

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

УДК 631.433.3

### К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ВЫХОДА ПУЗЫРЬКОВ МЕТАНА ИЗ ТОРФЯНИКА

Глаголев М.В.<sup>1,2,3)</sup>, Клепцова И.Е.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2)</sup>Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск)

<sup>3)</sup>Институт лесоведения РАН (пос. Успенское, Московская обл.)

m\_glagolev@mail.ru

*В работе рассматривается следующий возможный механизм выхода пузырьков из толщи торфа в атмосферу: при возникновении избыточного давления в толще торфа, формируется канал, по которому пузырьки могут подниматься на поверхность. Экспериментально показано, что избыточное давление в пузырьке радиусом  $1.3 \cdot 10^{-3}$  м, вышедшем с глубины 3 см, было таково, что могла быть совершена работа  $(7.6 \pm 4.4) \cdot 10^{-5}$  Дж, а работа, которую необходимо было совершить для прокладывания канала (т.е. работа против сил упругости «мишинок»), составляла  $(3.44 \pm 1.03) \cdot 10^{-5}$  Дж. На основании литературных данных показано, что аналогичный механизм может быть вполне работоспособным и при выходе пузырьков с гораздо больших глубин – порядка нескольких (или даже многих) дециметров, поскольку необходимые для этого давления, с одной стороны, могут создаваться метаногенными археями, но с другой стороны, такие величины давления не влияют на их активность.*

**Ключевые слова:** пузырьковый транспорт метана, перенос газа в почве.

**Цитирование:** Глаголев М.В., Клепцова И.Е. 2012. К вопросу о механизме выхода пузырьков метана из торфяника // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 3. № 3. С. 54-63.

...Все дело – в волшебных пузырьках!  
Из рекламного слогана

## ВВЕДЕНИЕ

Процесс образования метана в болотах, впервые открытый Вольтом еще в 1776 г., привлекает в настоящее время пристальное внимание исследователей различных специальностей. В последние десятилетия остро встал вопрос о регуляции метаногенеза в северных болотах в связи с глобальной ролью атмосферного метана в качестве парникового газа и причины дестабилизации теплового баланса Земли (и климата в целом). Быстрый рост концентрации  $\text{CH}_4$  в атмосфере со скоростью  $0.8\text{-}1\% \cdot \text{год}^{-1}$  заставил искать главные источники этого газа на поверхности Земли. В итоге накопились колоссальные сведения по динамике и пространственному варьированию эмиссии метана [Мастепанов, 2004, с. 1] – см., например, [Happell and Chanton, 1993; Baird et al., 2004; Глаголев и Клепцова, 2009; Glagolev et al., 2011], а также стали предприниматься попытки по их теоретическому осмыслению и моделированию [Cao et al., 1996; Walter et al., 1996; Сабреков и Глаголев, 2008; Степаненко и др., 2011].

Эмиссия метана из естественных болот является результатом наложения ряда биологических и физических процессов, идущих в почве, среди которых, во-первых, образование  $\text{CH}_4$  метаногенными микроорганизмами в анаэробных условиях; во-вторых, его окисление метанотрофными бактериями в аэробных условиях; и в-третьих, транспорт метана через почвенную толщу. Последний обеспечивается тремя путями: молекулярной диффузией, пузырьками и некоторым механизмом, связанным с растениями [Walter et al., 1996].

В насыщенной водой почве пузырьковый транспорт обеспечивает существенно более быстрый перенос метана, чем диффузия [Walter et al., 1996], и объем «пузырьковой» эмиссии по порядку величины совпадает с той, что обеспечивается переносом, связанным с растениями [Holzapfel-Pschorn and Seiler, 1986; Happell and Chanton, 1993<sup>1</sup>; Глаголев и Смагин, 2006]. Ранее в литературе (см.,

<sup>1</sup> Happell and Chanton [1993] говорят о транспорте пузырьками и диффузией, но из работы [Happell et al., 1993] ясно видно, что под «диффузией» эти авторы понимают именно перенос, связанный с растениями (считая, что в растениях осуществляется перенос именно по диффузионному механизму).

например, [Happell and Chanton, 1993; Waddington et al., 1996; Мастепанов, 2004; Glagolev et al., 2008]) отмечались различные величины вклада «пузырьковой» эмиссии – от 13 до 85%. Но, в любом случае, можно утверждать: было показано, что пузырьки являются важным механизмом выноса биогенного  $\text{CH}_4$  в атмосферу [Baird et al., 2004].

Однако, как отмечали Baird et al. [2004], имеется очень мало информации относительно **образования и движения** пузырьков биогенного газа в поверхностном слое торфяников (до глубины 1 м). И за прошедшие после опубликования статьи Baird et al. около 10 лет нам почти не встречались работы, которые бы проливали свет на эти вопросы. Точнее говоря, встречались отдельные публикации (например, [Бажин, 2004]), посвященные **образованию** пузырьков, но совсем не встречались статьи, в которых рассматривалось бы их **движение** в болоте. Однако именно последнее будет определять время пребывания пузырька внутри болота и, тем самым – долю метана, который успеет окислиться, а через это – вклад «пузырьковой» эмиссии в общий поток  $\text{CH}_4$  в атмосферу и абсолютную величину суммарного потока. И если в иностранной научной прессе хотя бы признается сам факт существования пузырькового транспорта и утверждается его весьма значительная роль среди вообще всех механизмов выноса метана из болота в атмосферу, то некоторые отечественные исследователи<sup>2</sup> высказывают сомнения даже в этом.

Конечно, для тех исследователей, для которых существование пузырькового транспорта не подлежит сомнению, может показаться, что наша работа лишена особого смысла. Действительно, зачем доказывать возможность события, являющегося очевидным фактом? Однако даже если сомнения в существовании пузырькового переноса и не высказываются явно, они подспудно могут выражаться в том, что при построении каких-либо формализованных схем газовой динамики почв (например, математических моделей) о пузырьках совершенно забывают и связанный с ними путь транспорта вообще не учитывается. А это, кстати говоря, может вести и к неправильным оценкам интенсивностей других путей (например, пытаюсь воспроизвести наблюдаемое значение эмиссии газа с поверхности в атмосферу, но забыв о пузырьках, модельер невольно так подгоняет параметры модели, что диффузия и/или перенос через растения достигают «заоблачных» высот). Приведем лишь несколько примеров широко известных моделей, которые совершенно не учитывают пузырьковый перенос: [Cao et al., 1995; 1996; Arah and Stephen, 1998].

В связи с вышесказанным целью данной работы было: показать (теоретически – с позиции физики, а также практически – в модельном эксперименте), что пузырьковый перенос вполне возможен.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Хотя мы рассматриваем эту нашу работу, скорее, как теоретическую, тем не менее, некоторые крайне простые эксперименты, нами все же были выполнены.

В работе использовался торф высокой степени разложения, отобранный из толщи мезотрофной части Бакчарского болотного комплекса, расположенного в Бакчарском районе Томской области близ стационара «Плотниково» Института почвоведения и агрохимии СО РАН (координаты точки отбора проб: 56°51.277' с.ш., 82°50.858' в.д.). Бакчарское болото было достаточно хорошо изучено и подробно описано ранее – см., например, [Глаголев и Шнырев, 2007; Глаголев и др., 2010; Коронатова, 2010; Golovatskaya, 2010].

Для физического моделирования процесса образования и движения пузырьков в торфе мы поступали следующим образом. Прозрачный сосуд заполнялся свежесобраным торфом практически доверху, но при этом в нем располагалась трубочка (диаметром 2 мм) так, чтобы один конец трубочки находился внутри сосуда (торфа), а другой – вне его. К этому «свободному» концу трубочки подсоединялся шприц. Если в шприце создавалось избыточное давление, то это приводило к выделению пузырьков на том конце трубочки, который находился в торфе.

Оценку сжимаемости торфа проводили по результатам компрессионных испытаний, как описано в [Базин и др., 1992, с. 132-133]. При этом мы ограничивались<sup>3</sup> только 4-ой ступенью нормального давления (3 кПа). Поскольку в дальнейшем мы будем осуществлять ряд расчетов, в

<sup>2</sup> Проф. Н.С. Паников, проф. А.В. Смагин – личные сообщения (мы упомянули только наиболее видных ученых из числа тех, что отрицают движение пузырьков в болоте, поскольку всех таких исследователей перечислить трудно).

<sup>3</sup> Поскольку известно, что при давлениях до 30-70 кПа сохраняется прямопропорциональная зависимость между напряжениями и деформациями [Базин и др., 1992, с. 130], а, как будет показано далее, в наших экспериментах превышение давления (над атмосферным) в пузырьках всегда было значительно (в 4-8 раз) ниже этих пределов.

которых существенными оказываются параметры прибора для компрессионных испытаний, то считаем необходимым привести их здесь: использовался цилиндрический сосуд диаметром  $d = 0.090 \pm 0.001$  м, а масса груза составила  $m = 1.95 \pm 0.05$  кг.

Температуру торфа измеряли электронными датчиками серий 1921–1923 («Dallas Semiconductor», США).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Предполагаемый механизм выхода пузырьков

Механизм выхода пузырька представляется нам следующим:

- в анаэробных условиях микроорганизмы выделяют газы, которые не успевают посредством диффузионного механизма отводиться от мест генерации в атмосферу [Глаголев, 2010, с. 77-78];
- в результате, концентрация газа становится столь велика, что превышает его растворимость, в связи с чем возникает газовая фаза;
- из-за продолжающегося образования газов создается существенное избыточное давление, обуславливающее возможность выполнить работу против внешних сил, олицетворяемых упругими «мшинками»;
- газ как бы расталкивает мшинки в стороны, благодаря чему формируется канал, по которому пузырьки могут подниматься вверх (из-за плавучести пузырька, в общем, этот канал будет преимущественно направлен вверх, хотя и не строго вертикально, поскольку в каждой точке пространства канал будет формироваться по пути наименьшего сопротивления, т.е. там, где мшинки наименее упруги).

### Какую работу *НУЖНО* совершить для формирования канала?

На вопрос, вынесенный в заголовок данного раздела, позволяют ответить результаты эксперимента по определению упругих свойств торфа. Очевидно, что в приборе для компрессионного испытания на поверхности мха действуют две противоположно направленные силы: сила упругости торфа (направлена вверх) и направленная вниз сила тяжести груза

$$F_T = m \cdot g,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения ( $9.8 \text{ м/с}^2$ ). Сила упругости в первом приближении может быть записана в соответствии с законом Гука:

$$F_y = k \cdot \Delta l,$$

где  $\Delta l$  – вертикальное смещение (м) поверхности после размещения на ней груза. Константа  $k$ , очевидно, должна быть пропорциональна площади круга ( $S$ , м) – ведь упругость свойственна каждой «мшинке», складывающей поверхность болота; каждую такую «мшинку» можно представить как упругую пружинку, и чем больше пружинок, тем большую силу надо приложить, чтобы сжать их все, а на большей площади может разместиться пропорционально больше пружинок. Поэтому мы представим  $k$  в виде  $k = k_1 \cdot S$ . Поскольку  $F_T$  постоянна, а  $F_y$  увеличивается с погружением круга в торф, то рано или поздно наступит равновесие ( $F_T = F_y$ ):

$$m \cdot g = k_1 \cdot S \cdot \Delta l$$

Из вышеприведенного уравнения легко найти неизвестную константу, характеризующую упругие свойства торфа:

$$k_1 = m \cdot g / (S \cdot \Delta l) = 4 \cdot m \cdot g / (\pi \cdot d^2 \cdot \Delta l).$$

В нашем эксперименте по определению упругих свойств торфа равновесие между силой упругости и силой тяжести груза наступило при  $\Delta l = 0.017 \pm 0.001$  м. Теперь, зная упругие характеристики насыщенного водой торфа, мы можем оценить – какую работу ( $A_1$ , Дж) нужно совершить, чтобы проложить пузырьку путь (канал) с глубины  $l = 0.030 \pm 0.005$  м в атмосферу. Если радиус пузырька обозначить через  $R$  (примем его равным  $1.3 \cdot 10^{-3}$  м) то в «нулевом» приближении можно было бы представить, что для выхода на поверхность пузырька нужно проложить канал, радиусом  $R$  и длиной  $l$ . В реальности, не являясь абсолютно твердым шариком, пузырек будет

непрерывно менять форму, то превращаясь в узкий эллипсоид (в тех местах, где торф особо плотный и раздвинуть его почти не удастся), то слегка увеличиваясь до большего размера (вблизи поверхности). Однако представляется, что и для «первого» приближения вполне возможно оставить представление о постоянстве  $R$ . А вот длина канала (мы обозначим ее  $L$ ) совершенно определенно не будет равна  $l$ . Во первых, это следует из прямых наблюдений (соответствующий эксперимент будет описан ниже в следующем разделе). Поднимаясь с глубины 10 до глубины 5 см, пузырьки смещаются примерно на 4.5-5 см в сторону от вертикальной оси. Аналогичную картину мы наблюдали и для глубины 3 см – пузырьки сместились в сторону примерно на 3 см. Во-вторых, данное явление издавна хорошо известно теоретически и объясняется извилистостью пути в пористой среде. Так, еще Г.М. Ломизе [1951, с. 105, 115], изучая движение воды, отмечал: «...фильтрационные струйки будут проходить путь, более длинный, чем кратчайшее расстояние между двумя точками фильтрации. Это удлинение пути... измеряемое коэффициентом...  $\xi = L/l$ ... с возможными колебаниями этой величины от 1 до 1.5 (без учета случаев исключительных)». Таким образом, мы видим, что следующее из нашего эксперимента значение  $\xi \leq 2^{1/2} \approx 1.41$ , оказывается вполне разумным<sup>4</sup>.

Итак, чтобы пузырек мог подняться с глубины  $l$ , нужно создать канал, радиусом  $R$  и длиной  $L = \xi \cdot l$ . Чтобы такой канал проложить, необходимо преодолеть силу упругости мшинок, сместив каждую из них на расстояние  $R$ . Поскольку площадь боковой стенки этого канала составит  $S_K = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \xi \cdot l$ , то для работы будем иметь:

$$A_1 = \int_0^R F_y dR = \int_0^R k_1 \cdot S_K \cdot R \cdot dR = \int_0^R k_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \xi \cdot l dR = k_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot l \cdot \int_0^R R^2 dR = k_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot l \cdot R^3 / 3 = 4 \cdot m \cdot g \cdot 2 \cdot \xi \cdot l \cdot R^3 / (3 \cdot d^2 \cdot \Delta l).$$

Подставляя численные значения, найдем:

$$A_1 = 4 \cdot 1.95 \cdot 9.8 \cdot 2 \cdot 1.41 \cdot 0.03 \cdot 1.3^3 \cdot 10^{-9} / (3 \cdot 0.09^2 \cdot 0.017) \approx 3.44 \cdot 10^{-5} \text{ Дж } (\pm 1.03 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}).$$

По-видимому, полученная величина  $A_1$  близка к оценке сверху и на самом деле для построения канала нужно будет выполнить несколько меньшую работу. Действительно, движение пузырька не по кратчайшей прямой вверх, а по более длинной линии говорит о том, что это движение происходит по пути наименьшего сопротивления. Но упругость мы измеряли не для наименее упругих «мшинок», а для самых разнообразных, среди которых были и наименее упругие, и средние по упругости, и даже весьма упругие. Расчет величины  $A_1$  был выполнен с использованием результатов этих измерений для «усредненной» мшинки. Разумеется, работа по деформации только наименее упругих мшинок должна быть меньше, чем работа по деформации «усредненных» мшинок.

Однако в данном разделе мы рассмотрели лишь работу по формированию канала. Но при движении пузырька осуществляются и другие виды работы. Вероятно, движение пузырьков в сформировавшемся канале в первом приближении можно рассматривать как движение в трубке. Мы не будем останавливаться на этом слишком подробно, поскольку необходимые детали читатель сможет найти в известной книге крупнейшего советского физика-пузырьковеда<sup>5</sup> Я.Е. Гегузина [1985], но порядок величины оценим, следуя только что процитированной книге.

<sup>4</sup> Не можем не обратить внимание читателей на интересный парадокс. Коэффициент извилистости можно приближенно определить по формуле Викке (см., например, [Сысоев, 1986]):  $\xi = \Pi / [1 - (1 - \Pi)^{2/3}]$ , где  $\Pi$  – пористость. Для предельного случая максимальной пористости ( $\Pi = 1$ ) получаем  $\xi(1) = 1$ , а для минимальной ( $\Pi = 0$ ) –  $\xi(0) = 1.5$ , т.е. именно те пределы, которые указаны в [Ломизе, 1951, с. 115]. Но ведь торф в естественном состоянии имеет очень высокую пористость –  $\Pi = 0.85 \div 0.98$  [Базин и др., 1992, с. 83]. Т.е., казалось бы, мы должны были иметь коэффициент извилистости, близкий к 1; например, типичная для болот пористость 0.85 дает  $\xi(0.85) = 1.18$ . А экспериментально полученное нами значение  $\xi = 1.41$  соответствует пористости, равной 0.31. Думаем, что парадокс этот разрешается весьма просто. Ведь при введении классического понятия пористости и коэффициента извилистости рассматривались каналы (поры) достаточно широкие, для того, чтобы молекулы газов или жидкостей могли бы в них свободно перемещаться. А для пузырьков эти поры слишком узкие (с подобным явлением сталкивались геохимики: в результате ряда исследований было отмечено наличие в тонкодисперсных породах эффекта полупроницаемости или «просеивания солей», который проявляется в способности пород задерживать часть молекул, размеры которых меньше размера поровых каналов – см., [Лукнер и Шестаков, 1986, с. 55] и ссылки там). Т.е. для пузырьков (радиуса около 1.3 мм) торф представляет собой вовсе не пористую среду, а почти «непроницаемую» (в торфе размеры пор составляют от десятых до сотых долей мм [Базин и др., 1992, с. 76]). Но тогда значение коэффициента извилистости и должно быть близким к тому, которое характерно для  $\Pi = 0$ , т.е. близким к 1.5. Это мы и имеем в эксперименте!

<sup>5</sup> Вообще говоря, Яков Евсеевич был ученым многогранным, вошедшим в историю науки еще и как автор фундаментальных работ в области высокотемпературных процессов в реальных кристаллах; он – один из создателей физики спекания, лежащей в основе технологии порошковой металлургии.

Для того чтобы сместить на расстояние  $x$  водную прослойку, разделяющую пузырьки, необходимо затратить следующее количество энергии [Гегузин, 1985]:

$$\Delta W = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot x \cdot \Delta \alpha,$$

где  $\Delta \alpha$  выражается через поверхностную энергию на границе жидкость/материал трубки и поверхностное натяжение вещества трубки.

Можно легко получить оценку сверху для работы (обозначим эту работу через  $A_2$ ), которую необходимо совершить, приняв, что придется проталкивать водную прослойку через всю трубку длиной  $L$  (т.е.  $x = L = \xi \cdot l$ ). Однако представляется вполне очевидным, что образовавшийся в торфе канал весьма сильно отличается от трубки с непроницаемыми стенками – движение водных прослоек в нем будет иметь другой характер: вода местами может двигаться не только вверх по каналу, но и в стороны (между мшинками), и обтекать пузырек.

Такое отличие трубки в торфе от «идеальной» трубки можно учесть при помощи константы Скиннера ( $C_{Sk}$ ) [Bloch, 2003]. К сожалению, точное значение ее в данном случае неизвестно, поэтому остается принять  $C_{Sk} = 0.5$ , исходя из того, что она больше 0 (по физическому смыслу) и, вероятно, меньше 1 (т.к. из-за частичной проницаемости стенок трубки не придется проталкивать водную прослойку по всей ее длине). Итак, имеем для работы  $A_2$  следующую формулу:

$$A_2 = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \xi \cdot l \cdot C_{Sk} \cdot \Delta \alpha.$$

Подставляя численные значения, найдем:  $A_2 = 2 \cdot 3.14 \cdot 1.3 \cdot 10^{-3} \cdot 1.41 \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5 \cdot 6.7 \cdot 10^{-2} \approx 1.2 \cdot 10^{-5}$  Дж (к сожалению, нам не известна величина  $\Delta \alpha$  для системы вода/торф, поэтому мы воспользовались приводимым в [Гегузин, 1985] значением  $\Delta \alpha = 6.7 \cdot 10^{-2}$  Дж/м<sup>2</sup> для системы вода/стекло, считая, что такое грубое приближение, все же, является вполне разумным для оценки порядка величины). Если принять  $C_{Sk} = 1$  (идеальная трубка с непроницаемыми стенками), то  $A_2$  возрастет до  $2.4 \cdot 10^{-5}$  Дж.

### Какую работу **МОЖЕТ** совершить газ, выходя из болота?

Эксперимент с погруженной в торф трубкой позволил воочию убедиться, что пузырьки (при весьма небольшом давлении в них) прекрасно проходят через торф, как бы «расталкивая» его в стороны.

Однако если разместить трубочку так, как показано на рис. 1а, то пузырьки пойдут не строго вверх, а вдоль трубочки, ибо вдоль нее сопротивление меньше. Поэтому, несмотря на кажущееся удобство такого расположения трубки (в прозрачном сосуде пузырьки будут хорошо видны), от него необходимо отказаться. Если разместить трубочку так, как показано на рис. 1б, то пузырьки идут действительно вверх (и мы ясно видим, что это именно пузырьки, хотя и несколько деформированные), но это ничего не доказывает – ведь они поднимаются вдоль стенки сосуда, а в природе таких стенок нет. Еще один вариант расположения трубки показан на рис. 1в: открытый конец трубки был помещен в слое торфа примерно на глубине 10 см в центре сосуда. Результат, в принципе, уже был положительным, хотя и тут есть к чему придаться. Дело в том, что пузырьки в торфе идут не строго вверх, а – в направлении наименьшего сопротивления, в каждой точке определяемого особенностями сложения торфа. Это направление может существенно отклоняться от вертикального, становясь, подчас, близким к горизонтальному. В результате, если на глубине 10 см пузырьки выделялись в центре сосуда, то поднявшись до глубины примерно 5 см, они оказались около стенки и дальше вверх шли уже только вдоль нее (что, кстати, доказывает правильность отбраковки варианта, изображенного на рис. 1б). Повторим, что результат этот – положительный, ведь пузырьки, все-таки, смогли подняться с глубины 10 см до глубины 5 см непосредственно в торфе – без соприкосновения со стенками сосуда или какими-то еще неестественными образованиями. Был бы сосуд пошире, они бы могли подняться еще выше – вроде бы это очевидно. Да, вроде бы... Но, все-таки, в этом эксперименте до атмосферы они не дошли. Однако выход лежит на поверхности! Не следует в таком узком сосуде так глубоко закапывать трубочку: поместим ее на глубину всего лишь 3 см, как это изображено на рис. 1г.

Использование градуировки на шприце позволило установить – какое давление необходимо создать в пузырьке, чтобы он вышел с глубины 3 см на поверхность. В нашем эксперименте использовался шприц объемом  $25 \pm 0.5$  мл и трубочка объемом  $2 \pm 0.1$  мл (т.е. исходный объем был  $27 \pm 0.6$  мл, а исходное давление можно принять равным 101325 Па). Пузырьки выходили в

атмосферу при смещении поршня на  $2 \pm 0.5$  мл. Т.е. объем уменьшился до  $25 \pm 0.6$  мл, а давление возросло (по закону Бойля-Мариотта) и может быть оценено величинами в интервале от  $26.4 \cdot 101325 / 25.6 = 1.045 \cdot 10^5$  Па до  $27.6 \cdot 101325 / 24.4 \approx 1.146 \cdot 10^5$  Па, т.е. можно принять среднее значение  $(1.096 \pm 0.051) \cdot 10^5$  Па. Конечно, точность этих наших измерений чрезвычайно низка и все приводимые величины имеют лишь ориентировочный характер. Но для прикидочных расчетов точность эта достаточна. Действительно, на глубине 0.03 м в насыщенном водой торфе давление будет складываться из атмосферного и гидростатического. Последнее приблизительно составит  $1000 \cdot 9.8 \cdot 0.03 = 294$  Па. Таким образом, эта величина существенно меньше давления выхода пузырька и можно считать, что несколько тысяч паскалей избыточного давления необходимо для совершения газом, главным образом, работы по деформации торфа – прокладыванию пути выхода в атмосферу. В дальнейших приближенных расчетах будем для простоты считать процесс изотермическим, а газ – идеальным.

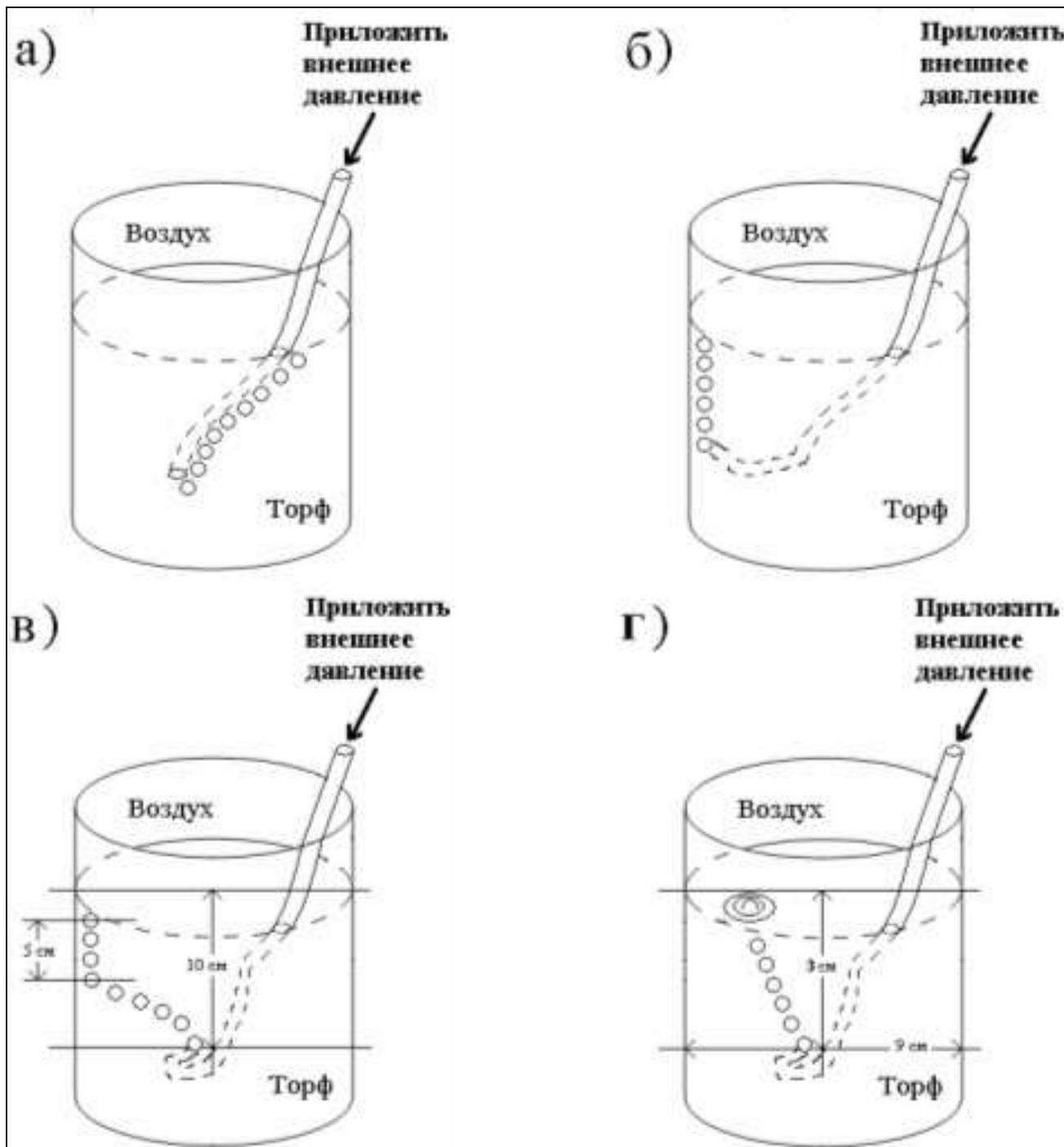


Рис. 1. Простой опыт для доказательства возможности пузырькового транспорта в почве (пояснения см. в тексте).

Математическое выражение для работы одного моля идеального газа таково:  $R_C \cdot T \cdot \ln(P_1/P_2)$ , где  $R_C \approx 8.31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $P_1, P_2$  – начальное и конечное давления [Годнев и др., 1982, с. 184, 192, 666]. Но в пузырьке содержится не один, а  $n$  молей газа, следовательно это выражение нужно домножить на  $n$ . Поскольку наши расчеты носят весьма приближенный характер, то мы грубо оценим  $n$ , исходя из того, что 1 моль газа занимает объем 22.4 л, тогда  $n = 4 \cdot \pi \cdot (R \cdot 10)^3 / (3 \cdot 22.4)$ . Таким образом,  $n \approx 4.11 \cdot 10^{-7}$  моль. Тогда, если в толще торфа давление в пузырьке составляло  $P_1 = (1.096 \pm 0.051) \cdot 10^5 \text{ Па}$ , то при выходе в атмосферу (т.е. туда, где давление  $P_2 = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ), он может совершить работу ( $A$ , Дж):

$$A = n \cdot R_C \cdot T \cdot \ln(P_1/P_2) \approx 4.11 \cdot 10^{-7} \cdot 8.31 \cdot 288 \cdot \ln(1.096/1.013) \approx 8 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}.$$

(мы приняли температуру  $15^\circ\text{C} \approx 288 \text{ К}$ , поскольку именно такая температура летом оказалась вполне типична для торфа Бакчарского болота на глубине 20-30 см). Для более или менее строгого учета погрешности этой величины необходимо учесть те приближения, которые мы допускали в  $n, T, P_1$  и  $P_2$ . Но мы ограничимся лишь учетом погрешности в  $P_1$ , что дает  $A \approx (7.6 \pm 4.4) \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ . Очевидно, что эта величина находится во вполне разумном соответствии с суммой  $A_1$  и  $A_2$ .

На первый взгляд, результаты нашего исследования противоречат результатам М.А. Мастепанова [2004, с. 12], утверждавшего, что в поверхностном слое торфяника (0-5 см) газонасыщенность практически нулевая, поскольку из этой зоны газовые пузыри могут **беспрепятственно** выходить в атмосферу (а в наших экспериментах приходилось приложить изрядное давление, чтобы заставить пузыри выйти). Однако все становится ясным, если учесть, что мы специально использовали торф относительно высокой степени разложения, взятый гораздо глубже указанного поверхностного слоя. Таким образом, в наших экспериментах, в отличие от работы Михаила Алексеевича, моделировалось движение пузырьков в более глубоких, а не в поверхностном слое. Но относительно этих слоев он отмечает: «Ниже, до 15 см газонасыщенность увеличивается и сохраняется на уровне 30-35% во всех нижележащих горизонтах». Так что никакого противоречия на самом деле нет!

### Может ли в торфе возникать необходимое для выхода пузырька давление?

Однако остается еще один вопрос: может ли в природе возникать внутри пузырька необходимое давление (которое мы «моделировали» надавливанием на поршень шприца)? Мы не видим, что может этому воспрепятствовать. Если метаногены непрерывно производят метан и выбрасывают его из своих клеток в окружающую среду, а там обмен с атмосферой затруднен, то давление в такой системе будет непрерывно возрастать до тех пор, пока оно либо убьет самих продуцентов, либо достигнет того уровня, при котором пузырьки проложат себе путь сквозь толщу торфа наверх и, таким образом, давление упадет. Т.е., фактически, поставленный вопрос сводится к следующему: какое давление способно убить микроорганизмы (или, по крайней мере, сильно снизить их активность). Оно больше или меньше тех нескольких килопаскалей избыточного давления, которые необходимы для выхода пузырька в атмосферу? К счастью, в микробиологии<sup>6</sup> этот вопрос давно и хорошо исследован.

Обычное давление не оказывает существенного влияния на микробные клетки. И лишь давление в  $1 \cdot 10^7$ - $5 \cdot 10^7 \text{ Па}$  угнетает рост и размножение микроорганизмов [Мишустин и Емцев, 1987, с. 83]. Но даже и такое повышенное атмосферное давление (в несколько сот атмосфер) оказывает слабое действие на бактерии [Сутин и др., 1973, с. 65-66]. Если же говорить конкретно о метаногенных археях, то они обнаруживались по крайней мере до глубины около 450 м ниже уровня моря [Воробьева, 2007, с. 237], что соответствует давлению почти в 50 атм. Напомним, что мы в наших экспериментах наблюдали устойчивый выход пузырьков, если градиент превышения давления в пузырьке (над атмосферным) составлял около  $3 \cdot 10^3 \text{ Па/см}$ . Таким образом, для глубины метаногенного слоя (30-40 см) получаем необходимое превышение давления в пузырьке около  $10^5 \text{ Па} \approx 1 \text{ атм}$ . Думаем из сказанного выше совершенно очевидно, что такое небольшое давление совершенно не скажется на активности метаногенов.

<sup>6</sup> В микробиологии возникло новое направление – баробиология микроорганизмов, которая изучает роль гидростатического давления как экологического фактора, оказывающего влияние на распространение и активность микробов [Мишустин и Емцев, 1987, с. 83].

Единственное, чем (на наш взгляд) отличался описанный в данной работе модельный эксперимент от той ситуации, которая имеет место в природе, это – характерное время процесса. Мы повышали давление в шприце достаточно быстро (со скоростью примерно 3 кПа/с), тогда как в реальности микробам для формирования пузырька, возможно, требуется больше времени. Однако мы не видим, как меньшая скорость увеличения давления могла бы помешать пузырькам начать прокладывать канал для выхода в атмосферу тогда, когда наконец необходимое давление будет достигнуто.

С чисто логической точки зрения, казалось бы, меньшая скорость поступления газа может привести к тому, что газ будет успевать отводиться другими механизмами транспорта. Напомним, что, как уже было сказано выше, кроме пузырькового, их выделяют еще два: диффузия и не до конца изученные процессы переноса, связанные с растениями. Однако относительно диффузии ранее было показано, что она не справляется с отводом  $\text{CH}_4$  от клеток метаногенов – см. [Глаголев, 2010, с. 77-78] и оригинальные ссылки там. К сожалению, транспорт, связанный с растениями, изучен еще довольно плохо, поэтому, пытаясь обосновать его очевидную неспособность помешать формированию пузырьков, мы можем невольно свернуть с магистрали строгой теории и легко угодить в болото сомнительных фактов, поросшее, к тому же, непроверенными гипотезами. Чтобы этого не произошло, будем считать, что в данной работе рассматриваются только те участки болота, которые покрыты настолько незначительным количеством хорошо транспортирующих газ растений (или любым количеством плохо транспортирующих), что этим видом транспорта можно смело пренебречь.

Большинство ранее проведенных исследований было выполнено для пузырькового переноса из относительно глубоких слоев торфа, где пузырьки удерживаются под слоями древесного торфа, характеризующегося низким коэффициентом фильтрации и высоким сопротивлением в отношении пузырькового транспорта. В этих условиях накапливаются большие объемы газа, которые в конце концов выделяются путем очень значительных выбросов, когда в течение небольшого интервала времени порядка минут (или пусть даже часов) в атмосферу выбрасывается более  $40 \text{ гCH}_4/\text{м}^2$ . В частности, такой режим функционирования механизма пузырькового переноса был показан для торфяников Миннесоты [Baird et al., 2004] и позднее предполагался на основе косвенных данных для Большого Васюганского болота [Глаголев и Смагин, 2006].

Очевидно, что это явление ничуть не противоречит нашей теории, а является ее частным случаем: при большем сопротивлении со стороны окружающей среды будет необходимо большее давление, чтобы газ мог проложить себе канал выхода в атмосферу. Но почему же выбросы продолжаются от минут до часов, а не прекращаются почти сразу – ведь с выходом буквально первого пузырька давление газа в толще торфа упадет и его уже не должно хватить на то, чтобы поддерживать канал в открытом состоянии?

В физике почв хорошо известно, что если снять нагрузку, вызвавшую деформацию почвы, то увеличение объема образца произойдет не мгновенно, а будет развиваться во времени в соответствии с так называемой кривой деформации: сначала произойдет быстрое увеличение объема образца, за которым последует длительная плавная стадия постепенного достижения равновесия [Шеин, 2005, с. 364]. Таким образом, когда первый (после образования канала) пузырек выйдет в атмосферу, канал не исчезнет сразу, а поначалу лишь уменьшится в объеме. Следовательно, пузырек, идущий следом за первым, должен выполнить уже несколько меньшую работу, чем его предшественник. Да, давление в торфе после выхода первого пузырька упало, но (из-за того, что канал «схлопывается» не сразу) в течение некоторого времени после выхода первого пузырька нужно уже меньшее давление, чтобы поддерживать разгрузку газа из толщи торфа в атмосферу.



## ЛИТЕРАТУРА

- Воробьева Л.И. 2007. Археи. М.: ИКЦ «Академкнига». 447 с.
- Бажин Н.М. 2004. Теория эмиссии метана из природных источников // Болота и биосфера: Сборник материалов Третьей Научной Школы (13-16 сентября 2004 г.). Томск: Изд-во ЦНТИ. С. 38-39.
- Базин Е.Т., Копенкин В.Д., Косов В.И., Корчунов С.С., Петрович В.М. 1992. Технический анализ торфа. М.: Недра. 431 с.
- Гегузин Я.Е. 1985. Пузыри. – М.: Наука. – 176 с.
- Глаголев М.В. 2010. Эмиссия  $\text{CH}_4$  болотными почвами Западной Сибири: от почвенного профиля до региона: дис. ... канд. биол. наук. М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ).
- Глаголев М.В., Клепцова И.Е. 2009. Эмиссия метана в лесотундре: к созданию «стандартной модели» (Аа2) для Западной Сибири // Вестник Томского государственного педагогического университета. № 3. С. 77-81.
- Глаголев М.В., Сирин А.А., Лапшина Е.Д., Филиппов И.В. 2010. Изучение потоков углеродсодержащих парниковых газов в болотных экосистемах Западной Сибири // Вестник Томского государственного педагогического университета. № 3. С. 120-127.
- 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. Т. 3. №3. С. 75-114.
- Глаголев М.В., Шнырев Н.А. 2007. Динамика летне-осенней эмиссии  $\text{CH}_4$  естественными болотами (на примере юга Томской области) // Вестник Московского государственного университета. Серия 17: Почвоведение. №1. С. 8-15.
- Годнев И.Н., Краснов К.С., Воробьев Н.К., Васильева В.Н., Васильев В.П., Киселева В.Л., Белоногов К.Н. 1982. Физическая химия. М.: Высшая школа. 687 с.
- Коронатова Н.Г. 2010. Исследование разложения торфа в болотах методом инкубации сухих и влажных образцов // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 1. № 1. С. 77-84.
- Ломизе Г.М. 1951. Фильтрация в трещиноватых породах. М.-Л.: Госэнергоиздат.
- Лукнер Л., Шестаков В.М. 1986. Моделирование миграции подземных вод. М.: Недра. 208 с.
- Мастепанов М.А. 2004. Кинетика газообмена в профиле сфагнового болота: от метаногенеза к эмиссии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ. 25 с.
- Мишустин Е.Н., Емцев В.Т. 1987. Микробиология. М.: Агропромиздат. 368 с.
- Сабреков А.Ф., Глаголев М.В. 2008. К математическому моделированию микробного сообщества цикла метана // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. № S1. С. 84-97.
- Степаненко В.М., Мачульская Е.Е., Глаголев М.В., Лыков 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.
- Сутин И.А., Финн Г.Р., Зеленская Л.Н. 1973. Микробиология. М.: Медицина.
- Сысуев В.В. 1986. Моделирование процессов в ландшафтно-геохимических системах. М.: Наука.
- Шейн Е.В. 2005. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ. 432 с.
- Arah J.R.M., Stephen K.D. 1998. A model of the processes leading to methane emission from peatland // Atmospheric Environment. V. 32. No. 19. P. 3257-3264.
- Baird A.J., Beckwith C.W., Waldron S., Waddington J.M. 2004. Ebullition of methane-containing gas bubbles from near-surface *Sphagnum* peat // Geophysical Research Letters. V. 31. L21505. DOI:10.1029/2004GL021157.
- Bloch A. 2003. Murphy's law. – N.Y.: Perigee.
- Cao M., Dent J.B., Heal O.W. 1995. Modeling methane emissions from rice paddies. Global Biogeochemical Cycles, V. 9, No. 2, 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. No. D9. P. 14399-14414.
- Glagolev M.V., Golovatskaya E.A., Shnyrev N.A. 2008. Greenhouse Gas Emission in West Siberia // Contemporary Problems of Ecology. V. 1. № 1. P. 136-146.
- Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov S., Machida T. 2011. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // Environmental Research Letters. V. 6. N. 4. P. 045214. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045214.
- Golovatskaya E.A. 2010. Biological productivity of oligotrophic and eutrophic peatlands in southern taiga in Western Siberia // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 1. № 2. С. 6.
- 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. No. D8. P. 14771-14782.
- Holzapfel-Pschorn A., Seiler W. 1986. Methane Emission During a Cultivation Period From an Italian Rice Paddy // Journal of Geophysical Research. V. 91. No. D11. P. 11803-11814.
- Waddington J.M., Roulet N.T., Swanson R.V. 1996. Water table control of  $\text{CH}_4$  emission enhancement by vascular plants in boreal peatlands // Journal of Geophysical Research. V. 101. P. 22775-22785.
- 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.

## MECHANISM OF METHANE BUBBLE TRANSPORT FROM PEAT LAYER

*Glagolev M.V., Kleptsova I.E.*

*Ebullition is an important mechanism of biogenic methane liberation from the peat into the atmosphere. However, at the present time we have a lack of information about formation and movement of the gas bubbles within the surface peat layer ( $< 1$  m depth). As a result, some Russian scientists raise a question about the existence of the ebullition phenomenon at all, despite the multiple field observations. They suggest that the gas transport through the dense peat is physically impossible. In this paper, we substantiate following mechanism of methane bubble transport: under the positive pressure the channel in the peat is formed and serves as a track for methane bubbles into the atmosphere. To model the physical process of the bubble formation and movement we fill the transparent vessel by mesotrophic peat which was recently sampled from Bakchar Bog, Tomsk region. A bent tube was stucked into the central part of peat layer. The syringe with the air was connected to the upper end of the tube putting a pressure on the peat. As a result, we observed a gas discharge which visually confirm theoretical possibility of the process. It was calculated that the bubble of  $1.3 \cdot 10^{-3}$  m in radius emitting from 3 cm depth has ability to do work of  $(7.6 \pm 4.4) \cdot 10^{-5}$  J. Meanwhile, the work to track the channel in the peat (i.e. to do work against elastic forces of moss stems) was theoretically estimated at  $(3.44 \pm 1.03) \cdot 10^{-5}$  J (peat compressibility was estimated using results of the «compressive» experiment.). Thus, experimentally based calculations confirm the ebullition phenomenon existence. In the addition, we suggested that the first bubble track the way through the peat facilitating the transport of the rest bubbles through its mass. It was shown on the literature data that required for ebullition positive pressure can be produced by methanogenic archaeobacteria and do not influence on its activity. The mechanism of the bubble transport from the several decimeters depth may be similar. In this case, large volume of methane is accumulated in the peat, emitting by considerable gas release events when during short time periods (several hours or even minutes) the flux reaches  $40 \text{ gCH}_4/\text{m}^2$ .*

**Key words:** methane ebullition, gas transport in soil.

Поступила в редакцию: 25.04.2012  
Переработанный вариант: 10.06.2012