

УДК 631.4

ПОТОКИ МЕТАНА В ХОЛОДНОЕ ВРЕМЯ ГОДА: РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И МАССОПЕРЕНОС В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ БОЛОТ

© 2015 г. А. В. Смагин^{1, 2, 3}, Н. А. Шнырев¹¹Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы
e-mail: smagin@list.ru²Институт экологического почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы³Институт лесоведения РАН, 143030, пос. Успенское Московской обл., Советская улица, 21

Поступила в редакцию 04.07.2014 г.

Приведены материалы полевых исследований потоков метана и его профильного распределения в снежном покрове в различных ландшафтных элементах западносибирского олиготрофного болота (полигон “Мухрино”, Ханты-Мансийский автономный округ) в холодное время года. Предложены простые модели для описания распределения метана в инертной снежной толще, сочетающие транспорт газа и источник постоянной мощности на поверхности почвы. Оценены темпы формирования стационарных профилей метана в снежном покрове (характерное время 1 сут). Выведены теоретические уравнения, позволяющие по параметрам стационарного профильного распределения, данным о пористости снега и эффективном коэффициенте диффузии метана в снежной толще рассчитать малые эмиссионные потоки из болот в атмосферу. Расчетные величины эмиссии метана, как правило, существенно (от 2–3 до нескольких десятков раз) превышали измеренные в полевых условиях методом закрытых камер (0.008–0.25 мг С/(м² ч)), что указывает на возможность недооценки холодного периода в годовом эмиссионном цикле болотного метана.

Ключевые слова: математическое моделирование, эмиссия, диффузия, конвективный транспорт, зимние наблюдения.

DOI: 10.7868/S0032180X15080080

ВВЕДЕНИЕ

Газообмен с почвами признается в настоящее время одним из наиболее мощных природных факторов регуляции состава и состояния атмосферы, а его нарушение при антропогенной деятельности может быть одной из причин глобальных климатических изменений. Вместе с тем механизмы, отвечающие за проявление газовой функции почв по отношению к атмосфере, исследованы недостаточно, что в свою очередь осложняет адекватную количественную оценку и моделирование этого явления [4]. Отдельный интерес и малую изученность представляет эмиссия метана, как второго по значимости парникового газа, в зимнее время, чья оценка затруднена по причинам методического характера. Как показано ранее [6], существует принципиальная возможность количественной оценки потоков метана в холодное время по данным о профильном распределении CH₄ в снежной толще на базе интегральных аналитических решений соответствующих моделей диффузионного газообмена в стационарном состоянии. То же следует из анализа известных зарубежных публикаций [8, 10–12], в которых в отли-

чие от наших исследований использовалась обычная дифференциальная форма закона Фика с расчетом потоков по градиенту концентраций и эффективному коэффициенту диффузии газов, и лишь в случае [11] – численные методы интегрирования для нестационарных и стационарных задач диффузионного массопереноса. Вместе с тем эксперименты указывают на наличие нелинейных профильных распределений метана в снежной толще, стационарная форма которых не может быть объяснена моделью диффузии с постоянным коэффициентом. В настоящей работе преследуется цель обобщенного количественного описания линейных и нелинейных распределений метана в снежном покрове болот на базе простых физически обоснованных моделей, сочетающих различные механизмы массопереноса и источник постоянной мощности на поверхности почвы, в связи с задачей оценки эмиссионных потоков этого газа в холодное время года.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Предметом количественного исследования и моделирования послужило явление профильного

распределения метана в толще снега на поверхности типичных элементов болотного ландшафта (рямов, гряд, мочажин, топей) в связи с оценкой эмиссии этого газа в холодное время года. Экспериментальные исследования проводили в 2010 и 2011 гг. в период с октября по май в зоне средней тайги Западной Сибири на стационаре Югорского государственного университета “Мухрино” (Ханты-Мансийский автономный округ, 60°53′20″ с. ш., 68°42′10″ в. д.). Они включали измерения потоков метана с поверхности снега в атмосферу методом камер [4], мощности снежной толщи и плотности ее сложения [1], а также вертикального распределения концентраций метана в снежном покрове. Образцы газовой фазы метана аккуратно отбирали из снега с заданной глубины шприцами 20 мл (IMP, США; SFM, Германия) с удлиненной игло-насадкой в 3–10-кратной повторности, герметизировали и транспортировали в лабораторию стационара. Концентрацию метана в пробах определяли на газовом хроматографе Кристалл-5000.1 (Хроматэк, Россия) с пламенно-ионизационными детекторами. Из каждого шприца (индивидуальная проба) в прибор последовательно вводили по три дозы отобранного воздуха; стандартное отклонение для повторных измерений не превышало 0.03 ppm. Синхронно программируемыми датчиками DS1922 (Dallas Semiconductor, США) фиксировали температуру на разных глубинах в толще снега. При помощи метеостанции стационара измеряли температуру и влажность воздуха (на высоте 1.5 м) датчиком HygroClip S3 (ROTRONIC, Швейцария), барометрическое давление датчиком Baro-Diver DI500 (Schlumberger Water Services, Нидерланды). Расчет концентрации метана в газовой фазе (C , г/м³) осуществлялся по следующему уравнению [4]:

$$C = \frac{0.012 X \text{ ppm} D}{RT}, \quad (1)$$

где X ppm – измеряемая величина объемного содержания метана, ppm, D – барометрическое давление, кПа, T – абсолютная температура, К, R – универсальная газовая постоянная, равная 8.31 Дж/(моль К).

Статистическую обработку измерений, а также аппроксимацию данных профильного распределения, математические расчеты потоков метана, построение графических иллюстраций проводили с использованием программ S-Plot 9 и Microsoft Excel 2003 с помощью стандартных пакетов функций и авторских макросов. В качестве отдельного метода исследования использовали имитационное математическое моделирование процесса эмиссии и транспорта газообразного метана через снежную толщу. Модели представлены дифференциальными уравнениями в частных производных с соответствующими граничными и начальными условиями. Полученные в

работе аналитические решения стационарных вариантов моделей позволили осуществить расчеты интенсивности источника (эмиссионного потока) метана из торфяной болотной почвы, находящейся в зимний период под толщей снега. Для численного решения полного варианта модели использовали среду компьютерного моделирования MATLAB-7 [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эмиссионные (положительные) потоки метана, измеренные традиционным методом камер, сильно варьировали как по срокам наблюдений, так и по элементам болотного ландшафта (рис. 1). Предварительно из выборки были исключены отрицательные значения потоков (поглощение метана из камеры), доля которых составила 22% измерений. Их генезис окончательно не ясен, но, предположительно, может быть связан с физико-химическими механизмами поглощения метана снежной толщей в неравновесных условиях, а в весеннее и осеннее время с активностью метанотрофных микроорганизмов в тающем снеге и на твердофазных включениях в нем. В целом исследуемые положительные величины характеризовались небольшими значениями, редко превышающими 0.2 мг С/(м² ч). Минимальные значения были свойственны наиболее холодным месяцам (февралю, марту) и составляли для рямов 0.008 ± 0.004 – 0.017 ± 0.004 , гряд 0.017 ± 0.012 – 0.043 ± 0.019 , мочажин 0.007 ± 0.003 – 0.024 ± 0.013 и топи 0.015 ± 0.006 мг С/(м² ч). В более теплые месяцы (май, октябрь) со спорадическими положительными температурами воздуха, эмиссия метана была выше и характеризовалась следующими средними значениями: для рямов 0.026 ± 0.015 – 0.033 ± 0.020 , гряд 0.020 ± 0.005 – 0.043 ± 0.014 , мочажин 0.249 ± 0.026 – 0.213 ± 0.042 и топи 0.060 ± 0.014 – 0.140 ± 0.046 мг С/(м² ч). Переувлажненные элементы (топь, мочажины) имели в теплые месяцы на порядок большие значения потоков метана по сравнению с грядами и рьями, достигавшими 0.15–0.25 мг С/(м² ч).

На фоне характерных значений эмиссии метана из западносибирских болот в летний период порядка 5–10 мг С/(м² ч) [7] полученные выше оценки для зимнего периода оказываются пренебрежимо малыми, и их вклад в общую годовую эмиссию, даже с учетом доминирования холодного периода не превышает 1–3%. Однако есть некоторые основания считать эти величины заниженными. Для решения вопроса обратимся к альтернативной методике оценки с использованием данных снежной съемки, которая запечатлевает следы выхода метана из торфяника в виде соответствующих распределений его концентраций в снежном покрове.

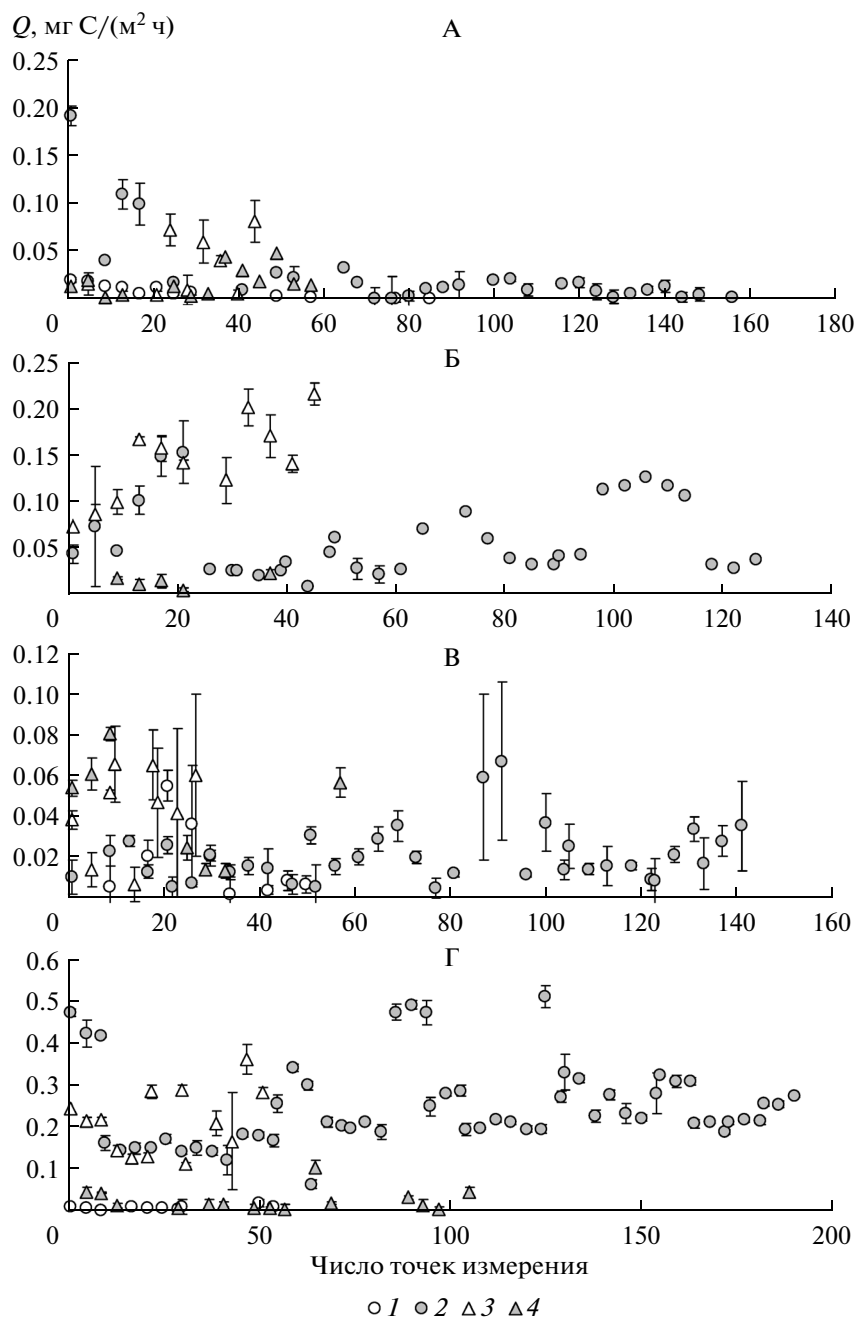


Рис. 1. Эмиссионные потоки метана в различных элементах болотного ландшафта в холодное время года (оценка методом камер): А — ряды; Б — топь; В — гряды; Г — мочажины; 1 — март, 2 — май, 3 — октябрь, 4 — февраль; вертикальные планки — стандартные отклонения.

На рис. 2 приведены типичные концентрационные распределения метана в снежном покрове. По форме профиля их можно сгруппировать в три основных типа: прямолинейные (А), нелинейные вогнутые (Б) и нелинейные выпуклые (В). Чаще всего тип А свойственен рябовым парцеллам, типы Б и В — мочажинным и грядовым. Поскольку форма распределений отражает процессы их образования и динамики, в ряде случаев существует

принципиальная возможность количественной оценки интенсивностей данных процессов методом обратной задачи по моделям стационарных распределений веществ [3, 4]. Для этого, очевидно, необходимо получить подобные физически обоснованные модели, дающие в виде стационарных решений профили линейного, вогнутого и выпуклого типов для распределения метана в инертной пористой толще.

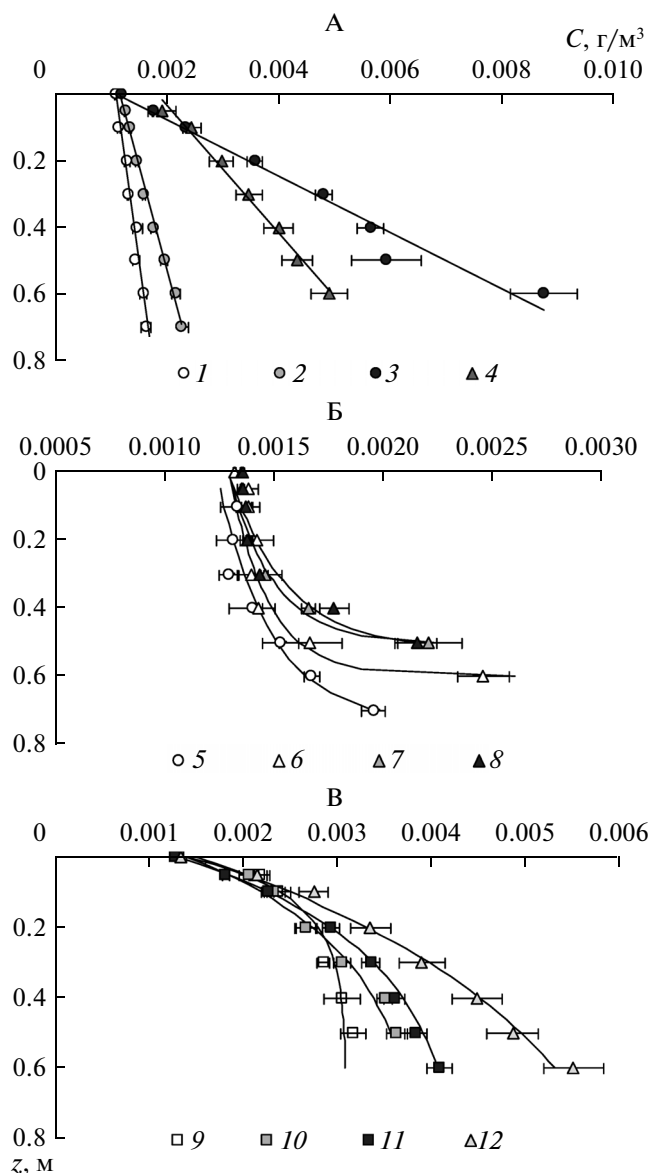


Рис. 2. Профильные распределения концентрации метана в толще снега (10.03–21.03.2011): А – прямолинейные; Б – вогнутые; В – выпуклые; 1, 2, 3, 5 – ряды; 4, 6, 7, 8, 12 – мочажины; 9, 10, 11 – гряды.

Сформулируем теоретические представления о динамике газообразного метана в толще снега на поверхности торфяно-болотной почвы. Рассмотрим элементарный слой снега мощностью (Δz) на единичной площади S . Баланс массы газа (Δm) за промежуток времени (Δt) в этом слое будет определяться притоком (q_1) с нижней границы (из почвы) и оттоком в верхний слой (q_2) согласно следующему уравнению: $\Delta m = (q_2 - q_1)S\Delta t$. Учитывая, что объем элементарного слоя $V = S\Delta z$, а общая концентрация газа в слое $C_i = m/V$ при направлении оси координат (z) вверх от поверхности почвы к ат-

мосфере, представим закон материального баланса при $\Delta z, \Delta t \rightarrow 0$ в виде уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z}. \quad (2)$$

Поскольку в экспериментах измеряется содержание газа не в объеме снега, а в его газовой фазе (поровом пространстве), перейдем в модели (2) от общей концентрации (C_i) к концентрации в газовой фазе (C) с учетом доли пор от общего объема снега (пористости P): $C_i = CP$. Примем, что ведущим механизмом массопереноса газа в снежной толще является молекулярная диффузия, с соответствующим потоком (закон Фика): $q = -D_{\text{эф}} dC/dz$, где $D_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент диффузии газа как функция от пористости, извилистости порового пространства, барометрического давления (D) и абсолютной температуры (T). Так как снег является макропористой средой, в первом приближении коэффициент диффузии можно определить по линейному уравнению Пенмена с поправками на температуру и давление [4]:

$$D_{\text{эф}} = 0.66PD_{st} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.75} \left(\frac{101.3}{D} \right). \quad (3)$$

Подставляя это уравнение в формулу (2) и сокращая величину P , получаем простую модель для распределения метана в однородном, инертном снежном покрове, то есть лишенном способности удерживать (адсорбировать) газ и трансформировать его в какие-либо иные химические соединения:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}, \quad (4)$$

где z – вертикальная координата, м; t – время, ч, C – концентрация метана в газовой фазе толщ снега, г/м³; $D = D_{\text{эф}}/P$ – приведенный к постоянной величине P эффективный коэффициент диффузии.

Модель (4) снабжается следующими очевидными граничными условиями. На поверхности почвы ($z = 0$) граничным является условие Коши – эмиссионный поток метана с интенсивностью Q (мг/(м² ч)). С учетом диффузионного механизма транспорта метана в снежной толще условие формализуется как:

$$-D_{\text{эф}} \left. \frac{dC}{dz} \right|_{z=0} = Q. \quad (5)$$

На верхней границе, абсолютной отметкой которой является мощность снежной толщи (H), целесообразно выбрать условие постоянства концентрации метана в атмосферном воздухе:

$$C|_{z=H} = C_0. \quad (6)$$

Модель (4) с граничными условиями (5) и (6) позволяет описать динамику профиля концентраций газа в снежной толще. По прошествии определенного времени, задаваемого интенсивностями эмиссии и диффузии газа, профиль концентраций становится инвариантным (стационарным). Форму стационарного профиля легко получить, приравняв к нулю левую часть модели (4):

$$\frac{d^2C}{dz^2} = 0. \quad (7)$$

Интегрируя (7) по глубине (z), имеем:

$$\int \frac{d^2C}{dz^2} dz = \frac{dC}{dz} = A, \quad (8)$$

где A — константа интегрирования. Сравнивая уравнения (8) и (5) из первого граничного условия, получаем:

$$\frac{dC}{dz} = A = -\frac{Q}{D_{эф}}. \quad (9)$$

После интегрирования по (z) уравнения (9) имеем в общем виде функцию концентрации газа в зависимости от вертикальной координаты:

$$\int \frac{dC}{dz} dz = C_{(z)} = \int -\frac{Q}{D_{эф}} dz = -\frac{Q}{D_{эф}} z + B, \quad (10)$$

где B — константа интегрирования. Используя второе граничное условие (6), определяем константу (B) и находим окончательно функцию стационарного профиля метана в снежной толще:

$$C_{(z)} = \frac{Q}{D_{эф}} H + C_0 - \frac{Q}{D_{эф}} z. \quad (11)$$

Функция (11) представляет уравнение прямой вида:

$$C_{(z)} = -az + b, \text{ где } a = \frac{Q}{D_{эф}}, \quad b = \frac{Q}{D_{эф}} H + C_0. \quad (12)$$

Поэтому, аппроксимируя профиль концентраций метана в толще снега линейной зависимостью (12), легко рассчитать искомый эмиссионный поток (Q) по данным об угловом коэффициенте прямой (a), эффективном коэффициенте диффузии газа ($D_{эф}$) и пористости (P). Вторым способ расчета — по данным об остаточном члене (b), эффективном коэффициенте диффузии, пористости, параметре мощности снежной толщи (H) и концентрации метана в атмосфере (C_0). Соответствующие уравнения расчета приведены ниже:

$$\begin{aligned} Q &= -a D_{эф}, \\ Q &= (b - C_0) \frac{D_{эф} b}{H}. \end{aligned} \quad (13)$$

В макропористой среде эффективный коэффициент диффузии линейно связан с пористостью (уравнение (3)). При подстановке этого уравнения в формулу (13) получаем соответствующие формулы вычисления Q :

$$Q = 0.66a P D_{ст} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.75} \left(\frac{101.3}{D} \right), \quad (14)$$

или

$$Q = 0.66 P \frac{D_{ст}}{H} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.75} \left(\frac{101.3}{D} \right) (b - C_0). \quad (15)$$

Можно допустить, что снег не является полностью инертным по отношению к метану и способен адсорбировать его по мере движения от поверхности торфа в атмосферу. Микробное окисление (метанотрофный фильтр) в объеме снега, зимой, по-видимому, исключается из-за низких температур. Как показано в нашей предшествующей работе [6], введение в модель предствления о равновесной адсорбции по типу межфазного распределения с константой Генри принципиально не меняет вида линейного распределения и может быть учтено новым эффективным коэффициентом диффузии ($D'_{эф}$), включающим константу Генри (K_T):

$$D'_{эф} = D_{эф} / (1 + (1/P - 1) K_T). \quad (16)$$

По физическому смыслу $0 < P < 1$, откуда для любых $K_T > 0$ множитель $(1 + (1/P - 1) K_T)$ не может быть меньше единицы. Следовательно, при одних и тех же параметрах линейного профильного распределения метана (a) и (b) в снежной толще новый расчет даст значения потоков Q такой же, как и по уравнениям (14), (15) или меньше. То есть предположение о наличии равновесной адсорбции газа в снежной толще адекватно с формальных позиций снижению скорости диффузии $D'_{эф} < D_{эф}$, а значит уменьшению расчетной мощности источника (Q).

До сих пор рассматривали простейший случай с линейным профилем концентраций метана (рис. 2А). Возможны ли подобные модели для нелинейных профильных распределений (рис. 2Б, 2В)? Можно предположить, что полученные экспериментально нелинейные профили — стадии выхода на стационарное состояние. Но, как будет показано позже, характерное время формирования стационарных газовых профилей для исследуемых условий в толще снега порядка 60–80 см не превышает первых суток. Значит, более вероятно гипотеза, что и нелинейные профили стационарны. Постараемся выявить физические причины их возникновения. Начнем со случая нелинейного вогнутого профиля (тип Б).

В исходной модели (4) предполагалось, что снежная толща однородна и характеризуется оди-

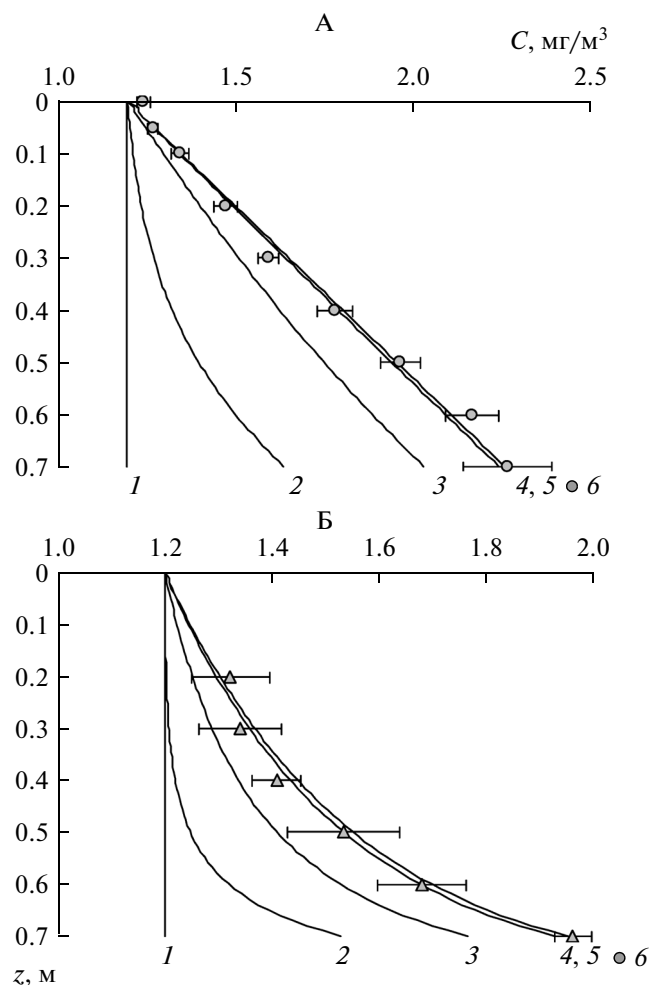


Рис. 3. Моделирование динамики распределения концентрации метана в снежном покрове: А – линейное стационарное распределение (модель (4)), Б – нелинейное вогнутое стационарное распределение (модель (17)); 1 – начальная концентрация (атмосферная); 2, 3, 4, 5 – профили концентраций через 2, 8, 24, 48 ч; 6 – реальные данные (стационарные распределения).

наковым по всей глубине эффективным коэффициентом диффузии. Однако анализ плотности снега (ρ) выявил ее фактически линейное увеличение с глубиной ($\rho(z) = 0.282z + 0.084$; $R^2 = 0.93$) и соответствующее снижение пористости. Экспериментальное подтверждение связи выпуклой формы концентрационного профиля с линейным нарастанием плотности снега с глубиной можно найти также в [8]. Согласно используемой в нашей работе функции Пенмена для диффузии в макропористых средах (уравнение (3)), коэффициент диффузии при линейном снижении пористости также будет линейно уменьшаться с глубиной. Формализуем это положение следующим образом. Если известны коэффициенты диффузии на поверхности (D_0) и (D_H) на нижней отметке

пористой толщи мощностью (H), то зависимость диффузивности от глубины будет иметь вид: $D(z) = D_0 - (D_0 - D_H)z/H$. Подставляя ее вместе с феноменологическим выражением для диффузионного потока в уравнение неразрывности (2), после дифференцирования по z получаем:

$$P \frac{\partial C}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{(D_0 - D_H)}{H} z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{(D_0 - D_H)}{H} \frac{\partial C}{\partial z}. \quad (17)$$

Стационарный вариант (16) будет иметь вид:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} (1 - mz) - m \frac{\partial C}{\partial z} = 0, \quad (18)$$

где $m = (D_0 - D_H)/(HD_0)$.

Решением уравнения (18) служит простая логарифмическая функция $C(z) = C_1 \ln(1 - mz)/m + C_2$, где C_1 и C_2 – константы интегрирования, определяемые из граничных условий. При условии постоянства концентрации в атмосфере (C_0) и эмиссионного потока из почвы (Q) получаем следующее выражение для стационарного профильного распределения концентрации метана в толще снега:

$$C(z) = C_0 - \frac{Q}{D_0 m} \ln(1 - mz). \quad (19)$$

Это уравнение удачно описывает вогнутую форму распределения (тип Б). Физический смысл получаемой картины состоит в том, что в более плотных нижних слоях диффузионная проницаемость невысока, и поэтому концентрация газа увеличена. По мере приближения к поверхности снежного покрова диффузия облегчается, и метан имеет возможность свободно выходить в атмосферу, что в свою очередь уменьшает концентрацию и соответствующий градиент.

Аппроксимируя в программе S-Plot 9 экспериментальные данные по концентрациям метана в снежной толще уравнением нелинейной регрессии $C(z) = C_0 - a \ln(1 - mz)/m$, где $a = Q/D_0$, получаем простое выражение для расчета эмиссионного потока по коэффициенту диффузии, аналогичное уравнению (14).

Если вогнутую форму стационарного профиля в инертной толще снега объяснить физически относительно несложно, то для типа В (выпуклые распределения) одной диффузионной модели без функции “источник/сток” недостаточно. Вместе с тем, включение конвективного механизма массопереноса со скоростью (v , м/ч) позволяет получить подобные профильные распределения. С физической точки зрения это, по-видимому, могут быть механизмы как вынужденной конвекции, например, под действием ветра на поверхности снега, так и естественной конвекции локальных скоплений метана, как более легкого по сравнению с атмосферным воздухом газа. Очевидно,

что просто конвекция без диффузии даст в стационарном состоянии распределение концентрации в виде вертикальной прямой ($C_{(z)} = Q/v$). И такие профильные распределения спорадически встречались в грядово-мочажинном комплексе и болотной топи. Однако по ним, не зная скорости конвекции, невозможно определить поток из почвы Q , а теоретическая оценка подобного механизма в отличие от диффузии фактически невозможна. Вместе с тем, комбинация диффузии и конвекции позволяет дать такую оценку по стационарным профильным распределениям, которые как раз будут иметь выпуклую форму (тип В), занимая промежуточное положение между двумя крайними линиями — наклонной прямой (диффузия) и вертикальной прямой (конвекция).

Подставляя комбинацию диффузионного и конвективного потоков с постоянными приведенными к пористости аэрации коэффициентами $D = D_{эф}/P$ и $q = v/P$ в уравнение неразрывности (2), получаем следующую модель:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + q \frac{\partial C}{\partial z}. \quad (20)$$

Стационарный вариант (20) имеет вид:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{q}{D} \frac{\partial C}{\partial z} = 0, \quad (21)$$

откуда после первого интегрирования по z имеем при граничном условии равенства суммы диффузионного и конвективного потоков эмиссии из почвы ($DdC/dz + qC = Q/P$ при $z = 0, z = H$):

$$\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{Q}{PD} - \frac{q}{D} C. \quad (22)$$

Тогда, используя замену переменных $u = Q/(PD) - qC/D$, сводим уравнение (22) к выражению $d \ln u / dz = -q/D$, интегрирование которого позволяет найти функцию $u = B \exp(-qz/D)$, где B — константа интегрирования. Возвращаясь к переменной C , и используя граничное условие постоянства концентрации в атмосфере (C_0), откуда $B = Q/(PD) - qC_0/D$, получаем окончательное уравнение для стационарного профиля концентраций в модели (21), сочетающей диффузию и конвекцию:

$$C_{(z)} = \frac{Q}{Pq} + \left(C_0 - \frac{Q}{Pq} \right) \exp\left(-\frac{q}{D} z \right). \quad (23)$$

Эта функция описывает выпуклый профиль (тип В), который в случае высоких значений скорости конвективного массопереноса приближается к вертикальной прямой линии $C_{(z)} = Q/(Pq)$, а при доминировании диффузии — к наклонной прямой (уравнение (11)). Аппроксимируя с помощью программы S-Plot 9 реальные профильные распределения уравнением нелинейной регрес-

сии $C_{(z)} = y_0 + a \exp(-bz)$, где $y_0 = Q/(Pq)$, $a = C_0 - Q/(Pq)$, $b = q/D$ легко найти выражения для расчета скорости приведенного конвективного потока (q) и эмиссии метана (Q) по известной пористости (P) и величине приведенного эффективного коэффициента диффузии ($D = D_{эф}/P$):

$$q = bD = 0.66bD_{st} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.75} \left(\frac{101.3}{D} \right), \quad (24)$$

$$Q = y_0 q P = 0.66 y_0 b P D_{st} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.75} \left(\frac{101.3}{D} \right), \quad (25)$$

или

$$Q = (C_0 - a) q P = 0.66 (C_0 - a) b P D_{st} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.75} \left(\frac{101.3}{D} \right). \quad (26)$$

Проиллюстрируем изложенные выше теоретические соображения практическими результатами. Все линии на рис. 2 являются результатом аппроксимации экспериментальных данных по распределению метана в толще снега уравнениями стационарных профилей (12), (19) и (23). Величины достоверности и параметры аппроксимации помещены в таблице. Как видно, во всех случаях получены высокие коэффициенты достоверности аппроксимации $R^2 = 0.97-0.99$ при минимальных стандартных ошибках $10^{-4}-10^{-5}$ и статистической значимости параметров при уровне значимости $0.05-0.001$, что свидетельствует об адекватности моделей. Используя параметры аппроксимации и соответствующие уравнения для расчета Q (14), (15), (25), (26), легко получить оценку эмиссионных потоков. Значение стандартного коэффициента диффузии D_{st} было принято равным $0.072 \text{ м}^2/\text{ч}$ [4], а максимальная пористость снега, рассчитанная по экспериментальным данным о плотности в верхней толще, $P = 0.9$. Сравнивая данные таблицы и измеренные камерным методом эмиссионные потоки (рис. 1) для исследуемого периода (первая и вторая декады март), нетрудно убедиться в сильном различии результатов, при этом градиентным методом стабильно получались более высокие значения. Для линейных трендов (модель диффузии с постоянным коэффициентом) различия варьируют от 3 до 47 раз, для нелинейных вогнутых (модель диффузии с уменьшающимся с глубиной коэффициентом) — от 2 до 3 раз, а для нелинейных выпуклых распределений (модель диффузии и конвекции с постоянными коэффициентами) — от 33 до 77 раз! То есть в последнем случае может быть разница почти на два порядка, и это прямое следствие проявления более интенсивных конвективных процессов транспорта метана в атмосферу. Оценка скорости конвективного массопереноса $v = qP$ по уравнению (24) дала величины от 0.08 (мочажины) до $0.14-0.33$ (гряды) м/ч. От-

Параметры аппроксимации профильных распределений метана в толще снега (рис. 2)

Модель (12) $C_{(z)} = -az + b$						
№ п/п	Парцелла	a , г/м ⁴	b , г/м ³	C_0 , г/м ³	R^2	Q , мг С/(м ² ч)
1	Рям	0.0008	0.0017	0.0012	0.97	0.03
2	Рям	0.0016	0.0023	0.0012	0.99	0.05
3	Рям	0.0114	0.0081	0.0012	0.97	0.38
4	Мочажина	0.0057	0.0051	0.0012	0.97	0.19
Модель (19) $C_{(z)} = C_0 - a \ln(1 - m z)/m$						
№ п/п	Парцелла	a , г/м ⁴	m , м ⁻¹	C_0 , г/м ³	R^2	Q , мг С/(м ² ч)
5	Рям	0.0003	1.353	0.0012	0.97	0.01
6	Мочажина	0.0003	1.666	0.0013	0.99	0.01
7	Мочажина	0.0004	1.981	0.0013	0.99	0.02
8	Мочажина	0.0005	1.923	0.0013	0.96	0.02
Модель (23) $C_{(z)} = y_0 + a \exp(-bz)$						
№ п/п	Парцелла	a , г/м ⁴	b , м ⁻¹	y_0 , г/м ³	R^2	Q , мг С/(м ² ч)
9	Гряда	0.0031	0.0017	8.722	0.97	1.02
10	Гряда	0.0040	0.0026	3.641	0.98	0.55
11	Гряда	0.0044	0.0031	3.750	0.99	0.62
12	Мочажина	0.0069	0.0054	2.060	0.99	0.54

метим, что для практически вертикальных распределений, параллельных оси ординат, встречающихся в грядово-мочажинном комплексе и болотной топи, величины $C_{(z)} = Q/v$ варьировали в пределах 1–3 мг/м³, что при полученной выше оценки скорости конвективного транспорта также дает весьма интенсивные эмиссионные потоки от 0.1 до 1 мг С/(м² ч).

В заключение коснемся вопроса динамики профильного распределения метана. Насколько инертен газовый профиль в снежной толще или как быстро устанавливается стационарное распределение метана? На этот вопрос ответ можно получить, используя численное моделирование в системе MATLAB-7 на основе полных моделей динамики метана в виде дифференциальных уравнений (3), (17), (20) с граничными условиями постоянства потока из почвы (Q) и концентрации в резервуаре атмосферы (C_0). Техника вычислений детально изложена в нашем пособии [2]. Для численного эксперимента использовались расчетные величины потока метана $Q = 0.05$ мг С/(м² ч) (модель (4)) и $Q = 0.01$ мг С/(м² ч) (модель (17)), оцененные по стационарным профилям, начальной концентрации, равной атмосферной $C_0 = 1.2$ мг/м³, а также значения эффективного коэффициента диффузии $D = 0.033$ м²/ч (модель (4)) и $D_0 = 0.038$ м²/ч при $m = 1.35$ 1/м (модель (17)). На рис. 3 приведены результаты численного моделирования динамики га-

зовых профилей. Как видно, уже по прошествии суток устанавливается стационарное состояние, фактически тождественное полученным в полевых условиях распределениям. Это означает, что предложенный метод градиентной оценки весьма чувствителен и дает величину осредненного потока метана из экранированной снегом болотной почвы в масштабе нескольких суток.

В целом можно заключить, что оценка потоков метана из болотных почв представляет собой сложную методическую задачу. Камерный метод, может давать заниженные величины эмиссии [9], а в болотных ландшафтах с весьма вероятными быстрыми локальными (преимущественными) конвективными потоками, его использование априори проблематично [4]. Ведь предугадать место и время локальной конвективной разгрузки болотного газа в атмосферу практически невозможно, а с ней может практически мгновенно удаляться запас газа, длительно аккумулирующийся в ненасыщенной торфяной толще в слое активного метаногенеза [4, 5]. На этом фоне осредненный по пространству метод газовых профилей, включая рассмотренную в статье снежную съемку в зимнее время, дает более объективную оценку.

Благодарность. Авторы сердечно благодарят сотрудников факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова проф. Е.В. Шеина и М.В. Глаголева за ценные советы и замечания при подготовке рукописи к публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 399 с.
2. Глаголев М.В., Смагин А.В. Приложения MATLAB для численных задач биологии, экологии и почвоведения. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 200 с.
3. Смагин А.В. Распределенные кинетические модели органофила почв // Вестн. Моск. ун-та. 2001. Сер. 17, почвоведение. № 3. С. 3–7.
4. Смагин А.В. Газовая фаза почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 300 с.
5. Смагин А.В. Почвенно-гидрофизическое обеспечение исследований газовой функции западносибирских болот в связи с проблемой парникового эффекта // Экологический вестник Сев. Кавказа. 2007. Т. 3. № 3. С. 46–58.
6. Смагин А.В., Шнырев Н.А., Витязев В.Г. К теории профильно-градиентного метода оценки эмиссии метана из болот в зимнее время // Экологический вестник Северного Кавказа. 2011. Т. 7. № 2. С. 23–29.
7. Шнырев Н.А., Глаголев М.В. Банк данных по эмиссии метана из почв России // Болота и биосфера: Сб. мат-лов Пятой научной школы. Томск: Изд-во ЦНТИ, 2006. С. 283–286.
8. Mast M.A., Wickland K.P., Striegl R.T., Clow D.W. Winter fluxes of CO₂ and CH₄ from subalpine soils in Rocky Mountain National Park, Colorado // Global Biogeochemical Cycles. 1998. V. 12(4). P. 607–620.
9. Norman J.M., Kucharik C.J., Gower S.T., Baldocchi D.D., Crill P.M. et al. A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes // J. Geophysic. Res. 1997. V. 102. № 24. P. 28.771–28.777.
10. Panikov N.S., Dedysh S.N. Cold season CH₄ and CO₂ emission from boreal peat bogs (West Siberia): Winter fluxes and thaw activation dynamics // Global Biogeochem. Cycles. 2000. V. 14(4). P. 1071–1080.
11. Solomon D.K., Cerling T.E. The annual carbon dioxide cycle in a montane soil: Observations, modeling, and implications for weathering // Water Resour. Res. 1987. V. 23(12). P. 2257–2265.
12. Zimov S.A., Zimova G.M., Davidov S.P., Davidova A.I., Voropaev Y.V., Voropaeva Z.V., Prosiannikov S.F., Prosiannikova O.V., Semiletova I.V., Semiletov I.P. Winter Biotic Activity and Production of CO₂ in Siberian Soils: A Factor in the Greenhouse Effect // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. № D3. P. 5017–5023.