

ДИСКУССИИ

УДК 631.4

СПОРНЫЕ ВОПРОСЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ МЕЖДУ ПОЧВОЙ И АТМОСФЕРОЙ (к дискуссии М.В. Глаголева и А.В. Наумова)

Смагин А.В.

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Институт лесоведения РАН (пос. Успенское, Московская обл.)*

smagin@list.ru

Цитирование: Смагин А.В. 2014. Спорные вопросы количественной оценки газовых потоков между почвой и атмосферой (к дискуссии М.В. Глаголева и А.В. Наумова) // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 5. № 2 (10). С. 10-25.

ВВЕДЕНИЕ

Журнал «Динамика окружающей среды и глобальные климатические изменения» (ДОСиГИК), для которого писалась эта статья, относится к молодым, перспективным научным изданиям нового поколения, удачно сочетающим традиции отечественной науки с современными требованиями европейских стандартов в области подготовки и рецензирования публикаций. К настоящему моменту ДОСиГИК имеет все шансы стать отечественным лидером по качеству и количеству публикаций, касающихся газообмена почвы и атмосферы, как одного из ведущих факторов глобальных климатических изменений. Открытый доступ к публикациям ведущих ученых в данной области и их высокий уровень в немалой степени способствует соответствующему рейтингу издания, чей импакт-фактор за последние 2 года достиг отметки 0,435.

В структуре журнала предусмотрена рубрика «Дискуссии», которая, к сожалению, была изъята из большинства ведущих журналов в сфере экологии и почвоведения, что лишило авторов возможности открыто полемизировать с рецензентами, полностью поставив их в зависимость от тайного судейства, далеко не всегда объективного. Вместе с тем начатую недавно в рамках этой рубрики дискуссию между Главным Редактором журнала М.В. Глаголевым и д.б.н. А.В. Наумовым [Наумов, 2013; Глаголев, 2013; Глаголев, 2014; Сабреков, 2014]¹ пока вряд ли можно назвать удачным примером. Давайте разберемся почему.

Главный Редактор ДОСиГИК взял на себя нелегкий, неблагодарный в глазах значительной части научного мира, но нужный для науки и своевременный труд по критической оценке, упорядочению и ревизии тех опубликованных работ, включая учебно-методические, которые напрямую касаются проблемы количественной оценки и моделирования газообмена почвы и атмосферы, особенно в болотных экосистемах. Имеет ли он на это право? Думаю, что да. На текущий момент Михаил Владимирович «первый среди равных» – то есть безусловный авторитет в данной области исследований, разносторонний, высоко эрудированный специалист с аналитическим складом ума, уверенно владеющий методом математического моделирования сложных систем, и вместе с тем постоянно практикующий исследователь-полевик. По количеству публикаций (100 за последние 5 лет), включая рейтинговые зарубежные журналы, а главное – по их уровню он значительно превосходит многих коллег, в том числе имеющих более высокие научные степени и ученые звания. Его квалификация и востребованность в научном сообществе подтверждаются

¹ В рукописи настоящей статьи проф. А.В. Смагина литературные ссылки были по большей части оформлены не в соответствии с правилами нашего журнала. Андрею Валентиновичу было предложено самостоятельно попытаться привести ссылки в соответствие с правилами (при необходимости воспользовавшись помощью редактора – Н.В. Филипповой). К сожалению, даже по прошествии весьма изрядного времени А.В. Смагин не смог этого сделать. Тогда, чтобы не быть обвиненными в задержке опубликования острополюемических дискуссионных материалов, редакция журнала была вынуждена поручить тяжелый труд по редактированию ссылок М.В. Глаголеву и Н.В. Филипповой. В результате, с одной стороны, мы благодарны Михаилу Владимировичу и Нине Владимировне, взявшим на себя неблагодарный труд по редактированию ссылок, но, с другой стороны, вынуждены заявить: ответственность за возможные ошибки в ссылках теперь в значительной степени несут они.

совместительством работы как минимум в трех государственных научных и учебно-научных организациях, включая МГУ, а также постоянным участием в крупных исследовательских проектах (грантах) на территории России международного уровня. Михаил Владимирович имеет множество учеников, являясь их реальным (а не номинальным) научным руководителем по дипломным и диссертационным работам; практически все из них остались в науке и успешно работают не только в России, но и за рубежом. Автор этих строк благодарен М.В. Глаголеву за помощь в освоении методов и программных продуктов численного моделирования, неизменную помощь в работе и учебном процессе, а также за объективный анализ и выявление ошибок в моих публикациях и лекциях, от которых, увы, никто не застрахован. В том числе и сам Главный Редактор. Поэтому, признавая за ним право на упомянутую выше деятельность и ее актуальность, хочу теперь в защиту уважаемого А.В. Наумова поднять второй вопрос – о научной этике.

Иными словами – как Главный Редактор это делает? Мне кажется, далеко не лучшим образом. Недоброжелательным, насмешливо-вызывающим, менторским тоном некоего непогрешимого судьи с категоричными формулировками, якобы претендующими на юмор, а на самом деле – обидными для выполнивших серьезную работу (например, написание учебного пособия [Лактионова и др., 2011], рецензия [Глаголев, 2011]) коллег, пусть даже заблуждающихся в чем-то по неведению. Стил, присущий современной бульварной прессе, но абсолютно неуместный для научных публикаций, рецензий и дискуссий и компрометирующий не только самого Главного Редактора, но и Редколлегию ДОСиГИКИ в целом. Это порождает и будет порождать, кстати, совершенно справедливо, «открытые письма» в Редакцию, подобные [Наумов, 2013].

В связи с вышеизложенным предлагаю Редколлегии журнала установить определенные правила для публикаций в рубрике «Дискуссии», тем более что она не рецензируемая.

1. Дискуссии открываются и ведутся по научным темам, а не для выяснения личных отношений между специалистами. С последней целью можно предусмотреть рубрику «Апелляции или открытые обращения», а также «от Редакции» с претензиями и (или) извинениями.

2. По установленной теме дискуссии каждый участник имеет право опубликовать не более пяти статей, причем в годовых отчетах их нельзя включать в список публикаций из рецензируемых журналов.

3. По окончании дискуссии или при невозможности ее завершения в виде консенсуса сторон готовится итоговая публикация, обобщающая основные результаты на данном этапе от лица всех дискутирующих.

4. Стил дискуссии должен исключать эмоции и быть сугубо научным. В нем не должны допускаться критиканство, игнорирование здравого смысла и чужих доводов, упрямство, менторский тон, поучение коллег, воззвания, ставящие под сомнение их научную или педагогическую деятельность, всплески эмоций типа «какая чушь!!!», «да это же полнейший абсурд!!!», «безумная величина!!!», двусмысленные с точки зрения русского языка формулировки или сокращения типа «этим г-ном Петровым» и тому подобные действия, превращающие научное издание в филиал низкопробной бульварной прессы. Приветствуются обращения по имени-отчеству или по фамилии с указанием ученого звания, что априори подразумевает уважение к оппоненту, без которого дискуссия не мыслима.

5. При проведении научной дискуссии с Рецензентами, членами Редколлегии, включая Главного Редактора, а также лицами, занимающими начальствующее положение по работе, должны быть исключены применение «административного ресурса» и угроза такого применения. Дискуссия – свободное выражение научного мнения, убеждение в нем посредством фактов и логики, но никак не навязывание научному сообществу. Уличенный в последнем исключается из дискуссии, а установленные факты применения «административного ресурса» или соответствующих угроз выносятся на суд общественности путем их опубликования в журнале.

6. При нарушении пп. 4, 5 Редакция журнала должна публично принести извинения за действия своих сотрудников посредством опубликования в ДОСиГИКИ.

Этим списком заканчиваю вводную часть, не касающуюся научного предмета начатой дискуссии.

СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

I. Терминология

Один из вопросов, поднятый в дискуссии М.В. Глаголева и А.В. Наумова касается термина «поток», применительно к эмиссии (поглощению) метана и иных газообразных веществ на границе

почвы и атмосферы. Мне кажется, нет оснований для ревизии сложившегося в научном сообществе экологов и почвоведов понятия газовых потоков (q) как массы (m), прошедшей за единицу времени (t) через единицу площади поперечного сечения (S) и менять его на «удельный поток» или «плотность потока», что корректнее с позиций терминологии ряда точных дисциплин. Согласен с уважаемым Алексеем Владимировичем, что это лишь внесет путаницу в и без того сложную область исследований, а главное, никогда не реализуется в мировом сообществе по почину одного отечественного журнала. Поэтому в дальнейшем изложении поток газа $q = m \cdot (S \cdot t)^{-1}$ с соответствующей размерностью $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ (иные единицы массы, площади и времени), а для движения среды, вмещающей газ, оставим привычное понятие скорости потока (u , м/с), откуда конвективный поток газа с концентрацией в среде $q = u \cdot C$.

II. Перечень дискуссионных вопросов

Попытаемся сформулировать те основные вопросы в исследуемой области, на которые пока нет очевидных ответов, по крайней мере, с точки зрения автора, хотя они представляются исключительно важными.

1. Адекватно ли отражает поверхностная эмиссия углеродсодержащих газов их продуцирование в почве и соответствующую диссимиляционную компоненту углеродного цикла? Возможен ли значительный положительный дисбаланс круговорота углерода (сток) на территории России?

2. Существуют ли мощные выбросы метана (сезонные, локальные) и если да – в чем их причины (физические механизмы)?

3. Существует ли сток метана в болотах и если да – какова интенсивность этого процесса в сравнении с источником?

4. Каков вклад бореальных (западносибирских) болот в эмиссию метана болотными экосистемами мира?

5. Адекватен ли камерный метод оценки потоков на границе почвы и атмосферы?

Эти вопросы являются предметом дискуссии, и в дальнейшем изложении автор попытается высказать свою, возможно субъективную точку зрения по ним в надежде на отклик не только упомянутых двух коллег, но и всех интересующихся данной проблемой.

III. Обсуждение проблемы

Активные исследования газовой функции почв как источника, стока и резервуара веществ по отношению к атмосфере были начаты в конце прошлого века в связи с проблемой парникового эффекта и глобальных климатических изменений. При этом и в нашей стране и за рубежом сложилась в целом одинаковая методология исследований в виде количественной оценки потоков на границе «почва-атмосфера», на основании которой и судят о вкладе почвенного покрова в регуляцию состава и состояния атмосферы в том или ином территориальном масштабе, вплоть до глобального. С поразительным единодушием и отечественные и зарубежные ученые продолжают идти по этому пути, совершенствуя методы определения таких потоков и модели, позволяющие интерполировать местные (локальные и спорадические оценки) на более масштабные пространственные и временные отрезки. При этом насущный в эпоху переживаемых климатических изменений вопрос об ответной реакции дыхания почв и иных газовых эмиссий решается преимущественно на базе эмпирических моделей, связывающих потоки на поверхности с контролируемыми гидротермическими факторами. В ряде обобщающих публикаций, правда в последнее время в основном в отечественных, выносятся вердикт о принадлежности той или иной территории, вплоть до государства в целом к категории «источников» или «стоков» газов по отношению к атмосфере. Для газов углеродного цикла с этой целью рассматривается баланс между ассимиляционной (фотосинтез) и диссимиляционной (дыхание) компонентами, причем в последней на экспериментальном уровне оценивается почвенное дыхание, иногда совместно с эмиссией метана.

В этой связи рассмотрим два крупных результата, полученные за последнее время в России. Первый – итог многолетней работы коллектива ИФХиБПП РАН (Пушино) под руководством проф. В.Н. Кудярова, вошедший в коллективную монографию «Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России» [2007], а также в докторскую диссертацию одного из основных исполнителей – И.Н. Кургановой «Эмиссия и баланс диоксида углерода в экосистемах России» [2010]. В нем Россия представлялась как «безусловный сток углерода» в размере порядка 1 Гт/год или около 25% от первичной продукции фотосинтеза. Автор был официальным оппонентом этой работы и на защите высказал сомнение по поводу данного результата (вывода), несколько, впрочем, не умаляющее

проделанного диссертантом большого труда и уверенности в его полном соответствии искомой ученой степени.

Второй результат – это весьма небольшая доля в глобальной эмиссии метана из болотных экосистем для Западной Сибири – крупнейшего болотного региона планеты. Он был получен М.В. Глаголевым в его недавней диссертационной работе [2010], где автор настоящих строк, хоть и числился номинальным научным руководителем, естественно не оказывал никакого влияния на совершенно самостоятельную плодотворную творческую деятельность диссертанта, о научном таланте и высокой квалификации которого я уже высказался во Введении.

Начнем с первого результата. Что это? Реальный результат или все же артефакт, связанный с методологией исследований. С логической точки зрения трудно предположить, что существует столь высокий дисбаланс (четверть от ежегодной первичной продукции) в сторону ассимиляции углерода на территории почти 1/8 суши планеты. Если это постоянное явление, значит, в масштабах эволюции оно должно было бы привести к гигантским резервуарам углерода на поверхности. Сами авторы в работе [Пулы..., 2007] указывают, что с конца ледникового периода Россия накопила более 300 Гт $C_{орг}$. Но это соответствует при возрасте голоцена в 10000 лет 0,03 Гт/год, а никак не 1 Гт. Дисбаланс в 1 Гт предполагает ежегодную аккумуляцию на сухопутной территории России оцененной в 1,7 млрд га [Пулы..., 2007], около 60 гС/м². Ни зарастание заброшенных пашен, ни аккумуляция в болотах не могут покрыть и 10% от указанной величины. Может быть речь идет о какой-то вспышке продуктивности, как отклика на повышение CO_2 в атмосфере? Но как показывают работы К.И. Кобак [1988] и А.В. Наумова [2004], распространенные в России лесные и болотные экосистемы достаточно автономны по круговороту углерода и используют свой же эмитированный CO_2 . Кроме того, повышение продуктивности пропорционально приросту концентрации CO_2 в атмосфере может быть при прочих оптимальных факторах (влажность, световой, тепловой режимы, минеральное питание), а здесь в масштабах страны тенденции неоднозначные в эпоху переживаемых климатических изменений. Наконец, оценки NPP в 4,5-4,7 Гт/год не учитывали напрямую этот фактор, и многие из них были получены в ту пору, когда уровень CO_2 в атмосфере был в пределах 300-320 ppm (0,03%). Если считать, что полученный результат дисбаланса в 1 Гт/год это не временное, а некое постоянное явление, то либо за 300 лет пул органического углерода в почвах России (296 Гт по [Орлов и Бирюкова, 1995]) должен удваиваться, либо за столетний период – пул углерода торфяников (115 Гт по [Ефремова и др., 1997]). Это, несомненно, нашло бы отражение в исследованиях и публикациях указанного периода совсем недавней истории. Если депонирование происходит только в растениях (прирост продуктивности) – лесной пул (40 Гт по данным [Исаев, Коровин, 1999]) должен был удвоиться всего за 40 лет, то есть на наших с вами глазах площадь лесов России (поскольку рост в высоту и ширину древостоя ограничен) должна была увеличиться в два раза.

Не логичнее все же принять гипотезу артефакта и попытаться проанализировать породившие ее причины? Одна из них очевидна – очень малое количество данных по дыханию почв для плохо изученных регионов Сибири и Дальнего Востока (всего 12 точек в пределах от 100 до 180° Е, составляющих почти половину протяженности страны), согласно [Курганова, 2010]. Вторая – использование в большинстве случаев «классического» метода камер с абсорбцией CO_2 , который может существенно занижать оценку эмиссии, как впрочем и метод камер вообще. Но это предмет отдельного обсуждения в конце статьи. Третья неоднократно высказывалась автором настоящей статьи научному сообществу, занимающемуся оценкой газовой функции почв, но почему-то не получила должного отклика ни позитивного, ни критического. Эмиссия с поверхности чаще всего не тождественна gross-продуцированию газа в объеме почвы [Смагин, 1998; 2000; 2005; Soils..., 2006].

Рассмотрим это положение подробнее, тем более что именно gross-продуцирование за вычетом корневого дыхания надо сравнивать с ассимиляционной составляющей углеродного цикла. Эмиссия с поверхности это своего рода «верхушка айсберга» – результат комплекса сложных и до сих пор не исследованных в должной мере внутрипочвенных процессов из следующего основного перечня.

1. Биологические и биохимические источники/стоки газообразных веществ.
2. Распределение и транспорт как самих газообразных веществ, так и их источников/стоков и промежуточных веществ (субстратов) для их получения (трансформации).
3. Абиотические источники и стоки физической, химической и физико-химической природы.

Биологические и биохимические источники/стоки в контексте обсуждаемых дискуссионных вопросов это дыхание корней и микроорганизмов, включая ризосферные (трудно идентифицируемый от собственно корневого дыхания источник), ферментативное разложение, а также метаногенез и деятельность метанотрофных организмов (почему-то игнорируемые в работе [Курганова, 2010]) в виде соответствующих функций распределения по профилю, зависимостей от переменных

гидротермических и иных факторов почвенной среды. Метанотрофный фильтр – мощнейший внутренний сток метана в болотах по данным ряда исследователей (см., например, [Глаголев, 2010]) может блокировать до 80% восходящего к атмосфере газа. Значит gross-продуцирование этого газа, очевидно, может в 5 раз превышать эмиссию с поверхности ($100/(100-80)=5$). Но тогда при характерных потоках CO_2 в $100 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ и метана в $10 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ мы имеем не 10% а 50% вклад метана в gross-продуцирование газообразного углерода. Казалось бы, какая разница, ведь измеряя камерой почвенное дыхание и эмиссию метана, мы все равно уловим весь поступающий в атмосферу из почвы углерод. Но, давайте посчитаем. Пусть реальная продукция метана $50 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, а CO_2 – $60 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. «Выходят» на поверхность после метанотрофного фильтра $10 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ метана и $60+40=100 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ CO_2 (считаем, что окисление идет по циклу Зендера-Брока до CO_2). По новым оценкам [Курганова, 2010] доля корневого дыхания существенно увеличена относительно «классических» 30% до 50%, а в болотах – до 70-80%, и это, кстати, тоже одна из возможных причин обсуждаемого артефакта дисбаланса в 1 Гт/год. Так вот, микробная составляющая при оценке по потокам с поверхности это $(100-0,8 \cdot 100)+10=30 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, а реально, по gross-продуцированию в объеме: $(60-0,8 \cdot 60)+40+10=62 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Разница в два раза. Допустим, реальная нетто-продукция фотосинтеза это $62 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, как и должно быть в сложившейся (инвариантной) экосистеме. Оценка по эмиссии с поверхности в этом случае даст «сток» в $62-30=32 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, а без учета эмиссии метана еще больше: $62-20=40 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, то есть 52-65% от NPP, что с учетом большой доли болотных экосистем в России, думаю, может объяснить весьма значительную часть дисбаланса круговорота углерода в 25% от NPP. Конечно, утрированный пример, но ведь есть повод для размышлений?

О внутрипочвенных потоках (транспорте) газообразных веществ. Опубликованные в Nature данные коллеги и бывшего ученика Главного Редактора к.б.н. М.А. Мастепанова с соавторами [Mastepanov et al., 2008] о неожиданном всплеске эмиссии в 4-6 и более раз (вплоть до $112 \text{ мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$) при последовательном промерзании верхней 0-15 см почвенной толщи, видимо, также возможно частично объяснить ингибированием метанотрофного фильтра при соответствующем фазовом переходе «вода-лед». Но автору, как физику почв, больше импонирует другой подход, тем более, что на его основе уже были получены оценки мощных выбросов, или, как мы их обозначили «конвективной разгрузки» газов в атмосферу из болотных почв, причем не только в холодное, но и в теплое время года, когда метанотрофный фильтр должен функционировать [Смагин, 2005; 2007а; Функционирование..., 2013]. О возможности спорадических «залповых» выбросов газов из болота в атмосферу пишут известные крупные специалисты (см, например, [Земцов, 2000]). В наших исследованиях использовался балансовый расчет динамики запасов газов, заключенных в толще торфяника (экспериментальные данные на западносибирском Бакчарском болоте были получены группой учащихся под руководством М.В. Глаголева). Этот расчет выявил пульсационный режим функционирования болотной экосистемы с периодической сменой фаз аккумуляции и разгрузки углеродсодержащих газов. Выброс газов на стадии разгрузки во много раз (на порядок и более) выше эмиссии, в чем несложно убедиться, сравнивая интегральную эмиссию с убылью запасов газа за период продолжительности данной стадии. Причем, поскольку запасы, как и эмиссия, рассчитываются относительно единицы площади, нет необходимости учета пространственной частоты таких «не-эмиссионных» преимущественных потоков, поскольку известно общее количество газа, выделяемое этим способом в атмосферу с данной площади, и оно, повторяем, значительно превышает фоновую эмиссию, измеряемую камерами.

Собственно говоря, любые почвы, включая автоморфные, характеризуются наряду с фоновой эмиссией в атмосферу, накоплением (аккумуляцией) газов в составе всех трех фаз почвенной толщи в летнее время с постепенным выходом этого запаса (разгрузкой) в холодное время года. Уместно сравнение почвенного резервуара с легкими животного, частота глубокого «дыхания» которого («вдох» и «выдох») обычно не выше 1 раза в год. Но для болот с ограниченным объемом «легких», подобное «дыхание» учащается. Генерируемые внутри торфяника газы, не имея возможности выйти в атмосферу обычным диффузным путем через обводненный поверхностный слой, аккумулируются в глубине в виде газовых резервуаров значительной протяженности (десятки метров) с запасом до $30-60 \text{ г/м}^2$ углерода CO_2 и CH_4 , приводя к локальной ненасыщенности влагой почвенной толщи. По достижении критического эндогенного (пневматического) давления или при случайном внешнем воздействии (нагрузка на поверхность от животных и человека), происходит разгрузка (выброс) в атмосферу значительного количества накопленного болотного воздуха конвективным путем, посредством барботирования наиболее широких каналов в структуре органогенной пористой среды,

включая, видимо, зазоры вдоль стеблей и корней растений, пронизывающих торфяную залежь. Фаза разгрузки вновь сменяется аккумуляцией газов внутри почвы и так до 6-10 раз за сезон и выше. При промерзании воды, вероятно, появляется возможность более свободного выхода аккумулированного газа, поскольку в отличие от чистого, не проникаемого для газов льда в водоемах, в болотах всегда будут включения в виде твердой фазы торфа, стеблей и корней растений, трещины и другие проводящие элементы структуры.

В целом же указанный потенциальный механизм газообмена с атмосферой практически невозможно исследовать традиционным камерным методом, поскольку вероятность попадания камеры на участок, где возникнет подобный выброс, крайне мала. По-видимому, М.А. Мастепанов с соавторами [2008] – первые, кому удалось определить подобные потоки прямым путем на поверхности почвы, так как был применен фактически непрерывный мониторинг эмиссии шестью автоматическими камерами с частотой измерений раз в 1 час с июня по октябрь включительно. Но все равно эта методология, в отличие от расчета динамики запасов газа внутри почвы, не дает на наш взгляд, возможности оценить реальный масштаб наблюдаемого явления, ведь не исследована частота встречаемости подобных выбросов на единицу площади. Шести камер и даже гораздо большего числа при полностью автоматизированных непрерывных измерениях все же, скорее всего не достаточно, чтобы «поймать» все подобные преимущественные потоки. Этим можно объяснить отсутствие выбросов по данным мониторинга в летнее время, тогда как по нашим расчетам динамики запасов болотного воздуха получается, что они существуют и летом и осенью [Смагин, 2005, 2007а, Функционирование..., 2013].

Возвращаясь к проблеме внутрипочвенных потоков, отметим следующее. Традиционно в исследованиях движения газообразных веществ особенно в автоморфных почвах приоритет отдается изотермической диффузии. Однако есть повод усомниться в ее доминирующем значении, ведь механизмы вынужденной и естественной конвекции могут на порядки превосходить молекулярный транспорт при очень слабом (в несколько Па/м) градиенте пневматического давления (в том числе и биогенного), который пока не умеют измерять в полевых условиях, или при небольших различиях в плотности почвенного воздуха [Смагин, 2005]. В последнем случае естественная конвекция в поле силы тяжести будет способствовать гравитационному стеканию воздуха с тяжелыми компонентами (CO_2 , N_2O , SO_2) и подъему – с легкими (H_2 , H_2O , CH_4). Для хорошо растворимых газов (CO_2), особенно в болотах, где диффузия затруднена, существенный (до 20% от фоновой эмиссии) вклад может иметь конвективный транспорт в жидкой фазе с выходом в атмосферу при эвапотранспирации [Смагин, 2005]. Вопрос об аналогичном транспорте С-газов и иных форм углерода с потоками грунтовых (болотных) вод также остается пока открытым, а его известные оценки в первые проценты от эмиссии могут быть, на наш взгляд, занижены по причинам не учитываемых разгрузок на геохимических барьерах (гидрокарбонаты, карбонаты) и выхода растворенных газов в атмосферу по мере конвективного массопереноса. Наши грубые, и, возможно, некорректные примеры оценок иногда дают для латеральных потоков в болотах весьма существенные величины на уровне эмиссии [Смагин и др., 2000; Смагин, 2007а].

На возможность альтернативных, более быстрых, чем диффузия конвективных механизмов массопереноса газов в почвах указывает до сих пор не решенная до конца проблема количественного описания процесса испарения. Даже комбинированный паро-жидкостный перенос не дает оценок, близких к реальным величинам испарения порядка 10 мм/сут, а диффузный транспорт не покрывает и 1% от этой величины [Глобус, 1987; Смагин, 2005].

Но если для автоморфных почв вклад диффузии, скорее всего, преувеличен, то для болот есть основания считать его неоправданно заниженным. Так М.В. Глаголев [2010] вслед за [Yagi, 1997] пишет о крайне незначительном вкладе в 0,3% относительно всех механизмов массопереноса болотного газа, беря за основу расчет потоков по эффективному коэффициенту диффузии в воде. Однако здесь же он приводит механизм «растительного транспорта» со вкладом до 40-60% (по [Yagi, 1997] – до 90% для рисовых плантаций). Но как газы перемещаются в растениях, особенно если речь идет о плохо растворимом метане? Это ведь не открытые с двух сторон и далеко не всегда полые трубки, где можно говорить о вынужденной конвекции. Скорее всего, вынужденная конвекция имеет место по гидрофобной поверхности стеблей и корней, а внутри растений, вероятнее всего имеет место именно диффузия по аэропаренхиме и полым каналам (о градиенте концентраций метана в аэропаренхиме см., например, [Knapp, Yavitt, 1992]), возможно усиленная естественной конвекцией метана, как легкого газа. Михаил Владимирович справедливо отмечает, что вклад различных механизмов меняется посезонно. И, наверное, именно диффузия становится ведущим механизмом фоновой эмиссии не только осенью [Глаголев, 2010], но и в зимний период, а ведь это большая часть

года. И уж конечно, роль диффузии резко возрастает для осушенных болот или повышенных элементов ландшафта (гряды).

К этому добавим феномен поверхностной диффузии, увеличивающий по нашим данным проводимость в несколько раз при насыщенном состоянии почвы [Смагин, 2005]. Можно не верить этим экспериментальным данным [Глаголев, 2010], но теоретически, согласно [Фролов, 1988], мы получаем еще более высокие значения. Эффективный коэффициент диффузии $D=D_w+K \cdot D_s$, где D_w и D_s – диффузивность в объеме и по поверхности, K – константа Генри для сорбции газа, которая варьирует в пределах 8-18 для метана, и 20-40 для CO_2 [Смагин, 2007б].

Значит при близкой плотности воды в адсорбционном слое и в свободном состоянии, или равенстве величин D_w и D_s , эффективный коэффициент диффузии D возрастает в 9-41 раз относительно такового в воде. То, что мы экспериментально получили более низкие величины, скорее всего результат извилистости порового пространства и, возможно, несовершенства методики опыта. Так что нельзя снимать со счетов механизм диффузии в болотах.

А вот механизм «пузырькового транспорта», который, судя по работам [Yagi, 1997; Мастепанов, 2004; Глаголев, 2010; Степаненко и др., 2011] достигает 30% вклада и более для автора данной статьи остается не очевидным, и я буду признателен коллегам за соответствующие разъяснения. Каким образом пузырек воздуха с характерным размером порядка 1-2 мм, судя по работе [Глаголев, 2010], может пробиться через извилистое поровое пространство насыщенного водой торфа или плотного ила донных отложений, да еще и мгновенно, согласно модели [Степаненко и др., 2011]? Это ясно, когда идет речь о слое воды, где наблюдается простая естественная конвекция пузырьков из-за разности плотностей воды и воздуха с минимальным сопротивлением движению со стороны гомогенной водной среды, но совсем не очевидно для гетерогенной пористой системы. Мало того, обычно насыщенный пузырьками ил, а при извержениях – туф, сами поднимаются на поверхность воды, а не «отдают» пузырьки, то есть не пропускают их через свою структуру. Значит, если пузырьки наблюдаются (а в этом у автора нет сомнений), они либо производятся на поверхности раздела почва/вода (в тонком рабочем слое, не насыщающемся водой полностью из за постоянной газогенерации), либо внутри почвы есть какие-то локальные каналы, которые их проводят. Возможно, это гидрофобная поверхность стеблей. Но как быть с лимническими отложениями, лишенными растительности? Можно предположить, что накопленный в виде сплошной фазы газ под собственным давлением прорывается наружу (обсуждаемые выше «выбросы»), но тогда пузырьки будут не мелкими.

Заканчивая тему транспорта, проблемные вопросы которой значительно шире, чем приведенные в статье примеры, хочу обратить внимание специалистов в области моделирования на одну деталь, а именно – учет эффективного пространства для массопереноса газов. Многие авторы, не исключая и пишущего эти строки, допускали здесь неточности, начиная, по-видимому, с пионерской отечественной работы [Орлов и др., 1987]. Транспорт в пористых средах осуществляется не по всему пространству, а по определенной его части в виде пористости или для газовой фазы – пористости аэрации. Поэтому модель, учитывающая массовый баланс в такой системе, должна содержать фактор эффективного пространства – в простейшем случае в виде пористости, а в более сложных – в виде линейных комбинаций долей фаз с соответствующими коэффициентами межфазных распределений [Смагин, 2005]. Например, если речь идет об автоморфной однородной почве с постоянным по глубине источником газа U , в которой измеряемой величиной является концентрация в газовой фазе (C_g), а концентрацией и диффузией в жидкой фазе можно пренебречь, модель будет иметь вид:

$$P_g \frac{\partial C_g}{\partial t} = DP_g \frac{\partial^2 C_g}{\partial z^2} + U, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии, P_g – пористость аэрации, принятые постоянной величиной. Сократить на P_g можно, но тогда надо это обосновать и ввести соответствующую функцию U/P_g . Только тогда, как справедливо указывает проф. Е.В. Шеин [2005], будет соблюдаться правило размерностей (и в левой и в правой части – г/м^3 почвы или г/м^3 почвенного воздуха в единицу времени), а значит, модель будет корректной с физической точки зрения. По видимому, также можно использовать показатель «эффективного коэффициента диффузии», как произведения $D \cdot P_g$ но тогда надо это оговаривать, чтобы не возникла неопределенность с размерностями.

По аналогии для насыщенной почвы и растворенных веществ (C_l) имеем вместо P_g общую пористость P . Формально, казалось бы можно ввести некоторую величину концентрации в объеме

почвы (а не в жидкой или газовой фазе) $C=C_l \cdot P$ или $C=C_g \cdot P_g$ и записать вместо (1), как это, видимо, подразумевалось в работах [Орлов и др., 1987; Степаненко и др., 2011]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + U. \quad (2)$$

Но такое допустимо лишь в редких случаях, если почва (пористая среда) с глубиной не меняет пористость. Этот случай не подходит к стратифицированным объектам донных отложений, тем более что сами авторы [Степаненко и др., 2011] используют в модели соответствующую запись, не вынося диффузивность в качестве постоянной величины при дифференцировании по пространству. Значит, возникает ошибка, которую легко понять из следующего примера. Пусть измеряемая величина (концентрация газа в жидкой фазе) всюду одинакова и равна 1 г/м^3 раствора. Если в поверхностном слое (рыхлый, взвешенный ил) пористость 0,6, а на 1 м глубине – $0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$, то при пересчете на общую концентрацию в объеме почвы (ила) получаем $1 \text{ г/м}^3 \cdot 0,6 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 0,6 \text{ г}$ газа на м^3 ила вверху и $1 \text{ г/м}^3 \cdot 0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 0,4 \text{ г}$ газа на м^3 ила внизу или значение градиента $0,2 \text{ г/м}^4$. То есть должна идти диффузия, причем в нисходящем направлении. Реально никакой диффузии нет, так как градиент в жидкой фазе – нулевой.

Изложенные выше примеры подводят нас к заключительной компоненте из списка внутрисочвенных процессов, а именно – абиотических источников/стоков газообразных веществ в виде химических реакций и межфазных взаимодействий. Из наиболее известных и имеющих количественную оценку химических реакций следует выделить взаимодействия растворенного CO_2 (угольной кислоты) в виде диссоциации на гидрокарбонат- и карбонат-анионы с последующим их связыванием 2-3 валентными катионами и выпадением в осадок (иммобилизацией). Обратный процесс – растворение карбонатов при подкислении (в том числе при повышении парциального давления CO_2). При этом из многочисленных реакций, связанных с гидрокарбонат- и карбонат-анионами а основным изучается карбонатно-кальциевое равновесие в почвах юга России и Сибири (черноземы, каштановые) на карбонатных породах. В этих исследованиях, включая палеонтологическую реконструкцию, в целом придерживаются мнения, что карбонатная система в условиях функционирования черноземных почв является скорее источником (хотя и слабым по сравнению с биогенной эмиссией), а не стоком газообразного углерода [Наумов, 2004; Пулы..., 2007]. Отсюда роль аридных и семиаридных территорий в связывании и депонировании углерода признается несущественной, если не отрицательной, по сравнению с бореальными ландшафтами. Для автора такой результат пока не очевиден, ведь щелочные растворы (а реакция исследованных почв от нейтральной до щелочной), напротив, должны поглощать CO_2 , на чем, собственно, основан классический метод определения почвенного дыхания по Люндегordu-Штатнову-Макарову. В [Смагин, 2005] приводится формула для расчета эффективной растворимости CO_2 ($a_{\text{эф}}$) в зависимости от pH:

$$a_{\text{эф}} = a \left[1 + \frac{K_1}{10^{-\text{pH}}} + \frac{K_1 K_2}{10^{-2\text{pH}}} \right], \quad (3)$$

где a – табличная растворимость как функция от температуры, K_1 и K_2 – константы диссоциации угольной кислоты по 1 и 2 ступени. Согласно этой формуле при pH=8 эффективная растворимость превышает табличную величину (порядка 1 для CO_2 при температуре почвенного раствора 15°C) в 40 раз, что, кстати, подтверждается экспериментально ($a_{\text{эф}}=39,4$ при pH=8 по [McCoy, Rolston, 1992]). Почему же не срабатывает этот мощный фактор стока? Не хватает влаги или катионов для последующего осаждения гидрокарбонатов и карбонатов? Или при расчетах этот фактор игнорируется (используется табличная, а не эффективная растворимость) и рассматривается только обратный процесс растворения карбонатов? Вопрос для меня не понятный и, опять-таки, буду признателен коллегам за соответствующие разъяснения.

Сорбция. Казалось бы, существенный фактор поглощения газов в пористых телах, если вспомнить классические труды акад. Н.Д. Зелинского, положенные в основу промышленного производства противогазов и очистителей воздуха. Но фактически ни в одной из известных автору моделей в рассматриваемой нами области газообмена почвы и атмосферы он не учитывается. Равно как и очень мало работ по практическому определению параметров взаимодействия газообразных веществ с твердой фазой почв, исключая разве что пары воды. Но главное – у специалистов абсолютно отсутствует интерес к этой проблеме. Так статья в переводном журнале Почвоведение «Абиотическое поглощение газов органогенными почвами» [Смагин, 2007б], где были приведены экспериментальные оценки параметров сорбции для CO_2 , CH_4 и O_2 в торфах имеет нулевой индекс

цитирования и в нашей стране и за рубежом. Возможно плохая статья? Но все же рискну привести один расчет из нее, показывающий, как мне кажется, всю важность учета означенных выше взаимодействий для болотного газа.

Общая концентрация газа (C) в элементарном объеме почвы, фигурирующая в моделях динамики типа [Степаненко и др., 2011] с учетом межфазных равновесий в первом (линейном) приближении может быть рассчитана по концентрации в почвенном воздухе (C_g), согласно уравнению баланса [Смагин, 2005]:

$$C = (P_g + a_{эф} \cdot W \cdot \rho_b / \rho_l + K \cdot \rho_b / \rho_s) C_g, \quad (4)$$

где P_g – порозность аэрации; W – весовая влажность почвы; ρ_b , ρ_s , ρ_l – плотности почвы, ее твердой и жидкой фаз; $a_{эф}$, K – эффективная растворимость и константа Генри для сорбции газа. Нетрудно убедиться, что при низкой пористости аэрации ($P_g=0,05-0,1$) заболоченных торфяников и плохой растворимости таких газов как кислород и метан ($a_{эф}=0,03-0,05$) их основное количество будет сосредоточено именно на твердой фазе в адсорбированном виде. Так вклад «свободного» газа в порах аэрации не превысит 0,1, растворенного газа при плотностях торфа 0,2-0,4 г/см³ – $0,05 \cdot 0,3/1=0,015$, а доля адсорбированного газа при $K=8-11$ и $\rho_b/\rho_s = 0,1-0,3$ составит не менее 0,8-3, то есть доминирующее значение. При единичной концентрации в газовой фазе ($C_g=1$ г/м³ почвенного воздуха) общее содержание в элементарном объеме торфяной почвы будет, согласно (4), равным 0,9-3,1 г/м³ почвы. Значит общее содержание газа (кислорода или метана) в обводненной торфяной почве превысит таковое в почвенном воздухе (0,1 г/м³ почвы) в 9-31 раз, а в почвенной влаге (0,015 г/м³ почвы) в 60-200 раз! До 89-97% общего количества газа будет сосредоточено на твердой фазе в адсорбированном состоянии. У автора нет экспериментальных данных по сорбции метана илистыми донными отложениями, но, думаю, здесь картина будет похожей, исходя из близких удельных поверхностей торфа и ила порядка 300-500 м²/г и выше. Поэтому распространенные модели типа [Степаненко и др., 2011], пренебрегающие фактором сорбции и оперирующие только растворенным и свободным газом, трудно признать обоснованными с физической точки зрения. Кстати, и расчет «критической концентрации», при которой будет формироваться газовый пузырек, с учетом сорбции и балансового уравнения (4) для межфазных взаимодействий не в двухфазной системе «жидкость-газ», а в реальной, содержащей высокодисперсную твердую фазу, моделируемой среде будет иным, чем в работах [Walter et al., 1996; Степаненко и др., 2011]. Отметим и еще одно. Используемый в расчетах «актуальной» метаногенной активности метод интегрирования по глубине точечных источников, определяющихся по приросту концентрации метана в газовой фазе [Глаголев, 2010], также может существенно занижать реальную интенсивность, если в нем не учитывается сорбция газа твердой фазой и, вероятно еще – метанотрофное окисление.

В завершающей части статьи коснемся методического вопроса определения потоков газов на поверхности раздела почвы и атмосферы. Мы не будем анализировать литературные данные о сильных отличиях (до двух раз и более) разных методов определения потоков и внутри одной группы методов (например, камерных) в зависимости от вариантов их реализации и детекторов газов. Наряду с источниками [Кобак, 1988; Кобак и др., 1980; Замолотчиков и др., 2004; Witkamp, 1969; Norman et al., 1997], хотим обратить внимание интересующихся специалистов на малоизвестные работы [Машика, 2004; 2006] талантливого молодого специалиста, к.б.н. Александра Васильевича Машики, внезапная кончина которого прервала яркий творческий взлет этого прекрасного ученого и человека. Обратимся здесь к физическому обоснованию наиболее часто употребляемого метода закрытых камер, подробная теория которого в отечественной науке была изложена в работе [Орлов и др., 1987]. Очевидно, это необходимо для выявления возможных ошибок и погрешностей в расчетах потоков по данным о динамике концентраций в камере-изоляторе.

Предварительно зададимся вопросом – какие потоки мы пытаемся изучить? Если диффузионные, то почему они должны быть всегда постоянными и не затухать во времени при выравнивании концентраций в почве и камере? Ведь в почве может попросту отсутствовать в момент измерений источник газа, но выход в атмосферу будет происходить пока концентрация в почве выше атмосферной или пока она не сравняется с таковой в закрытой камере. Тренд прироста концентрации будет нелинейным (экспонента с асимптотой в виде равновесной концентрации), как в случае диффузиметров [Смагин, 2005], но при этом для объяснения не нужно никакого оттока из камеры, как в теории [Орлов и др., 1987]. Мало того, если это диффузионные потоки, пусть даже постоянной интенсивности, почему тогда они должны поступать в камеру в центре, а по бокам опять-таки диффузионно из нее должен выходить накопленный газ, как показано на схеме метода (рис.1-А)?

Ведь если интенсивность потоков одинакова по всему сечению камеры (рис. 1-Б), а значит, одинаковы градиенты концентраций их формирующие, что заставит газ двигаться в обратную сторону из камеры, пока эти градиенты существуют? Если же возникают латеральные градиенты, то часть потоков из почвы не будут поступать в камеру, когда в ней концентрация хоть немного превысит атмосферную, то есть создастся эффект «обтекания камеры», что также занизит оценку (рис. 1-В). В случае стационарности диффузионных потоков при наличии источника газа в почве постоянной мощности нетрудно получить аналитическое решение для тренда аккумуляции газа в закрытой камере в виде комбинации нелинейных функций от времени (квадратный корень, $\exp$ и erfc), адекватно описывающей экспериментальные данные [Venterea et al., 2009]. Таким образом, для диффузионных потоков схема, приведенная в [Орлов и др., 1987] и соответствующая модель представляются нам физически не обоснованными.

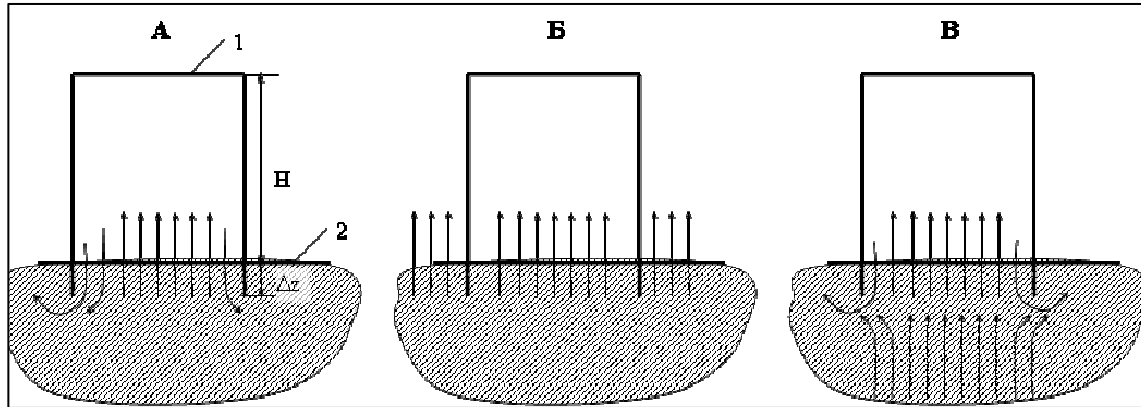


Рис. 1. Схема камерно-статического метода. А – вариант из [Орлов и др., 1987]; 1 – корпус камеры, 2 – поверхность почвы, H – высота над поверхностью почвы, Δz – глубина врезки; стрелками показаны потоки газов. Б – вариант вертикальных диффузионных потоков, В – потоки при наличии латеральных градиентов концентраций (пояснения в тексте).

Допустим, потоки конвективные $q=u \cdot C$. Автору импонирует точка зрения о возможном доминировании конвекции над диффузией, хотя в [Орлов и др., 1987] об этом напрямую не пишут. В этом случае при $q=\text{const}$ концентрация в почве постоянна и равна C . Диффузионный противопоток может возникнуть, если концентрация в камере будет больше C , но тогда непонятно почему он должен быть направлен только вбок (в атмосферу по стенкам камеры), а вглубь почвы из камеры двигаться не будет? Но даже если это и так, скажем, возникают преимущественные боковые градиенты, почему тогда в уравнении материального баланса для камеры в [Орлов и др., 1987] для расчета диффузионного противопотока используется вся площадь сечения, а не его часть, как показано стрелками таких потоков на рисунке 1-А? А если помимо диффузионного оттока в камере могут происходить еще какие-нибудь процессы поглощающие газ (для метана – биохимическое и биологическое окисление, для CO_2 – фотосинтез, также адсорбция и абсорбция избытка газа почвой, возможно химические реакции)? Кинетика этих процессов в первом приближении будет соответствовать реакции первого порядка, поэтому их весьма сложно отличить от диффузионной убыли. Попробуем изложить указанные выше соображения в виде модели динамики концентраций в закрытой камере, развивая представления [Орлов и др., 1987].

Для врезанной в почву на глубину Δz камеры объемом $V=S \cdot H$, где $S=L^2$ – площадь основания с ребром L , H – высота над поверхностью, будет справедливо следующее выражение баланса массы (m) газа:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = QS_1 - qS_2 \pm UV, \quad (5)$$

где Q , q – входящий и выходящий в камеру потоки газа [$\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$], S_1 , S_2 – соответствующие площади сечения для этих потоков, [м^2], U – функция «источник-сток» для газа внутри камеры, [$\text{г} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{час}^{-1}$]. Пусть $C=m/V$ – концентрация газа в камере, [$\text{г}/\text{м}^3$], зависящая от времени t , [час]. В окружающей атмосфере будем считать концентрацию постоянной и равной C_0 . Полагая, что газ выделяется в камеру из почвы через все сечение камеры ($S_1=S$) с потоком Q , диффундирует в обратную сторону с постоянным коэффициентом диффузии (D , $\text{м}^2/\text{час}$), проходя путь Δz через почву в атмосферу с боковыми потоками интенсивностью $q=D \cdot (C-C_0)/\Delta z$, а также способен поглощаться

внутри камеры с кинетикой первого порядка ($U=-k \cdot C$), где k – кинетическая константа, [час⁻¹], получаем из (5):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{Q}{H} - \frac{DCS_2}{\Delta zHL^2} + \frac{DC_0S_2}{\Delta zHL^2} - kC, \quad (6)$$

Теоретически оценить величину S_2 весьма непросто. Поэтому мы рассмотрим два крайних случая. Первый $S_2=S$ сохраним из работы [Орлов и др., 1987], а во втором примем, что S_2 равна «тени» от глубины врезки камеры и пути диффузионного переноса Δz , то есть $S_2 = 4 \cdot L \cdot \Delta z$. Тогда после соответствующей группировки компонентов (6): $A=Q/H+D \cdot C_0/(\Delta z \cdot H)$ или $A=Q/H+D \cdot C_0/(4 \cdot L \cdot H)$ и $b=D/(\Delta z \cdot H)+k$ или $b=4 \cdot D/(L \cdot H)+k$, имеем:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = A - bC, \quad (7)$$

Решением (7) при условии равенства концентрации в камере в начальный момент времени $t=0$ величине C_0 служит экспоненциальная функция вида:

$$C(t) = \frac{A}{b} + \left(C_0 - \frac{A}{b} \right) \exp(-bt). \quad (8)$$

Производя замену обозначений $y_0=A/b$, $a=(C_0-A/b)$ и аппроксимируя тренды нелинейной монотонной динамики концентраций в камере-изоляторе полученным из (8) уравнением: $C(t)=y_0+a \cdot \exp(-b \cdot t)$, что несложно сделать, используя стандартный перечень функций из приложения для нелинейной регрессии Regression Wizard программы S-Plot 9, можно оценить параметры y_0 , a , b , а по ним константу k и искомый поток Q , согласно формулам:

$$C_0 = y_0 + a, \quad (9)$$

$$k = b - \frac{D}{\Delta zH} \quad \text{или} \quad k = b - \frac{4D}{LH}, \quad (10)$$

$$Q = (C_0 \cdot k - a \cdot b) \cdot H = ((y_0+a) \cdot k - a \cdot b) \cdot H. \quad (11)$$

При отсутствии дополнительного к диффузионному массопереносу в атмосферу стока газа в камере ($k=0$), выражение (11) упрощается и поток, независимо от предположений о размерах площади его сечения, можно определить непосредственно по данным нелинейной регрессии как произведение параметров экспоненты a и b на высоту камеры H :

$$Q = -a \cdot b \cdot H. \quad (12)$$

Коэффициент эффективной диффузии при этом находится из формул:

$$D = \Delta z b H \quad \text{или} \quad D = \frac{bHL}{4}. \quad (13)$$

Если известна кинетическая константа процесса стока газа в камере (k), отличная от нуля, формулы (13) приобретают вид:

$$D = \Delta z(b-k)H \quad \text{или} \quad D = \frac{(b-k)HL}{4}. \quad (14)$$

На рис. 2 приведены примеры аппроксимации двух трендов экспериментальных данных по определению потоков метана на границе снежного покрова болота с атмосферой на полигоне ЮГУ «Мухрино», любезно предоставленные нам н.с. МГУ им. М.В. Ломоносова Н.А. Шныревым. По

основному массиву данных готовится отдельная публикация и здесь рассматривается лишь один пример из этого исследования.

Первоначально расчет потоков производился по упрощенной формуле (12) в соответствии с представлениями [Орлов и др., 1987] о единственно возможном механизме стока части метана из камеры посредством диффузии в атмосферу. При этом были получены следующие оценки. Для образца 1 (тренд накопления метана) поток $Q=0,11 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ или в 5 раз больше, чем по линейной модели, когда тренд аппроксимировался уравнением прямой (традиционный расчет для метода камер). Коэффициенты диффузии $D=0,042 \text{ м}^2/\text{час}$ ($S_2=S$) или $D=0,028 \text{ м}^2/\text{час}$ ($S_2=4 \cdot L \cdot \Delta z$). Обе эти величины были меньше диффузивности в атмосфере $D=0,068 \text{ м}^2/\text{час}$, что не противоречило допущению о диффузионном механизме выноса газа для обоих вариантов расчета. Хотя, если допустить, что путь для молекул газа из камеры это не Δz , а $2 \cdot \Delta z$, что, возможно, корректнее, так как молекулам вначале надо пройти внутри непроницаемой стенки камеры вниз, а потом подняться по ее внешней стороне в атмосферу, расчет по ($S_2=S$) даст D в почве, больше чем в атмосфере, а значит, чисто диффузионная гипотеза выноса или схема расчета не верны.

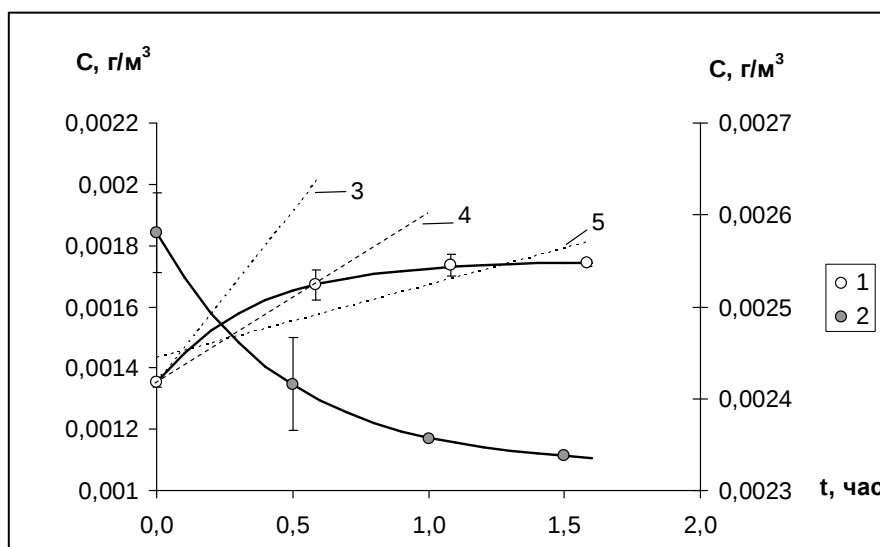


Рис. 2. Примеры трендов динамики содержания метана в камерах-изоляторах на снежном покрове болота (полигон ЮГУ «Мухрино», март 2011 г., экспериментальные данные Н.А. Шнырева): 1 – накопление метана (левая ось ординат), 2 – убыль метана (правая ось ординат), 3 – касательная с максимальным угловым коэффициентом $n=a \cdot b$ в точке $t=0$, 4 – секущая по первому измерению прироста концентрации, 5 – аппроксимация всех данных 1 линейной моделью; кривые – нелинейная модель (8) (пояснения в тексте).

Для второго образца (тренд убыли метана) расчетный поток $Q=-0,054 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ оказался отрицательным при соответствующих коэффициентах диффузии $D=0,032$ и $D=0,021 \text{ м}^2/\text{час}$. То есть, заложенный в модель (6) в соответствии с представлениями [Орлов и др., 1987] механизм диффузионного оттока газа из камеры в атмосферу не мог обеспечить реальную убыль концентрации (сток) метана, наблюдаемую в эксперименте (рис. 2). Это означает, что наряду с диффузионным оттоком для метана действует еще какой то механизм, ответственный за сток метана в атмосфере камеры-изолятора.

Предполагая, что его кинетика подчиняется реакции первого порядка, как заложено в полном варианте модели (6), получаем, при условии нулевого потока из почвы ($Q=0$) оценку соответствующей кинетической константы $k=0,245 \text{ час}^{-1}$. Зная k , и допуская, что этот процесс стока справедлив также и для образца 1 (тренд накопления), можно, оценив по формулам (14) соответствующие коэффициенты диффузии, рассчитать скорректированный поток Q с учетом дополнительного к диффузии в атмосферу механизма потенциального поглощения метана в камере. Этот поток составил $Q=0,15 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, что в 1,3 раза выше первоначально полученной оценки ($0,11 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$) и в 6 раз выше традиционной оценки по линейной модели для всего тренда ($0,024 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$). Расчетные коэффициенты диффузии при этом были равны $0,038$ и $0,026 \text{ м}^2/\text{час}$, соответственно.

Возникает резонный вопрос о природе дополнительного стока метана. Биологический фактор, по-видимому, следует исключить из-за отрицательных температур и малой вероятности заселения поверхности снега метанотрофными организмами. Предположение о сорбции метана поверхностью

снега также кажется маловероятным, поскольку по мере продвижения газа из почвенного источника соответствующее межфазное равновесие должно быть уже реализовано. Однако, если речь идет о быстром конвективном массопереносе, формирующем в камере повышенную по сравнению с атмосферной концентрацию, здесь может происходить последующая дополнительная адсорбция, а кинетика этого процесса как раз соответствует первому порядку [Смагин, 2005]. Вместе с тем нельзя исключать и химические реакции, способствующие стоку метана в атмосфере камеры-изолятора, и в частности – фотолиз метана, хотя автор, не являясь специалистом в данном вопросе, безусловно, может ошибаться в последующем изложении.

Известно, что основной глобальный сток атмосферного метана – это фотолиз в атмосфере, который составляет величину порядка 490 Тг/год при размахе оценок от 375 до 835 Тг/год [Бажин, 2000; Смагин, 2005]. Разделив эту величину на площадь поверхности земного шара, можно получить ориентировочную оценку соответствующего потока, которая даст в пересчете на календарную продолжительность года 0,11 мг/м²/час, а на световое время (грубо – половина суток) вдвое большую величину. Как видно, это довольно малые потоки, поэтому выявить их на фоне высоких значений эмиссии в теплое время года проблематично. По данным [Глаголев, 2010] медиана значений разности эмиссионных потоков метана в темной и прозрачной камерах составила 0,11 мгС/м²/час для 38 пар измерений, то есть пренебрежимо малую величину на фоне наблюдаемого характерного значения эмиссии в 6,1 мгС·м⁻²·час⁻¹. Но в сравнении с полученной выше оценкой фотолиза в атмосфере это весьма похожая величина (разницей в единицах измерения можно пренебречь, поскольку молярная масса метана близка к таковой для углерода). Интересно, что в работе А.В. Наумова [2004], который, по-видимому, впервые обратил внимание на различия оценок эмиссии метана в темноте и на свету, исследуемые характерные потоки были низкими, и на их фоне, вероятно, мог проявляться механизм фотолиза, хотя автор выдвинул для объяснения гипотезу поглощения метана фотохемотрофными организмами.

Для метана фотолиз представлен цепью многочисленных реакций с начальной стадией в виде взаимодействия с ОН-радикалами [Бажин, 2000]. Поэтому в общем случае константа фотолиза связана близкой к линейной зависимостью с концентрацией ОН-радикалов и в характерном для тропосферы диапазоне (заметим, ничтожно малых концентраций) $0,5 \cdot 10^6 < \text{ОН}^* < 6 \cdot 10^6$ молекул/см³ меняется от $1 \cdot 10^{-5}$ до $2,5 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹ [Jackson et al., 2009]. Очевидно, что даже верхняя граница этого диапазона, представленная значением $k=0,09$ час⁻¹, все-таки почти втрое ниже полученной нами экспериментальной оценки для тренда стока метана на рис. 2. К тому же в приземный слой почти не должен поступать коротковолновый ультрафиолет (<310 нм), вызывающий распад озона на О₂ и активный атомарный кислород, под действием которого из молекул воды образуются ОН-радикалы. Однако в этом слое, по-видимому, могут происходить более быстрые процессы фотодиссоциации двуокиси азота под действием более длинноволнового излучения (<420 нм), усиленного к тому же отражением от снега, с формированием атомарного кислорода, а далее – ОН-радикалов. Для фотохимических реакций азотного цикла характерное время составляет даже не часы, а минуты, то есть это весьма быстрые процессы, приуроченные, по-видимому, к поверхностному слою вблизи потенциальных источников окиси и двуокиси азота [Маркова и др., 2014]. Производство же немного более высоких, чем $6 \cdot 10^6$ молекул/см³ концентраций ОН-радикалов вполне может увеличить, согласно количественной зависимости [Jackson et al., 2009] константу фотолиза, доведя ее значения до полученной нами экспериментальной оценки в 0,245 час⁻¹.

В целом, нам пока не представляется возможным принять или отвергнуть гипотезу о фотохимическом стоке метана в поверхностном слое атмосферы как механизме дополнительного к диффузии уменьшения концентрации этого газа в камере-изоляторе. Думаю, здесь следует обратиться к авторитетным экспертам – специалистам в области химии метана уровня проф. Н.М. Бажина. Отметим лишь одно обстоятельство, хорошо известное в физике и химии атмосферы, но игнорирующееся пока в почвоведении при исследовании малых потоков газов на границе с атмосферой как камерными, так и градиентными методами. Это наличие так называемого «сухого выпадения» газообразных примесей из атмосферы на поверхность почвы или воды (снега) как сложного процесса иммобилизации газообразных веществ в тонком, не подверженном турбулентной диффузии, активном поверхностном слое под действием гравитации, адсорбции, химических реакций и иных факторов. И в будущем, вероятнее всего, потребуется существенная корректировка в методологии изучения малых потоков газов на границе с атмосферой.

Возвращаясь к оценке потоков по трендам динамики концентрации газов ($C(t)$) в закрытой камере, отметим, что традиционный расчет по линейной модели ($Q=n \cdot H$, где $n=C'(t)$ – угловой коэффициент прямой, аппроксимирующей экспериментальные данные тренда, H – высота камеры)

может в случае нелинейных трендов, например экспоненциальных, существенно занижать реальную величину потока, особенно при длительном времени экспозиции камеры порядка 30-60 мин, что нередко используется при исследованиях эмиссии метана [Глаголев, 2010]. В этих случаях необходимо вначале с помощью статистических методов убедиться в «линейности» тренда, например, сравнивая величины R^2 для линейной и нелинейной регрессий, и лишь потом производить расчет по более адекватной модели. К близкому выводу приходят и некоторые зарубежные коллеги, см, например [Venterea et al., 2009]. При отсутствии иных, кроме диффузии механизмов стока из камеры, правильная оценка эмиссии по уравнению (12) будет совпадать с расчетом по линейной модели лишь на первых небольших отрезках времени, когда линейный тренд близок к касательной к экспоненте в точке $t=0$. Аналитическое условие касательной дает величину:

$$C'(t) = (y_0 + a \cdot \exp(-b \cdot t))'_t = -a \cdot b,$$

которая при умножении на высоту камеры позволяет оценить «истинный» поток по линейному тренду, совпадающий с (12): $Q = -a \cdot b \cdot H = n \cdot H$. Во всех других случаях (увеличение интервалов времени) линейный тренд – это уже не касательная, а секущая экспоненты (см. рис. 2), и чем длиннее промежуток времени экспозиции, тем меньше ее наклон (n), а, следовательно, и результирующий поток Q . Для залповых выбросов и подавно, нельзя вести расчет по линейным трендам за весь период экспозиции камеры, поскольку в этом случае резкий всплеск концентрации в камере потом сменяется «рассасыванием», значит, корректно оценить сам поток мы можем именно по первоначальному всплеску, а не по некоторой «размытой» величине последствия. И, наконец, не исследовав возможности и причины появления дополнительного к диффузии стока газа из камеры, а их для метана, повторяем, предостаточно, мы не сможем никогда быть уверены в правильности полученной оценки потоков на границе почвы с атмосферой.

Изложенный в статье материал дает автору основание сомневаться, что широко используемая традиционная методология исследования газовой функции почв является адекватной для этой сложной задачи. В результате беру на себя смелость сформулировать нижеследующее закключение по обозначенному в пункте II перечню дискуссионных вопросов.

1. Эмиссия с поверхности углеродсодержащих газов отражает их gross-продуцирование в объеме чаще всего не адекватно; положительный дисбаланс углеродного цикла (сток из атмосферы) в 1 Гт/год на территории России является артефактом.

2. В болотных экосистемах наряду с фоновой эмиссией действуют мощные локальные периодические выбросы С-газов конвективной природы, выносящие значительные количества газов в атмосферу из протяженных ненасыщенных областей в глубине торфяной залежи; их не в состоянии оценить традиционный камерный метод изучения эмиссии.

3. В болотах действует мощный внутренний сток метана в виде метанотрофного фильтра, соизмеримый с gross-продуцированием этого газа и превышающий эмиссию на поверхности, которая является лишь разностью между метаногенезом и потреблением метанотрофами. Этот «невидимый» сток столь же важен для атмосферы, как и фотоллиз метана и прогноз реакции болотных экосистем на климатические изменения должен его учитывать так же тщательно, как и метаногенез.

4. Имеющаяся оценка вклада бореальных (западносибирских) болот в глобальную эмиссию метана из болотных экосистем в виде первых процентов представляется заниженной, поскольку не учитывает мощные выбросы газа при разгрузке его запасов в атмосферу. Доля российских болот от мировых по площади и по запасам торфа (субстрата) составляет порядка 50%, а доля западносибирских – почти половину от данной величины (20-25%). Сокращая эту цифру вдвое с учетом возможного круглогодичного сезона генерации метана в тропических болотах и, возможно, более интенсивного метаногенеза (что не очевидно), получаем вклад как минимум больше 10%.

5. Наиболее распространенный метод статических (закрытых) камер для исследования газообмена почвы и атмосферы имеет ряд проблем, как в плане практической реализации, так и в теоретическом обосновании тех или иных способов расчета потоков по измеряемым данным, и может существенно занижать интенсивность определяемой величины. Особенно проблематичным представляется использование этого метода в болотных экосистемах в связи с невозможностью оценки упомянутых в п. 2 мощных локальных (преимущественных) потоков С-газов.

Данное заключение является лишь выражением субъективного мнения автора по дискуссионным вопросам количественного исследования газообмена почвы и атмосферы, с попыткой его аргументации в меру моих знаний и опыта. Надеюсь, что оно позволит продолжить дискуссию

со включением в нее мнений оппонентов и всех заинтересованных сторон. Наиболее ценным результатом подобной дискуссии считаю выработку коллегиального мнения (консенсуса) и создание на его основе единой Программы по исследованиям газообмена почвы и атмосферы (газовой функции почв), без которой разрозненные, нередко противоречивые и не выдержанные в методическом отношении исследования отдельных специалистов и организаций никогда не смогут дать адекватной оценки роли почв в регуляции состава и состояния атмосферы и в глобальных изменениях климата.

ЛИТЕРАТУРА

- Бажин Н.М. 2000. Метан в атмосфере // СОЖ. Т.6. №3. С. 52-57.
- Глаголев М.В. 2010. Эмиссия CH_4 болотными почвами Западной Сибири: от почвенного профиля до региона: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ).
- Глаголев М.В. 2011. От керогена до «Кристалла» (рецензия на учебно-методическое пособие Лактионовой с соавт. «Физикохимия и биология торфа: определение парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) в торфах методом газовой хроматографии») // ДОСйГИК. Т. 2. № 1(3). С. 1-16.
- Глаголев М.В. 2013. Ответ на «Открытое обращение» А.В. Наумова: I. О рецензии на автореферат О.А. Михайлова // ДОСйГИК. Т. 4. № 2(8). С. 1-10.
- Глаголев М.В. 2014. Ответ на «Открытое обращение» А.В. Наумова: II. Об аннотированном списке // ДОСйГИК. Т. 5. № 1(9). С. 1-13.
- Глобус А.М. 1987. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеиздат. 428 с.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Мелентьева Н.В. 1997. Запасы и содержание соединений углерода в болотных экосистемах России // Почвоведение. №12. С. 1470-1477.
- Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Честных О.В. 2004. Измерения потоков углекислого газа в мерзлотных ландшафтах: проблемы и перспективы // Почвы – национальное достояние России: Матер. IV съезда Докуч. об-ва почвоведов. Новосибирск: Наука-Центр. Кн. 1. С. 342-344.
- Земцов А.А. (ред.). 2000. Болота Западной Сибири – их роль в биосфере. Томск: ТГУ, СибНИИТ. 72 с.
- Исаев А.С., Коровин Г.Н. 1999. Углерод в лесах Северной Евразии // Круговорот углерода на территории России / Под ред. Н.П. Лаверова и Г.А. Заварзина. М.: НТП «Глобальные изменения природной среды и климата». Избр. науч. тр. С. 63-95.
- Кобак К.И. 1988. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеиздат. 248 с.
- Кобак К.И., Яценко-Хмелевский А.А., Кондрашева Н.Ю. 1980. Баланс углекислого газа в высоко- и малопродуктивных сообществах // Проблема атмосферного углекислого газа. Л.: Гидрометеиздат. С. 252-264.
- Курганова И.Н. 2010. Эмиссия и баланс диоксида углерода в экосистемах России. Автореферат докт. дисс. М.: МГУ. 36 с.
- Лактионова Е.А., Савельев В.В., Сергеева М.А. 2011. Физикохимия и биология торфа: Определение парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) в торфах методом газовой хроматографии. Практикум по газохроматографическому анализу. Томск: ЦНТИ. 60 с.
- Маркова Т.А., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Грисенко А.М., Севастьянов В.В. 2014. Распределение окислов азота в приземном слое атмосферы над континентальными районами России // Pandia, 2009-2014. Эл. публ. <http://www.pandia.ru/text/77/465/16927.php>
- Мастепанов М.А. 2004. Кинетика газообмена в профиле сфагнового болота: от метаногенеза к эмиссии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ. 25 с.
- Машика А.В. 2004. Сравнение двух методов измерения потока CO_2 с поверхности почв // Мат. докл. XV Коми респ. молод. науч. конф. Т. 2. Сыктывкар. С. 176-178.
- Машика А.В. 2006. Эмиссия диоксида углерода с поверхности подзолистой почвы // Почвоведение. №12. С. 1457-1464.
- Наумов А.В. 2004. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Автореферат докт. дисс. Томск: ТГУ. 37 с.
- Наумов А.В. 2013. Открытое обращение в редакционную коллегию журнала «Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата» // ДОСйГИК. Т. 4. № 2(8). С. 1-3.
- Орлов Д.С., Бирюкова О.Н. 1995. Запасы углерода органических соединений в почвах Российской Федерации // Почвоведение. №1. С. 21-32.
- Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. 2007. М.: Наука. 315 с.
- Сабреков А.Ф. 2014. Комментарии к дискуссии между А.В. Наумовым и М.В. Глаголевым, развернутой в журнале «Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата» // ДОСйГИК. Т. 5. № 1(9). С. 1-15.
- Смагин А.В. 1998. Анализ поведения углекислого газа в почве // Вестн. Моск. ун-та, сер. 17 Почвоведение. №4. С. 28-35.
- Смагин А.В. 2000. Газовая функция почв // Почвоведение. №10. С. 1211-1223.
- Смагин А.В. 2005. Газовая фаза почв. М.: Изд-во Моск. Ун-та. 301 с.
- Смагин А.В. 2007а. Почвенно-гидрофизическое обеспечение исследований газовой функции западносибирских болот в связи с проблемой парникового эффекта // Экологический Вестник Сев. Кавказа. Т. 3. №3. С. 46-57.
- Смагин А.В. 2007б. Абиотическое поглощение газов органогенными почвами // Почвоведение. № 12. С. 1482-1488.

- Орлов Д.С., Минько О.И., Аммосова Я.М., Каспаров С.В., Глаголев М.В. 1987. Методы исследования газовой функции почвы // Воронин А.Д., Орлов Д.С. (ред.). Современные физические и химические методы исследования почв. М.: Изд-во МГУ. С. 118-156.
- Степаненко В.М., Мачульская Е.Е., Глаголев М.В., Лыкосов В.Н. 2011. Моделирование эмиссии метана из озер зоны вечной мерзлоты // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. Т. 47. №2. С. 275-288.
- Фролов Ю.Г. 1989. Курс коллоидной химии. М.: Химия. 464 с.
- Функционирование микробных комплексов верховых торфяников – анализ причин медленной деструкции торфа. 2013. М.: Товарищество научных изданий КМК. 129 с.
- Шеин Е.В. 2005. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. Ун-та. 432 с.
- Jackson L.S., Carslaw N., Carslaw D.C., Emmerson K.M. 2009. Modelling trends in OH radical concentrations using generalized additive models // *Atm. Chem. Phys.* №9. P. 2021–2033.
- Knapp A.K., Yavitt J.B. 1992. Evaluation of a closed-chamber method for estimating methane emission from aquatic plants // *Tellus*. 44B. P. 63-71.
- Mastepanov M., Sigsgaard Ch., Dlugokencky E.J., Houweling S., Ström L., Tamstorf M.P., Christensen T.R. 2008. Large tundra methane burst during onset of freezing // *Nature*. V. 456/4. P. 628-631.
- McCoy B.J., Rolston D.E. 1992. Convective transport of gases in moist porous media // *Env. Sci. Tech.* V.26. P. 2468-2476.
- Norman J.M., Kucharik C.J., Gower S.T., Blagocchi D.D., Crill P.M. et al. 1997. A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes // *J. Geophys. Res.* V. 102. № D24. P. 771-777.
- Soils: Basic Concepts and Future Challenges. 2006. Cambridge etc.: Cambridge University Press. 310 p.
- Venterea R.T., Spokas K.A., Baker J.M. 2009. Accuracy and Precision Analysis of Chamber-Based Nitrous Oxide Gas Flux Estimates // *SSSAJ*. V. 73. № 4. P. 1087-1093.
- Walter B.P., Heimann M., Shannon R.D., White J.R. 1996. A process-based model to derive methane emissions from natural wetlands // *Geophysical Research Letters*. V. 23. No. 25. P. 3731-3734.
- Witkamp M. 1969. Cycles of temperature and carbon dioxide evolution from litter and soil // *Ecology*. V. 50. № 6. P. 922-924.
- Yagi K. 1997. Methane emission from paddy fields // *Bull. Natl. Inst. Agroenviron. Sci.* V.14. P. 96-210.

Поступила в редакцию: 15.07.2014