

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭМИССИИ МЕТАНА БОЛОТАМИ: ОТ
ПОЧВЕННОГО ПРОФИЛЯ – ДО РЕГИОНА
(К 15-ЛЕТИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ)*.

Глаголев М.В.¹, Смагин А.В.^{1,2}

Контактный адрес электронной почты: smagin@list.ru

¹ - Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
факультет почвоведения

² - Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
институт экологического почвоведения

Исследуется проблема экспериментальной оценки и моделирования экологической газовой функции болотных ландшафтов на различных иерархических уровнях их организации на примере эмиссии парникового газа - метана. Приведены результаты многолетних исследований генерирования, окисления, транспорта и эмиссии CH_4 на болотных массивах Томской области. Впервые обоснована региональная оценка потока метана из болот Томской области в атмосферу порядка $0.5 TgC-CH_4$. Обсуждаются методологические проблемы исследования газовой функции в болотных экосистемах и почвах.

ВВЕДЕНИЕ.

Успешное решение проблемы долгосрочного прогнозирования парникового эффекта атмосферы невозможно без знания функционирования и распределения наземных источников и стоков газообразных веществ (Минько, 1988). Болотные почвы и ландшафты оказывают существенное влияние на газовый состав атмосферы, являясь мощными резервуарами органического углерода и воды, и связывая на длительное время в составе торфяных залежей диоксид углерода атмосферы. Одновременно болотные экосистемы служат одним из основных природных источников углеродсодержащих парниковых газов, среди которых на первом месте находится метан. Его вклад в глобальный парниковый эффект относительно других газов составляет не

* Финансовая поддержка фондов РФФИ, RSSF, ЮНЕП/ГЭФ (Wetlands International, M3475/RU005614/GLM; M3504/RU005614/GLP; M4063/RU005614/GLP; M4307/RU005614/GLM; M4383/RU005614/GLT), федеральных программ «Интеграция», «Университеты России» «Биологические ресурсы России».

менее 15%, а способность к экранированию теплового излучения превышает в 20-40 раз аналогичную характеристику для диоксида углерода и считается, что без метана средняя температура поверхности Земли была бы на $1,3^{\circ}\text{C}$ (Кароль, 1996, Смагин, 2005). Особое значение эмиссия метана имеет для России, где торфяные болота вместе с заболоченными мелкоотторфованными землями занимают около 21.6% территории (Вомперский, 1994). При этом очевидно, что значительный вклад в глобальную эмиссию метана может вносить Западная Сибирь – крупнейший болотный регион планеты.

Большая часть натуральных измерений потоков метана на болотах нашей страны была выполнена в Западной Сибири - в Томской области, где только собственно болота без учета заболоченных земель занимают 29-30% территории (Семенова, 2001). Эти измерения проводились ежегодно начиная с 1992 г, что позволило за истекшие 15 лет получить уникальный массив информации, содержащий данные об образовании, внутрипочвенном транспорте, потреблении и эмиссии метана на нескольких иерархических уровнях – от почвенного профиля до региона.

Ранее предпринималось несколько попыток обобщения информации, полученной в описываемых исследованиях, однако ни одну из них нельзя признать полностью успешной. Наиболее объемной и доступной для читателя является работа (Паников, 1995), но она охватывает лишь самое начало исследований (1992-1994 гг.). Краткие обобщения результатов даны в статьях (Glagolev et al., 2001) (период 1995-1999 г.г.) и (Глаголев и Смагин, 2003) (1995-2003 гг.) Несколько подробнее результаты 1996-2001 гг. описаны в (Глаголев и Эгнаташвили, 2004), но эта работа была опубликована в малотиражном внутриведомственном издании и оказалась совершенно недоступна специалистам-экологам. Кроме того, следует отметить, что вышеперечисленные работы содержат лишь сведения небольших

отечественных рабочих групп, и не охватывают результатов комплексных экспедиций с международным участием, и в первую очередь специалистов японского Национального института исследований окружающей среды (NIES) долгое время работавших в Томской области. В связи с этим цель настоящей публикации – дать более подробное изложение результатов, полученных на территории Томской области в ходе 15-летних исследований по проблеме парниковых газов.

Краткая история исследований эмиссии CH_4 в Томской области.

Изучение эмиссии метана на территории Томской области было начато в 1992 г. группой сотрудников из трех институтов РАН (Микробиологии – ИНМИ, Почвоведения и Агрохимии – ИПА и Химической Кинетики и Горения – ХКиГ). В первый год были обследованы несколько относительно небольших болот Томского стационара Института леса СО РАН. С 1993 г. были развернуты работы в районе стационара «Плотниково» ИПА СО РАН, в частности, на Бакчарском болоте (рис.1), ставшем на все последующие годы основным объектом.

Начиная с 1994 г., к работе присоединились специалисты из японского Национального института исследований окружающей среды (*Паников*, 1995). С 1997 г. по 2004 г. на Бакчарском болоте работала учебно-научная экспедиция отдела экологического образования Московского Городского Дворца Детского (Юношеского) Творчества (МГДДЮТ). В 1998-1999 гг. и в 2005-2006 гг. в исследованиях принимала участие экспедиция факультета почвоведения и института экологического почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова.

Стационарные измерения за прошедшие годы преимущественно выполнялись только на двух участках, оба из которых были локализованы на территории крупнейшей в мире системы Большого Васюганского болота. Первый – уже упоминавшееся Бакчарское болото. Второй – ландшафтный профиль р. Ключ в районе стационара «Полынянка», где работала, в основном,

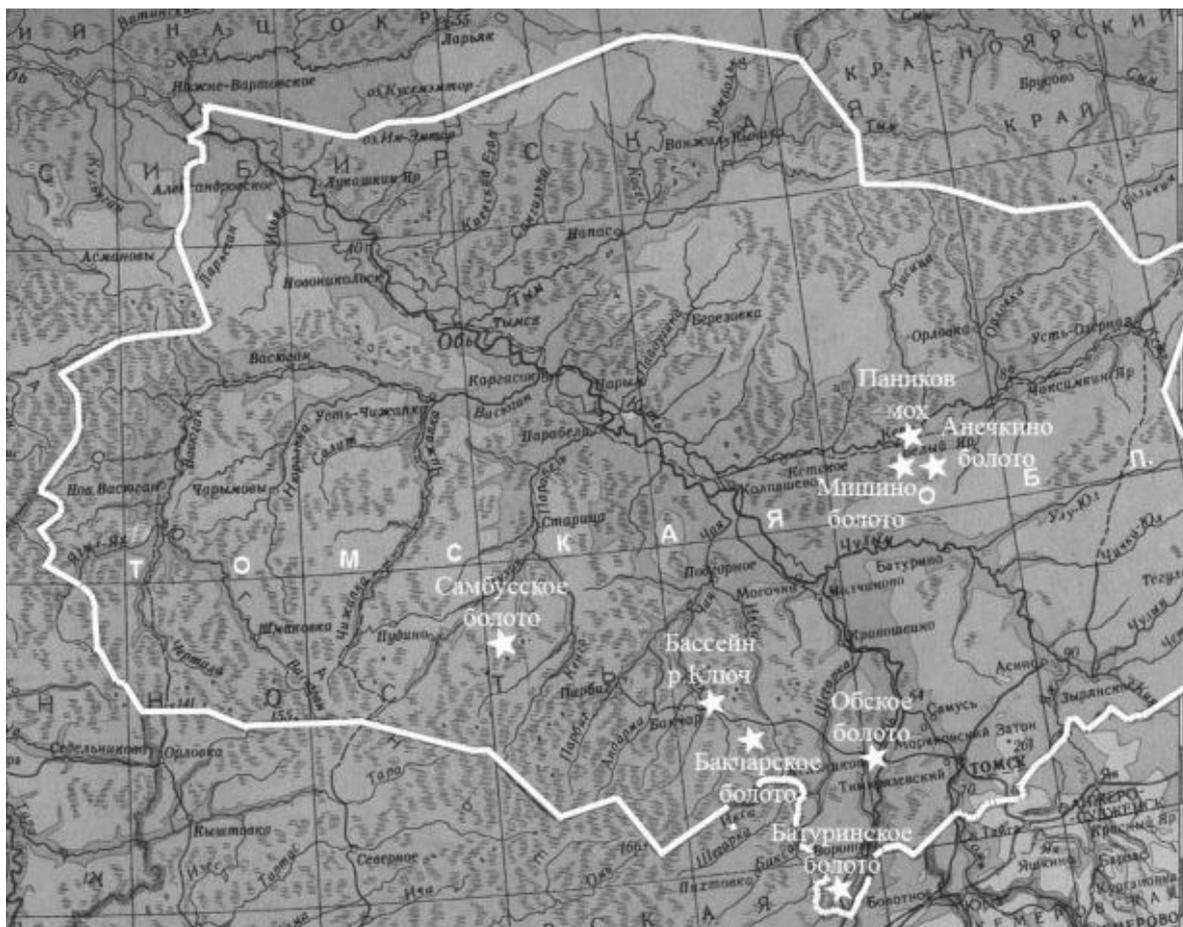


Рис.1 Карта района исследований.

экспедиция Сибирского НИИ торфа, а в последние годы также и Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН). Японские исследователи широко использовали в своей работе отбор проб с самолета, что позволяло существенно расширить географическую область исследований по оценки эмиссия метана. В 2003-2006 гг. экспедиции МГДДЮТ и МГУ также увеличили репрезентативность исследований: в 2003-2005 гг. исследовательские полигоны были размещены на расстояниях порядка десятков километров друг от друга, в 2006 г. – порядка сотен километров.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭМИССИИ МЕТАНА В ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ.

Измерения потоков CH_4 проводились на экспериментальных полигонах в Бакчарском, Верхнекетском, Кожевниковском, Парабельском, Томском и

Шегарском районах Томской области (рис.1). Исследования проводились на естественных и осушенных болотах различных типов (верховых, переходных, низинных).

Район исследований охватывает часть междуречий Кеть-Чулым (Прикетье) и Обь-Томь (Южное Привасюганье), северо-восточные отроги Большого Васюганского болота (Восточное Васюганье), а также отрезок поймы северной части долины Верхней Оби, известной в литературе под названием Томского Приобья. В Томском Приобье эксперименты проводились на двух (из пяти, выделяемых в литературе) геомассивах: Батурином (самом южном) и Шегарском (самом северном). Наибольшее количество результатов получено на Бакчарском болоте (одном из отрогов Большого Васюганского болота, близ стационара ИПА СО РАН «Плотниково»), где исследования осуществлялись ежегодно. В 40 км к западу от этой точки (на ландшафтном профиле р. Ключ) в последние годы в связи с организацией стационара ИМКЭС СО РАН «Полынянка» также начались интенсивные работы.

Геолого-морфологическое и литолого-геоморфологическое строение, физико-географические условия, климат, гидрологический режим, почвенный покров, растительность, строение торфяных залежей, структура и динамика пойменных болот Томского Приобья подробно описаны в (Лапина, 1987). Подробное описание Прикетья см., например, в (Базанов, 1988; Пологова и Дюкарев, 2003), а болот Восточного Васюганья - в (Lapshina et al., 2000). Ландшафтный профиль р. Ключ подробно описан в (Головацкая, 2004).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Лабораторные эксперименты по оценке потенциального продуцирования (поглощения) метана образцами торфяных почв.

Методика определения потенциальной биогенной эмиссии (поглощения) газов в лабораторных условиях методом инкубируемых флаконов изложена в руководствах (Методы почвенной ... 1991, Смагин, 2005). Суть методик заключается в инкубации образцов почвы в закрытых сосудах с объемом

воздушного пространства (V_{ϕ}) при оптимальных гидротермических условиях и факторах, влияющих на газогенерацию. В процессе инкубации через определенные интервалы времени (Δt) отбираются образцы газовой фазы, в которых анализируется содержание исследуемого компонента (C). В простейшем случае расчет интенсивности продуцирования (поглощения) газа (U) производится на абсолютно сухую массу образца (m_s), согласно формуле:

$$U = \Delta C V_{\phi} / (\Delta t m_s),$$

где ΔC – прирост (убыль) концентрации за данный промежуток времени.

Измерение интенсивности продукции метана *in situ*.

Полевые эксперименты по оценке продуцирования метана торфяной залежью осуществлялись исходя из следующих положений (Glagolev, 1998). Для некоторого объема почвы (слоя заданной мощности) записывается уравнение динамики концентрации газа (уравнение сохранения массы) и решается обратная задача – по динамике экспериментально измеряемого поля концентраций находится распределение мощности источников - $R_{\text{prod}}(t, z)$. Можно показать, что при определенных легко реализуемых *in situ* условиях (удаление растений, изоляция исследуемого объема почвы от поступления кислорода из атмосферы и от обмена с окружающей почвой в латеральном направлении) имеем

$$R_{\text{prod}}(t, z) \approx \partial[\text{CH}_4]/\partial t - D \cdot \partial^2[\text{CH}_4]/\partial z^2,$$

где $[\text{CH}_4]$ – концентрация метана в момент времени t на глубине z ; D – эффективный коэффициент диффузии CH_4 в почве (Glagolev, 1998; Смагин и Глаголев, 2004). Следовательно, для определения *in situ* интенсивности продукции газа необходимо отследить динамику его концентрационного профиля и выполнить вычисления в соответствии с вышеприведенным уравнением. Пробы газа (или жидкости) из толщи торфа отбирали посредством трубок ($\phi = 1$ мм) из нержавеющей стали, а в более поздних исследованиях – при помощи стационарных пробоотборников мембранного и заместительного

типов (Смагин, 2005). Эффективный коэффициент диффузии определяли по методу, описанному в (Смагин и Смирнов, 1996). Дифференцирование экспериментально полученных зависимостей $[CH_4]$ от t и z осуществляли после сглаживания по программе SPL06W01 из работы (Носач, 1994).

Измерение интенсивности потребления метана *in situ*.

Измерение интенсивности потребления (окисления) CH_4 основано на масс-спектрометрическом определении изотопного состава углерода метана. Известно (Alperin *et al.*, 1988; Whiticar, 1999), что метанооксиляющие микроорганизмы вовлекают в свой метаболизм предпочтительно $^{12}CH_4$, т.е. остающийся метан (в сравнении с метаном исходным) оказывается обогащен тяжелым изотопом ^{13}C . Для расчета доли (r) метана, окисленного в некотором слое (при движении CH_4 от одного почвенного слоя к другому) использовалась формула, основанная на теории Рэля:

$$r = 1 - \exp\{(\delta - \delta_0)/1000/(1/\alpha - 1)\},$$

где δ – изотопный состав метана в том почвенном слое, для которого рассчитывается количество окисленного метана; δ_0 – изотопный состав метана в том слое, относительно которого ведется расчет (т.е. в том слое, в котором метан образуется и где его больше, поскольку он еще не успел окислиться); α – кинетический фактор разделения изотопов (т.е. отношение константы скорости химической реакции, в которой участвует легкий изотоп, к константе скорости реакции тяжелого изотопа (Alperin *et al.*, 1988), $\alpha \approx 1.03$).

Оценка абиотических процессов поглощения метана в лабораторных условиях.

Помимо биогенного окисления поглощение CH_4 в торфяных почвах может происходить и благодаря физико-химическим процессам сорбции на твердой фазе и растворения в болотной воде. Растворимость метана (a) в природных условиях варьирует в диапазоне 0,03 – 0,05 единиц и обычно этим процессом пренебрегают из-за его малой интенсивности. Данных о поглощении метана

поверхностью торфяных субстратов у авторов не было, в связи с чем были предприняты эксперименты для количественной оценки этой величины адсорбционно-статическим методом (Смагин, 2005). Стерильные образцы торфа помещались в стеклянные флаконы с резиновыми крышками-герметизаторами, после чего внутрь флаконов вводился метан. По прошествии времени, необходимого для адсорбции газа, образцы быстро нагревались в микроволновой печи для термодесорбции поглощенного твердой и жидкой фазой метана. Если известно, что после поглощения в свободном объеме флакона осталась концентрация C_g^1 газа, а после быстрой термодесорбции его содержание возросло до C_g^2 , по разности концентраций с учетом объема флакона легко найти массу поглощаемого твердой и жидкой фазами почвы газа $m_g = (C_g^2 - C_g^1)V_\phi$. При известной величине растворимости газа (а), легко разделить линейные показатели его взаимодействия с жидкой и твердой фазами почв, используя уравнения для эффективной растворимости и следующее выражение материального баланса (Смагин, 2005):

$$C_s = ((C_g^2 - C_g^1)V_\phi / m_s - aC_g^1 W / \rho_l) \rho_s,$$

где C_g^1 , C_g^2 – концентрации газа до и после быстрой дегазации (термодесорбции) образца, V_ϕ – объем воздушного пространства флакона (определяется заполнением водой после проведения опыта), W , ρ_s – влажность и плотность твердой фазы почвы, ρ_l – плотность воды. Равновесная константа Генри для сорбции CO_2 твердой фазой почвы, согласно модели Генри находится из уравнения:

$$C_s = K_r C_g$$

Измерение эмиссии метана с поверхности методом статических камер.

Метод хорошо известен в почвоведении и его теория излагается во многих руководствах и учебных пособиях, см. например (Смагин, 2005). Использовались камеры с площадью основания – 37х37 либо 40х40 см²; заглубление основания в почву – до уровня стояния воды, объем камеры – 48-

64 л, время экспозиции – 30-60 минут в зависимости от типа растительной ассоциации. Основания устанавливались не менее чем за 20 минут до измерений. Для предотвращения механического выдавливания газа из почвы на Бакчарском болоте в самом начале описываемых многолетних исследований были установлены стационарные мостки. На других исследовательских полигонах использовались съемные мостки (1-2 алюминиевые доски, каждая 200x24 см²), устанавливавшиеся незадолго до начала измерения и снимающиеся по его окончании. В течение времени экспозиции пробы воздуха из камеры через газозаборные трубки длиной до 0.5 м отбирали несколько (до шести) раз в шприцы («IMP», США; «SFM», Германия) объемом 10 или 20 мл. Шприцы герметично закупоривались и доставлялись в лабораторию, где проводился количественный анализ газа.

При изучении транспорта метана, связанного с растениями использовались конические микрокамеры с площадью основания 172 см². Они устанавливались таким образом, чтобы их нижний край оказывался на несколько сантиметров ниже уровня воды. Микрокамеры размещались либо над известным числом сосудистых растений определенных видов («опыт»), либо на участках, покрытых только лишь *Sphagnum sp.* («контроль»). Измерялась эмиссия над растениями следующих видов: *Carex rostrata*, *Eriophorum vaginatum*, *Menyanthes trifoliata*, *Equisetum fluviatile*, *Oxycoccus palustris*, *Sphagnum magellanicum*, *Sphagnum fuscum*.

Японская исследовательская группа осуществляла измерения при помощи автоматических и полуавтоматических камерных систем различной конструкции (Inoue et al. 1997; Nakano et al., 2000, 2001, 2004; Nakano and Inoue, 1997; Sorokin et al., 1998).

Градиентный метод.

Градиентный метод измерения эмиссии метана с поверхности почвы в атмосферу основан на том, что вертикальный турбулентный поток (Q) инертной газовой примеси в атмосфере практически не изменяется с высотой в

приземном слое воздуха (т.е. в пределах этого слоя соответствует потоку на границе почва/атмосфера) и может быть вычислен на основе измерения коэффициента турбулентной диффузии (v) и профиля концентрации (C) данного газа в атмосфере на разных высотах по формуле (Матвеев, 2000):

$$Q = -v \cdot dC/dz, \quad \text{где} \quad v(z) \approx \chi^2 \cdot z \cdot V_1 / \ln(z_1/z_0)$$

(последнее уравнение приближенно выполняется вблизи земной поверхности до уровня в несколько десятков метров (Будыко, 1956)), здесь V_1 - скорость ветра (осредненная за интервал времени не менее 10 мин) на некоторой высоте z_1 ; χ – постоянная Кармана (обычно принимают $\chi=0.38$) (Матвеев, 2000); z_0 – параметр шероховатости (для открытой равнины с травой высотой до 0.2 м при небольшом числе отдельных препятствий $0.01 \leq z_0 \leq 0.03$ м, значения для других поверхностей приведены, например, в (Седунов, 1991)). Более точные формулы и методики вычисления коэффициента турбулентной диффузии в пограничном слое атмосферы рассмотрены, например, в (Будыко, 1956; Седунов, 1991; Смагин, 2005). Подробности градиентного метода см. в работе Смагина и Глаголева (2004).

При реализации данного метода существенной становится проблема четкого различения концентраций газа на близких высотах над поверхностью земли (т.е. проблема надежного различения близких концентраций). Уменьшение погрешности измерения близких концентраций мы осуществляли за счет увеличения числа повторностей: брали n проб с каждой высоты, тогда погрешность среднего уменьшалась в $n^{1/2}$ раз (обычно было $n=10$). Скорость ветра измеряли чашечным анемометром (с порогом чувствительности 0.1 м/с).

Аналитическая техника, сопутствующие измерения.

При измерениях методом ручных камер концентрация метана определялась на газовом хроматографе «ХПМ-4» («Хроматограф», СССР) с пламенно-ионизационным детектором. Условия определения: газ-носитель – H_2 , его расход – 10 мл/мин, колонка диаметром 2.5 мм и длиной 1 м заполнена

софполом, температура колонки – 85°C, проба вводилась через петлю объемом 0.132 см³.

Для изучения профильного распределения, межфазных взаимодействий и эффективных коэффициентов диффузии CH₄ был использован отечественный портативный газоанализатор ПГА-7 с ИФК-детектором на метан (*Смагин с соавт., 2003*)

Концентрация метана в автоматических камерах измерялась с помощью полупроводникового датчика (технические подробности см. в (*Nakano and Inoue, 1997; Inoue et al., 1998; Nakano et al. 2000; Геворкян, 2003*)).

С помощью электронных датчиков (серий «1921»-«1923», DALLAS Semiconductor, США) определялись температуры почвы (от поверхности до глубины 45 см) и атмосферы (на высоте 100 см). Параллельно с эмиссией измерялся уровень болотных вод (УБВ) в непрерывном режиме с помощью пьезоэлементного сенсора японского производства.. Геоботанические описания были сделаны на всех участках по общепринятой методике (обилие видов определялось в баллах по шкале Браун-Бланке) (Полевая геоботаника...).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.

Образование метана.

Одна из первых попыток измерения потенциальной скорости продукции метана образцами торфа, т.е. скорости продукции в оптимальных условиях была предпринята на Бакчарском болоте (Паников, 1995). Экспериментальные данные показали, что, начиная с глубины 20 см (10 см ниже УБВ) и, по крайней мере, до глубины 110 см она приблизительно постоянна и равна $U_p = 0.05 \text{ мгС} \cdot \text{дм}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$. Есть основания полагать, что это значение сильно занижено. Если бы микроорганизмы действительно образовывали метан в природных условиях с такой скоростью, то потенциальная (максимальная) эмиссия (F_{max} , мгС/м²/час) могла бы составить лишь $F_{\text{max}} = c \cdot U_p \cdot H$, где H – мощность слоя торфа ($H \sim 9 \div 30$ дм), c – коэффициент перехода от дм²/сут к

Доклады по экологическому почвоведению 2006, №3, вып.3

$\text{м}^2/\text{час}$ ($c \approx 4.2 \text{ дм}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$), т.е. $F_{\text{max}} = 4.2 \cdot 0.05 \cdot (9 \div 30) \approx 1.9 \div 6.3 \text{ мгС}/\text{м}^2/\text{час}$. В реальности на Бакчарском болоте как нами (Panikov et al., 1997; Glagolev, 1998; Kotsyurbenko et al., 2004; Шнырев и Глаголев, 2006), так и многими другими исследователями (см., например, (Inoue et al., 1997; Паников, 1998; Nakano et al., 1998; Maksyutov et al., 1999)) наблюдались на порядок бóльшие величины среднесуточной (даже не максимальной!) эмиссии – см. также табл. 1, 2 и рис. 2.

Сложность определения потенциальной интенсивности метаногенеза состоит в комплексности факторов, влияющих на этот процесс, и в недостаточной изученности их действия. В связи с этим мало в настоящее время не представляется возможным объективно задать действительно оптимальные условия эксперимента по продуцированию CH_4 . К сожалению, даже в отношении наиболее простых и обычных факторов внешней среды нет полной ясности.

Например, температурная зависимость продукции метана образцами торфа из Бакчарского болота независимо изучалась двумя научными группами, получившими различные результаты. Так, Паников (1998) опубликовал температурную кривую, из которой видно, что скорость продукции экспоненциально возрастает при возрастании температуры инкубирования образцов примерно до 35°C , максимум достигается приблизительно при 40°C , а дальнейшее возрастание температуры вызывает резкое падение скорости продукции. Эти экспериментальные данные очень хорошо описываются предложенным нами эмпирическим уравнением (Глаголев, 2006):

$$U(T) = B \cdot \exp(a_4 \cdot T^4 + a_3 \cdot T^3 + a_2 \cdot T^2 + a_1 \cdot T + a_0),$$

где $a_4 = -0,000003^\circ\text{C}^{-4}$, $a_3 = 0,0002^\circ\text{C}^{-3}$, $a_2 = -0,0028^\circ\text{C}^{-2}$, $a_1 = 0,0435^\circ\text{C}^{-1}$, $a_0 = -2,5465$, $B = 1 \text{ мгС}/(\text{час} \cdot \text{кг})$. Однако при попытке воспроизвести вышеуказанные экспериментальные результаты для образцов торфа из того же болота, было обнаружено, что скорость продукции экспоненциально возрастает лишь до 20°C , максимум достигается в интервале $20\text{-}25^\circ\text{C}$, а при дальнейшем

возрастании температуры скорость продукции резко падает, обращаясь в ноль при 35 °С (Kotsyurbenko et al., 2004). Возможно, указанное несоответствие результатов объясняется тем, что образцы брались с разных глубин или из-под разных растительных ассоциаций (хотя и в пределах одного болотного массива). Вышеприведенный пример показывает, что обеспечение оптимальности одних только температурных условий (для измерения потенциальной скорости продукции) уже сталкивается с серьезными трудностями, которые нельзя преодолеть без подробных исследований.

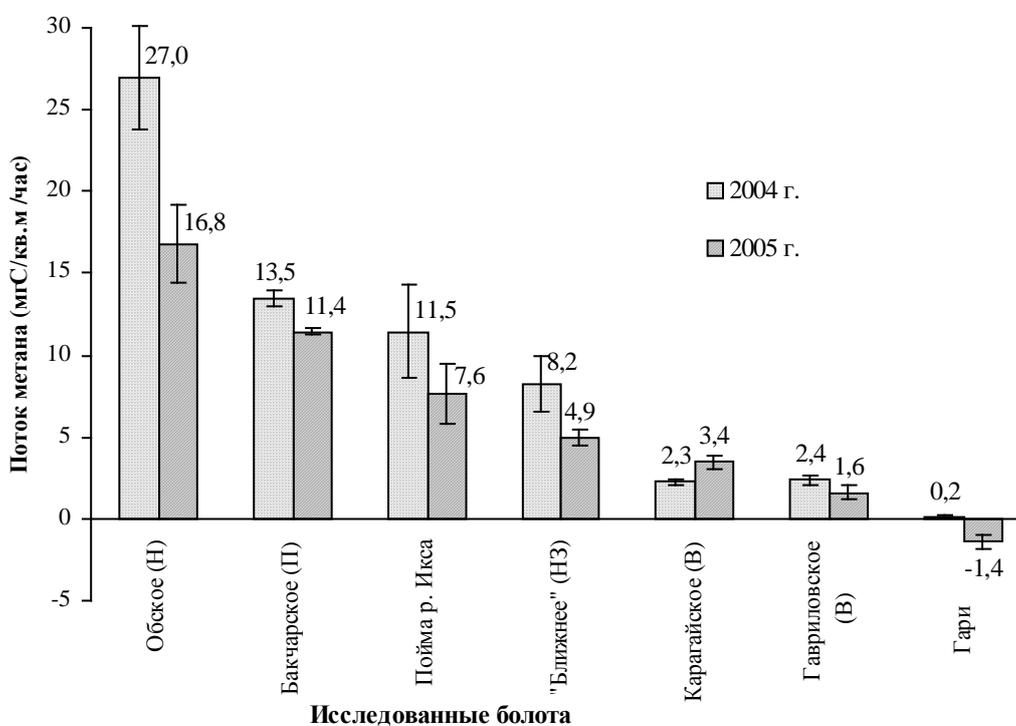


Рис.2 Экспериментальная оценка эмиссии метана с поверхности болот Западной Сибири (2004-2005 г.г.).

Измерение «актуальной» метаногенной активности непосредственно в поле (т.е. измерение интенсивности продукции метана *in situ*) показало, что она обнаруживается приблизительно на глубине 8 см под уровнем стояния воды, спустя еще 10-20 см достигает максимума ($U_m = 2 \text{ мгС} \cdot \text{дм}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$), а далее по

глубине экспоненциально снижается (с показателем экспоненты $g \approx 0.6 \text{ дм}^{-1}$). К сожалению, пока удалось измерить «актуальную» метаногенную активность лишь до глубины порядка первых дециметров. Вероятно, глубже она убывает более резко, во-первых, потому что (в первом приближении) метаногенная активность экспоненциально убывает с уменьшением температуры, а температура с глубиной убывает также экспоненциально; во-вторых, в более глубоких слоях лимитирование может происходить и по ряду других факторов (например, изменяется качественный и количественный состав субстратов метаногенеза). При суммировании экспоненциально распределенных источников по мощности торфяной залежи, пренебрегая первыми 10-20 см, где метаногенная активность мала, получаем, что монолит торфа с основанием 1 м^2 и высотой z мог бы эмитировать в атмосферу:

$$F \approx c \cdot \int_0^z U_m \cdot \exp(-g \cdot x) dx = c \cdot U_{\max} \cdot [1 - \exp(-g \cdot z)] / g \approx c \cdot U_{\max} / g = 14 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$$

(здесь учитывается, что для достаточно больших z можно принять экспоненциальный член равным нулю). Подчеркнем, что полученное значение – не «потенциальная» (максимально возможная) эмиссия, а актуальная ее величина, которая должна была бы получиться в тех условиях, в которых измерялась метаногенная активность, если бы кроме образования метана не существовало его потребления (о чем речь пойдет ниже). Если же говорить о реально возможной максимальной эмиссии, то в (Glagolev, 1998) приведены расчеты, показывающие, что максимально достижимой (в природных условиях Бакчарского болота) величиной продуцирования метана U_{\max} является $2.7 \text{ мгС} \cdot \text{дм}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$, при этом показатель экспоненциального убывания источников с глубиной $g \approx 0.3 \text{ дм}^{-1}$. Для таких численных значений получаем $F_{\max} = 4.2 \cdot 2.7 / 0.3 \approx 38 \text{ мгС} / \text{м}^2 / \text{час}$. Действительно, этот предел не был превышен даже в 1995 и 2002 годах (см. табл. 1 и 2), характеризовавшихся максимально высокими значениями температуры и УБВ.

Транспорт метана.

На настоящий момент для болотных экосистем известны следующие механизмы транспорта: диффузия газа через воду или воздух, заполняющие поры в грунте, пузырьковый перенос и транспорт газа, посредством растений (*Walter et al.*, 1996). Интенсивность переноса метана всеми этими путями была изучена в 1996-1998 гг. при работе на Бакчарском болоте.

Диффузионный поток (q_d) рассчитывается по первому закону Фика:

$$q_d = - D(z) \cdot \partial[\text{CH}_4] / \partial z,$$

где $D(z)$ – коэффициент диффузии. Вклад *диффузии* в транспорт метана составляет от первых единиц процентов в насыщенных водой болотных почвах до 10÷18% и более - в ненасыщенных (разброс возможных величин эмиссии в пределах порядка объясняется очень существенным различием численных значений коэффициентов диффузии в воздухе и воде). При экспериментальной оценке зависимости эффективных коэффициентов диффузии в торфе от пористости аэрации (Па) было получено следующее эмпирическое уравнение:

$$D[\text{см}^2/\text{час}] = 0,0046\text{Па}^3 + 0,047\text{Па}^2 - 0,0878\text{Па} + 0,19$$

Из него следует, что даже при нулевой пористости аэрации, то есть при полном насыщении образцов торфа влагой, молекулярное движение частиц газа происходит с интенсивностью 0,19 см²/час.

Как показывают экспериментальные данные (рис.3), при очень малых величинах воздухоносной пористости в диапазоне от 0 до 5% показатель D варьирует в пределах 0,15-3 см²/час, что в 2-40 раз выше чем известные из литературы значения коэффициента диффузии газа в чистой воде. Такое увеличение эффективного коэффициента диффузии метана в торфе – органическом материале с высокой удельной поверхностью мы связываем с явлением поверхностной диффузии газа (*Смагин с соавт.*, 2000). Оно заключается в предварительной адсорбции метана на поверхности твердой

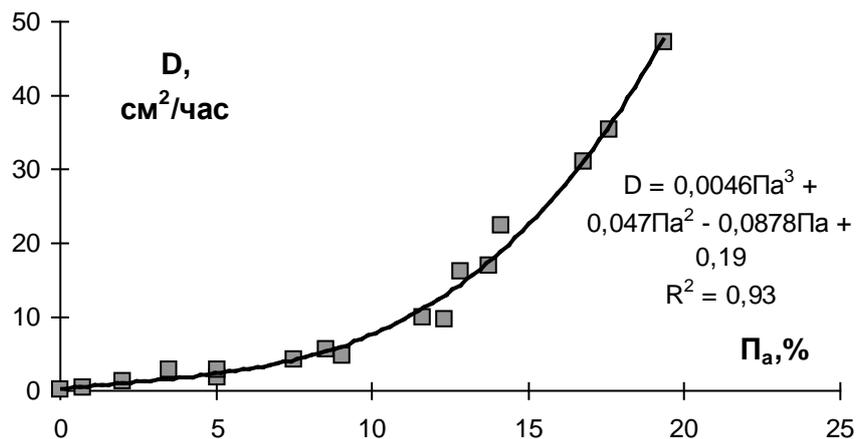


Рис. 3 Зависимость эффективных коэффициентов диффузии метана от пористости аэрации торфяника Бакчарского болота.

фазы и последующей диффузии под действием градиента концентрации по направлению к атмосфере (восходящая диффузия) или вглубь почвы (нисходящая диффузия).

Не менее важным результатом исследований было обнаружение в исследованных торфяных залежах природных неосушенных болот феномена локальной ненасыщенности в виде газоносных слоев (пузырей) значительной (до десятков м.) протяженности под верхними обводненными горизонтами (рис.4) (Смагин с соавт., 2000). Впоследствии оценка характерных размеров и мест локализации болотных газов в торфяных залежах Бакчарского болота была осуществлена без отбора образцов неразрушающими среду методами полевой электрофизики (Поздняков, 2001).

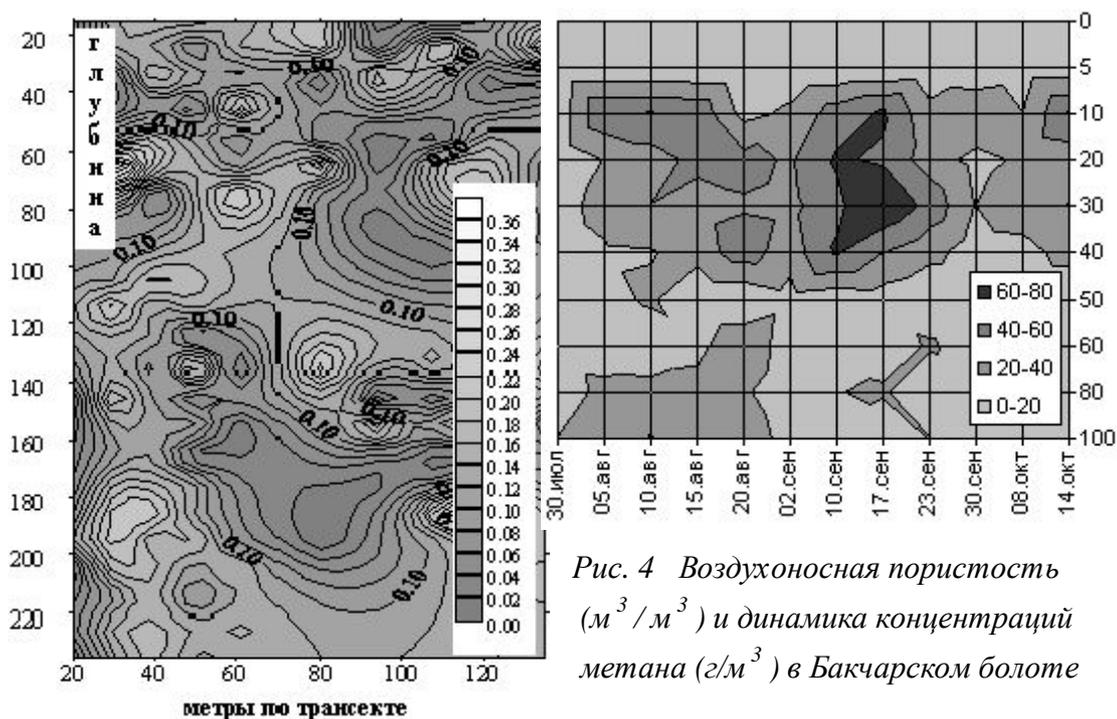


Рис. 4 Воздухоносная пористость ($\text{м}^3/\text{м}^3$) и динамика концентраций метана ($\text{г}/\text{м}^3$) в Бакчарском болоте

Следующим этапом был расчет диффузионных потоков метана в вертикальном направлении согласно закону Фика по данным о распределении концентраций газа (рис.4), и полученным выше эффективным коэффициентам диффузии в зависимости от воздухоносной пористости (Смагин с соавт., 2000). Восходящий поток с верхней границы варьировал от 0,06 до 0,9 $\text{мг}/\text{м}^2\text{час}$. Эмиссия с поверхности не превышала при этом 8 $\text{мг}/\text{м}^2\text{час}$ для CH_4 . Соответственно на этом фоне вклад восходящей диффузии газов в эмиссию составляет не более 7-10%. Нисходящий диффузионный поток оценен, соответственно, в 0,1-1,2 $\text{мг}/\text{м}^2\text{час}$ CH_4 . Более интенсивный геотропический массоперенос объяснялся повышенными значениями эффективных коэффициентов диффузии, благодаря наличию воздухоносной пористости в нижних горизонтах вплоть до 10-15 % (Рис.4). Доля этих потоков от эмиссии составляет для метана 1-15%. Таким образом, определенная часть газа, продуцируемого в гидроморфных условиях, может переноситься вглубь почвы, а не выделяться в атмосферу.

Направленный *пузырьковый перенос* обеспечивает от менее чем 1% эмиссии при относительно низких температурах до 30% - при высоких. При изучении пузырькового переноса было обнаружено на первый взгляд парадоксальное явление – образование пузырьков активно происходило в болотной воде, содержащей метан в концентрации, ниже концентрации насыщения. Теоретическое объяснение и соответствующая математическая модель были приведены в (Glagolev et al., 1999). Физическая сущность феномена заключается в неравновесности подобного состояния, при котором скорость локального продуцирования газа выше, чем его диффузионный отток и распределение в болотной воде. По-видимому, этот механизм, наряду с заземлением воздуха при таянии снега и движении поверхностных болотных вод объясняет образование скоплений газа внутри торфяной залежи в виде больших пузырей (Рис.4).

Поток через растения сильно менялся в зависимости от сезона: к концу лета он повышался от 40 до 60%, а далее снижался, падая практически до 0 к последней декаде октября. Измеренный вклад транспорта, связанного с растениями хорошо дополняет определенные ранее величины диффузионного и пузырькового потоков, давая в сумме (с учетом погрешности измерения) 100%.

Если же говорить об абсолютных величинах, то следует отметить, что с надежностью ≥ 0.99 было показано различие потоков метана в опыте (где присутствовали сосудистые растения) и контроле (где сосудистые растения отсутствовали). Наименьшая эмиссия наблюдалась в «контроле» и составляла лишь 0.0004 ± 0.0003 мгС/час на грамм сухого веса растений, в данном случае - *Sphagnum sp.* (далее будет использоваться обозначение мгС/час/г). Наибольшие эмиссии были отмечены в опытах с *E. fluviatile* (0.11 ± 0.05 мгС/час/г) и *S. rostrata* (0.10 ± 0.05 мгС/час/г). На порядок меньший поток демонстрировала *M. trifoliata* (0.032 ± 0.016 мгС/час/г). Еще на один порядок от нее отличалась *O. palustris* (0.004 ± 0.001 мгС/час/г).

Полученные нами результаты в основном находятся в соответствии с результатами других авторов. Так в работе *Nouchi and Mariko* (1993) было показано, что основную роль в транспорте метана из затопленных почв рисовых полей играют растения риса, а у *Sebacher et al.* (1985) - что некоторые водные растения (*Avicennia nitida*, *Cladium jamaicense*, *Eleocharis interstincta*, *Glyceria striata*, *Juncus effusus*, *Nymphaea odorata*, *Nuphar luteum*, *Peltandra virginica*, *Pontederia cordata*, *Sagittaria graminea*, *S. lancifolia*, *Typha latifolia*, *Zizaniopsis miliacea*) способны обеспечить скорость эмиссии метана от 0.1 до 14.8 мг/день/растение. В работе (*Whiting and Chanton*, 1992) утверждается, что в болотах с доминированием *Carex* (расположенных на территории Квебека и Онтарио) более 90% эмиссии происходит за счет транспорта, обусловленного растениями. На первый взгляд, несколько удивительно отсутствие в наших опытах значимого потока через *Er. vaginatum* (0.01 ± 0.01 мгС/час/гСВ), тогда как в (*Waddington et al.*, 1996) сообщалось о том, что удаление этого растения (два участка в северных болотах Швеции) уменьшало поток метана на 55-85%. Однако, в нашем случае растительная ассоциация с преобладанием *Er. vaginatum* располагалась вдоль дренажных каналов старой осушительной системы, которая хотя и не поддерживалась в надлежащем состоянии, тем не менее, обеспечивала существенное дренирование вплоть до расстояния порядка нескольких десятков метров от каналов. Таким образом, в месте расположения ассоциации с преобладанием пушицы метаногенез был весьма слабым; иначе говоря, отсутствие транспорта метана из почвы под этой ассоциацией в атмосферу было обусловлено просто отсутствием метана. Дальнейшие подробности и сравнение с данными других авторов см. в работе *Глаголева с соавт.* (1999).

Потребление метана.

Экспериментальные данные, опубликованные *Паниковым* (1995), показывают, что при уровне стояния воды около 10 см потенциальная скорость

потребления CH_4 равномерно возрастает от 0 (у поверхности почвы) до $\approx 1.4 \text{ мгС} \cdot \text{дм}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ (на глубине 20 см), после чего снижается до 0 уже к 25 см.

Измерение относительной актуальной степени потребления метана в профиле почвы дало иные результаты. Было показано, что под *Menyanthes trifoliata* или *Eriophorum vaginatum* на глубине 70 см уже оказывается окислено 15-20% CH_4 , приходящего с глубины 120 см. Вообще же в процессе переноса к поверхности почвы происходит потребление метанотрофными микроорганизмами значительной доли CH_4 , которая может составлять от 15-45% под *Equisetum fluviatile* или *Carex rostrata* до 55-80% под *Menyanthes trifoliata* или *Eriophorum vaginatum* (Glagolev et al., 2000; Глаголев с соавт., 2001). Конечно, напрямую сравнивать потенциальную скорость с актуальной степенью потребления CH_4 не имеет смысла, но с качественной точки зрения очевидно, что если на глубине 70 см уже окислено 15-20% метана, потенциальная скорость окисления на этой глубине не может быть нулевой.

В связи с вышеуказанным несоответствием результатов нами была предпринята новая попытка определения потенциальной активности потребления CH_4 образцами торфа Бакчарского болота. Для всех растительных ассоциаций потенциальная окисляющая способность была обнаружена на всех исследованных глубинах (10, 20, ..., 50 см), причем она убывала с увеличением глубины от 10 до 50 см ($\text{мгС} \cdot \text{дм}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$): *Eriophorum* от 3.5 ± 0.6 до 0.97 ± 0.57 , *Sphagnum* от 3.2 ± 0.3 до 0.56 ± 0.22 , *Carex* от 2.4 ± 0.02 до 0.03 ± 0.06 (Шнырев с соавт., 2006).

К сожалению, интерпретация масс-спектрометрических измерений сильно осложняется тем, что на изотопный состав метана кроме окисления могут влиять еще и другие факторы, например: изотопный состав разлагаемого органического вещества (Burke, 1993); изотопный состав непосредственного предшественника метана (Cicerone and Oremland, 1988); путь образования метана (образуется ли CH_4 из ацетата или из H_2 и CO_2): бактериальное восстановление CO_2 в CH_4 дает $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ до -110‰, а ферментация

Доклады по экологическому почвоведению 2006, №3, вып.3

метилированных субстратов приводит к величинам $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ от -50‰ до -60‰ (Whiticar, 1999); степень истощения субстрата (Whiticar, 1999); температура (Whiticar, 1999);

Таким образом, какие-либо значения $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ в профиле почвы можно объяснить воздействием как одного, так и другого фактора. Например, относительно высокие значения $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ можно представить следствием образования метана путем восстановления CO_2 с дальнейшим окислением CH_4 метанотрофными бактериями, а можно – ферментацией метилированных соединений без последующего окисления. Итак, интерпретация изотопного состава будет тем надежнее, чем больше дополнительной информации удастся получить. Как уже было сказано выше, в недавних измерениях на Бакчарском болоте в местах, где ранее изучался изотопный состав метана, потенциальная способность почв к потреблению CH_4 была обнаружена, по крайней мере, вплоть до глубины 50 см. Кроме того, из образцов торфа Бакчарского болота Коцюрбенко (2005) впервые выделил умеренно ацидофильный метаноген, отнесенный к роду *Methanobacterium* (в качестве нового вида). Этот микроорганизм образует метан путем восстановления CO_2 в CH_4 , причем удалось показать, что при $\text{pH} < 4.5$ (кислотность Бакчарского болота) именно этот путь метаногенеза становится доминирующим. Если доминирующим путем образования метана является восстановление CO_2 , то образуется лишь «легкий» метан, дальнейшее «утяжеление» которого при движении из глубины к поверхности почвы может объясняться только окислением. Действительно, например, в торфе под *Er. vaginatum* на глубине 80 см мы (Glagolev et al., 2000) обнаруживали метан с изотопным составом углерода $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 = -83.2\text{‰}$, а на глубине 20 см – -38.7‰ . Близкие результаты были получены и под *C. rostrata*: $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 = -76.5\text{‰}$ и -70.5‰ , соответственно, на глубинах 60 см и 20 см (метан, выходящий из почвы в атмосферу, имел еще более тяжелый изотопный состав – $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 = -69.1\text{‰}$). Интересно отметить, что, кроме всего прочего, в более

«влажном» 1999 году у поверхности почвы метан был «легче», чем в более «сухом» 2000 году. Так и должно быть – в «сухие» годы осадков меньше, следовательно, вода стоит ниже, а значит, слой, в котором происходит окисление метана, больше, поэтому в таком слое успевает окислиться большая доля метана, что приводит к «утяжелению» его изотопного состава.

Проведенные измерения интенсивности потребления (окисления) метана породили закономерный вопрос: а достаточно ли кислорода в толще болотной почвы? Приведенные выше данные (рис.4) свидетельствуют о наличии больших объемов газовой фазы в толще торфяника (10-20% в слое 60-90 см). Одновременно предпринимались попытки измерить концентрацию кислорода в этом локально ненасыщенном слое, выявившие закономерное снижение концентрации O_2 от примерно 6-9% на глубине 10 см до 2-5% на глубине 100 см. Этот на первый взгляд удивительный факт, тем не менее, уже отмечался в литературе. *Nakagawa et al.* (2002) сообщали о концентрации O_2 от 1.5 до 3% в пузырях, поднимающихся из осадочной толщии озер аласов, расположенных близ г. Якутск (такая концентрация аттестовывалась ими, как индикатор анаэробных условий в осадках). *King et al.* (1981) и *Williams and Crawford* (1984) наблюдали 6%-ную концентрацию кислорода в газовых пузырях и непосредственно в почвах различных кислых болот. Для объяснения данного факта *Smith et al.* (1990) и *Frenzel et al.* (1992) представили различные экспериментальные доказательства того, что кислород может поступать в почву из корней растений.

Абиотическое поглощение метана в торфяной залежи.

Лабораторные эксперименты по определению сорбции метана торфяными образцами Бакчарского болота выявили весьма значительную интенсивность этого процесса (Рис.5). Как видно сухие торфяные образцы удерживают при равновесии в 18 раз больше газа, чем его находится в окружающем воздушном пространстве. Увлажнение торфа снижает практически втрое способность к адсорбции метана, но все равно она остается достаточно высокой. На фоне

очень маленькой растворимости (0,03-0,05) равновесные константы Генри для сорбции метана исследованными торфяными почвами практически на два порядка выше (6-18), что указывает на первостепенное значение адсорбции среди абиотических механизмов иммобилизации газа внутри торфяной залежи. Благодаря сорбции и нисходящей диффузии, включая механизм поверхностной диффузии, произведенный в болоте

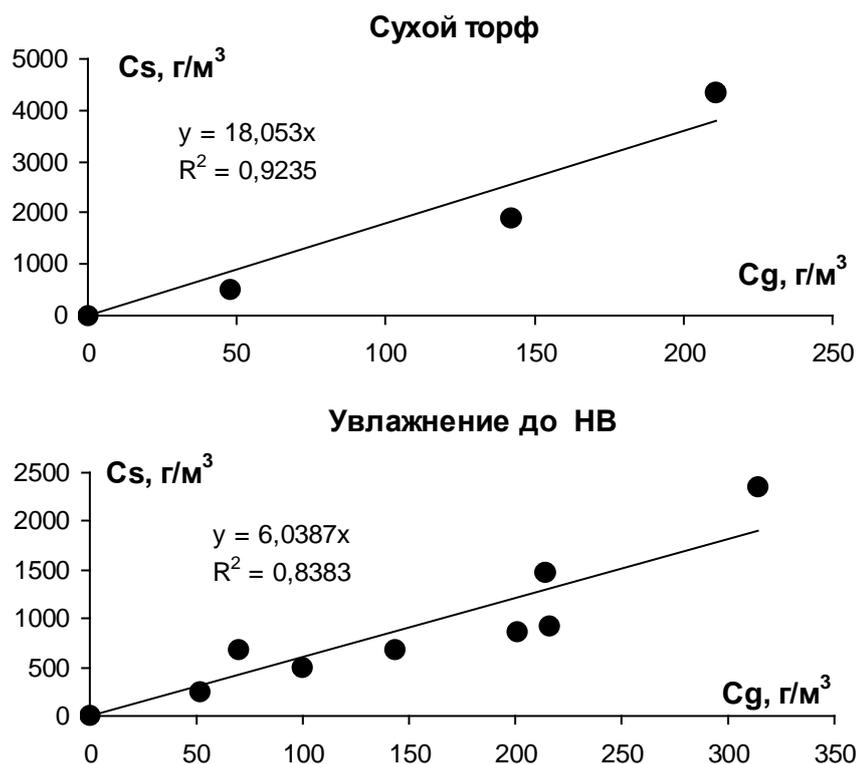


Рис.5 Изотермы сорбции метана образцами верховых торфов (адсорбционно-статический метод, ст. «Плотниково».

метан, может на долгое время удерживаться в составе торфяной залежи и не выходить в атмосферу метана исследованными торфяными почвами практически на два порядка выше (6-18), что указывает на первостепенное значение адсорбции среди абиотических механизмов иммобилизации газа внутри торфяной залежи. Благодаря сорбции и нисходящей диффузии, включая механизм поверхностной диффузии, произведенный в болоте метан, может на

долгое время удерживаться в составе торфяной залежи и не выходить в атмосферу.

Эмиссия CH_4 : динамика во времени и влияние температуры.

Являясь результатом наложения описанных выше процессов образования, окисления, межфазных взаимодействий и различных типов переноса, эмиссия метана из болотных почв не остается постоянной, но, напротив, демонстрирует значительную изменчивость в нескольких масштабах времени.

Многочисленные «мгновенные» пики эмиссии метана, вызванные выходом небольших газовых пузырьков, имеют стохастический характер по частоте выхода и по амплитуде (Мастепанов, 2004). Таким образом, на наименьших масштабах времени (минуты – первые десятки минут) эмиссия может рассматриваться как случайный процесс.

При переходе к следующему временному масштабу (часы-сутки) уже удается обнаружить некоторые закономерности. В частности, в 2002 г. было проведено 4 эксперимента (29-30 июля, а также 2-3, 12-13 и 17-18 августа), в каждом из которых эмиссия измерялась в среднем примерно 1 раз за час на двух участках болота: на первом преобладал хвощ (*Equisetum fluviatile*), а на втором – пушица (*Eriophorum vaginatum*). Во всех этих экспериментах (табл. 1) и независимо от того, на какой площадке проводились измерения, было обнаружено, что «ночью» поток значимо выше (в среднем на 38%), чем «днем» (за «ночь» мы условно принимаем промежуток времени от 23:00 до 7:00). Интересно отметить, что для среднего потока (т.е. для полусуммы потоков с вышеуказанных двух площадок) данное превышение закономерно возрастало с течением времени: 29% 29-30.07, 33% 2-3.08, 42% 12-13.08 и 47% 17-18.08, т.е. приблизительно на 1% в сутки. Существует несколько физических объяснений суточной динамики эмиссии метана (см., например, (Seiler et al., 1984; Глаголев с соавт., 2003)). Все эти объяснения связаны с температурным фактором, но до сих пор ни одна из гипотез не получила подтверждения, поэтому однозначно

утверждать, что динамика в масштабе часов-суток определяется температурой пока нельзя, хотя это и кажется весьма вероятным.

Таблица 1. Внутрисуточная динамика потока метана (мгС/м²/час).

Время	29.07-30.07		02.08-03.08		12.08-13.08		17.08-18.08	
	Пушица	Хвоц	Пушица	Хвоц	Пушица	Хвоц	Пушица	Хвоц
7-15	18.4 [±] 0.9	17.6 [±] 2.0	н.д.	н.д.	22.3 [±] 2.7	16.2 [±] 0.9	11.4 [±] 0.5	19.8 [±] 1.2
15-23	18.7 [±] 0.6	12.9 [±] 0.7	18.0 [±] 0.7	11.6 [±] 0.4	25.4 [±] 0.6	30.3 [±] 0.6	14.1 [±] 0.3	23.0 [±] 0.4
23-7	21.5 [±] 1.0	22.4 [±] 0.9	19.5 [±] 0.4	14.3 [±] 0.3	26.0 [±] 0.3	33.7 [±] 0.6	20.0 [±] 0.2	28.5 [±] 0.4
7-15	13.4 [±] 0.6	18.5 [±] 1.4	18.2 [±] 0.4	7.2 [±] 0.4	19.9 [±] 0.7	25.6 [±] 0.6	13.0 [±] 0.2	21.9 [±] 0.4
15-23	16.0 [±] 1.8	10.8 [±] 0.9	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.

Жизнь организмов любой популяции в экосистеме проходит под воздействием множества экологических факторов. Однако по степени воздействия на организмы они далеко не равносильны, вследствие чего в экосистемах разного типа некоторые факторы выделяются как наиболее существенные. Хорошо известно определяющее влияние температуры на экологические процессы (Федоров и Гильманов, 1980). Действительно, исследование динамики эмиссии метана на больших масштабах времени (месяцы-годы) (Glagolev, 1998) совершенно определенно показало ее связь с температурным фактором. В первом приближении ($R = 0.919$ при $n = 11$) по результатам измерений за 1993-1998 гг. эта связь могла быть описана регрессионным уравнением вида

$$F = 0.744 \cdot e^{0.137 \cdot T},$$

где F – поток метана из почвы (мгС/м²/час); T – средняя температура поверхности почвы (°C).

Эмиссия СН₄: изменчивость в пространстве и влияние факторов среды.

Дальнейшее изучение закономерностей динамики эмиссии метана на больших масштабах времени и попытки объяснения наблюдаемой вариабельности ее в пространстве привели к пониманию важности такого

фактора, как уровень стояния болотных вод (УБВ). Уточненное регрессионное уравнение, пригодное для различных гидротермических условий, имеет вид:

$$F = \exp(-1.478 + 0.126 \cdot T - 0.057 \cdot W),$$

(W - УБВ отсчитывается в см от поверхности почвы вдоль оси направленной вниз, т.е. стоянию воды над поверхностью почвы соответствуют отрицательные W). Результаты вычислений по этому уравнению и измерений приведены в табл. 2, из которой видно, что за исключением лета 2002 г. (когда наблюдался экстремально высокий уровень воды), регрессионная модель находится в хорошем согласии с реальностью.

Таблица 2. Поток CH_4 в связи с уровнем воды (W) и температурой (T).

Объект и период измерений	$T, ^\circ C$	$W, см$	Эмиссия $CH_4, мгС/м^2/час$		
			измеренная		рассчитанная
			среднее	погреш.	
Бакчарское болото, 19-29.7.1995	21.5	-22.3	14.9	2.66	12.1
Бакчарское болото, 30.7-3.8.1995	23.4	-26.3	19.3	3.9	19.4
Бакчарское болото, 06.8-15.8.1995	21.1	-17.3	10.8	1.5	8.7
Бакчарское болото, 16.8-21.8.1995	20.9	-22.3	15.5	2.8	11.3
Бакчарское болото, 16.7-21.7.1996	19.3	-22.7	6.0	1.6	9.4
Бакчарское болото, 22.7-29.7.1996	19.9	-26.3	8.6	0.8	12.4
Бакчарское болото, 11.7-11.8.1997	13.9	-25.1	4.0	0.4	5.5
Бакчарское болото, 8.7-7.8.1998	16.3	-25.0	9.6	0.8	7.4
ЛаПроК*, низкий рям, лето 2000	14.8	8	0.5	0.1	0.9
ЛаПроК, высокий рям, --"--	14.8	33	0.1	0.2	0.2
ЛаПроК, рям на периферии топи, --"--	14.8	34	0.4	0.1	0.2
ЛаПроК, осоково-сфагновая топь, --"--	14.8	7	1.8	0.1	1.0
Бакчарское болото, лето 2000	14.8	-3	3.3	0.1	1.8
Бакчарское болото, лето 2001	14.9	-18.3	5.8	0.1	2.2
Бакчарское болото, лето 2002	18.3	-38.3	13.5	0.1	20.1

Примечание: *ландшафтный профиль р. Ключ.

По-видимому, если говорить о вариабельности потока в пространстве, то из двух вышеуказанных факторов в региональном масштабе на передний план выходит УБВ, поскольку в пределах одной области в данный момент времени температура может различаться не так значительно, как уровень воды.

Таблица 3. Поток CH_4 в связи с типами растительности.

Растительная ассоциация ¹⁾	Поток CH_4 , $\text{мгС/м}^2/\text{час}$	
	1995 г. (по (Panikov et al., 1997))	1997 г. (по (Nakano et al., 1998))
«Гряда» (<i>Pinus silvestris</i>)	3.7	нет данных
Кустарничково-пушицево-сфагновая	12.8	7.7
Кустарничково-осоково-сфагновая	18.1	11.3, 21.4 ²⁾
Осоково-вахтово-сфагновая	15.1	7.7
Осоково-хвощево-сфагновая	6.5	8.7
<i>Sphagnum</i> spp.	нет данных	7.6

Примечания:

¹⁾ Ассоциация, условно обозначенная «Гряда» (*Pinus silvestris*), находилась практически непосредственно на отвалах, образовавшихся при прокладке дренажной канавы. Несколько более увлажненное местообитание на удалении от гряды занимала кустарничково-пушицево-сфагновая ассоциация. Остальные ассоциации, перечисленные в табл., находятся на открытой части болота, где вода стоит почти у самой поверхности.

²⁾ На данной растительной ассоциации было установлено 2 камеры. Меньшее значение получено в камере №5, большее - в камере №2.

Эмиссия метана хорошо коррелирует с составом растительного сообщества (Panikov et al., 1997; Глаголев с соавт., 1999; Kotsyurbenko et al., 2004) (табл. 3). По-видимому, это может объясняться как тем, что все многочисленные экологические факторы, влияющие на эмиссию метана, параллельно влияют и на состав растительности, так и тем, что влияя на состав растительного сообщества, они опосредованно управляют эмиссией метана (растения отчасти поставляют субстраты метаногенеза и в значительной степени определяют интенсивность транспорта CH_4 из почвы в атмосферу). В любом случае, независимо от теоретического объяснения этого факта, в ряде работ (Bubier et al., 1995; Schimel, 1995; Bellisario et al., 1999; Glagolev et al., 2000) было показано, что использование уже одной только переменной «тип растительной ассоциации» позволяет прогнозировать величины потоков метана близкие к наблюдаем. Maksyutov et al. (1999) в связи с этим высказали уверенность в том, что одновременное изучение состава растительных

Доклады по экологическому почвоведению 2006, №3, вып.3

ассоциаций и скоростей эмиссии метана могут дать необходимые сведения для оценки потока на большой территории при помощи дистанционного зондирования с использованием географической информации. Конкретное приложение этой идеи на территории юга Томской обл. см. в (Глаголев и Шнырев, 2006) а на площади всей Западной Сибири – в (Tamura and Yasuoka, 1999; Takeuchi et al., 2003).

Все многообразие наблюдавшихся нами величин потоков на различных объектах в Томской обл. кратко представлено на рис. 2. Из рис. видно, что типы болот упорядочиваются по убыванию интенсивности эмиссии CH_4 в виде следующего ряда: низинные > переходные > верховые (а внутри каждого типа конкретные исследовательские полигоны, в основном, оказались упорядочены по уровню стояния воды, в частности, при измерениях в пойме р. Икса поток CH_4 был тем больше, чем ближе к берегу реки располагался полигон).

Региональная оценка эмиссии метана.

С самого начала измерений в Томской области исследователи ставили перед собой цель – экстраполировать результаты отдельных измерений на всю территорию области (а в перспективе - всей Западной Сибири) и оценить, таким образом, вклад региональных потоков метана в глобальный. Но на практике поначалу в исследования крайне редко вовлекались хотя бы и 3-4 объекта (см., например, (Наумов с соавт., 1994; Паников, 1995; Паников с соавт., 1995)), а массовые измерения были начаты лишь в последние годы (Глаголев с соавт., 2004; Глаголев с соавт., 2005; Глаголев и Шнырев, 2006; Шнырев и Глаголев, 2006). Существуют работы (Паников, 1995; Tamura and Yasuoka, 1999; Takeuchi et al., 2003), в которых делается попытка ориентировочно оценить эмиссию метана со всей территории Западной Сибири по нескольким разовым измерениям, проведенным на юге Томской области. Однако, на территории Западно-Сибирской равнины принято выделять пять биоклиматических (природных) зон, имеющих сплошное простираие на Евразийском материке: тундру, лесотундру, тайгу, лесостепь и степь. В таежной зоне выделяют

Доклады по экологическому почвоведению 2006, №3, вып.3

подзоны северной, средней и южной тайги, а также подзоны предтундровых редколесий на севере и подтайги (мелколиственных осиново-березовых лесов) на юге (*Лапшина, 2003*). Учитывая это и тот факт, что к настоящему времени в некоторых природных зонах Западной Сибири (тундре, лесотундре и северной тайге) эмиссия метана почти совсем не изучена, сегодня, по нашему мнению, можно получить более или менее реалистическую оценку потока CH_4 не со всей территории Западной Сибири, а только с южной ее части, например – с Томской области. Однако, и для этого следовало расширить район измерений потока метана в Томской области до масштабов сотен километров как с запада на восток, так и с севера на юг, вовлекая в эти измерения наряду с болотными почвами южной тайги также и исследовательские полигоны, расположенные в средней тайге, что и явилось целью работы экспедиции МГУ в летне-осенний сезон 2006 г.

Методология оценки регионального потока была предложена, в частности, в (*Tamura and Yasuoka, 1999; Takeuchi et al., 2003*) и состояла в следующем: все измерения сводятся в несколько групп по местообитаниям, а поток рассчитывается как арифметическое средневзвешенное потоков из отдельных местообитаний, где весами являются доли площадей этих местообитаний от площади всей области. В качестве активно выделяющих CH_4 местообитаний предлагалось избрать следующие три типа, соответствующие (в отечественной болотоведческой терминологии) грядово-мочажинным комплексам (ГМК), рямам и гальям («рям» – сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз, «гальи» – лишенные древесной растительности части болот, представляющие собой застойные и транзитные мелкозалежные топи (*Lapshina et al., 2000*); термины «рям» и «галья» широко используются в сибирской экологической литературе).

В летне-осенний период 2006 г. на обследованных болотных массивах Томской области, расположенных в подзонах южной и средней тайги нами были получены следующие величины удельных потоков метана ($\text{мгС}/\text{м}^2/\text{час}$; в

качестве характерных значений приводятся медианы, а в скобках – первый и третий квартили): в рямах 0.67 (0.20-1.27); в понижениях на галье 4.06 (2.28-6.52), в повышениях на галье 2.67 (1.45-4.27); в понижениях ГМК 2.13 (1.60-2.88), в повышениях ГМК 0.74 (0.61-0.88). С учетом площадей распространения этих типов местообитаний и периодов активной эмиссии метана в южной и средней тайге, было подсчитано, что региональный поток метана из болот Томской области составляет около 0.5 ТгС, т.е. около 1% от эмиссии из болот всего мира. В настоящее время не представляется возможным объективно распространить эту оценку на всю Западную Сибирь, но даже элементарный подсчет из соотношения площадей Томской области и Западной Сибири ($\approx 1/10$) показывает, что вклад данного региона в глобальную эмиссию метана болотными экосистемами может быть около 10%. Вместе с тем, есть основания считать, что подобная величина может быть занижена.

Методологические проблемы оценки газовой функции болот, перспектива дальнейших исследований.

Рассмотрим заключительную иллюстрацию статьи (Рис.6). На ней сопоставляются данные о динамике запаса метана в торфяной залежи Бакчарского болота и величин эмиссии с поверхности, измеренных традиционным камеро-статическим методом. Выявлен пульсационный режим функционирования с неоднократной за сезон сменой фаз аккумуляции и разгрузки (Смагин, 2005). Разгрузка предположительно происходит посредством локальных конвективных потоков (выбросов) газа по местам наибольшей воздухопроницаемости по мере достижения критических величин пневматического давления, необходимых для прорыва вышележащего водного слоя. Заранее определить места такой разгрузки практически невозможно, а залповые выбросы газа, накопленного в почве, во много раз превышают фоновые величины эмиссии, определенные обычным методом камер (рис.6).

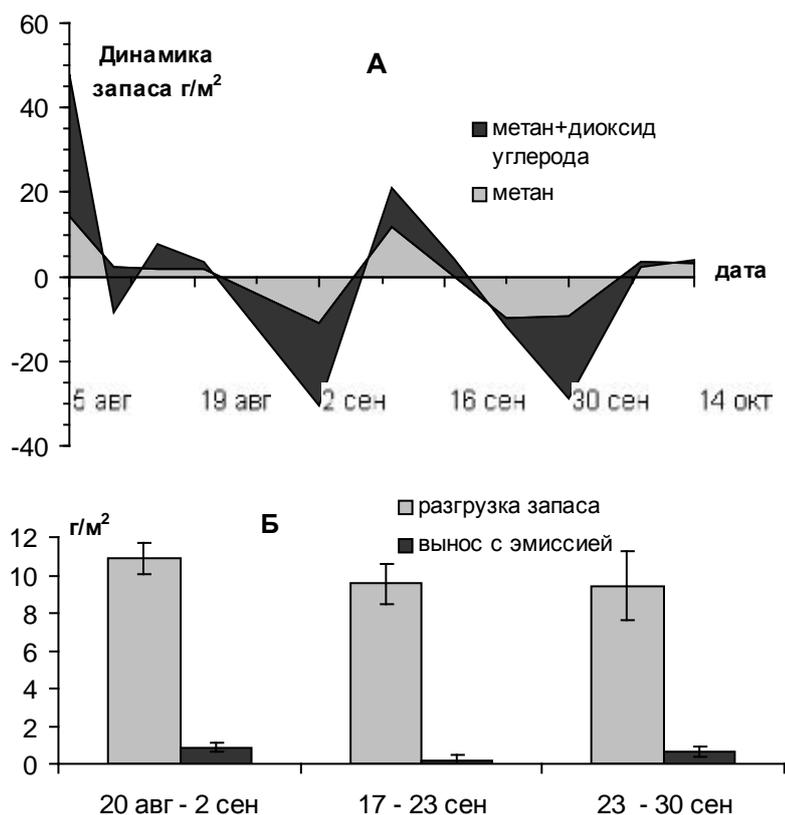


Рис.6 Пульсационный режим функционирования Бакчарского болота (2000г)

Вероятность попадания таких локальных выбросов в камеры, даже работающие в автоматическом режиме ничтожно мала, поэтому оценка реального поступления парниковых газов из таких почв в атмосферу обычными камерными методами изучения почвенного дыхания может существенно занижаться. Отсюда возможные заблуждения о значительном превышении биопродуктивности над деструкцией органических веществ и мощной функцией стока углерода в таких ландшафтах. В связи с этим будущие исследования на наш взгляд должны развиваться в двух основных направлениях. Это интегральная оценка эмиссии метана с поверхности болот представительного размера дистанционными микрометеорологическими методами и дальнейшая интенсификация изучения внутрисочвенных биофизических процессов продуцирования, поглощения и транспорта газа для

реализации комплексной модели его поведения в болотных почвах как динамических биокосных системах.

Благодарности.

Авторы благодарят всех членов экспедиционного отряда и, в особенности, Шнырева Н.А., который выполнил ряд ответственных полевых измерений и помог подготовить часть иллюстративного материала. Также авторы выражают благодарность директорам Института Почвоведения и Агрохимии СО РАН д.б.н. К.С. Байкову и Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН чл.-корр. РАН М.В. Кабанову и сотрудникам д.г.н. А.Г. Дюкареву, к.б.н. В.В. Читоркину, к.б.н. Б.А. Смоленцеву, к.б.н. Н.Н. Пологовой, за любезно предоставленную возможность проведения работы и ее организацию на полевых стационарах «Плотниково» ИПА СО РАН и «Таежный» ИМКЭС СО РАН. Отдельная благодарность - к.ф.-м.н. Ш.Ш. Максютову и д.б.н. А.А. Сирину за всестороннюю помощь при организации исследований.

Литература

1. *Базанов В.А.* Структура болот кетско-чулымского междуречья. Дисс. канд. биол. наук. Томск. 1988. 213с.
2. *Будыко М.И.* Тепловой баланс земной поверхности. Л. Гидрометеиздат. 1956.
3. *Вомперский С.Э.* Роль болот в круговороте углерода // Чтения памяти В.Н. Сукачева. XI: Биогеоценотические особенности болот и их рациональное использование. М. Наука. 1994. С.5-37.
4. Геворкян М.В. (ред.). Figaro: датчики газов (Библиотека электронных компонентов, вып. 30). – М. Издательский дом «Додэка-XXI». 2003. 64с.
5. *Глаголев М.В.* Математическое моделирование метанообразования в почве // Труды Института микробиологии РАН. Вып. XIII. М. Наука. 2006. С.315-341.

6. Глаголев М.В., Голышев С.А., Фирсов С.Ю. Оценка переноса метана из почвы в атмосферу болотными растениями // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования. М. ГЕОС. 1999. С.177-180.
7. Глаголев М.В., Жужман И.В., Чистотин М.В. К вопросу о существовании внутрисуточной динамики потока метана из болотной почвы // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии». Пушино. 2003. С.32-33.
8. Глаголев М.В., Лебедев В.С., Наумов А.В., Инишева Л.И., Дементьева Т.В., Головатская Е.А., Ерохин В.Е., Шнырев Н.А., Муханов В.В., Ножневникова А.Н. Определение эмиссии и окисления метана некоторыми болотами Томской области // Функции почв в биосферно-геосферных системах. М. МАКС Пресс. 2001. С.148-149.
9. Глаголев М.В., Смагин А.В. Биогеофизика эмиссии метана из болотных почв // Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации. М. МГУ. 2003. С.172-174.
10. Глаголев М.В., Чистотин М.В., Сиринов А.А. Эмиссия парниковых С-газов из естественных и измененных при хозяйственном использовании болот (на примере участка Томской области) // Почвы. Национальное достояние России. Новосибирск. Наука-Центр. 2004. С.340.
11. Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сиринов А.А. Эмиссия CO₂ и CH₄ из измененных при хозяйственном воздействии и ненарушенных торфяных почв в условиях юга Западной Сибири // Биосферные функции почвенного покрова. Пушино. 2005. С.21.
12. Глаголев М.В., Шнырев Н.А. Анализ космических снимков – перспективное направление в изучении газовой функции болотных экосистем // Болота и биосфера. Томск. ЦНТИ. 2006. С.104-114.
13. Глаголев М.В., Эгнаташвили Т.Д. Роль экспедиции отдела экологии в исследованиях проблемы парниковых газов на территории Западной

- Сибири // Комплексная программа «Каникулы». М. МГДД(Ю)Т. 2004. С.58-68.
14. *Головацкая Е.А.* Болотные биогеоценозы Западной Сибири // Болота и биосфера. Томск. ЦНТИ. 2004. С.91-99.
15. *Кароль А.И.* Оценки характеристик относительного вклада парниковых газов в глобальное потепление климата // Метеорология и гидрология. 1996, Т. 11. С.5-12.
16. *Коцюрбенко О.Р.* Метаногенные микробные сообщества из холодных наземных экосистем. Автореф. дисс. докт. биол. наук. М. 2005. 76с.
17. *Лапина Е.Д.* Структура и динамика болот поймы реки Оби (на юге Томской области). Дисс. канд. биол. наук. Томск. 1987. 282с.
18. *Лапина Е.Д.* Флора болот юго-востока Западной Сибири. Томск. ТГУ. 2003. 296с.
19. *Матвеев Л.Т.* Физика атмосферы. СПб. Гидрометеиздат. 2000.
20. *Мастепанов М.А.* Кинетика газообмена в профиле сфагнового болота: от метаногенеза к эмиссии. Автореф. дисс. канд. биол. наук. М. 2004. 25с.
21. Методы почвенной микробиологии и биохимии. 1991. М. МГУ. 294 с.
22. *Минько О.И.* Планетарная газовая функция почвенного покрова // Почвоведение, 1988. №7. С.59-75.
23. *Наумов А.В., Ефремова Т.Т., Ефремов С.П.* К вопросу об эмиссии углекислого газа и метана из болотных почв южного Васюганья // Сиб. экологич. ж., 1994. Т.3. С.269-274.
24. *Носач В.В.* Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. М. МИКАП. 1994. 382с.
25. *Паников Н.С.* Эмиссия парниковых газов из заболоченных почв в атмосферу и проблемы устойчивости. // Экология и почвы. Избранные лекции I-VII Всероссийских школ. Пущино. ОНТИ ПНЦ РАН. 1998, Т.1. С.171-184.

26. *Паников Н.С.* Таежные болота – глобальный источник атмосферного метана? // *Природа*, 1995, №6. С.14-25.
27. *Паников Н.С., Сизова М.В., Зеленев В.В., Махов Г.А., Наумов А.В. и Гаджиев И.М.* Эмиссия CH_4 и CO_2 из болот Западной Сибири: пространственное и временное варьирование потоков // *Экологическая химия*, 1995, Т.4, №1. С.13-24.
28. *Поздняков А.И.* 2001 Полевая электрофизика почв М.МАИК Наука/интерпериодика. 278с.
29. Полевая геоботаника. М.-Л. Наука. 1964, Т.3. 530с.; 1972, Т.4. 336с.
30. *Пологова Н.Н., Дюкарев А.Г.* Лесорастительные условия темнохвойных насаждений Прикетья // *Проблемы кедр.* Томск. Изд-во ИОА СО РАН. 2003. Вып.7. С.149-156.
31. *Седунов Ю.С. (ред.).* Атмосфера. Л. Гидрометеиздат. 1991.
32. *Семенова Н.М.* Состояние, использование и охрана ресурсов торфяных болот в Томской области // *Охрана природы.* Томск. Изд-во НТЛ. 2001. Вып.2. С.69-86.
33. *Смагин А.В.* Газовая фаза почв. М. МГУ. 2005. 301с.
34. *Смагин А.В., Смагина М.В., Вомперский С.Э., Глухова Т.В.* 2000. Особенности генерирования и выделения парниковых газов в болотах // *Почвоведение*, №9. С.1097-1105.
35. *Смагин А.В., Глаголев М.В., Суворов Г.Г., Шнырев Н.А.* 2003. Методы исследования потоков газов и состава почвенного воздуха в полевых условиях с использованием портативного газоанализатора ПГА-7 // *Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 17, почвоведение*, №3. С.30-37.
36. *Смагин А.В., Глаголев М.В.* Современные полевые методы изучения газовой функции болотных почв // *Болота и биосфера.* Томск. ЦНТИ. 2004. с.53-63.

37. Смагин А.В., Смирнов Г.В. Методы определения эффективных коэффициентов диффузии CO_2 в почве // Вестн. МГУ, сер. 17, 1996, №2. С.3-10.
38. Федоров В.Д., Гильманов Т.Г. Экология. М. МГУ. 1980. 464с.
39. Шнырев Н.А., Воробьев А.В., Глаголев М.В. Потенциальная интенсивность окисления CH_4 метанотрофами в Бакчарском болоте // «Биология – наука XXI века». Пушино. ПНЦ РАН. 2006. С.221.
40. Шнырев Н.А., Глаголев М.В. Эмиссия метана из болот южной части Томской области // «Биология – наука XXI века». Пушино. ПНЦ РАН. 2006. С.243-244.
41. Alperin M.J., Reeburg W.S., Whiticar M.J. Carbon and hydrogen isotope fractionation resulting from anaerobic methane oxidation // Global Biogeochemical Cycles, 1988, V.2. P.279-288.
42. Bellisario L.M., Bubier J.L., Moore T.R., Chanton J.P. Controls on CH_4 emissions from a northern peatland // Global Biogeochem. Cycles, 1999, V.13(1). P.81-92.
43. Bubier J.L., Moore T.R., Juggins S. Predicting methane emissions from bryophyte distribution in northern Canadian peatlands // Ecology, 1995, V.76. P.677-693.
44. Burke R.A., Jr. Possible influence of hydrogen concentration on microbial methane stable hydrogen isotopic composition // Chemosphere, 1993, V.26. P.55-67.
45. Cicerone R.J., Oremland R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane // Global Biogeochemical Cycles, 1988, V.2. P.299-327.
46. Frenzel P., Rothfuss F., Conrad R. Oxygen profiles and methane turnover in a flooded rice microcosm. // Biol. Fertil. Soils, 1992, V. 14. P.84-89.
47. Glagolev M.V. Modeling of Production, Oxidation and Transportation Processes of Methane // Global Environment Research Fund: Eco-Frontier Fellowship (EFF) in 1997. Tokyo: Environment Agency, 1998. P.79-111.

48. *Glagolev M.V., Belova S.E., Smagin A.V., Golyshev S.A., Tarasov A.L.* Bubble's mechanism of gas transfer in the wetland soil. // Proceedings of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba: Isebu, 1999. P.132-142.
49. *Glagolev M.V., Smagin A.V., Lebedev V.S., Shnyrev N.A.* Generation, mass-transfer and transformation of methane in a peatland (on example of Bakcharskoe wetland) // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее. Новосибирск. ООО «Агентство Сибпринт», 2001. С.79-81.
50. *Glagolev M., Uchiyama H., Lebedev V., Utsumi M., Smagin A., Glagoleva O., Erohin V., Olenov P., Nozhevnikova A.* Oxidation and Plant-Mediated Transport of Methane in West Siberian Bog. // Proceedings of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999. Tsukuba. Isebu, 2000. P.143-149.
51. *Inoue G., Ohnishi H., Matsui M.* Application of solid State Gas-sensors of CH₄ and CO₂ to Environment Research // Proceedings of the Sixth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1997. Tsukuba. Isebu. 1998. P.201-206.
52. *Inoue G., Takahashi Y., Maksyutov S., Sorokin M., and Panikov N.* Methane emission rate from the wetland in West Siberia and its controlling factors // Fifth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies Between Japan and Russia in 1996. Tsukuba. Isebu. 1997. P.34–39.
53. *King G.M., Berman T., Wiebe W.J.* Methane Formation in the Acidic Peats of Okefenokee Swamp, Georgia. *The American Midland Naturalist*, 1981. **105**, P.386-389.
54. *Kotsyurbenko O.R., Chin K.-J., Glagolev M.V., Stubner S., Simankova M.V., Nozhevnikova A.N., Conrad R.* Acetoclastic and hydrogenotrophic methane production and methanogenic populations in an acidic West-Siberian peat bog // *Environ. Microbiol.* 2004. № 6, P.1159-1173.

55. *Lapshina E.D., Pologova N.N., Mouldiyarov E.Ya., Golyshev S.A., Glagolev M.V.* Watershed Peatlands in South Taiga Zone of West Siberia // Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999. Tsukuba. Isebu, 2000. P.121-128.
56. *Maksyutov S., Inoue G., Sorokin M., Nakano T., Krasnov O., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N., Vasiliev S.* Methane fluxes from wetland in West Siberia during April-October 1998 // Proceedings of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba. Isebu. 1999. P.115-124.
57. *Nakagawa F., Yoshida N., Nojiri Y., Makarov V.N.* Production of methane from alasses in eastern Siberia: Implications from its ^{14}C and stable isotopic compositions. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(3), 1041, doi:10.1029/2000GB001384.
58. *Nakano T., Asahi C., Inoue G., Fukuda M.* Measurements of Methane and Carbon Dioxide Fluxes in a Birch Forest in West Siberia after Burning // Proceedings of the Ninth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 2000. Tsukuba. Isebu. 2001. P.145-149.
59. *Nakano T., Fukuda M., Utsumi M., Inoue G.* Measurements of Methane Flux at a Burnt Forest in West Siberia: Preliminary Results // Proceedings of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999. Tsukuba. Isebu. 2000. P.160-164.
60. *Nakano T., Inoue G.* Development of an Automatic System for the Field Measurement of Methane Flux // Fifth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1996. Tsukuba. Isebu. 1997. P.45-49.
61. *Nakano T., Inoue G., Maksyutov S., Sorokin M.* Automatic Measurements of Methane Flux in West Siberian Wetlands in 1997 Summer // Sixth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1997. Tsukuba. Isebu. 1998. P.211-215.

62. *Nakano T., Sawamoto T., Morishita T., Inoue G., Hatano R.* A comparison of regression methods for estimating soil-atmosphere diffusion gas fluxes by a closed-chamber technique, *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**, P.107-113.
63. *Nouchi I., Mariko S.* Mechanism of Methane Transport by Rice Plants. // *Biogeochemistry of global change: radiatively active trace gases.* (R.S. Oremland, ed.) – New York; London. Chapman & Hall. 1993. P.336-352.
64. *Panikov N.S., Glagolev M.V., Kravchenko I.K., Mastepanov M.A., Kosych N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Naumov A.V., Inoue G., Maxutov S.* Variability of methane emission from west-siberian wetlands as related to vegetation type // *J. Ecol. Chem.* 1997. V.6, №1, P.59-67.
65. *Sebacher D.I., Harriss R.C., Bartlett K.B.* Methane Emissions to the Atmosphere Through Aquatic Plants. *J. Environ. Qual.*, 1985. **14**, P.40-46.
66. *Seiler W., Holzappel-Pschorn A., Conrad R., Scharffe D.* Methane Emission from Rice Paddies. // *J. of Atmospheric Chemistry*, 1984. **1**, P.241-268.
67. *Schimel J.P.* Plant transport and methane production as controls on methane flux from arctic wet meadow tundra // *Biogeochemistry*. 1995. V. 28. P.183-200.
68. *Smits A.J.M., Laan P., Their R.H., van der Velde G.* Root aerenchyma, oxygen leakage patterns and alcoholic fermentation ability of the roots of some nymphaeid and isoetid macrophytes in relation to the sediment type of their habitat. // *Aquatic Botany*, 1990. **38**. P.3-17.
69. *Sorokin M., Maksyutov S., Inoue G., Nakano T.* Fully Methane Flux Measurements System by a Static Chamber Method // *Sixth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1997.* Tsukuba. Isebu. 1998. P.207-210.
70. *Takeuchi W., Tamura M., Yasuoka Y.* Estimation of methane emission from West Siberian wetland by scaling technique between NOAA AVHRR and SPOT HRV // *Remote Sensing of Environment*. 2003. V. 85. P.21-29.
71. *Tamura M., Yasuoka Y.* Observation of Western Siberian wetlands by using remote sensing techniques for estimating methane emission // *Fourth symposium*

- on the joint Siberian permafrost studies between Japan and Russia in 1995. Sapporo. Kohsoku Printing Center. 1999. P.133-138.
72. *Waddington J.M., Roulet N.T., Swanson R.V.* Water table control of CH₄ emission enhancement by vascular plants in boreal peatlands // *Journal of Geophysical Research*, 1996. **101**, P.22775-22785.
73. *Walter B.P., Heimann M., Shannon R.D., White J.R.* A process-based model to derive methane emissions from natural wetlands // *Geophysical Research Letters*, 1996. **23**, P.3731-3734.
74. *Whiticar M.J.* Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane // *Chemical Geology*. 1999. V. 161. P.291-314.
75. *Whiting G.J., Chanton J.P.* Plant-dependent CH₄ emission in a subarctic Canadian fen. *Global Biogeochemical Cycles*. 1992. **6**, P.225-231.
76. *Williams R.T., Crawford R.L.* Methane Production in Minnesota Peatlands. *Applied and Environmental Microbiology*, 1984. **47**, P.1266-1271.