

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОТОКИ МЕТАНА В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ ЗАПАДНОСИБИРСКИХ БОЛОТ

Рассмотрены закономерности профильного распределения метана в толще снега и эмиссионные потоки этого газа с поверхности снежного покрова олиготрофного западносибирского болота и этого газа в толще снега. Предложены физически обоснованные математические модели процесса распределения метана в снеговом покрове, сочетающие источник на поверхности торфяной почвы и механизм диффузионного транспорта, выделяющегося газа в атмосферу. Расчетные данные нередко превышают измеренные камерным методом потоки в 2–10 раз и более, варьируя в диапазоне 0,01–0,3 мгС/м²/час. Предложенный метод снеговой съемки позволяет успешно оценивать потоки болотного газа в атмосферу в холодное время года, сглаживая при этом большое варьирование.

Ключевые слова: метан в болотных экосистемах, зимние наблюдения, профильное распределение в снегу, эмиссия, диффузионный транспорт, математическое моделирование.

Метан относится к одним из основных парниковых газов в атмосфере Земли. Исследованиям его эмиссии из природных и антропогенных источников посвящено много современных публикаций, как в нашей стране, так и за рубежом, представления о которых можно получить из обобщений [1], [2]. Особенно актуальны эти исследования для России, где находятся крупнейшие на планете болотные экосистемы – природные источники метана. Вместе с тем оценки эмиссии из болот России весьма противоречивы [3], [4] и редко включают сведения о потоках в холодное время года со снежным покровом, а этот период может доминировать в условиях умеренного климата. Относительно немного работ по эмиссии метана в холодный сезон и за рубежом [5]–[8], что во многом связано с трудоемкостью проведения полевых исследований и несовершенством соответствующих методик. В связи с этим целью настоящей работы было экспериментальное исследование потоков метана и его распределения в снежном покрове типичного западносибирского олиготрофного болота с последующим математическим моделированием изучаемых явлений для физического обоснования градиентного метода снеговой съемки эмиссионных потоков. В отличие от исследования [9], наш вариант метода оперировал не разностью концентраций между двумя точками измерений в снегу и в атмосфере, а физически-обоснованными моделями стационарных профильных распределений газа в снежном покрове.

Объекты и методы исследования

Экспериментальные исследования проводились в марте в зоне средней тайги Западной Сибири на полигоне Югорского государственного университета «Мухрино» (ХМАО, 60°53'20" с.ш., 68°42'10" в.д.). Они включали измерения потоков метана с поверхности снега в атмосферу методом камер [2], мощности снеговой толщи и плотности ее сложения, а также вертикального распределения концентраций метана в снежном покрове. С этой целью образцы газовой фазы метана аккуратно отбирались из снега с заданной глубины шприцами 20 мл («IMP», США; «SFM», Германия) с удлиненной иглой-насадкой в 3–10-кратной повторности, герметизировались и транспортировались в лабораторию стационара «Мухрино». Концентрация метана в пробах определялась на газовом хроматографе «Кристалл 5000.1» («Хроматэк», Россия) с пламенно-ионизационными детекторами. Синхронно программируемыми датчиками DS1922 («Dallas Semiconductor», США) фиксировалась температура на разных глубинах в толще снега. Расчет концентрации метана в газовой фазе (С) по данным об измеряемой величине его объемного содержания (X_{ppm}), абсолютной температуре (Т) и барометрическом давлении (Д) осуществлялся по следующей формуле [2]:

$$C = \frac{0,012 X_{ppm} \cdot D}{RT}, \quad (1)$$

где [С] = г/м³, [X_{ppm}] = ppm, [Д] = кПа, [Т] = К, R = 8,31 Дж/кг (универсальная газовая постоянная).

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены данные по эмиссии метана на исследуемом объекте в марте месяце, когда болото находилось под снежным покровом мощностью до 60-80 см. Как видно, измеряемая величина не превышает уровня 0,02 мгС/м²/час. При этом для мочажинных элементов болотного рельефа характерно высокое варьирование данных. В летний период такое варьирование часто объясняется выходом из болота газовых пузырьков, содержащих метан, и формирующихся в жидкой фазе при превышении «критической» концентрации, зависящей от растворимости газа и внешнего давления, согласно [10]. Однако для холодного времени года с промерзанием воды в болоте «пузырьковый» транспорт, по-видимому, становится невозможным, поэтому природа сильного варьирования потоков метана в мочажинах, скорее всего, иная и пока остается не ясной.

На рис. 2 представлены результаты измерений концентраций метана в толще снега. По форме профиля их оказалось возможным сгруппировать в два типа – прямолинейные (А) и нелинейные вогнутые (Б), причем тип А был свойственен преимущественно прямым комплексам, а тип Б 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 [2], [11]. Для этого, очевидно, необходимо получить подобные физически-обоснованные модели, дающие в виде стационарных решений профили ли-

нейного и вогнутого типов для распределения метана в инертной пористой толще снега.

Принимая гипотезу диффузионного механизма массопереноса метана в снежном покрове при его движении из почвы в атмосферу, имеем следующую простую модель динамики концентраций газа:

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

где z – вертикальная координата (м),

t – время (час),

C – концентрация метана в газовой фазе толщи снега (г/м³),

D – эффективный коэффициент диффузии (м²/час), зависящий температуры, барометрического давления и пористости среды [2].

Так как снег является макропористой средой, в первом приближении эффективный коэффициент диффузии можно определить по линейному уравнению Пенмена [2]: $D = 0,66D_0P$, где D_0 – коэффициент диффузии в воздушной среде при заданной температуре и барометрическом давлении, P – воздухоносная (активная) пористость или объемная доля пор, не занятых жидкой фазой от общего объема среды (м³/м³), 0,66 – параметр, ответственный за извилистость порового пространства. Учитывая известную зависимость диффузивности газов от температуры и давления [2], получаем окончательную формулу для оценки эффективного коэффициента диффузии метана в толще снега с активной пористостью P :

$$Q = 0,66 \cdot P \cdot D_{st} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,75} \left(\frac{101,3}{D} \right), \quad (3)$$

где D_{st} – коэффициент диффузии метана в стандартных условиях при 273 К температуры и

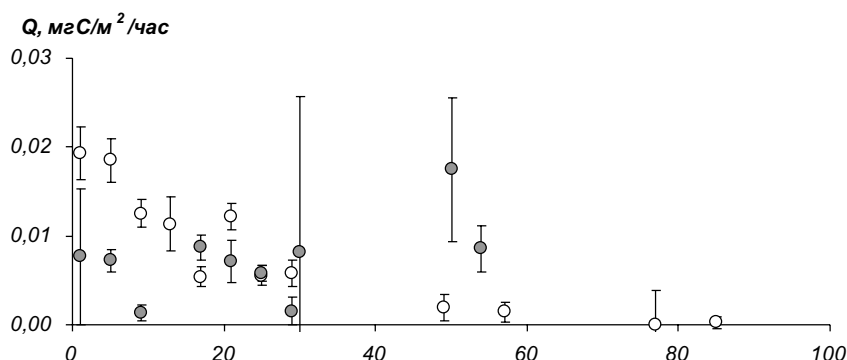


Рисунок 1. Фрагмент измерений эмиссионных потоков метана камерным методом с поверхности снежного покрова в различных элементах болотного ландшафта (март 2010). Белые символы – рямы, закрашенные – мочажины; ось абсцисс – порядковый номер точки измерений, вертикальные планки – стандартные отклонения.

101,3 кПа барометрического давления. Оценка этой величины по разным источникам варьирует в диапазоне 0,069–0,119 м²/час [12]–[14].

Модель (2) снабжается следующими очевидными граничными условиями. На поверхности почвы граничным условием является эмиссионный поток метана с интенсивностью Q (мг/м²/час). На верхней границе, абсолютной отметкой которой является мощность снеговой толщи (H), целесообразно выбрать условие постоянства концентрации метана в атмосферном воздухе (C_0). Стационарный вариант (2) при указанных граничных условиях имеет простое аналитическое решение в виде уравнения прямой:

$$C_{(z)} = -a \cdot z + b \quad (4)$$

где $a = \frac{Q}{D}$, $b = \frac{Q}{D} H + C_0$

Поэтому, аппроксимируя профиль концентраций метана в толще снега линейной зависимостью (4), легко рассчитать искомый эмиссионный поток (Q) по данным об угловом коэффициенте прямой (a) или остаточном члене (b), и зависимости (3) для эффективного коэффициента диффузии газа (D):

$$Q = 0,66 \cdot a \cdot P \cdot D_{st} \left(\frac{T}{273}\right)^{1,75} \left(\frac{101,3}{D}\right) \quad (5)$$

или

$$Q = 0,66 \cdot P \cdot D_{st} \left(\frac{T}{273}\right)^{1,75} \left(\frac{101,3}{D}\right) (b - C_0) \quad (6)$$

В исходной модели (2) предполагалось, что снежная толща однородна и характеризуется одинаковым по всей глубине эффективным коэффициентом диффузии D . Однако анализ плотности снега (ρ) выявил ее фактически линейное увеличение с глубиной ($\rho_{(z)} = 0,282 \cdot z + 0,084$; $R^2=0,93$), а, значит, и соответствующее снижение пористости. Согласно (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: $D_{(z)} = D_0 - (D_0 - D_H)z/H$. В этом случае вместо модели (2) получаем:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{(D_0 - D_H)}{H} z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{(D_0 - D_H)}{H} \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (7)$$

где $m = (D_0 - D_H)/(HD_0)$. Аналитическим решением стационарного варианта (7) при указанных выше граничных условиях служит достаточно простая логарифмическая функция:

$$C_{(z)} = C_0 - \frac{a}{m} \cdot \ln(1 - m \cdot z), \text{ где } a = \frac{Q}{D_0}. \quad (8)$$

Это уравнение удачно описывает вогнутую форму распределения (тип *Б* на рис. 2). 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 достаточно свободно выходить в атмосферу, что в свою очередь уменьшает концентрацию и соответствующий градиент.

Аппроксимируя экспериментальные данные по концентрациям метана в снежной тол-

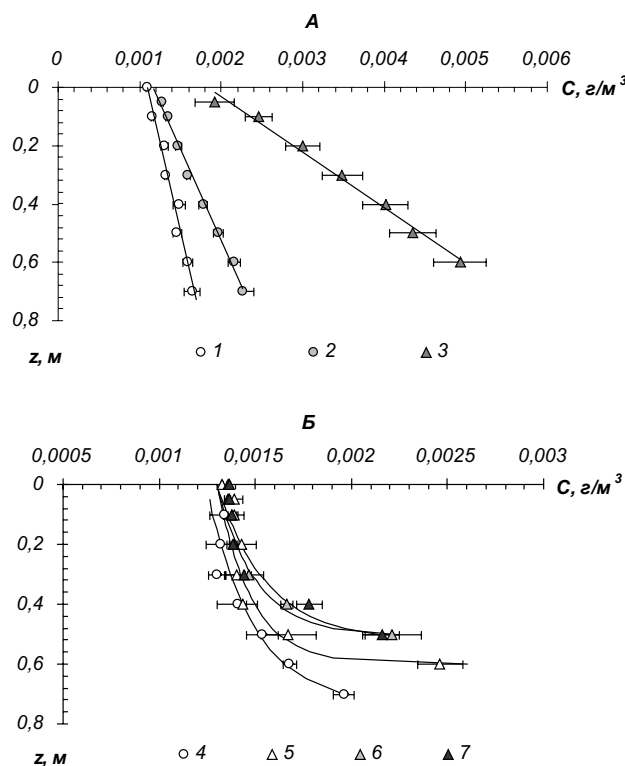


Рисунок 2. Профильные распределения метана в толще снега. А – прямолинейные, Б – вогнутые, 1,2,4 – рямые, 3,5,6,7 – мочажины; линии на графиках аппроксимация по моделям (4) и (8).

ще уравнением нелинейной регрессии (8), получаем возможность расчета эмиссионного потока по уравнению, аналогичному (5).

Таким образом, оценка потоков метана из болотных почв представляет собой достаточно сложную методическую задачу. Камерный метод, сам по себе может давать заниженные величины эмиссии [8], а в болотных ландшафтах

с развитыми локальными (преимущественными) потоками, его использование и подавно способствует неадекватной оценке [2]. На этом фоне осредненный по пространству градиентный метод газовых профилей в варианте снеговой съемке, дает, по-видимому, более объективные данные о газообмене болот с атмосферой в холодный период года.

10.06.2014

Список литературы:

1. Бажин, Н.М. Метан в окружающей среде / Н.М. Бажин. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2010. (Сер. Экология. Вып. 93). – 56 с.
2. Смагин, А.В. Газовая фаза почв / А.В. Смагин. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. – 300 с.
3. Болота Западной Сибири - их роль в биосфере. 2-е изд. / Под ред. А.А. Земцова. – Томск: ТГУ, СибНИИТ, 2000. – 72 с.
4. Глаголев, М.В. Эмиссия CH_4 болотными почвами Западной Сибири: от почвенного профиля до региона: автореф. канд. дисс. – М.: МГУ, 2010. – 24 с.
5. Dise, N.B. Winter fluxes of methane from Minnesota peatlands / N.B. Dise // Biogeochemistry, 1992. – V.17. – P. 71–83.
6. Winter CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes on some natural and drained boreal peatlands / J. Alm [etc.] // Biogeochemistry, 1999. – V. 44. – P. 163–186.
7. Methane flux dynamics in an Irish lowland blanket bog / A. Laine // Plant Soil, 2007. – V. 299. – P. 181–193.
8. Leppala, M.V. Methane flux dynamics during mire succession / M. Leppala, J. Oksanen, E-S. Tuittila // Oecologia, 2011. – V. 165. – P. 489–499.
9. Measuring N_2O emissions from organic soils by closed chamber or soil/snow N_2O gradient methods / M. Maljanen [etc.] // European Journal of Soil Science, 2003. – V. 54. – P. 625–631.
10. Walter, K.M. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget / K.M. Walter, L.C. Smith, F.S. Chapin // Phil. Trans. R. Soc. A. 2007. – V. 365. – P. 1657–1676.
11. Смагин, А.В. Распределенные кинетические модели органо-профиля почв / А.В. Смагин // Вестн. Моск. ун-та, 2001, Сер. 17 Почвоведение. – №3. – С. 3–7.
12. Handbook of Natural Gas Engineering / D.L. Katz. – N.Y.: McGraw-Hill, 1959.
13. Perry, R.H. Chemical Engineer's Handbook / R.H. Perry, C.H. Chilton, S.D. Kirkpatrick. – McGraw-Hill, New York, 1963.
14. Massman, W.J. A Review of the Molecular Diffusivities of H_2O , CO_2 , CH_4 , CO , O_3 , SO_2 , NH_3 , N_2O , NO , and NO_2 in Air, O_2 and N_2 Near STP / W.J. Massman // Atmospheric Environment, 1998. – V. 32. – №6. – P. 1111–1127.
15. Norman, J.M. A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes / J.M. Norman [etc.] // J. of Geophysic. Research, 1997. – V. 102. – №24. – P. 28.771–28.777.

Сведения об авторах:

Шнырев Николай Андреевич, научный сотрудник факультета почвоведения
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, e-mail: shnyrevn@list.ru

Смагин Андрей Валентинович, профессор факультета почвоведения
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, заведующий лабораторией
Института экологического почвоведения МГУ, профессор, доктор биологических наук,
e-mail: smagin@list.ru

119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, МГУ им. М.В. Ломоносова