение», «подсушивание, просеивание, увлажнение»). В частности, проверяли возможность ингибирующего действия аэробных условий при закладке опыта на метаногенное микробное сообщество в вариантах без растений и с посевом трав.

В начале инкубационного эксперимента наблюдали нетто-выделение метана из почвы участка торфодобычи, инкубируемой при атмосферной концентрации CH_4. При этом почва сенокоса характеризовалась весьма низкими величинами обмена метана с газовой фазой. Эти результаты соответствовали зафиксированным в полевых условиях низким (положительным или отрицательным) величинам потока CH_4 на сенокосе и более высоким на торфоразработках [17].

После подсушивания почвы сенокоса до 26% ПВ, просеивания и повышения влажности до 90% ПВ наблюдали нетто-выделение CH_4. Механизмом такого эффекта могло быть появление при разрушении естественного сложения почвы крупных пор, дающих возможность выделения продуцируемого метана в обход метанотрофного «фильтра», либо повышение доступности имеющихся в почве органических субстратов. При этом отрицательного воздействия повышенной аэрации на метаногенное сообщество при подсушивании почвы, продолжавшемся 5 сут, зафиксировано не было. С аналогичными причинами, вероятно, связан и некоторый рост выделения CH_4 из образцов с торфоразработок. Интересным было снижение нетто-выделения метана при длительной инкубации почвы. В естественных условиях происходит поступление свежего органического материала в верхний слой торфяной залежи, а в опыте оно прекращается. Этот фактор, а также возможная значительная плотность популяции метанотрофов в почве сенокосного участка и обусловили нетто-потребление метана.

Температурные условия периода наблюдений. По данным наблюдений Метеорологической обсерватории им. В.А. Михельсона, теплообеспеченность летнего периода 2008 г. была несколько больше среднемноголетней. Пониженная температура воздуха отмечена в начале июня и начале августа, повышенная – в середине августа (рис. 2). С начала октября до первой декады декабря температура превышала климатическую норму на 2–10°С, до 10 декабря преобладали положительные дневные и ночные температуры. В 2009 г. теплообеспеченность первой половины вегетационного периода незначительно отличалась от среднемноголетней. Прохладная погода отмечена в первой половине апреля и начале июля 2009 г.

Сезонная динамика обмена метана между почвой и атмосферой. Во всех вариантах опыта преобладало выделение метана в атмосферу. В варианте с луговой растительностью при постоянно высоком увлажнении сезонный ход выделения метана в течение первого года опыта следовал изменению температуры почвы (рис. 2б). В июне эмиссия из монолитов была низкой даже при постоянно высокой влажности (порядка 0.1 мкг CH_4/кг сухой почвы · ч). Возможно, происходила адаптация микробного сообщества к условиям вегетационного эксперимента. В июле эмиссия достигла 120 мкг/кг · ч, после снижения температуры к концу лета снова уменьшилась, однако недостаток наблюдений в начале августа затруднил анализ спада эмиссии. С октября по декабрь наблюдали нетто-поглощение атмосферного метана, достигавшее 0.08 мкг/кг · ч. В течение следующего вегетационного периода почва этого варианта вновь была источником метана, однако величины эмиссии не превышали 2 мкг/кг · ч.

В вариантах с открытым торфом и посевом тимофеевки уровень эмиссии метана и ее временнóй ход различались незначительно при одинаковых условиях влажности. Для многих дат измерений несколько более высокую эмиссию наблюдали при залужении. При постоянно высокой влажности в первый год опыта выделение метана возрастало до ноября, достигнув 17 и 39 мкг/кг · ч в вариантах без растений и с посевом многолетних трав соответственно. В апреле уровень эмиссии был близким к максимальному осеннему, затем происходило его снижение. В конце эксперимента в июле 2009 г наблюдали эмиссию ~0.01 мкг/кг · ч.

Средняя эмиссия метана на единицу площади почвы под луговой растительностью составила для летних месяцев первого года опыта 32 мг/м^2 · сут, в десятки раз превышая ее величину в двух других вариантах (1.5–1.6 мг/м^2 · сут) (табл. 2). Однако осенью и в течение второго вегетационного периода монолиты, напротив, характеризовались пониженным средним выделением.

В период с июня по сентябрь, когда в соответствующих вариантах были смоделированы изменения влажности с ее понижением до 50% ПВ, выделение метана в атмосферу не было высоким (рис. 2а). В осенние месяцы в отдельных вариантах было зафиксировано нетто-поглощение CH_4 (до 0.01 мкг/кг · ч). Для почвенных монолитов с луговой растительностью более отчетливо отмечена реакция на изменение условий среды. Максимум эмиссии был зафиксирован на фоне увлажнения почвы до 90% ПВ, когда поток CH_4 возрос на порядок в течение 5 сут после полива 21 июля, достигнув 1.0 мкг/кг · ч. Это подтвердило предположение о возможных всплесках эмиссии метана из осушенных торфяных почв при увлажнении, которые мо-

гут не фиксироваться при эпизодических и даже периодических полевых измерениях.

По средней величине выделения метана за летние месяцы монолиты примерно в 3 раза превысили два других варианта с переменным увлажнением (соответственно 0.37 и 0.11–0.13 мг/м^2 · сут). В последующий период в тех же вариантах поддерживали условия постоянно высокой влажности. В 2009 г. эмиссия в варианте с луговой растительностью экспоненциально увеличивалась до июня, следуя ходу температуры и достигнув 50 мкг CH_4/кг сухой почвы · ч. Возможно, при избыточном увлажнении в этом варианте сформировались благоприятные условия для метаногенеза, в который было вовлечено легкодоступное органическое вещество, имеющееся в почве. Однако в июле, перед завершением опыта эмиссия снизилась на порядок, поскольку мог быть использован наиболее доступный материал для метаногенеза, но возможны и другие причины.

В 2009 г. эмиссия метана в вариантах, моделирующих первые две стадии залужения, не превышала 0.4 мкг/кг · ч. Интегральная величина выделения CH_4 за второй год опыта была в этих вариантах на порядок меньше по сравнению с вариантом луговой растительности. При этом в варианте с посевом тимофеевки среднее выделение метана было примерно в 2 раза больше, чем в варианте с открытым торфом, что также могло подтверждать связь интенсивности продукции метана с наличием легкодоступного органического вещества, поставляемого корнями растений.

Суточная динамика потока метана. В течение наблюдений с интервалом 5 ч в течение 3 сут, выполненных в июле 2008 г., температура почвы менялась от 12 до 23°С (рис. 3). Выделение (поглощение) метана в целом следовало ходу температуры, причем более отчетливо – для условий переменной влажности и менее – для условий высокой влажности. Явно отмечены, особенно для условий переменного увлажнения, вечерние максимумы и утренние минимумы эмиссии, а также понижательный тренд, соответствующий изменению погодных условий за период измерений. Однако для монолитов с луговой растительностью этот тренд выражен не был: при снижении температур эмиссия метана оставалась на прежнем уровне. В вариантах с переменным увлажнением, в которых влажность почвы находилась во время наблюдений на невысоком уровне (≈60% ПВ), при пониженных температурах наблюдали нетто-поглощение метана из атмосферы, наиболее четко зафиксированное для монолитов. Полученные данные свидетельствовали о положительной связи нетто-выделения метана с температурой. Связь между потоком CH_4 и температурой почвы была значимой для варианта открытого торфа при высокой

Таблица 2. Удельный поток метана в периоды наблюдений в зависимости от растительности и режима увлажнения почвы

Период		Длительность периода, сут.	Поток CH_4 за период (среднее), мг/м^2 · сут					
			варианты					
			переменная влажность почвы (50–90% ПВ)			постоянно высокая влажность (90% ПВ)		
			без растений*	посев тимофеевки*	луговая растительность**	без растений*	посев тимофеевки*	луговая растительность**
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
Сутки со среднесуточной температурой воздуха	<10°С, 2008 г.	94	0.014 ± 0.004	0.020 ± 0.002	0.038 ± 0.004	7.1 ± 2.9	13.8 ± 5.4	0.26 ± 0.27
	>10°С, 2008 г.	100	0.110 ± 0.020	0.096 ± 0.027	0.319 ± 0.043	2.22 ± 0.54	2.88 ± 0.66	27.7 ± 4.5
	<10°С, 2009 г.	43	0.068 ± 0.010	0.082 ± 0.020	0.74 ± 0.19	2.16 ± 0.97	16 ± 12	0.71 ± 0.03
	>10°С, 2009 г.	69	0.063 ± 0.011	0.157 ± 0.021	18 ± 14	0.48 ± 0.17	2.6 ± 1.2	0.43 ± 0.30

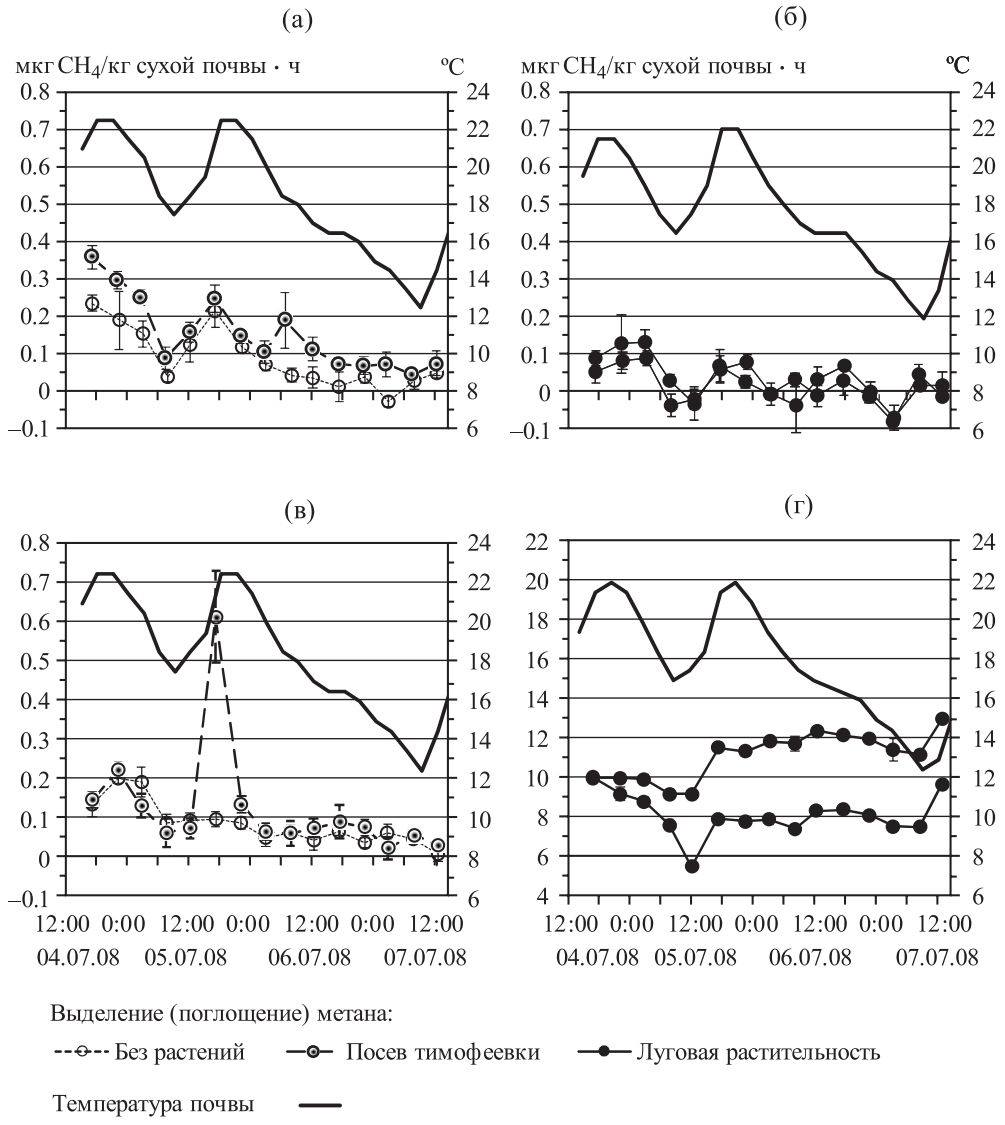

Рис. 3. Суточная динамика выделения (поглощения) метана при переменной (а, б) и при постоянно высокой (в, г) влажности. Положение каждой точки вдоль горизонтальной оси соответствует середине периода экспозиции камеры.

влажности, а также для почвы с посевом тимофеевки (при обоих уровнях влажности). Величины коэффициента $\mathbf{Q}_{10}$ для этих вариантов находились в интервале 4.6–6.2.

Связь выделения метана с температурой и влажностью почвы. Для проверки гипотезы о зависимости эмиссии метана от влажности почвы, контролируемой в опыте, а также от сезонных изменений температуры проведен корреляционный анализ данных сезонной динамики при переменной влажности с июня по сентябрь 2008 г. В качестве независимых переменных использованы средняя за 10 сут перед каждым измерением влажность почвы и средняя за время экспозиции камеры температура почвы. Для всех 3-х вариантов почвы и растительности выявлена значимая экспоненциальная зависимость от этих факторов (рис. 4). Множественный коэффициент корреляции изменялся для отдельных вариантов от 0.83 до 0.86. Величины частных коэффициентов корреляции составляли 0.59–0.75 и 0.66–0.81 для зависимости от температуры и от влажности соответственно. Было закономерным увеличение интенсивности анаэробного разложения органического вещества при повышении влажности до уровня, близкого к полной влагоемкости. Представляет интерес также положительная температурная зависимость нетто-выделения CH_4, которая проявлялась и в суточном ходе этого показателя. Известно, что изменение температуры в большей степени влияет на активность метаногенеза, чем на окисление метана [30], и что результирующая температурная зависимость измерявшейся в полевых условиях эмиссии CH_4 положительна [31]. Это является вероятным объ-

яснением температурной зависимости, зафиксированной в опыте.

Интенсивность процессов образования и потребления метана в конце опыта. Потенциальные активности продукции и аэробного окисления метана, определенные после окончания опыта, дали информацию о двух процессах, которые определяли знак и величину измерявшегося в опыте показателя – нетто-обмена CH_4 между почвой и атмосферой. Разные варианты температурных условий (17 и 25°С), позволили оценить и их влияние. Для почвы сенокоса активность метаногенеза, определенная в анаэробных условиях, была на 2 порядка больше в сравнении с почвой участка добычи торфа без растений (рис. 5). В почве монолитов, находившейся в первый год в условиях переменного увлажнения, активность метаногенеза в конце опыта была больше. Это соответствовало более высокой нетто-эмиссии в этом варианте, которую отметили во 2-й год вегетационного опыта. При инкубации почвы варианта без растений при атмосферной концентрации CH_4 в газовой фазе наблюдали некоторый ее рост (данные не приведены). Почва монолитов в тех же условиях потребляла метан. Таким образом, значительно большее образование CH_4 в этом варианте перекрывалось высокой плотностью популяции метанотрофов. Однако значительная часть продуцируемого метана все-таки выделялась в атмосферу, что было зафиксировано в вегетационном опыте (рис. 2). Для почвы сенокоса различие в активности продукции CH_4 между температурами 17 и 25°С соответствовало величине коэффициента Q_{10}, равной 21–46. Q_{10} для температурной зависимости потенциальной активности окисления метана в том же интервале температуры был равен 0.9–2.4. Это также может объяснять значительные величины эмиссии метана, отмеченные в ходе вегетационного эксперимента, особенно в теплый летний период.

Удельный поток метана в зависимости от растительности. Среднее выделение метана за один год проведения опыта было рассчитано для периода с 8 июля 2008 г. по 7 июля 2009 г. Этот период не включал первые 1.5 мес. опыта с предположительно наиболее сильными нестационарными изменениями обсуждаемого показателя после переноса почвы в условия, которые отличались от естественных. При расчете было сделано допущение о нулевом выделении и поглощении CH_4 в период с середины декабря до середины марта. При поддержании постоянно высокой влажности с начала опыта среднее выделение в вариантах с посевом трав и с луговой растительностью было близким и составило 6.7 мг/м^2 · сут. Для варианта без растений оно было равно 2.8 мг/м^2 · сут. При интерпретации этих результатов необходимо учитывать, что общая теплообеспеченность периода проведения вегетационного эксперимента превышала среднемноголетнюю.

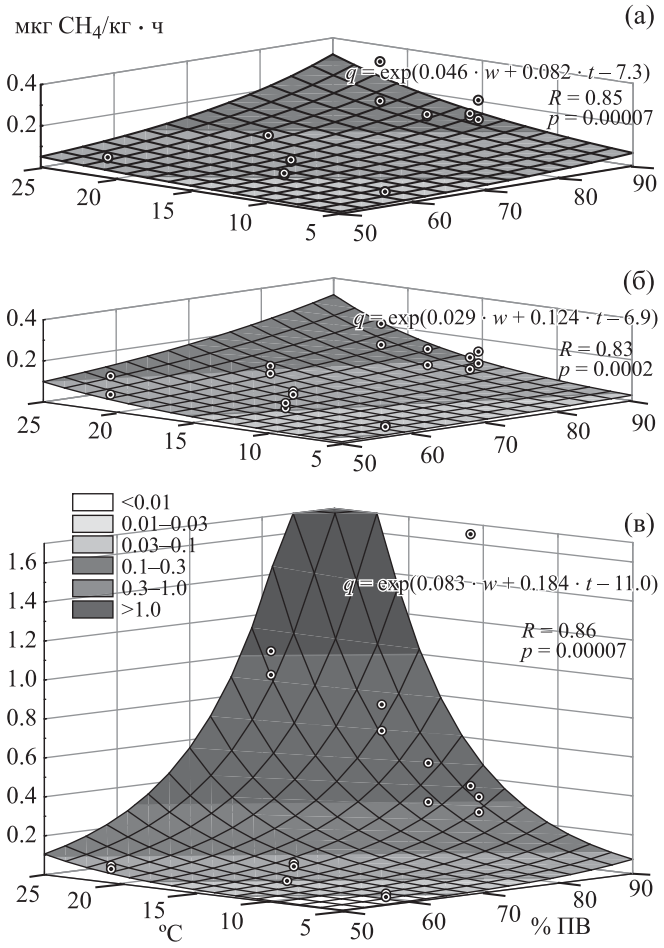

Рис. 4. Выделение метана (*q*, мкг/кг/ч) в зависимости от влажности (*w*, % ПВ) и температуры (*t*, °С) почвы: (а) – без растений, (б) – посев тимофеевки, (в) – луговая растительность; *R* – линейный коэффициент множественной корреляции, *p* – уровень значимости.

Выделение метана на единицу площади для монолитов с луговой растительностью при переменном увлажнении имело тот же порядок величин, что и величины потока, зафиксированные при полевых измерениях на сенокосном участке (0.01 мг CH_4/м^2 · ч) [17]. В вегетационном эксперименте также наблюдали поглощение метана, которое нередко имело место в полевых условиях. При постоянно высокой влажности эмиссия из монолитов была в среднем близка к 1 мг/м^2 · ч, или на 2 порядка больше, чем наблюдавшаяся на соответствующем участке торфяника. В варианте открытого торфа при переменной влажности выделение метана было на уровне 0.001, а при постоянно высокой влажности – 0.1 мг CH_4/м^2 · ч. На натурном объекте (участке торфодобычи), с которого была взята почва данного варианта опыта, в отдельные периоды наблюдали выделение или поглощение CH_4 (~0.01 мг/м^2 · ч).

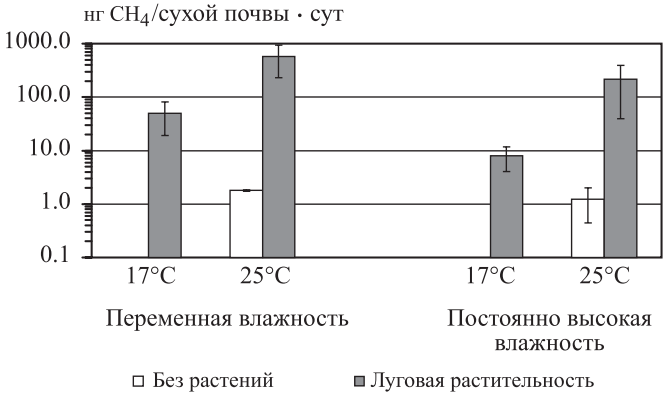

Рис. 5. Потенциальная активность продукции метана почвой после окончания вегетационного опыта.

Применимость результатов. Вегетационный опыт не может полностью смоделировать полевые условия. Перенос почвы мог повлиять на метанотрофное микробное сообщество, причем особенно сильно для вариантов с нарушенным почвенным сложением. Суточная амплитуда температуры почвы в модельных условиях отлична от естественной, а искусственное создание переменной влажности не может повторить динамику увлажнения от атмосферных дождевых осадков и последующее высушивание торфяной почвы.

Полученные данные убедительно свидетельствуют о влиянии растительности на потоки метана из осушенных торфяных почв. Разница между выделением CH_4 из открытой и только что залуженной торфяной почвы, с одной стороны, и покрытой луговой растительностью, с другой, очевидна. Отсутствие значительных различий между почвой двух участков, использованной для опыта, дополнительно подчеркивает значимость фактора растительности.

Вегетационный опыт подтвердил предположения и имевшиеся данные натурных измерений о выделении метана из осушенных торфяных почв при определенном увлажнении. Это касается как используемых и заброшенных торфоразработок без растений или с формирующейся растительностью, так и торфяных почв осушенных земель, используемых в сельском хозяйстве. Эта информация подчеркивает необходимость учета метана при рассмотрении таких площадей как источников и поглотителей парниковых газов [1, 32, 33]. Величина потока в целом небольшая, однако с учетом масштаба таких земель их интегральный вклад может быть весомым. Его учет также позволит скорректировать оценку возможного увеличения поступления метана в атмосферу при обводнении таких земель. Обводнение – необходимая мера для снижения опасности торфяных пожаров путем изменения водного режима торфяных почв и возвращения болотной растительности [7] для восстановления болотных экосистем для поддержания биологического разнообразия и других выгод, среди которых к ключевым относится сокращение потерь углерода, поступающего в виде CO_2 в атмосферу [34]. Увеличение эмиссии метана при обводнении – один из наиболее частых аргументов оппонентов этих мероприятий, и более обоснованный учет эмиссии метана из осушенных торфяных почв поможет скорректировать эти опасения. Это поможет оптимизации работ по обводнению, направленных прежде всего на «искусственное заболачивание» [8] как приоритетной меры по рекультивации осушенных неиспользуемых торфяников, для чего необходимо не затопление, а поднятие уровней болотных вод для усиления увлажнения торфяных почв. Результаты вегетационного опыта показали, 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 открытый торф имеет ряд преимуществ. Это необходимо учитывать при планировании мероприятий по обводнению и рекультивации деградирующих торфяных почв.

ВЫВОДЫ

1. В вегетационном опыте с осушенной торфяной почвой для всех вариантов растительности (открытый торф, первый год после посева многолетних трав и 20-летний луговой фитоценоз) при переменном (изменения в пределах 50–90% ПВ) и постоянно высоком (90% ПВ) режимах влажности почвы эмиссия метана в атмосферу (от 0.01 до 100 мкг CH_4/кг сухой почвы · ч) преобладала в течение всего периода с положительной температурой воздуха.

2. Для изученных вариантов растительности потоки метана были на 1–2 порядка больше при постоянно высокой влажности, чем при переменной; среднее выделение за летний период составило 0.1–0.4 и 1–30 мг $CH_4/м^2$ · сут соответственно. Через 5 сут после повышения влажности с 50 до 90% ПВ на почвенных монолитах с луговой растительностью отмечено увеличение эмиссии CH_4 на порядок. Это подтвердило возможность всплеска эмиссии метана из осушенных торфяных почв при увлажнении, которое может оказаться не зафиксированным при эпизодических и даже регулярных натурных измерениях.

3. Сезонный ход изменения потока метана в целом следовал изменению температуры почвы. Выявлена значимая экспоненциальная зависимость эмиссии метана от температуры и влажности поч-

вы. Положительная температурная зависимость зафиксирована и при измерениях, выполнявшихся в течение 3 сут с интервалом 5 ч. В осенний период, а также летом в ночное время в отдельных вариантах наблюдали поглощение метана, достигавшее 0.1 мкг CH_4/кг · ч.

4. При постоянном поддержании высокой влажности эмиссия метана в варианте луговой растительности достигла максимума примерно через 2 мес. после начала опыта. В течение второго вегетационного периода ее уровень был на 2 порядка меньше. В варианте с посевом тимофеевки максимальная величина выделения CH_4 в атмосферу была близкой, однако отмечена весной 2-го года опыта. Затем до середины лета во всех вариантах с постоянно высокой влажностью происходило снижение эмиссии метана. Видимо, при благоприятных условиях влажности количество доступного органического материала сокращалось даже в случае луговой растительности, где очевидно происходило его продуцирование. Значение свежего органического материала для образования метана подтвердил и эксперимент с длительной (2.5 года) инкубацией почвы, продемонстрировавший постепенное снижение нетто-выделения метана при благоприятных условиях высокой влажности.

5. Среднее выделение CH_4 за один год проведения опыта было близким (6.7 мг/м^2 · сут) в вариантах с посевом тимофеевки и с луговой растительностью при постоянно высокой влажности почвы. В варианте без растений оно составило 2.8 мг/м^2 · сут.

6. Эмиссия из почвенных монолитов с луговой растительностью при переменной влажности была того же порядка величины (0.01 мг CH_4/м^2 · ч), что и величины потока, наблюдавшиеся при полевых измерениях на сенокосном участке, где были отобраны монолиты. При постоянно высокой влажности эмиссия в вегетационном опыте была на 2 порядка больше.

7. Обводнение осушенных торфяных почв может способствовать большей эмиссии CH_4 в случае развитой луговой растительности, чем из открытого и слабо заросшего торфяного грунта. Эти величины могут уменьшаться по мере использования свежего органического вещества. Тем не менее эмиссия метана в условиях периодического увлажнения осушенных торфяных почв и при их обводнении имеет значение, с точки зрения поступления CH_4 в атмосферу и изменения климата. Ее необходимо принимать во внимание при планировании, разработке технологии и проведении мероприятий по обводнению и рекультивации пожароопасных осушенных и неиспользуемых в настоящее время торфяных почв.

Авторы признательны Э.А. Томутовой и 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, П.П. Леонову (РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева), Л.Е. Дулову (ИНМИ РАН им. С.Н. Виноградского), М.В. Глаголеву, А.Ф. Сабрекову (факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова), Т.Ю. Минаевой (Институт лесоведения РАН) за практическое содействие и помощь, без которых работа не могла бы быть выполнена. Авторы также благодарят Т.М. Россинскую (РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева), предоставившую данные Метеорологической обсерватории им. В.А. Михельсона, и И.К. Кравченко (ИНМИ РАН им. С.Н. Виноградского), давшую ценные советы при обсуждении результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands / Eds. Hiraishi T. et al. Intergovernmental Panel on Climate Change. Switzerland: IPCC, 2014.
2. *Вомперский С.Э., Иванов А.И., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Глухова Т.В., Дубинин А.И., Глухов А.И., Маркелова Л.Г.* Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // Почвоведение. 1994. № 12. С. 17–25.
3. *Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А.* Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. геогр. 2005. № 5. С. 21–33.
4. *Вомперский С.Э., Сирин А.А., Сальников А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А.* Оценка площади болотных и заболоченных земель России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 3–11.
5. Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / Под ред. Сирина А.А., Минаевой Т.Ю. М.: Геос, 2001. 190 с.
6. A Quick scan of peatlands in central and eastern Europe / Eds Minayeva T., Sirin A., Bragg O. The Netherlands, Wageningen: Wetlands International, 2009. 132 p. (http://www.wetlands.org/LinkClick.aspx?fileticket=Az8K7KVj%2bhk%3d&tabid=56).
7. *Сирин А., Минаева Т., Возбранная А., Барталев С.* Как избежать торфяных пожаров? // Наука в России. 2011. № 2. С. 13–21.
8. Водный кодекс Российской Федерации от 3 июня 2006 года № 74-ФЗ.
9. *Holmgren K., Kirkinen J., Savolainen I.* Climate impact of peat fuel utilization // Peatlands and climate change / Ed. Strack M. International Peat Society. Saarijärvi, Finland: Saarijärven Offset Oy, 2008. P. 123–147.
10. *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.

11. *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. 1–10.

12. *Van den Pol-van Dasselaar A., van Beusichem M.L., Oenema O.* Effects of grassland management on the emission of methane from intensively managed grasslands on peat soil // Plant and Soil. 1997. V. 189. № 1. P. 1–9.

13. *Van den Pol-van Dasselaar A., van Beusichem M.L., Oenema O.* Methane emissions from wet grasslands on peat soil in a nature preserve // Biogeochemistry. 1999. V. 44. № 2. P. 205–220.

14. *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.

15. *Von Arnold K., Weslien P., Nilsson M., Svensson B.H., Klemedtsson L.* Fluxes of CO_2, CH_4 and N_2O from drained coniferous forests on organic soils // Forest Ecol. Manag. 2005. V. 210. № 1–3. P. 239–254.

16. *Von Arnold K., Nilsson M., Hänell B., Weslien P., Klemedtsson L.* Fluxes of CO_2, CH_4 and N_2O from drained organic soils in deciduous forests // Soil Biol. Biochem. 2005. V. 37. № 6. P. 1059–1071.

17. *Чистотин М.В., Сирин А.А., Дулов Л.Е.* Сезонная динамика эмиссии углекислого газа и метана при осушении болота в Московской области для добычи торфа и сельскохозяйственного использования // Агрохимия. 2006. № 6. С. 54–62.

18. *Regina K., Pihlatie M., Esala M., Alukukku L.* Methane fluxes on boreal arable soils // Agricult. Ecosyst. Environ. 2007. V. 119. P. 346–352.

19. *Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сирин А.А.* Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрохимия. 2008. № 5. С. 56–68.

20. *Höper H., Augustin J., Cagampan 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. International Peat Society. Saarijärvi, Finland: Saarijärven Offset Oy, 2008. P. 182–210.

21. *Kettunen R., Saarnio S., Martikainen P., Silvola J.* Elevated CO_2 concentration and nitrogen fertilisation effects on N_2O and CH_4 fluxes and biomass production of *Phleum pratense* on farmed peat soil // Soil Biol. Biochem. 2005. V. 37. № 4. P. 739–750.

22. *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.

23. *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.

24. *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. DOI: 10.1029/2007JG000609.

25. *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.

26. *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.

27. *Davison A.C., Hinkley D.V.* Bootstrap methods and their application. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 582 p.

28. *Sirin A., Laine J.* Peatlands and greenhouse gases // Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Main report / Eds Parish F. et al. Kuala Lumpur: Global Environment Centre; Wageningen: Wetlands International, 2008. P. 118–138.

29. *Strack M., Waddington J.M., Turetsky M., Roulet N.T., Byrne K.A.* Natural peatlands, greenhouse gas exchange and climate change // Peatlands and climate change / Ed. Strack M. International Peat Society. Saarijärvi, Finland: Saarijärven Offset Oy, 2008. P. 44–69.

30. *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.

31. *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. DOI: 10.1029/2002GL016848.

32. *Wilson D., Blain D., Couwenberg J., Evans C.D., Murdiyarso D., Page S., Renou-Wilson F., Rieley J., Sirin A., Strack M., Tuittila E.-S.* Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils // Mires and Peat. 2016. V. 18. P. 1–10.

33. *Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P.* The role of peatlands in climate regulation // Peatland restoration and ecosystem services – science, policy and practice / Ed. Bonn A. Cambridge University Press, 2016. P. 66–79.

34. Carbon credits from peatland rewetting – climate-biodiversity-land use / Eds. Tanneberger F., Wichtmann W. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers, 2011. 223 p.

The Temporal Pattern of Methane Emission from Drained Peat Soil at Pot Experiment as Depended on Vegetation and Soil Moisture

M.V. Chistotin[1, 2], G.G. Suvorov[2], A.A. Sirin[2]

[1]*D.N. Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry, 127550, ul. Pryanishnikova 31a, Moscow, Russia*

E-mail: chistotinmv@yahoo.com

[2]*Institute of Forest Science, 143030 Uspenskoe, Odintsovo raion, Moscow oblast, ul. Sovetskaya, 21, Russia*

E-mail: suvorov@ilan.ras.ru, sirin@ilan.ras.ru

During a pot experiment, the methane emission (up to 100 μg/kg dry soil · h) from a drained peat soil prevailed over the uptake (up to –0.1 μg/kg · h) for bare soil, soil with perennial grasses and 20-year old meadow treatments. CH_4 efflux into the atmosphere was 1 to 2 orders of magnitude larger under the constantly high soil water content (90% of maximum water-holding capacity), as compared with the alternating water content (50 to 90%). An exponential dependence of the emission on soil temperature and water content was revealed. During the first year of the experiment, average methane emission was nearly equal for the perennial grass cover and the meadow vegetation. The emission decreased during the late period of the experiment.

Key words: methane, temporal pattern of emission, drained peat soil, vegetation, rewetting regime, pot experiment.