

**НАКОПЛЕНИЕ МЕТАНА
В ПРОМЕРЗАЮЩИХ И МЕРЗЛЫХ ПОЧВАХ КРИОЛИТОЗОНЫ¹**

*Г.Н. Краев**, *Е.М. Ривкина***

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
(Москва)

**Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
(Московская обл., Серпуховский район, г. Пушкино)

Несмотря на увеличение качества и количества исследований, разброс оценок эмиссии метана заболоченными землями Арктики остается и изменяется в пределах $30 \cdot 10^{12}$ г. Это связано с высокой пространственно-временной изменчивостью условий, благоприятных для биологической продукции и окисления метана, а также с факторами, определяющими диффузионный обмен между почвой и атмосферой. Так, зимний поток метана, формирующийся при промерзании почв, до недавнего времени считали пренебрежимо малым. Данные единичных измерений позволяют оценивать его вклад в годовой обмен метана между почвой и атмосферой величиной до 25 %. В настоящем исследовании показано, что часть метана задерживается в промерзшей почве. Установлены количество и продолжительность сохранения метана в промерзающих и мерзлых почвах Северо-Востока Сибири. Содержание метана в нижней части сезонноталого слоя составляло в среднем $1,4 \text{ см}^3/\text{кг}$. Концентрация метана в переходном слое многолетней мерзлоты, протаивающем в отдельные теплые годы, достигала $15 \text{ см}^3/\text{кг}$. Чтобы определить источники повышенного содержания метана в почвах, проанализирован вклад биологических и физических процессов: потенциальной продукции метана в промерзающей и мерзлой почве и криогенного отжима метана во время промерзания к кровле мерзлых пород. В формировании горизонтов с повышенным содержанием метана принимают участие как биологические, так и криогенные процессы. Метан накапливается при промерзании почвы, формируя разобщенные локализованные максимумы концентраций на участках, где условия благоприятствуют его продукции и захоронению на подошве деятельного слоя, а не распределяется равномерно. Метан может сохраняться в почве до ее оттаивания. Поток метана, образованного в сезонноталых и периодически оттаивающих горизонтах мерзлоты в условиях наблюдаемых участков, может достигать $3 \text{ г}/\text{м}^2$ в год.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, сезонное промерзание, мощность сезонноталого слоя, криолитозона, продукция метана, газообмен почвы, зимняя температура почвы.

¹Авторы выражают признательность А.Л. Холодову и Д.Г. Федорову-Давыдову за содействие в отборе образцов, а также рецензенту за конструктивные конкретизирующие замечания, позволившие сделать работу более понятной. Публикация работы поддержана оргкомитетом конференции «Папанинские чтения». Работа выполнена в рамках госзадания Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (№ 01201355191), программы Президиума РАН № 15 при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых МК-9417.2016.5.

Контактное лицо: Краев Глеб Николаевич, *адрес:* 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32; *e-mail:* kraevg@gmail.com

Для цитирования: Краев Г.Н., Ривкина Е.М. Накопление метана в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 173–184. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.173

Заболоченные земли являются одним из крупнейших материковых природных источников атмосферного метана [1]. Широкое распространение заболоченных земель и переувлажненных почв в высоких широтах обуславливается гумидным климатом и неглубоким залеганием многолетней мерзлоты, играющей роль водоупора. Застойные условия избыточного увлажнения и обилие органического вещества, препятствуя проникновению кислорода к подошве сезонноталого слоя (СТС), создают благоприятную бескислородную среду для функционирования метаногенных бактерий.

Измерениям потоков метана в наземных экосистемах Арктики посвящено множество работ [2–4]. Они свидетельствуют о высокой изменчивости потоков в пространстве и во времени, что обуславливает широкий разброс оценок пан-Арктической эмиссии – от 0 до $30 \cdot 10^{12}$ г $\text{CH}_4/\text{м}^2$ в год [4]. На пространственно-временную изменчивость потоков метана влияют биогеохимические факторы. Поток метана с поверхности почвы – продукт разнонаправленных процессов метанового цикла, осуществляемых как строго анаэробными метаногенными археями, так и аэробными метанотрофными бактериями. Существуют и физико-химические факторы, определяющие характер поступления метана из почвы в атмосферу. Растворимость метана в воде составляет 22,7 мг/л [5]. При концентрациях, превышающих растворимость, поступление метана в атмосферу обеспечивает, наряду с диффузионным, пузырьковый поток. Его вклад в суммарную эмиссию оценивается в размере от 13 до 85 % [6]. Предсказать время формирования пузырьковой составляющей потока метана из почв на большой территории практически невозможно из-за неоднородностей почвенного строения [7]. Такие спорадически возникающие струи метана вносят значительную неопределенность в оценку суммарного поступления метана в атмосферу [8].

Преградой на пути метана в атмосферу может стать лед, заполняющий поры почвы при промерзании, т. к. коэффициент диффу-

зии метана в мерзлых породах не превышает 10^{-13} м²/с [9]. Увеличение концентрации метана в деятельном слое при его промерзании наблюдалось в степях Внутренней Монголии [10] и в тайге Аляски [11]. Впоследствии она резко сокращалась, формируя мощные потоки метана в атмосферу. В Гренландии промерзание деятельного слоя сопровождалось интенсивной эмиссией метана, в 3–4 раза превышающей летние значения в отдельные сроки измерений [12, 13]. Выделение метана происходит по ослабленным зонам, где поры не полностью заполнены льдом: он просачивается по корням и стеблям сосудистых растений [14] или высвобождается в процессе образования пятен-медальонов. Суммарно зимний поток метана из промерзающего деятельного слоя оценивается в 25 % от годового потока в умеренных и арктических широтах Северного полушария [15].

Нашими наблюдениями установлено, что помимо поступления в значительных объемах в атмосферу, метан может сохраняться в промерзших горизонтах почв криолитозоны в течение всей зимы, а в горизонтах, оттаивающих реже, и более длительное время. Он поступает в биогеохимический цикл вместе с новообразованным метаном в следующий период оттаивания и не учитывается в годовом балансе метана. Целью данной работы была оценка условий формирования, объемов и продолжительности существования этого временного резервуара в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны. Для ее достижения были проведены наблюдения за распределением метана в почвах Северо-Востока Сибири после промерзания; оценена роль метаногенеза и увеличения концентрации метана за счет криогенного отжима из промерзающих горизонтов по данным расчетов, основанных на эмпирической зависимости.

Материалы и методы. Объект исследования – концентрация метана в мерзлых горизонтах почв криолитозоны. В работе использованы данные 60 опробований горизонтов почв и мерзлых пород, выполненных в 1990–2008 годах в пределах Колымской и Яно-Индигирской

низменностей (рис. 1), на 8 участках (от 2 до 11 образцов с каждого участка) расположенных вблизи площадок циркумпольной сети мониторинга деятельного слоя (CALM)², в т. ч.:

- из нижних и самых верхних горизонтов деятельного слоя, протаивающего ежегодно;
- из переходного слоя, который протаивает периодически, лишь в отдельные экстремально теплые годы или в результате нарушений и восстановительных сукцессий и т. п. [16];
- из покровного слоя, образовавшегося в результате максимального оттаивания льдистых пород ледового комплекса в голоцене и его последующего промерзания.

Почвы располагались на водораздельных поверхностях, сложенных лессовидными супесями и суглинками ледового комплекса позднего неоплейстоцена [17], в термокарстовых котловинах, сформировавшихся в голоцене в

результате вытаивания подземных льдов [18], и в поймах рек³. Поскольку структура и положение в разрезе переходного и покровного слоев близки, на водоразделах переходный слой рассматривался в составе покровного.

Образцы мерзлых почв отбирали из керна, извлеченного колонковым снарядом диаметром 107 мм и длиной от 50 до 100 см. Вращательное бурение на глубину деятельного слоя осуществляли переносной буровой установкой УКБ-12/25 (Машиностроительный завод им. В.В. Воровского, г. Екатеринбург) без применения промывки и продувки скважины. Кроме того, мерзлые образцы почвы отбирали со дна шурфов и расчисток обнажений. Содержание метана определяли методом уравнивания фаз «Headspace» [19]. Образец мерзлой почвы из центральной части керна объемом около 50 см³ взвешивали (чувствительность весов 0,1 г) и

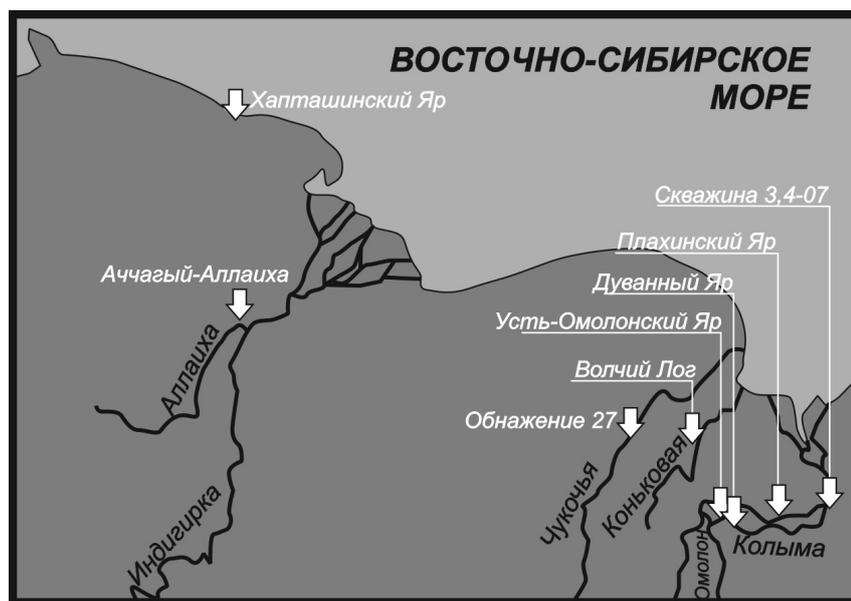


Рис. 1. Участки исследования концентрации метана в промерзшей почве и периодически оттаивающих горизонтах многолетней мерзлоты

²Circumpolar Active Layer Monitoring Summary Data Table. URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/data/north.html> (дата обращения: 01.03.2017).

³Государственная геологическая карта Российской Федерации. Карта четвертичных образований. М. 1:1 000 000. Лист R-(55)-57 (Нижнеколымск). Объяснительная записка. СПб., 2000.

помещали в промывочный шприц объемом 150 мл и ценой деления 2 мл (МИМ, г. Тюмень), заполненный 30–50 мл насыщенного раствора хлорида натрия. Шприц наполняли известным объемом азота 99,999 %. После оттаивания, интенсивного встряхивания и разрушения образца почвенный газ в смеси с азотом через шприцевую иглу методом компенсации переносили в стеклянные флаконы объемом 30 или 50 мл, полностью заполненные рассолом и закрытые пробкой из изобутиловой резины. Концентрацию метана в газовой смеси измеряли в лабораторных условиях на хроматографе ХПМ-4 (ОАО «Хроматограф», Москва) с пламенно-ионизационным детектором и водородом в качестве газа-носителя.

Хроматографические данные – площадь и высоту пика – соотносили с площадью и высотой пика после введения стандарта с концентрацией 1 % CH_4 . Значения концентрации метана в газовой смеси с азотом пересчитывали на объем газовой фазы в шприце, тем самым определяли количество вещества и его массу в стандартных термобарических условиях. Его соотносили с объемом образца мерзлой породы, который был разрушен в шприце.

В работе приводятся значения концентрации метана в отложениях, рассчитанные по средним отношениям соответствующих величин хроматографических пиков в стандарте при однократном определении в образце. С учетом точности измерений и погрешности метода [19] ошибка определения концентрации в случае максимальной наблюдаемой концентрации метана ($15 \text{ см}^3/\text{кг}$) не превышала $0,05 \text{ см}^3/\text{кг}$.

Для сопоставления измеренных концентраций на разных участках, глубину опробования нормализовали по средней многолетней глубине оттаивания и представляли в процентах. Это позволило выявить основные тенденции распределения метана в промерзших горизонтах вне зависимости от локальных условий протаивания.

Анализ источников метана выполняли путем сравнения наблюдаемых и модельных значений концентрации метана в почве. Модель концептуально представляла собой однородный столбик суглинистой почвы с температурой замерзания⁴ $-0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ с площадью сечения 100 см^2 и высотой, равной деятельному слою. Расчет продукции проводили для каждого из горизонтов толщиной 10 см. Используемое расчетное уравнение описывало продукцию метана при разной температуре охлажденных и мерзлых пород на основе лабораторного эксперимента с радиоактивно меченым субстратом $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ [20]. Оценку продукции метана в формировании наблюдаемых концентраций в промерзшей почве на участках отбора проб проводили с использованием данных мониторинга температуры почвы по глубинам CALM. Роль отжима метана при промерзании почвы в талые горизонты оценивали по суммарным объемам продукции метана в талых горизонтах за период от начала промерзания поверхности до полного промерзания почвы. Предполагали, что мерзлые горизонты непроницаемы для метана [21]. Массовые концентрации метана в мерзлых породах ($\text{см}^3/\text{кг}$) через известный объемный вес мерзлой почвы пересчитывали в концентрации в 1 дм^3 почвы.

Результаты. Основные характеристики периода промерзания и пребывания исследованных почв в мерзлом состоянии приведены для трех участков, расположенных вблизи площадок CALM (табл. 1).

Исследованные почвы имели суглинистый состав и сходные характеристики промерзания и протаивания. Средняя многолетняя мощность деятельного слоя изменялась в пределах 50 см, однако в понижениях микрорельефа она была, как правило, ниже (15–26 см), а на повышениях – выше (60–80 см). Межгодовая изменчивость средних значений лежала в пределах 15 %. Максимальное протаивание почвы наблюдалось в конце августа – начале сентября,

⁴СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Введ. 2013–01–01. Доступ из норматив. системы «NormaCS».

Таблица 1

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОМЕРЗАНИЯ И ПРОТАИВАНИЯ ПОЧВ
СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРИ (средние данные за 1999–2013 годы)**

Показатель	Участок отбора почв		
	Аччагый-Аллаиха	Обнажение 27	Усть-Омолонский Яр
Координаты (с. ш. / в. д.)	70°34'/147°26'	69°29'/156°59'	68°43'/158°54'
Состав почв	Средний суглинок	Средний суглинок	Легкий суглинок
Максимальная за год глубина протаивания, см: средняя многолетняя / средняя минимальная – средняя максимальная	47±4 / 26–69	44±4 / 21–60	41±6 / 15–82
Дата максимального протаивания	18 авг. ± 8 сут	2 сент. ± 13 сут	12 сент. ± 7 сут
Дата начала промерзания	29 сент. ± 7 сут	25 авг. – 8 окт.	30 сент. ± 4 сут
Время промерзания почвы, сут	29±4	30	42±6
Срок пребывания почвы в мерзлом состоянии, сут	243±8	233–271	230±7
Средняя температура поверхности почвы в срок пребывания в мерзлом состоянии, °С	-18,3±1,6	-18,2...-16,2	-8,2±1,5

а к началу октября начиналось ее промерзание. Промерзание длилось в тундре около месяца, а в тайге (Усть-Омолонский Яр) – до полутора месяцев. Таким образом, 2/3 года почвы пребывали в мерзлом состоянии. Температура поверхности почвы в это время была -18 °С в тундре, и на 10 °С выше в тайге.

Концентрация метана в мерзлых почвах деятельного слоя в среднем составляла $(1,4 \pm 0,3) \text{ см}^3/\text{кг}$ (рис. 2), что в 10^6 раз выше концентрации метана в атмосфере. Характерно отсутствие метана в верхних горизонтах деятельного слоя до глубины 25 см, опробованных в начале периода промерзания.

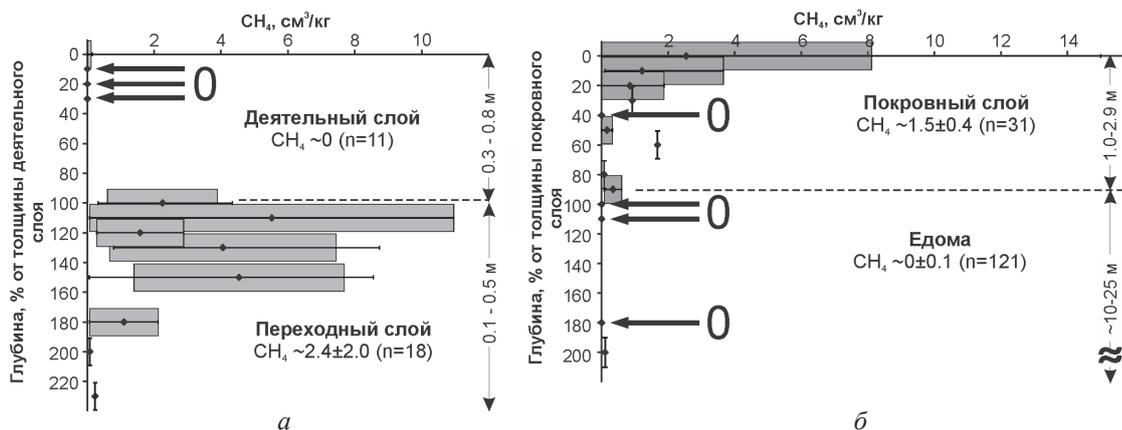


Рис. 2. Распределение средней концентрации метана по относительным глубинам в сводных разрезах почв Северо-Востока Сибири: а – в деятельном слое и периодически оттаивающем верхнем горизонте многолетней мерзлоты (переходном слое); б – в горизонте многолетнемерзлых пород, оттаивавшем в голоцене (покровном слое)

В переходном слое и в неоттаявшей части СТС наблюдались колебания концентрации метана от 0,1 до 11 см³/кг (рис. 2а). Пики концентрации характерны для горизонтов, залегающих непосредственно под подошвой СТС, в пределах 10–20 см. В слое 20–40 см, подстилающем СТС, средняя концентрация метана изменялась от 2 до 6 см³/кг. Глубже, в горизонтах переходного слоя, оттаивающих реже, она убывала.

Средняя концентрация метана в покровном слое составляла (1,5±0,4) см³/кг. Она постепенно снижалась с глубиной от (2,6±5,5) до (1,0±1,0) см³/кг, особенно заметно в верхних 40–100 см покровного слоя (рис. 2б). На больших глубинах горизонты, содержащие метан в концентрациях 0,3–1,7 см³/кг, переслаивались с горизонтами без метана.

Чтобы определить источники метана в периодически оттаивающих горизонтах почв, была рассчитана потенциальная биогенная продукция в промерзающих и мерзлых породах. Путем аппроксимации экспериментальных данных [20] были найдены два уравнения зависимости продукции метана от температуры (с коэффициентами детерминации $R^2 > 0,9$):

для талых, охлаждающихся почв

$$P = 0,0009T + 0,0104;$$

для мерзлых почв

$$P = 0,0061e^{0,3395T},$$

где P – продукция метана, см³/кг·сут; T – среднесуточная температура почвы, °С.

Результат моделирования – массив данных по изменениям концентрации метана в почвенном разрезе за счет продукции в промерзающей и мерзлой почве. В качестве примера рассмотрим динамику изменения концентрации метана на отдельно взятом участке в репрезентативный год (рис. 3). Метан с первого дня промерзания накапливался в талых горизонтах почвы, перекрытых промерзшим слоем, со скоростью порядка 0,015 см³/кг·сут почти равномерно по всему профилю. За месяц промерзания в талой почве продуцировалось 0,82 см³ метана. После промерзания, с понижением температуры почвы продукция резко сокращалась до 0,008 см³/кг, а при температуре ниже –6,5 °С она была менее 0,001 см³/кг. В нижних горизонтах промерзшей почвы на глубине 0,5–0,6 м она была закономерно (как и температура) выше, чем на 0,1–0,2 м. Чтобы оценить продукцию именно в промерзающей и мерзлой почве, в нашей модели с началом отта-

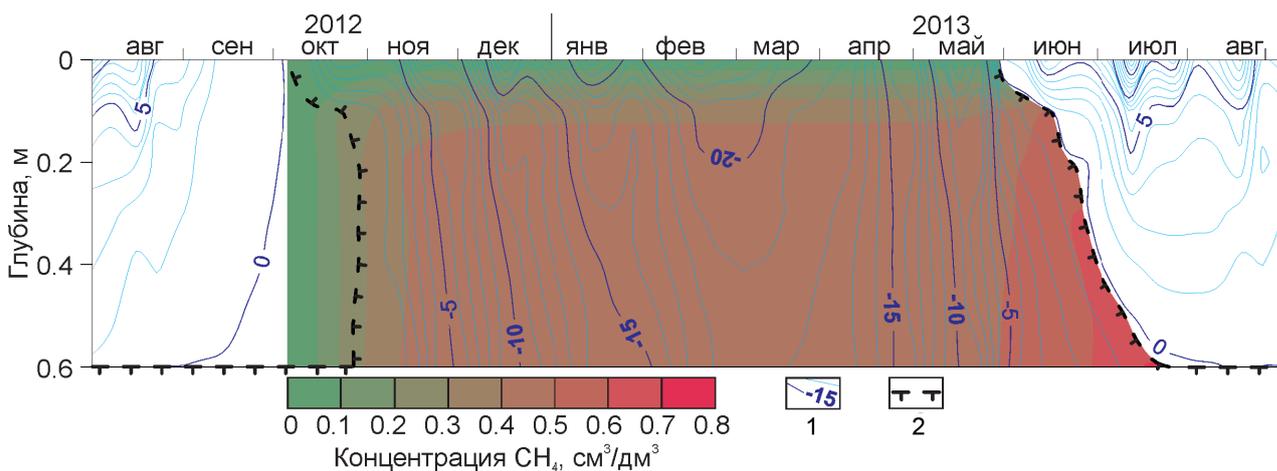


Рис. 3. Изменение температуры почвы и концентрации метана (по данным расчетов продукции метана) по глубинам в 2012–2013 годах на участке Аччагый-Аллаиха: 1 – изотермы; 2 – положение кровли мерзлых пород

ивания продуцирование метана прекращалось, а метан из протаявших горизонтов мигрировал в атмосферу. Таким образом, продуцирование метана продолжалось до полного оттаивания СТС, что является одной из причин существования у его подошвы максимума концентрации. Другим процессом, учтенным в нашей модели, являлось концентрирование у подошвы СТС метана, спродуцированного в талой почве при промерзании.

Аналогичные расчеты проведены для всех лет и площадок, где осуществлялись исследования концентрации метана и мониторинг температуры почвы по глубинам. Результаты представлены в *табл. 2*.

Согласно результатам моделирования, около 2/3 массы метана, накапливаемого за период промерзания и пребывания почв в мерзлом состоянии, продуцировалось при отрицательных температурах. Оставшиеся ~30 % массы метана продуцировались во время промерзания почв. В течение зимы в почвах Северо-

Востока Сибири формируется 2–3 г/м² метана при мощности СТС 50–60 см и около 1 г/м² в СТС мощностью 30 см. В рассмотренных почвах Северо-Востока Сибири значения расчетной продукции метана и средней наблюдаемой концентрации метана в периодически оттаивающих слоях почвы (см. *рис. 2*) были одного порядка. Однако наблюдаемая концентрация метана могла быть как существенно ниже расчетной, так и многократно выше. Расчетная продукция метана на подошве СТС была значимо ниже средней наблюдаемой концентрации метана в периодически оттаивающих горизонтах.

Обсуждение. Отсутствие метана в верхних горизонтах промерзшей почвы может объясняться лучшей аэрацией и благоприятными условиями для аэробного метаноокисления [22], выделением метана в атмосферу или отжимом метана при промерзании [23]. Последний механизм также объясняет существование максимума концентрации метана на подошве СТС.

Таблица 2

**РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ БИОГЕННОЙ ПРОДУКЦИИ МЕТАНА
В ПРОМЕРЗАЮЩИХ И МЕРЗЛЫХ ПОЧВАХ СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРИ
(средние данные за 1998–2013 годы)**

Показатель	Участок отбора почв		
	Аччагый-Аллаиха	Обнажение 27	Усть-Омолонский Яр
Глубина СТС на момент отбора, см	80	70	50
Наблюдаемая концентрация метана ниже подошвы СТС на момент отбора, см ³ /кг	0,1	15,0	0
Объемный вес мерзлой почвы, г/см ³	1,44	1,6	1,73
Глубина СТС на участке мониторинга температуры, см	60	50	30
Суммарное расчетное содержание метана в СТС на момент полного промерзания, см ³	1,4±0,3*	1,3	0,5±0,1*
Максимальная расчетная концентрация на подошве СТС на момент оттаивания, см ³ /кг	0,5±0*	0,8±0,3*	0,4±0,1*
Суммарное расчетное содержание метана, образованного в промерзшем СТС, см ³	2,4	1,9±0,8*	1,2±0,2*
Расчетные запасы биогенного метана в мерзлой почве, г/м ²	2,7	2,3±0,6*	1,2±0,1*

Примечание: * – среднеквадратическое отклонение.

Оттаивание верхних слоев переходного слоя происходит не каждый сезон, в соответствии с естественной климатической циклическостью и закономерностями сукцессии [16]. С увеличением глубины частота протаивания уменьшается – от одного раза в год до одного раза за десятки-сотни лет в зависимости от повторяемости экстремально теплых сезонов или катастрофических изменений почвенных и растительных условий. Протаивание до подошвы покровного слоя происходило во время голоценового оптимума. Таким образом, метан сохраняется в промерзших слоях почвы на протяжении от сезона до тысяч лет. Максимумы концентрации метана наблюдаются вблизи современной подошвы деятельного слоя, т. е. в горизонтах, оттаивающих чаще.

Как показывают результаты моделирования (см. табл. 2), средние значения концентрации метана у подошвы СТС – около $2 \text{ см}^3/\text{кг}$ (см. рис. 2а) – не могут формироваться лишь за счет продукции в этом слое в мерзлом состоянии. Однако и с учетом процесса отжима метана из деятельного слоя не во всех случаях можно объяснить наблюдаемые концентрации на подошве СТС (например, на участке Обнажение 27). Такие локальные максимумы концентрации могут сформироваться в случае, когда метан продуцируется и накапливается в мерзлых слоях, не оттаивая в течение нескольких лет. Также это может происходить там, где при промерзании происходит отжим метана из почв в некоторой области вокруг участка наблюдаемого максимума.

Например, для формирования концентрации $15 \text{ см}^3/\text{кг}$ ($24 \text{ см}^3/\text{дм}^3$ в пределах 1 дм^2) на участке Обнажение 27 потребовался биогенный метан не только из промерзающего вышележащего модельного столбика почвы объемом 5 дм^3 , но еще из 11-12 соседних. Вероятно, в месте измерения концентрации существовали благоприятные условия для накопления газа – микропонижение кровли мерзлых пород или иная литологическая ловушка, затрудняющая выделение или окисление метана. Альтерна-

тивной версией может быть накопление наблюдаемого количества метана в течение 18 лет, пока этот мерзлый горизонт не оттаивал. Интересно, что лето 1987 года (за 18 лет до измерения) было действительно аномально теплым, и некоторое количество метана из деятельного слоя могло быть захоронено в переходном слое в случае его протаивания.

Стоит заметить, что оценки продукции метана, основанные на лабораторных экспериментах с радиоактивно мечеными субстратами [20], получены в исключительно благоприятных условиях для метаногенеза: при строгом анаэробии и доступности субстрата. Оценка продукции метана, основанная на этих данных, определенно завышена.

В данной работе не приводятся данные о зависимости концентрации метана от химических свойств почв, содержания общего углерода, льдистости, гранулометрического состава. Такие зависимости при рассмотрении всех имеющихся в нашем распоряжении данных о концентрации метана в мерзлых породах (около 800 образцов) нами обнаружены не были [24]. Для определения влияния физических и химических свойств почв на концентрацию метана в СТС и других периодически оттаивающих горизонтах необходимо проведение дополнительных специальных исследований.

Выводы:

1. Средняя концентрация метана в СТС и периодически оттаивающих горизонтах в кровле многолетнемерзлых пород Северо-Востока Сибири составляет $1,4 \text{ см}^3/\text{кг}$. Локально, в условиях, благоприятных для биогенной продукции и сохранения метана в мерзлых почвах, формируются максимумы концентрации до $15 \text{ см}^3/\text{кг}$.

2. Метаногенез в промерзающей и мерзлой почве и криогенный отжим метана к подошве деятельного слоя объясняют 30–100 % концентрации метана в периодически оттаивающих горизонтах почв. Таким образом, вклад метана, сформированного в промерзающих и мерзлых почвах, в годовой поток составляет не более $1\text{--}3 \text{ г}/\text{м}^2$.

3. Такой порядок значений может объяснять выбросы метана зимой в период формирования морозобойных трещин или пятен-медальонов. Во время оттаивания деятельного слоя и более глубоких, реже оттаивающих слоев почв этот метан может поступать в регулярный газообмен между почвой и атмосферой или поглощаться метанотрофами, увеличивая неопределенность баланса парниковых газов.

Список литературы

1. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
2. Sachs T., Wille C., Boike J., Kutzbach L. Environmental Controls on Ecosystem-Scale CH₄ Emission from Polygonal Tundra in the Lena River Delta, Siberia // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2008. Vol. 113, iss. G3.
3. Кривенко Л.А., Глаголев М.В., Фастовец И.А., Смоленцев Б.А., Максютов Ш.Ш. Удельные потоки метана из экосистем южной тундры Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2014. Т. 5, № 1(9). С. 1–17.
4. McGuire A.D., Christensen T.R., Hayes D., Heroult A., Euskirchen E., Kimball J.S., Koven C., Lafleur P., Miller P.A., Oechel W., Peylin P., Williams M., Yi Y. An Assessment of the Carbon Balance Of Arctic Tundra: Comparisons Among Observations, Process Models, and Atmospheric Inversions // Biogeosciences. 2012. Vol. 9, iss. 8. P. 3185–3204.
5. Clever H.L., Young C.L. Methane. Oxford, England: Pergamon Press, 1987. 783 p. (Solubility Data Series, vol. 27–28).
6. Глаголев М.В., Клепцова И.Е. К вопросу о механизме выхода пузырьков метана из торфяника // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2012. Т. 3, № 3. С. 54–63.
7. Ramirez J.A., Baird A.J., Coulthard T.J. The Effect of Pore Structure on Ebullition from Peat // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2016. Vol. 121, iss. 6. P. 1646–1656.
8. Liu L., Wilkinson J., Koca K., Buchmann C., Lorke A. The Role of Sediment Structure in Gas Bubble Storage and Release // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2016. Vol. 121, iss. 7. P. 1992–2005.
9. Rivkina E., Gilichinsky D., McKay C., Dallimore S. Methane Distribution in Permafrost: Evidence for an Interpore Pressure Methane Hydrate // Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 2001. P. 487–496.
10. Wolf B., Chen W., Brüggemann N., Zheng X., Pumpanen J., Butterbach-Bahl K. Applicability of the Soil Gradient Method for Estimating Soil–Atmosphere CO₂, CH₄, and N₂O Fluxes for Steppe Soils in Inner Mongolia // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2011. Vol. 174, № 3. P. 359–372.
11. Kim Y., Ueyama M., Nakagawa F., Tsunogai U., Harazono Y., Tanaka N. Assessment of Winter Fluxes of CO₂ and CH₄ in Boreal Forest Soils of Central Alaska Estimated by the Profile Method and the Chamber Method: A Diagnosis of Methane Emission and Implications for the Regional Carbon Budget // Tellus. Ser. B: Chemical and Physical Meteorology. 2007. Vol. 59, № 2. P. 223–233.
12. Mastepanov M., Christensen T.R. Bimembrane Diffusion Probe for Continuous Recording of Dissolved and Entrapped Bubble Gas Concentrations in Peat // Soil Biology and Biochemistry. 2008. Vol. 40, № 12. P. 2992–3003.
13. Tagesson T., Mölder M., Mastepanov M., Falk J.M., Lindroth A., Christensen T.R., Ström L., Sigsgaard C., Tamstorf M.P., Lund M. Land-Atmosphere Exchange of Methane from Soil Thawing to Soil Freezing in a High-Arctic Wet Tundra Ecosystem // Global Change Biology. 2012. Vol. 18, № 6. P. 1928–1940.
14. Kutzbach L., Wagner D., Pfeiffer E.-M. Effect of Microrelief and Vegetation on Methane Emission from Wet Polygonal Tundra, Lena Delta, Northern Siberia // Biogeochemistry. 2004. Vol. 69, № 3. P. 341–362.
15. Zona D., Gioli B., Commane R., Lindaas J., Wofsy S.C., Miller C.E., Dinardo S.J., Dengel S., Sweeney C., Karion A., Chang R.Y.-W., Henderson J.M., Murphy P.C., Goodrich J.P., Moreaux V., Liljedahl A., Watts J.D., Kimball J.S., Lipson D.A., Oechel W.C. Cold Season Emissions Dominate the Arctic Tundra Methane Budget // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2016. Vol. 113, № 1. P. 40–45.

16. Shur Yu., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Transient Layer: Implications for Geocryology and Climate-Change Science // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2005. Vol. 16, iss. 1. P. 5–17.
17. Murton J.G., Goslar T., Edwards M.E., Bateman M.D., Danilov P.P., Savvinov G.N., Gubin S.V., Ghaleb B., Haile J., Kanevskiy M., Lozhkin A.V., Lupachev A.V., Murton D.K., Shur Yu., Tikhonov A., Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Yu.K., Wolfe S.A. Palaeoenvironmental Interpretation of Yedoma Silt (Ice Complex) Deposition as Cold-Climate Loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2015. Vol. 26, iss. 3. P. 208–288.
18. Каплина Т.Н. Аласные комплексы Северной Якутии // *Криосфера Земли*. 2009. Т. XIII, № 4. С. 3–17.
19. McAuliffe C. GC Determination of Solutes by Multiple Phase Equilibration // *Chem. Tech.* 1971. № 1. P. 46–51.
20. Ривкина Е.М., Лауринавичюс К.С., Гуличинский Д.А., ЩербакOVA В.А. Метанообразование в вечномёрзлых отложениях // *Докл. Акад. наук*. 2002. Т. 383, № 6. С. 830–833.
21. Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // *Криосфера Земли*. 1998. Т. II, № 4. С. 42–50.
22. Samarkin V.A., Fedorov-Davydov D.G., Vecherskaya M.S., Rivkina E.M. CO₂ and CH₄ Emission on Cryosols and Subsoil Permafrost Possible Global Climate Change // *Soil Processes and Greenhouse Effect*. Lincoln, USA: US National Soil Survey Center, 1994. P. 55–71.
23. Краев Г.Н., Шульце Э.-Д., Ривкина Е.М. Криогенез как фактор распределения метана в горизонтах мерзлых пород // *Докл. Акад. наук*. 2013. Т. 451, № 6. С. 684–687.
24. Краев Г.Н. Закономерности распространения метана в многолетнемерзлых породах на Северо-Востоке России и прогноз его поступления в атмосферу: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2010. 131 с.

References

1. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, England, Cambridge University Press, 2007. 996 p.
2. Sachs T., Wille C., Boike J., Kutzbach L. Environmental Controls on Ecosystem-Scale CH₄ Emission from Polygonal Tundra in the Lena River Delta, Siberia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, vol. 113, iss. G3.
3. Krivenok L.A., Glagolev M.V., Fastovets I.A., Smolentsev B.A., Maksyutov Sh.Sh. Udel'nye potoki metana iz ekosistem yuzhnoy tundry Zapadnoy Sibiri [Methane Fluxes from South Tundra Ecosystems of West Siberia]. *Dinamika okruzhayushchey sredy i global'nye izmeneniya klimata* [Environmental Dynamics and Global Climate Change], 2014, vol. 5, no. 1(9), pp. 1–17.
4. McGuire A.D., Christensen T.R., Hayes D., Heroult A., Euskirchen E., Kimball J.S., Koven C., Lafleur P., Miller P.A., Oechel W., Peylin P., Williams M., Yi Y. An Assessment of the Carbon Balance of Arctic Tundra: Comparisons Among Observations, Process Models, and Atmospheric Inversions. *Biogeosciences*, 2012, vol. 9, iss. 8, pp. 3185–3204.
5. Clever H.L., Young C.L. Methane. *Solubility Data Series, Vol. 27-28*. Oxford, England, Pergamon Press, 1987. 783 p.
6. Glagolev M.V., Kleptsova I.E. K voprosu o mekhanizme vykhoda puzyr'kov metana iz torfyanika [Mechanism of Methane Bubble Transport from Peat Layer]. *Dinamika okruzhayushchey sredy i global'nye izmeneniya klimata* [Environmental Dynamics and Global Climate Change], 2012, vol. 3, no. 3, pp. 54–63.
7. Ramirez J.A., Baird A.J., Coulthard T.J. The Effect of Pore Structure on Ebullition from Peat. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, vol. 121, iss. 6, pp. 1646–1656.
8. Liu L., Wilkinson J., Koca K., Buchmann C., Lorke A. The Role of Sediment Structure in Gas Bubble Storage and Release. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, vol. 121, iss. 7, pp. 1992–2005.
9. Rivkina E., Gilichinsky D., McKay C., Dallimore S. Methane Distribution in Permafrost: Evidence for an Enterpore Pressure Methane Hydrate. *Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources*. Ed. by R. Paepe, V. Melnikov. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publ., 2001, pp. 487–496.
10. Wolf B., Chen W., Bruggemann N., Zheng X., Pumpanen J., Butterbach-Bahl K. Applicability of the Soil Gradient Method for Estimating Soil–Atmosphere CO₂, CH₄, and N₂O Fluxes for Steppe Soils in Inner Mongolia. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, vol. 174, no. 3, pp. 359–372.
11. Kim Y., Ueyama M., Harazono Y., Tanaka N., Nakagawa F., Tsunogai U. Assessment of Winter Fluxes of CO₂ and CH₄ in Boreal Forest Soils of Central Alaska Estimated by the Profile Method and the Chamber Method: a Diagnosis of Methane Emission and Implications for the Regional Carbon Budget. *Tellus. Ser. B: Chemical and Physical Meteorology*, 2007, vol. 59, no. 2, pp. 223–233.

12. Mastepanov M., Christensen T.R. Bimembrane Diffusion Probe for Continuous Recording of Dissolved and Entrapped Bubble Gas Concentrations in Peat. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, vol. 40, no. 12, pp. 2992–3003.
13. Tagesson T., Mölder M., Mastepanov M., Falk J.M., Lindroth A., Christensen T.R., Ström L., Sigsgaard C., Tamstorf M.P., Lund M. Land-Atmosphere Exchange of Methane from Soil Thawing to Soil Freezing in a High-Arctic Wet Tundra Ecosystem. *Global Change Biology*, 2012, vol. 18, no. 6, pp. 1928–1940.
14. Kutzbach L., Wagner D., Pfeiffer E.-M. Effect of Microrelief and Vegetation on Methane Emission from Wet Polygonal Tundra, Lena Delta, Northern Siberia. *Biogeochemistry*, 2004, vol. 69, no. 3, pp. 341–362.
15. Zona D., Gioli B., Commane R., Lindaas J., Wofsy S.C., Miller C.E., Dinardo S.J., Dengel S., Sweeney C., Karion A., Chang R.Y.-W., Henderson J.M., Murphy P.C., Goodrich J.P., Moreaux V., Liljedahl A., Watts J.D., Kimball J.S., Lipson D.A., Oechel W.C. Cold Season Emissions Dominate the Arctic Tundra Methane Budget. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, vol. 113, no. 1, pp. 40–45.
16. Shur Yu., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Transient Layer: Implications for Geocryology and Climate-Change Science. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2005, vol. 16, iss. 1, pp. 5–17.
17. Murton J.G., Goslar T., Edwards M.E., Bateman M.D., Danilov P.P., Savvinov G.N., Gubin S.V., Ghaleb B., Haile J., Kanevskiy M., Lozhkin A.V., Lupachev A.V., Murton D.K., Shur Yu., Tikhonov A., Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Yu.K., Wolfe S.A. Palaeoenvironmental Interpretation of Yedoma Silt (Ice Complex) Deposition as Cold-Climate Loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2015, vol. 26, iss. 3, pp. 208–288.
18. Kaplina T.N. Alasnye komplekсы Severnoy Yakutii [Alas Complex of North Yakutia]. *Kriosfera Zemli* [Earth Cryosphere], 2009, vol. XIII, no. 4, pp. 3–17.
19. McAuliffe C. GC Determination of Solutes by Multiple Phase Equilibration. *Chem. Tech.*, 1971, no. 1, pp. 46–51.
20. Rivkina E.M., Laurinavichus K.S., Gilichinsky D.A., Shcherbakova V.A. Methane Generation in Permafrost Sediments. *Doklady Biological Sciences*, 2002, vol. 383, no. 1-6, pp. 179–181.
21. Are F.E. Problema emissii glubinnykh gazov v atmosferu [Emission Problem of Deep Gases into the Atmosphere]. *Kriosfera Zemli* [Earth Cryosphere], 1998, vol. II, no. 4, pp. 42–50.
22. Samarkin V.A., Fedorov-Davydov D.G., Vecherskaya M.S., Rivkina E.M. CO₂ and CH₄ Emission on Cryosols and Subsoil Permafrost Possible Global Climate Change. *Soil Processes and Greenhouse Effect*. Lincoln, USA, US National Soil Survey Center, 1994, pp. 55–71.
23. Kraev G.N., Schultze E.-D., Rivkina E.M. Cryogenesis as a Factor of Methane Distribution in Layers of Permafrost. *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 451, iss. 2, pp. 882–885.
24. Kraev G.N. *Zakonomernosti rasprostraneniya metana v mnogoletnemerzlykh porodakh na Severo-Vostoke Rossii i prognoz ego postupleniya v atmosferu: dis. ... kand. geogr. nauk* [Regularities of Methane Distribution in Permafrost in the North-East of Russia and the Forecast of Its Release into the Atmosphere: Cand. Geogr. Sci. Diss.]. Moscow, 2010. 131 p.

DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.173

Gleb N. Kraev*, Elizaveta M. Rivkina**

*Centre of Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russian Federation)

**Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences
(Moscow Region, Serpukhov District, Pushchino, Russian Federation)

ACCUMULATION OF METHANE IN PERMAFROST-AFFECTED SOILS OF CRYOLITHOZONE

Estimates of methane emission from Arctic wetlands remain highly uncertain, despite the increase in the quality and quantity of research. It is associated with high spatio-temporal variability of conditions favorable for biological methane production and oxidation, as well as with factors that determine

diffusional transfer between soil and atmosphere. Thus, winter flux of methane, formed in conditions of soil freezing, is considered negligible. The data of single measurements make it possible to estimate its contribution to the annual methane exchange between the soil and the atmosphere of up to 25 %. We can confirm that part of methane is retained in the frozen soil. The amount and duration of methane conservation in permafrost-affected soils of northeastern Siberia are established. The methane content in the lower part of the seasonally thawed layer is on the average 1.4 cm³/kg. The concentration of methane in the transition layer of permafrost, thawing in certain warm years, reaches 15 cm³/kg. We have analyzed the contribution of biological and physical processes to identify possible sources of increased methane content: potential methane production in permafrost-affected soil and cryogenic squeezing of methane during freezing to the top of frozen soils. Both biological and cryogenic processes take part in the formation of horizons with a high content of methane. Methane accumulates during soil freezing, forming disjointed localized concentration maxima in areas where conditions favor its production and retention on the base of the active layer, rather than being distributed evenly. Methane can be stored in soil before its thawing. The flux of methane formed in seasonal and periodically thawed permafrost horizons under the conditions of the observed areas can reach 3 g/m² per year.

Keywords: *permafrost, soil seasonal freezing, seasonally thawed layer thickness, cryolithorone, methane production, soil gas exchange, winter soil temperature.*

Поступила 22.03.2017
Received on March 22, 2017

Corresponding author: Gleb Kraev, *address:* ul. Profsoyuznaya, 84/32, Moscow, 117997, Russian Federation; *e-mail:* kraevg@gmail.com

For citation: Kraev G.N., Rivkina E.M. Accumulation of Methane in Permafrost-Affected Soils of Cryolithozone. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 173–184. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.173