

УДК 631.433.3

ВЫСОКИЙ УРОВЕНЬ СТОЯНИЯ ВОДЫ МОЖЕТ СНИЖАТЬ ЭМИССИЮ МЕТАНА ИЗ ПОЧВЫ

Глаголев М.В.

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Институт лесоведения РАН, пос. Успенское, Московская обл.
Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск*

m_glagolev@mail.ru

Чаще всего математические модели потока метана из почв содержат в себе монотонно возрастающую зависимость эмиссии от уровня стояния воды. Этот уровень, в свою очередь, в значительной степени определяется интенсивностью и продолжительностью осадков, а также распределением и чередованием осадков во времени. Поскольку климатические модели предсказывают рост средней по земному шару суммы осадков с увеличением концентрации CO_2 , то на основании моделей эмиссии можно ожидать дальнейшего увеличения эмиссии метана. Однако вопрос моделирования почвенной эмиссии в условиях высокого стояния воды нуждается в дальнейшей разработке в связи с существующими многочисленными экспериментальными данными, показывающими, что эмиссия CH_4 может падать, если вода стоит над поверхностью почвы. На основании опубликованных в литературе экспериментальных данных нами предлагается обсудить как само явление снижения эмиссии в условиях высокого стояния воды, так и относительно простую зависимость эмиссии метана от него, учитывающую и первоначальное возрастание эмиссии, и ее снижение после превышения уровнем воды некоторого порогового значения.

Ключевые слова: болота, метан, эмиссия, уровень воды, математическое моделирование.

Цитирование: Глаголев М.В. 2012. Высокий уровень стояния воды может снижать эмиссию метана из почвы // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 3. № 1(5). EDCCmis0003.

ВВЕДЕНИЕ

Болотный метан в проблематике парникового эффекта и глобального изменения климата

Метан – важный компонент фотохимической и климатической систем атмосферы. В XX в. скорость возрастания его концентрации достигала 1% в год. Очевидно, что исследование причин столь быстрого возрастания чрезвычайно важно [Andronova and Karol, 1993]. Основные вклады в глобальный баланс метана качественно определены, однако на сегодняшний день существуют трудности в надежном количественном определении темпов выброса из разнообразных биосферных и антропогенных источников. Это препятствует прогнозированию концентраций CH_4 в атмосфере и его вклада в радиационное воздействие на климат в будущем для любого заданного сценария антропогенных выбросов [Жилиба и др., 2011].

Известно, что одним из главных источников метана являются болота. Представляется, что Россия может быть одним из основных источников метана из-за существенной заболоченности ее территории [Andronova and Karol, 1993]. Однако провести достаточное количество прямых измерений эмиссии CH_4 на столь большой территории в настоящее время не представляется возможным. Перспективным для решения данной задачи может быть метод математического моделирования.

Важнейшим требованием, которое предъявляется к математической модели, является требование ее адекватности (соответствия) реальному объекту, процессу, явлению. В частности, может быть выделен особый аспект неадекватности модели, возникающий из-за того, что при ее построении была применена схема, разработанная для иной группы явлений, к которой изучаемое явление не относится. Гипотезы, на которые опиралась эта модель, в данной ситуации не обоснованы и даже несправедливы [Виноградов и Виноградова, 2010, с. 15]. Математическая модель отражает характеристики анализируемого процесса лишь в определенных рамках. Границы эффективного моделирования полностью определяются допущениями, принятыми при проектировании модели. Неучет особенностей

допущений может привести к ошибочным заключениям по результатам моделирования. При этом одним из часто используемых допущений является представление об отсутствии в системе чрезмерных перегрузок, приводящих к необходимости введения ограничений эффективной области применения модели по параметрам входной информации, за которыми существенны искажения результатов моделирования [Смит, 1980, с. 14]. С практической точки зрения это означает, что необходимо особое внимание уделять экстремальным значениям входных переменных – именно они, скорее всего, оказываются в зоне чрезмерных перегрузок, при которых, весьма вероятно, адекватность модели будет нарушаться.

В данной статье мы бы хотели обратить внимание на один частный вопрос из этой сферы. А именно: насколько адекватно будут работать модели почвенной эмиссии метана при повышении уровня стояния воды.

Действительно, модели климата предсказывают рост средней по земному шару суммы осадков с увеличением концентрации CO₂. Зимой ожидается рост осадков в высоких широтах, а согласно большинству моделей – также и в умеренных. В основном для большинства широтных зон модели предсказывают при удвоении CO₂ рост осадков на уровне 10-30%, сопровождающийся значительным ростом частоты и интенсивности сильных осадков, в особенности в тропиках и умеренных широтах Северного полушария [Груза и др., 2001, с. 32]. И эти предсказания уже начинают подтверждаться наблюдениями.

Например, из данных, откорректированных П.Я. Гройсманом следует, что годовое количество осадков за период 1981-1990 гг. на севере Западной Европы и Европейской части России, а также в Западной Сибири и Средней Азии было примерно на 10-15% выше нормы (за 1951-1975 гг.). Количество атмосферных осадков для теплого и холодного полугодий и за год в период 1991-1995 гг. на большей части внетропической территории Евразии и Северной Америки также превышало норму [Ефимова и Строкина, 2002, с. 93, 99].

Хотя положение уровня воды на участке болотного массива является функцией значительного числа факторов, интенсивность и продолжительность осадков, а также распределение и чередование осадков во времени находятся среди главных факторов, влияние которых безусловно очень велико и которые на известном промежутке времени могут рассматриваться как независимые [Иванов, 1953, с. 180-181].

Используемые сокращения

УБВ – уровень болотных вод; УП – удельный поток.

НЕКОТОРЫЕ ОПУБЛИКОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Монотонная зависимость эмиссии от уровня стояния воды

В подавляющем большинстве экспериментальных исследований (см., например, [Shurpali et al., 1993; Hargreaves and Fowler, 1998; Glagolev et al., 2001; Глаголев и Смагин, 2006]) была выявлена монотонная зависимость эмиссии CH₄ от УБВ: чем больше воды – тем больше поток метана (сразу отметим, что именно такая зависимость чаще всего использовалась и в математических моделях, как мы это проиллюстрируем далее).

Представление о том, что с увеличением слоя воды эмиссия должна увеличиваться принято теоретически обосновывать следующим образом (см., например, [Kettunen et al., 1996; Strack et al., 2004; Глаголев и Смагин, 2006; Глаголев с соавт., 2007, с. 203] и ссылки там). Образование метана происходит при анаэробии в торфе ниже УБВ, а в аэробных условиях имеет место метанокисление. Следовательно, чем большая часть почвенного профиля оказывается в анаэробных условиях, тем более высокие УП CH₄ следует ожидать.

Однако здесь мы не будем подробно останавливаться на этих тривиальных результатах, а перейдем к более интересным наблюдениям, показывающим, что все не так просто. Для теоретического обоснования таких неожиданных наблюдений заметим, что образование метана в анаэробной зоне и его эмиссия с поверхности почвы – процессы хотя и взаимосвязанные, тем не менее, все же, не тождественные. Эмиссия определяется не только образованием метана, но, кроме того, процессами его

транспорта из анаэробной зоны к поверхности и окислением в аэробной зоне (см., например, [Shannon and White, 1994; Glagolev, 1998; Walter and Heimann, 2000; Глаголев с соавт., 2008] и оригинальные ссылки там). Поэтому, говоря о влиянии уровня воды на эмиссию, нужно рассматривать зависимость от УБВ не только продукции метана, но и этих процессов. Следовательно, если, например, высокий УБВ будет затруднять процессы транспорта, то эмиссия вполне может снизиться.

Низкая корреляция между эмиссией CH_4 и УБВ

Однако, несмотря на общепринятое представление о четкой монотонной зависимости эмиссии от УБВ, ряд исследователей отмечали неожиданно низкую корреляцию между ними.

В частности, Inoue et al. [1995], изучавшие эмиссию CH_4 в нескольких географических точках России, показали что УП возрастает с увеличением УБВ, но соответствующие коэффициенты корреляции по большей части оказались малы, причем они были тем меньше, чем более крупная географическая область вовлекалась в исследования.

Аналогично, Silvola et al. [2003] изучали эмиссию метана в пяти географических точках, расположенных в Швейцарии, Финляндии, Голландии, Швеции и Великобритании. Хотя сами авторы пишут о том, что корреляция между УП CH_4 и УБВ была обнаружена на голландском и финском сайтах, но, учитывая, что для последнего $r^2 = 0.04$, следует признать, что из изученных пяти точек указанная корреляция была обнаружена только в одной – голландской (где $r^2 = 0.53$). А средние по сайтам величины УП CH_4 и УБВ не обнаруживали между собой практически никакой корреляции ($r^2 = 0.0009$). Такое часто наблюдаемое явление снижения коэффициента детерминации при переходе от меньшей пространственной области к большей было объяснено нами ранее (как раз на примере данных из цитированной выше работы [Inoue et al., 1995]) на основе представления о мультипликативном влиянии факторов среды на эмиссию метана (здесь мы не будем повторять это объяснение, отсылая интересующегося читателя к [Глаголев с соавт., 2007]).

Suyker et al. [1996] обнаружили существенное (12 суток!) запаздывание между изменением уровня воды и эмиссии метана. Однако и с учетом этого высокий коэффициент детерминации (от 68 до 94%) достигался лишь после того, как были отброшены измерения, полученные в тот период, когда вода стояла максимально высоко.

Снижение эмиссии CH_4 при высоких значениях УБВ

Наконец, существуют довольно многочисленные экспериментальные исследования, в которых приводятся данные о снижении эмиссии метана в условиях чрезмерного возрастания УБВ.

Например, Moore et al. [1990, Fig. 8] при исследованиях на эвтрофных болотах в канадской провинции Квебек показали, что эмиссия возрастает если УБВ приближается к поверхности торфа, и почти симметрично падает (чуть медленнее – если вода стоит над поверхностью) при удалении от нее.

Снижение эмиссии для высоких УБВ отмечали и Shannon and White [1994, Fig. 8] при исследованиях на мичиганском торфянике «Big Cassandra Bog». Несмотря на большой разброс данных достаточно ясно видно снижение эмиссии после того, как УБВ превысит примерно 10 см над поверхностью почвы. Правда необходимо отметить, что эти данные накапливались с мая по сентябрь в течение трех лет и, таким образом, они не могут быть однозначно интерпретированы в свете исключительно одного лишь УБВ, ведь, безусловно, существенным было и влияние температурного фактора. По той же причине не могут быть однозначно интерпретированы данные, которые получали с июля 2001 г. по сентябрь 2002 г. Strack et al. [2004, Fig. 2] при исследованиях на мезотрофном болоте в канадской провинции Квебек. Но и здесь отмечалось примерно симметричное падение средней сезонной эмиссии левее и правее интервала УБВ от -10 до +10 см.

Конечно, опубликованные наблюдения снижения УП CH_4 при сверхвысоких УБВ не ограничиваются лишь тремя вышеперечисленными работами. За неимением места мы не можем подробно рассмотреть здесь все имеющиеся данные, но хотим обратить внимание заинтересованных читателей еще и на [Harriss et al., 1982, p. 673, Fig. 1; Happell and Chanton, 1993, p. 480, Fig. 2; Happell et al., 1993, p. 14776, Tab. 3]. Кроме того укажем еще и [Harriss et al., 1988, p. 235, Tab. 2]. При ознакомлении с последней работой на первый взгляд может показаться, что облако экспериментальных данных демонстрирует, в общем-то, обычное монотонное поведение при изменении УБВ. Однако это облако складывается из данных, полученных на разных сайтах. И если провести анализ отдельно по

каждому сайту, то становится очевидным, что в ряде случаев мы имеем возрастание УП до какого-то порогового значения УБВ (которое может быть различным для разных сайтов или вообще не существовать для некоторых из них), а после превышения этого порога начинается снижение УП.

Итак, очевидно, что существуют многочисленные экспериментальные данные, демонстрирующие немонотонную зависимость УП CH_4 при возрастании УБВ: до некоторого порогового значения уровня воды эмиссия возрастает, но после превышения этого порога начинает падать. А что же дают нам математические модели?

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ НА ЭМИССИЮ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Эмпирическая формула Shurpali-Verma-Clement'a

По результатам измерений УП CH_4 из торфяников Миннесоты (май-октябрь 1991 г.) в [Shurpali et al., 1993] была построена эмпирическая зависимость вида

$$F = f_1(T_{10}) / (1 + b \cdot w),$$

где F – удельный поток метана из почвы ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$); $f_1(T_{10})$ – температурный фактор¹, зависящий от T_{10} – температуры торфа ($^{\circ}\text{C}$) на глубине 10 см; b – эмпирический коэффициент (4.3 м^{-1}), отражающий чувствительность УП CH_4 к изменению УБВ; w – УБВ (отсчитывается в метрах от усредненной поверхности мочажин, расположенной на высоте 415.84 м выше уровня моря).

Экспоненциальная зависимость

По результатам измерений УП CH_4 из низинного болота канадской провинции Saskatchewan (май-октябрь 1994 г.) в [Suyker et al., 1996] была построена эмпирическая зависимость вида

$$F = f_1(T_{10}) \cdot 10^{c \cdot w},$$

где c – эмпирический коэффициент, отражающий чувствительность УП CH_4 к изменению уровня воды; w – уровень стояния воды (отсчитывается в метрах от усредненной поверхности мочажин).

Аналогичная зависимость была использована в ряде других работ. Например, в [Van den Pol-van Dasselaar et al., 1999] она была построена по результатам измерений удельного потока метана из эвтрофного торфяника в западной части Голландии. Однако в этом случае вместо T_{10} использовалась температура почвы на глубине 20 см. В [Глаголев и Смагин, 2006] такая же зависимость была построена по результатам измерений удельного потока метана на северо-восточном отроге Большого Васюганского Болота (1995-2002 гг.). Однако в этом случае вместо T_{10} использовалась средняя температура поверхности почвы, причем T и W представляли собой усредненные значения за некоторый период времени, обычно составлявший от недели до месяца.

При моделировании среднегодовой эмиссии оказалось, что она зависит только от среднегодового УБВ, но не от температуры, в связи с чем принималось $f_1 = \text{const}$ [Van den Pol-van Dasselaar et al., 1999].

Смещенная экспоненциальная зависимость

Очевидно, что вышеприведенная экспоненциальная зависимость может описать только выделение метана (в этом случае удельный поток принимается положительным), но не его потребление (т.е. отрицательные УП). Однако при очень низком УБВ потребление вполне возможно, и поэтому некоторое распространение получила смещенная экспоненциальная модель вида

$$F = f_2 \cdot e^{c \cdot w} - F_1,$$

¹ Температурный фактор был выбран в виде: $f_1(T_{10}) = a \cdot Q_{10}^{(0.1 \cdot T_{10} - 1)}$, где $a = 122$, $Q_{10} = 1.9$ [Shurpali et al., 1993]. Естественно, в других работах, использовавших температурный фактор такого же вида, численные значения коэффициентов были иными.

где f_2 – температурный фактор.

В частности, такая зависимость была построена в [Tuittila *et al.*, 2000] для моделирования результатов измерений удельного потока метана из торфяника на юге Финляндии (1994-1997 гг.). При этом коэффициент c принимался пропорциональным степени покрытия (%) измерительных площадок пушицей (*Eriophorum vaginatum*), $F_1 = 1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ и использовался достаточно сложный температурный фактор².

Линейная зависимость

По результатам измерений УП CH_4 из торфяника в Шотландии (май-июнь 1994 г.) в [Hargreaves and Fowler, 1998] была построена эмпирическая зависимость вида

$$F = F_0 + b \cdot W,$$

где F – удельный поток метана из почвы ($\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$); F_0 – удельный поток метана в ситуации, когда уровень воды совпадает с поверхностью торфа ($78.77 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$); b – эмпирический коэффициент (3.208 см^{-1}), отражающий чувствительность УП CH_4 к изменению УБВ; W – уровень стояния воды (см).

На первый взгляд может вызвать недоумение то, что если одни авторы использовали для описания зависимости УП CH_4 от УБВ существенно нелинейные функции, то другие ограничились простейшей линейной взаимосвязью. Однако в данном случае это можно легко объяснить: Hargreaves and Fowler [1998] исследовали изменение УБВ на очень небольшом интервале – от чуть более 8 до чуть более 16 см. Естественно, на небольшом интервале изменения независимой переменной нелинейную функцию вполне возможно аппроксимировать линейной (при помощи разложения в ряд Тэйлора).

Опосредованная зависимость эмиссии метана от уровня воды (через Eh)

Поскольку для образования метана необходимы анаэробные условия, то интенсивность этого процесса, с физико-химической точки зрения, определяется величиной окислительно-восстановительного потенциала (Eh), а не уровнем воды самим по себе. Например, даже если вода стоит высоко, но вода эта насыщена кислородом, то образования метана не будет или оно будет очень слабым. Изложенные выше модели опирались на тот эмпирический факт, что обычно наблюдается хорошая корреляция между УБВ и Eh: чем выше стоит вода – тем ниже будет окислительно-восстановительный потенциал (следовательно, тем лучше условия для метанобразования). Но в некоторых моделях (см., например, [Zhang *et al.*, 2002; Zhuang *et al.*, 2004]) задана именно зависимость продукции от Eh, а не от УБВ. Конечно, и в таких моделях УБВ будет влиять на эмиссию, но опосредованно – через изменение Eh при разных уровнях стояния воды.

Неявный учет влияния уровня воды

В распределенных моделях (например, [Walter and Heimann, 2000; Kettunen, 2003; Глаголев, 2006; Tang *et al.*, 2010]) явная зависимость каких-либо параметров от уровня воды не вводится, но ниже УБВ (т.е. в водной среде) некоторые параметры и члены уравнения (например, коэффициенты диффузии газов, скорость образования пузырьков), имеют одни значения, а выше УБВ – другие.

В модели James [1993] также не вводится явная зависимость параметров от уровня воды, но УБВ задает толщину слоя, в котором ведется расчет, а она, в свою очередь, определяет концентрации и (через них) – потоки.

Эмиссия CH_4 в этих моделях с формально-математической точки зрения может рассматриваться как неявная функция УБВ. Однако, задавая те или иные значения УБВ и вычисляя для них эмиссию, можно построить зависимость $F(W)$ в явном виде.

² Температурный фактор имел вид: $f_2 = a \cdot \exp(b_0 + b_1 \cdot T_{15} + b_2 \cdot T_{30})$, причем коэффициент a определялся степенью покрытия пушицей (EV) и индексом суммы эффективных температур (ETI): $a = \exp(b_4 \cdot \text{EV} \cdot \text{ETI})$; здесь T_{15} и T_{30} – соответственно, температуры торфа на глубинах 15 и 30 см; коэффициент b_0 оказался незначимым (т.е. можно принять $b_0 = 0$) [Tuittila *et al.*, 2000].

Гидрологический фактор в CH₄_Model

Развитием известного семейства моделей Cao et al. [1995, 1996] была созданная нами CH₄_Model (первоначальная ее версия была впервые опубликована в [Glagolev, 1998]). В ней скорость образования метана (MPR, мгС·см⁻³·час⁻¹) на глубине z (см) рассчитывается с учетом влияния на этот процесс температуры почвы (T , °C) и уровня стояния воды (WTL, см):

$$MPR = CSR \cdot P_m \cdot F_1(T) \cdot F_2(z, WTL),$$

где CSR (мгС·см⁻³·час⁻¹) – скорость поступления простых углеродсодержащих субстратов метаногенеза в почву; P_m – максимальная доля углерода (в субстрате), идущего на образование CH₄ в оптимальных гидротермических условиях; F_1 , F_2 – термический и гидрологический факторы (множители, отражающие уменьшение скорости метанобразования в реальных, т.е. неоптимальных, гидротермических условиях, соответственно, отдельно для температуры и уровня стояния воды).

Гидрологический фактор $F_2(z, WTL)$ в модели определяется средним уровнем стояния воды WTL (т.е. для расчета данного фактора необходимо иметь достаточно длительный ряд наблюдений за уровнем стояния воды в данной географической точке):

$$F_2(z, WTL) = \begin{cases} 0 & \text{при } z < WTL \\ F2max \cdot (z - WTL) / (z_{max} - WTL) & \text{при } WTL \leq z \leq z_{max} \\ F2max & \text{при } z > z_{max}, \end{cases}$$

где

$$z_{max}(WTL) = \begin{cases} Z_{INTERCEPT} + Z_{SLOPE} \cdot WTL & \text{при } WTL > WTL_1 \\ 0 & \text{при } WTL \leq WTL_1, \end{cases}$$

$$F2max(WTL) = \begin{cases} 1 & \text{при } WTL > WTL_2 \\ \exp[k_{WTL} \cdot (WTL - WTL_2)] & \text{при } WTL \leq WTL_2, \end{cases}$$

здесь WTL, z_{max} и z отсчитываются от поверхности вглубь почвы, и этому соответствует положительное направление, а отрицательные величины характеризуют стояние воды над поверхностью, т.е., например, WTL = -9.8 см означает, что вода стоит на 9.8 см выше поверхности почвы (линейная зависимость z_{max} от WTL взята из работы [Sundh et al., 1994], и содержит следующие численные значения параметров: WTL₁ = -9.82 см, Z_{INTERCEPT} = 10.9 см, Z_{SLOPE} = 1.11). По физическому смыслу z_{max} – это глубина, начиная с которой, при данном уровне стояния воды условия становятся оптимальными для продуцирования CH₄ метаногенами. По сути дела, формула, задающая в нашей модели $z_{max}(WTL)$, показывает, что z_{max} расположена существенно ниже WTL (непосредственно под WTL вода может быть насыщена кислородом, ингибирующим метаногенез); предполагается, что метаногенез более активно может идти в торфе, а не в слое воды над ним, поэтому всегда $z_{max} \geq 0$. Зависимость F2max(WTL) отражает тот факт, что в условиях очень высокого стояния воды над поверхностью почвы скорость продукции метана снижается с увеличением толщины слоя воды. В модели были приняты следующие значения коэффициентов: $k_{WTL} = 0.0076 \text{ см}^{-1}$, WTL₂ = -28.42 см. Однако сравнение с данными из [Shannon and White, 1994, Fig. 8; Strack et al., 2004, Fig. 2] показывает, что падение эмиссии начинается при существенно меньшем уровне стояния воды, нежели -28.42 см и происходит существенно быстрее. Исходя из указанной совокупности данных можно рекомендовать значения WTL₂ = -12.9 см и $k_{WTL} = 0.102 \text{ см}^{-1}$.

Гидрологический фактор, используемый в CH₄_Model позволяет во многих случаях адекватно описать изменение эмиссии CH₄ при изменении УБВ. Однако очевидно, что фактор этот – чисто эмпирический. Но каков может быть физический (биофизический?) механизм немонотонного влияния УБВ на УП?

КАКОВ МЕХАНИЗМ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ CH_4 ПРИ ВЫСОКОМ УРОВНЕ СТОЯНИЯ ВОДЫ?

Прежде всего отметим, что якобы наблюдаемое подавление эмиссии при высоком УБВ может быть и артефактом. Например, если проводились длительные измерения (захватывающие весну и лето), а потом строились корреляции между УП и УБВ, то могло оказаться, что высокие уровни УБВ соответствовали весеннему половодью, когда почва еще не прогрелась и процесс метаногенеза был весьма слаб в силу низкой температуры метаногенного слоя. Но, допуская возможность такой ситуации (которую экспериментально легко обнаружить и исключить), мы ниже обсудим действительные (не являющиеся артефактами статистического анализа) механизмы подавления эмиссии высокими УБВ.

Kettunen et al. [1996] при исследованиях в 1993 г. с мая по октябрь на минеротрофных участках болотного комплекса Salmisuo (Финляндия) обнаружили для некоторых микроландшафтов отрицательную корреляцию между осадками и эмиссией CH_4 в течение двух дней после их выпадения. Авторы интерпретировали это следующим образом: дождевая вода может подавлять эмиссию, возможно, за счет того, что заполняет поровое пространство в до того не насыщенном влагой торфе. Однако по истечении двух дней корреляция становится положительной. Таким образом, этот механизм может объяснить лишь краткосрочное (порядка первых суток), но не долговременное снижение эмиссии в условиях высокого УБВ.

Кратковременное возрастание УП при падении УБВ наблюдалось как в лабораторных, так и в полевых условиях и было связано с выходом метана, до того зажатого водой в порах (см. [Kettunen et al., 1996] и ссылки на оригинальные публикации там). На первый взгляд может показаться, что **возрастание УП** при снижении УБВ не имеет отношения к обсуждаемому нами вопросу: **снижению УП** при высоком уровне стояния воды. Однако по зрелому размышлению становится очевидно, что если в условиях относительно низкого стояния воды (хотя важно не это, а то, что происходит дальнейшее падение УБВ) исследователь наблюдает необычайно высокие потоки, то обычные потоки при постоянном высоком УБВ он будет воспринимать как относительно низкие и может сделать поспешный вывод о якобы имеющем место снижении УП CH_4 при высоком стоянии воды. Но, как видим, приведенное объяснение указывает не столько на зависимость УП от УБВ, сколько на зависимость от скорости изменения УБВ. Следовательно, данное объяснение, так же как и предыдущее, позволяет понять лишь краткосрочное снижение/повышение эмиссии (впрочем, количественно охарактеризовать этот срок для нас пока затруднительно).

Кроме того, в ряде работ показано, что падение атмосферного давления приводит к усиленному выходу метана из торфа в атмосферу (см. [Kettunen et al., 1996] и ссылки на оригинальные публикации там), что вполне естественно с физической точки зрения. Поскольку выпадение осадков коррелирует именно с падением давления, то получается, что сразу после дождя почва оказывается несколько «разгруженной» от метана и, следовательно, эмиссия уменьшится. А раз произошло выпадение осадков, то УБВ повысится и мы будем иметь понижение эмиссии при повышении УБВ. Конечно, через какое-то время давление метана в толще торфяника возрастет и, соответственно, возрастет УП. Т.е. и этот механизм объясняет лишь кратковременное снижение эмиссии. Однако можно предположить, что при достаточно частом выпадении осадков складывается ситуация, при которой давление в торфянике лишь только успевает возрасти до обычного, обеспечивающего интенсивную эмиссию, как следует новый дождь и торфяник опять быстро «разгружается» от метана. Поскольку теоретически рассчитать интервал времени, в течение которого эмиссия еще не вернулась к норме, для нас пока затруднительно, то будем опираться лишь на экспериментальные данные [Frolking and Crill, 1994; Kettunen et al., 1996], которые указывают, что УП после дождя остается меньше обычного в течение 2-4 дней. Таким образом, если в течение некоторого интервала времени дожди следуют друг за другом с периодичностью в несколько дней, то во всем этом интервале велика вероятность того, что исследователь будет обнаруживать малые эмиссии при больших УБВ.

Наконец вспомним, что среди процессов транспорта метана из почвы в атмосферу весьма важная роль принадлежит не до конца понятным механизмам, тесно связанным с растениями (см., например, [Glagolev et al., 2000; Strack et al., 2004; Глаголев с соавт., 2007; Tang et al., 2010] и ссылки там на оригинальные публикации). К сожалению, слабая изученность этих механизмов не позволяет однозначно утверждать, что сверхвысокий УБВ обязательно будет уменьшать их эффективность. Но, в принципе, такое предположение не лишено оснований. С чисто логической точки зрения транспорт метана может

быть либо связан с процессами жизнедеятельности растения, либо с растением как с некоторой пространственной структурой (но не с какими либо процессами жизнедеятельности). В первом случае относительно большинства видов растений достаточно очевидно следующее утверждение: если растение находится под водой, то процессы его жизнедеятельности затруднены. Но и во втором случае можно предложить ряд механизмов, активность которых будет подавляться в том случае, когда УБВ стоит выше уровня почвы. Например, для растений, стебель которых отчасти покрыт гидрофобными веществами, между стеблем и водой может находиться тончайшая пленка воздуха. Поскольку коэффициент диффузии метана в воздухе существенно больше, чем в воде (на 4 порядка [Tang et al., 2010]!), то чем больше будет таких стеблей, тем интенсивнее будет транспорт метана в атмосферу. И совершенно ясно, что чем выше над поверхностью болота стоит вода, тем больший путь вдоль стебля предстоит пройти молекуле метана, прежде чем она выйдет в приземный слой воздуха. Понятно, что на прохождение большего пути требуется большее время, следовательно для такой молекулы увеличивается вероятность того, что она вообще не выйдет в атмосферу, а будет окислена в CO_2 метанотрофами, которые могут быть ассоциированы с растением.

ЛИТЕРАТУРА

- Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. 2010. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Издат. центр «Академия». 304 с.
- Глаголев М.В. 2006. Математическое моделирование метаноокисления в почве // Труды Института микробиологии имени С.Н. Виноградского РАН. Вып. XIII: К 100-летию открытия метанотрофии / Под ред. В.Ф. Гальченко. М.: Наука. С. 315-341.
- Глаголев М.В., Головацкая Е.А., Шнырев Н.А. 2007. Эмиссия парниковых газов на территории Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. Т. 14. № 2. С. 197-210.
- Глаголев М.В., Смагин А.В. 2006. Количественная оценка эмиссии метана болотами: от почвенного профиля – до региона (к 15-летию исследований в Томской области) // Доклады по экологическому почвоведению. Вып. 3. №3. С. 75-114.
- Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сирин А.А. 2008. Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрохимия, №5, с. 46-58.
- Груза Г.В., Бардин М.Ю., Раянкова Э.Я., Рочева Э.В., Соколов Ю.Ю., Самохина О.Ф., Платова Т.В. 2001. Об изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России в XX веке // Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений / Под ред. Ю.А. Израэля. М.: Наука. С. 18-39.
- Ефимова Н.А., Строкина Л.А. 2002. Эмпирические оценки изменений климата на континентах северного полушария в конце XX века // Изменения климата и их последствия. СПб.: Наука. 93-104 с.
- Жилиба А.И., Вандышева Г.А., Грибанов К.Г., Захаров В.И. 2011. Глобальные изменения климата: «метановая бомба» - наукообразный миф или потенциальный сценарий? // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 2. № 1(3). EDCCrev0001. Также доступна по URL: http://www.ugrasu.ru/uploads/files/EDCC_2_1_Zhiliba.pdf (дата обращения 23.12.2011).
- Иванов К.Е. 1953. Гидрология болот. Л.: Гидрометеиздат. 297 с.
- Смит Дж.М. 1980. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей. М.: Машиностроение. 271 с.
- Andronova N.G., Karol I.L. 1993. The contribution of USSR sources to global methane emission // Chemosphere. V. 26. P.111-126.
- Cao M., Dent J.B., Heal O.W. 1995. Modeling methane emissions from rice paddies // Global Biogeochemical Cycles. V. 9. P. 183-195.
- Cao M., Marshall S., Gregson K. 1996. Global carbon exchange and methane emissions from natural wetlands: Application of a process-based model // Journal of Geophysical Research. V. 101. P. 14399-14414.
- Frolking S., Crill P. 1994. Climate controls on temporal variability of methane flux from a poor fen in southeastern New Hampshire: Measurement and modeling // Global Biogeochemical Cycles. V. 8. P. 385-397.
- Glagolev M.V. 1998. Modeling of Production, Oxidation and Transportation Processes of Methane // Global Environment Research Fund: Eco-Frontier Fellowship (EFF) in 1997. Tokyo: Environment Agency. Global Environment Department. Research & Information Office. P. 79-111.
- Glagolev M., Inisheva L., Lebedev V., Naumov A., Dement'eva T., Golovatskaja E., Erohin V., Shnyrev N., Nozhevnikova A. 2001. The Emission of CO_2 and CH_4 in Geochemically Similar Oligotrophic Landscapes of West Siberia // Proceedings of the Ninth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 2000 (Sapporo, Japan, 23-24 January, 2001). Sapporo: Kohsoku Printing Center. P. 112-119.
- Glagolev M., Uchiyama H., Lebedev V., Utsumi M., Smagin A., Glagoleva O., Erohin V., Olenev P., Nozhevnikova A. 2000. Oxidation and Plant-Mediated Transport of Methane in West Siberian Bog // Proceedings of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999. Tsukuba: Isebu. P. 143-149.
- Happell J.D., Chanton J.P. 1993. Carbon Remineralization in a North Florida Swamp Forest: Effects of Water Level on the Pathways and Rates of Soil Organic Matter Decomposition // Global Biogeochemical Cycles. V. 7. P. 475-490.

- Happell J.D., Chanton J.P., Whiting G.J., Showers W.J. 1993. Stable Isotopes as Tracers of Methane Dynamics in Everglades Marshes With and Without Active Populations of Methane Oxidizing Bacteria // *Journal of Geophysical Research*. V. 98. P. 14771-14782.
- Hargreaves K.J., Fowler D. 1998. Quantifying the effects of water table and soil temperature on the emission of methane from peat wetland at the field scale // *Atmospheric Environment*. V. 32. No. 19. P. 3275-3282.
- Harriss R.C., Sebacher D.I., Bartlett K.B., Bartlett D.S., Crill P.M. 1988. Sources of Atmospheric Methane in the South Florida Environment // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 2. P. 231-243.
- Harriss R.C., Sebacher D.I., Day F.P., Jr. 1982. Methane flux in the Great Dismal Swamp // *Nature*. V. 297. P. 673-674.
- Inoue G., Maksyutov S., Panikov N. 1995. CO₂ and CH₄ emission from wetlands in west Siberia // *Proceedings of the Third Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1994*. Sapporo: iWORD. P. 37-43.
- James R.T. 1993. Sensitivity analysis of a simulation model of methane flux from the Florida Everglades // *Ecological Modelling*. V. 68. P. 119-146.
- Kettunen A. 2003. Connecting methane fluxes to vegetation cover and water table fluctuations at microsite level: A modeling study // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 17. No. 2. 1051. DOI:10.1029/2002GB001958.
- Kettunen A., Kaitala V., Alm J., Silvola J., Nykanen H., Martikainen P.J. 1996. Cross-correlation analysis of the dynamics of methane emissions from a boreal peatland // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 10. No. 3. P. 457-471.
- Moore T., Roulet N., Knowles R. 1990. Spatial and temporal variations of methane flux from subarctic/northern boreal fens // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 4. P. 29-46.
- Shannon R.D., White J.R. 1994. A three-year study of controls on methane emissions from two Michigan peatlands // *Biogeochemistry*. V. 27. P. 35-60.
- Shurpali H.J., Verma S.B., Clement R.J. 1993. Seasonal Distribution of Methane Flux in a Minnesota Peatland Measured by Eddy Correlation // *Journal of Geophysical Research*. V. 98. P. 20649-20655.
- Silvola J., Saarnio S., Foot J., Sundh I., Greenup A., Heijmans M., Ekberg A., Mitchell E., Van Breemen N. 2003. Effects of elevated CO₂ and N deposition on CH₄ emissions from European mires // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 17. No. 2. 1068. DOI: 10.1029/2002GB001886.
- Strack M., Waddington J.M., Tuittila E.-S. 2004. Effect of water table drawdown on northern peatland methane dynamics: Implications for climate change // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 18. GB4003. DOI:10.1029/2003GB002209
- Sundh I., Nilsson M., Granberg G., Svensson B. 1994. Depth Distribution of Microbial Production and Oxidation of Methane in Northern Boreal Peatlands // *Microbial Ecology*. V. 27. P. 253-265.
- Suyker A.E., Verma S.B., Clement R.J., Billesbach D.P. 1996. Methane flux in a boreal fen: Season-long measurement by eddy correlation // *Journal of Geophysical Research*. V. 101. P. 28637-28647.
- Tuittila E.-S., Komulainen V.-M., Vasander H., Nykänen H., Martikainen P.J., Laine U. 2000. Methane dynamics of a restored cut-away peatland // *Global Change Biology*. V. 6. P. 569-581.
- Tang J., Zhuang Q., Shannon R.D., White J.R. 2010. Quantifying wetland methane emissions with process-based models of different complexities // *Biogeosciences*. V. 7. P. 3817-3837. DOI: 10.5194/bg-7-3817-2010. URL (дата обращения 01.05.2012): www.biogeosciences.net/7/3817/2010/
- Van den Pol-van Dasselaar A., van Beusichem M.L., Oenema O. 1999. Methane emissions from wet grasslands on peat soil in a nature preserve // *Biogeochemistry*. V. 44. P. 205-220.
- Walter B.P., Heimann M. 2000. A process-based, climate-sensitive model to derive methane emissions from natural wetlands: Application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 14. No. 3. P. 745-765.
- Zhang Y., Li C., Tretin C.C., Li H., Sun G. 2002. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems // *Global Biogeochem. Cycles*. V. 16. No. 4. 1061. DOI:10.1029/2001GB001838.
- Zhuang Q., Melillo J.M., Kicklighter D.W., Prinn R.G., McGuire A.D., Steudler P.A., Felzer B.S., Hu S. 2004. Methane fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere at northern high latitudes during the past century: A retrospective analysis with a process-based biogeochemistry model // *Global Biogeochem. Cycles*. V. 18. GB3010. DOI:10.1029/2004GB002239

HIGH WATER TABLE CAN LOWER A METHANE EMISSION FROM SOIL

Glagolev M.V.

Climate models predict that the precipitation will increase under $2\times CO_2$ scenario leading to raised water tables at some regions. The position of the water table within a peatland can have a large effect on CH_4 emissions. Methane production occurs below the depth of the water table in anaerobic peat. Hence, the greater part of the peat profile that was anaerobic, the greater would be the expected flux. However depth of the water table affects the methane emission with complex interactions, so the effects of temporal variations in the water table level on methane emissions may be controversial. Methane emissions correlated negatively with depths of the water tables in some measurements: high methane emissions were associated with low water tables and vice versa. The suppression of methane emission by

a) filling the unsaturated pore space in peat during precipitation and the increased release rate (caused by a declining water table) could explain the result in time scale of some few days;

b) suppression of a plant-mediated mechanism of methane emission during super-high water table could explain the result in any time scale (the products of photosynthesis lead to increased root exudations which then promote the microbial formation of methane at depth; this methane is transported via the plant vascular system to the atmosphere; thus both plant-mediated methane production and transport are suppressed by high water table).

Also a drop in atmospheric pressure correlates with a precipitation. Hence, the greater part of the methane that was released during pressure dropping, the smaller would be the expected flux after precipitation (in condition of high water table).

The author acknowledge the financial support by the European Union FP7-ENV project PAGE21 under contract number GA282700.

Key words: Mires, Methane flux, Water table level, Mathematical models.

Поступила в редакцию: 09.04.2012