

СУММАРНАЯ ЭМИССИЯ МЕТАНА НА КРУПНОБУГРИСТОМ БОЛОТЕ КРАЙНЕСЕВЕРНОЙ ТАЙГИ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА

М.Н. Мигловец, С.В. Загирова, Н.Н. Гончарова, О.А. Михайлов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар

E-mail: miglovets@ib.komisc.ru

Аннотация. В работе представлены результаты измерений потоков метана с поверхности крупнобугристого болота крайнесеверной тайги. Установлены факторы, регулирующие интенсивность эмиссии CH_4 в основных типах сообществ исследованного участка болота. Сезонная динамика потоков метана на болоте смоделирована с использованием регрессионных уравнений. Суммарная эмиссия метана за сезон в пушицево-сфагновых мочажинах составила 11.8-13.7 гС- CH_4 м⁻². Слабым источником поступающего в атмосферу метана были торфяные пятна на мерзлотном бугре (0.5 гС- CH_4 м⁻²), а кустарничково-лишайниковые сообщества характеризовались незначительным стоком (-0.5 гС- CH_4 м⁻²). Были получены сходные результаты оценки суммарной эмиссии метана с использованием медианы скорости потоков и регрессионных уравнений.

Ключевые слова: крупнобугристое болото, потоки метана, мерзлотный бугор

Введение

Торфяные болота занимают 19% территории криолитозоны, а запасы почвенного углерода в них составляют 277.3 Пг (Soil..., 2009). Торфяные почвы являются источником природного метана, образующегося в процессе метаболизма метаногенных архей в анаэробных условиях. Имеющиеся в литературе данные свидетельствуют о значительной эколого-географической вариабельности эмиссии метана в атмосферу в болотных экосистемах Субарктики. Так, суммарное поступление метана в атмосферу из мерзлых болот Финляндии зависело от типа ландшафта и варьировало от 0.1 до 32.4 гС- CH_4 м⁻² в год (Annual..., 2003). На бугристых болотах Аляски в мочажинах суммарная эмиссия соответствовала 7.5 гС- CH_4 м⁻² в год, а на буграх поток метана был направлен из атмосферы в сообщества растений (Controls..., 1996). В тундровых болотах Республики Коми за вегетационный сезон эмиссия метана менялась от 0.2 до 13.6 гС- CH_4 м⁻² (Carbon..., 2004).

Для количественной оценки суммарного потока метана чаще всего используют математические модели, основываясь на результатах камерных измерений. В этом случае точность оценки зависит от количества и качества эмпирических данных, использованных в модели. В работе Г.Г. Суворова и М.В. Глаголева (2007) обоснован принцип расчета суммарной величины потока метана по медиане за сезон для болота подзоны средней тайги. Показана слабая чувствительность медианы к отклонениям от стандартных условий и высокая ее эффективность для широкого класса распределений. Полученные авторами результаты адекватно отражали имеющиеся эмпирические данные по эмиссии метана на среднетаежных болотах.

Как показал анализ литературы, основным методом заполнения пропусков во временных рядах измерений является использование регрес-

сионных уравнений. При этом значение суммарной величины может существенно варьировать в зависимости от качества использованной модели. Основными переменными в парных и множественных регрессионных моделях для субарктических болот являются температурные условия торфяной залежи, глубина залегания болотных вод, минерализация, глубина сезонно-талого горизонта.

Цель нашего исследования состояла в количественной оценке суммарного за сезон поступления метана в атмосферу с поверхности крупнобугристого болота крайнесеверной тайги с использованием регрессионных уравнений зависимости скорости эмиссии от экологических факторов и медианы значений сезонной эмиссии метана.

Материалы и методы

Исследования проведены в Интинском районе Республики Коми в июне-августе 2016 г. В качестве объекта был выбран комплекс крупнобугристого болота в урочище Кулицанюр (65°54'10" с.ш., 60°26'40" в.д.) на водоразделе рек Черной и Большой Инты. Для данного болота характерны два основных типа мезоландшафта (фаций): 1) грядово-мочажинный; 2) мерзлотные торфяные бугры высотой до 4 м. На буграх формируются сухоторфяные мерзлотные почвы (Cryic Follic Histosol). В табл. 1 представлена характеристика сообществ растений на этих участках исследованного болота.

Температуру торфяной залежи регистрировали датчиками S-TMB-M006 с погрешностью ±0.2 °С фирмы Onset (США), установленными на бугре под таллом лишайников (температура поверхности залежи) и на глубину 20 см. В мочажине температуру регистрировали на глубинах 5 и 25 см. Для определения содержания влаги в торфе бугра использовали датчики S-SMC-M005 (погрешность ±3.1%), температуру и влажность атмосферного воздуха измеряли датчиками S-TNB-

Таблица 1

Характеристика исследованного участка крупнобугристого болота (общая площадь – 11.8 га)

| Тип сообщества | Фация | Доминирующие виды | Доля от общей площади (%) |
|---|------------------------------------|--|---------------------------|
| Кустарничково-сфагновое (КСФС) | Олиготрофная грядово-мочажинная | <i>Ledum palustre</i> L., <i>Vaccinium uliginosum</i> L., <i>Empetrum hermaphroditum</i> Hagerup., <i>Rubus chamaemorus</i> L., <i>Sphagnum fuscum</i> (Schimp.) H.Klinggr. | 33 |
| Пушицево-сфагновое (ПСФС) | | <i>Eriophorum russeolum</i> Fries., <i>Carex limosa</i> L., <i>C. rotundata</i> Wahlenb., <i>Sphagnum lindbergii</i> Schimp., <i>S. riparium</i> Engstr. | 31 |
| Торфяное пятно (ТП) | Мерзлотный | Растения отсутствуют | 5.5 |
| Лишайниковое и кустарничково-лишайниковое (КЛС) | сухоторфяной бугор | <i>Ledum palustre</i> L., <i>Vaccinium uliginosum</i> L., <i>Betula nana</i> L., <i>Empetrum hermaphroditum</i> H., <i>Cladonia arbuscula</i> (Wallr.) Flot., <i>C. coccifera</i> (L.) Willd., <i>C. gracilis</i> (L.) Willd., <i>C. rangiferina</i> (L.) F. H. Wigg. | 23 |

M002 (± 0.21 °C/ $\pm 2.5\%$ RH). Глубину сезонно-талого слоя (СТС) определяли металлическим щупом. Сезонный ход формирования СТС был смоделирован с использованием уравнения:

$СТС = 0.0128 \cdot DDT$; $R^2 = 0.98$ при $p < 0.000$, (1) где СТС – глубина сезонно-талого слоя (см), DDT – накопленная сумма положительных температур воздуха (°C).

Уровень болотных вод и давление атмосферного воздуха определяли датчиками Baro/Diver фирмы Schlumberger Water Services (Нидерланды). Реализация статистического анализа и построение регрессионных уравнений выполнены в среде STATISTICA (StatSoft inc., США) при заданном уровне достоверности 95%. Площадь исследованных сообществ в мезоландшафте болота, указанных в табл. 1, рассчитана с использованием космоснимков Landsat. На исследованной территории болота 7.1% площади занимали открытые водные пространства (озерки и ручьи) и лесные массивы.

Для измерений удельного потока метана использовали темную металлическую камеру объемом 0.1 м³, которую устанавливали на металлическое основание (0.25 м³). Время экспозиции составляло 20 мин. Количество измерений за летний период на торфяных пятнах составило 19 (число повторностей $n = 3$), в кустарничково-лишайниковых сообществах бугра – 30 ($n = 5$), травянистых мочажинах – 23 ($n = 3$), на кустарничково-сфагновых грядах – 22 ($n = 3$). Объемную долю метана в воздухе камеры измеряли газоанализатором GGA-30p (Los Gatos Research, США). Удельный поток метана рассчитывали с использованием уравнения:

$$F_{CH_4} = PV \cdot M / (R \cdot (273 + T) \cdot A) \cdot k, \quad (2)$$

где F_{CH_4} – поток метана (мкгС-CH₄ м⁻²с⁻¹), P – атмосферное давление на момент измерения (Па), V – объем камеры (м³), M – молярная масса метана (16.043 г моль⁻¹), R – универсальная газовая постоянная (8.314472 Па м³ моль⁻¹ К⁻¹), T – температура внутри камеры на момент измерения (°C), A – площадь рамы, ограничивающей

поверхность (м²), k – коэффициент наклона линейной функции изменения концентрации газа во времени, вида $kx + b$ (ppm с⁻¹).

Для оценки суммарного потока метана за сезон (июнь-сентябрь) использовали два метода, представленные уравнениями 3 и 4:

$$F_{tot} = \sum_{i=1}^n F_i \cdot R, \quad (3)$$

где F_{tot} – суммарный поток за n дней (гС-CH₄ м⁻²), F_i – средний за сутки поток CH₄, восстановленный по регрессионным уравнениям (табл. 2) (мкгС-CH₄ м⁻² с⁻¹), R – коэффициент перевода мкг м⁻² с⁻¹ в г м⁻² сут⁻¹, равный 0.0864. Ошибку F_{tot} рассчитывали по уравнению 3, в этом случае F_i соответствовала стандартной ошибке регрессионного уравнения;

$$F_{tot} = Me \cdot R \cdot n, \quad (4)$$

где F_{tot} – суммарный поток за n дней (гС-CH₄ м⁻²), Me – медиана потока за сезон (мкгС-CH₄ м⁻² с⁻¹), R – конверсионный коэффициент, n – количество дней в расчетном периоде. За ошибку принято доверительное значение для медианы.

В обоих вариантах расчета число дней соответствовало 104 сут.

Результаты

В периоды наблюдений 2016 г. в районе исследования отмечена аномально теплая погода с недобором осадков в мае и июле. Температура в июле превысила среднегодовую норму на 6.5 °C. В сезонной динамике максимальные значения температуры поверхности торфяного бугра наблюдали в июле, а на глубине 20 см – во второй декаде августа (рис. 1). В 2016 г. температура СТС в летний период была в два раза выше, чем в 2014-2015 гг. В связи с этим в июле-августе отмечено значительное снижение содержания влаги в верхнем горизонте торфа на бугре до 13% (рис. 1). Глубина СТС на бугре постепенно увеличивалась в июне-августе и составила 77 см в сентябре. Уровень болотных вод в пушицево-сфагновой мочажине в июле снизился до 25 см (рис. 1).

С июня по август 2016 г. медиана дневных значений скорости эмиссии метана составила

Регрессионные уравнения зависимости эмиссии CH₄ от экологических факторов

| Тип сообществ | Регрессионное уравнение | b | a ₁ | a ₂ | a ₃ | R ² | p |
|---------------|---|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| ТП | b+a ₁ СТС-a ₂ Тп(15 см)-a ₃ WC | 0.35 | 0.001 | 0.007 | 1.26 | 0.56 | 0.007 |
| КЛС | b-a ₁ WC-a ₂ СТС+a ₃ Тп(15 см) | 0.25 | 0.43 | 0.006 | 0.03 | 0.73 | 0.003 |
| ПСФС | b-a ₁ УБВ+a ₂ Рв+a ₃ Тв | -96.8 | 0.1 | 0.96 | 0.08 | 0.56 | 0.001 |
| КСФС | b+a ₁ ФАР+a ₂ Тп(5 см) | -0.12 | 0.0003 | 1.2 | - | 0.54 | 0.001 |

Примечание. Здесь и далее типы сообществ соответствуют описаниям в табл. 1. СТС – глубина сезонно-талого слоя (см), Тп (15 см) – температура торфа на глубине 15 см, WC – объемное содержание влаги в торфе (%), УБВ – уровень болотных вод (см), Рв – давление атмосферного воздуха (гПа), Тв – температура воздуха (°С), ФАР – интенсивность фотосинтетической активной радиации (мкмоль м⁻² с⁻¹), Тп (5 см) – температура поверхности (°С).

0.027 и -0.016 мкгС-CH₄ м⁻² с⁻¹ с поверхности оголенных торфяных пятен и кустарничково-лишайниковых сообществ бугра соответственно, 1.2 мкгС-CH₄ м⁻² с⁻¹ – в пушицево-сфагновых мочажинах и 0.23 мкгС-CH₄ м⁻² с⁻¹ – на кустарничково-сфагновых грядах (рис. 2).

Регрессионный анализ результатов измерений показал, что поток метана с поверхности участков мерзлотного бугра зависит от таких факторов, как глубина СТС, температура торфа на глубине 15 см и содержание влаги в торфе (табл. 2). Сезонная динамика потока метана в пушицево-сфагновых мочажинах в большей степени зависела от изменения уровня болотных вод и величины атмосферного давления. На кустарничково-сфагновых грядах эмиссия метана регулировалась температурой аэробного слоя залежи, где происходит окисление метана метанотрофными аэробными микроорганизмами (табл. 2).

Для расчета величины суммарной эмиссии метана на крупнобугристом болоте были использованы полученные регрессионные уравнения и эмпирические медианы потока для каждого участка (табл. 3). Оба метода показали, что активное поступление CH₄ в атмосферу происходит с поверхности избыточно увлажненных травянисто-сфагновых сообществ олиготрофных мочажин (табл. 3). Минимальная скорость потока метана наблюдается на лишенных растительного покрова торфяных пятнах мерзлотного бугра. Кустарничково-лишайниковые сообщества бугра выполняли функцию стока атмосферного метана. С учетом площади, занимаемой выделенными нами сообществами в болотном ландшафте (табл. 1), суммарное поступление метана в атмосферу с 11.8 га болотного ландшафта за сезон составило 0.55 т CH₄ (по уравнению 3) и 0.48 т CH₄ (по уравнению 4).

Обсуждение

Полученные нами результаты измерений эмиссии метана на крупнобугристом болоте крайнесеверной тайги сопоставимы с данными исследований других авторов.

Ранее было установлено, что на переувлажненных территориях криолитозоны доля метана в суммарной эмиссии углерода достигает 8.7%, что значительно выше по сравнению с необводненными ландшафтами (Environmental..., 2013). Эти различия могут быть связаны не только с уровнем болотных вод и анаэробными условиями торфяной залежи, транспорт метана из почв в атмосферу может происходить благодаря молекулярной диффузии этого газа через воздухопроводящие ткани травянистых растений, присутствующих в мочажинах. По некоторым оценкам вклад сосудистых растений в общий поток метана в атмосферу может составлять не менее 37% (Schimel, 1995), а иногда достигает 90% (Whiting, 1992).

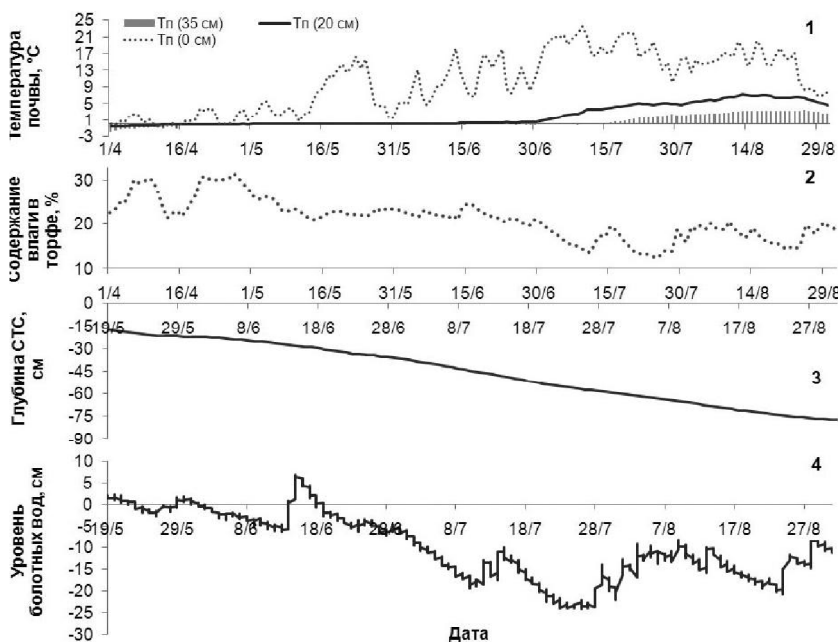


Рис. 1. Сезонная динамика основных исследованных факторов среды в 2016 г. 1 – температура торфяной залежи мерзлотного бугра на разных глубинах, 2 – содержание влаги в верхнем слое торфа мерзлотного бугра, 3 – глубина СТС на бугре, 4 – уровень болотных вод в пушицево-сфагновой мочажине.

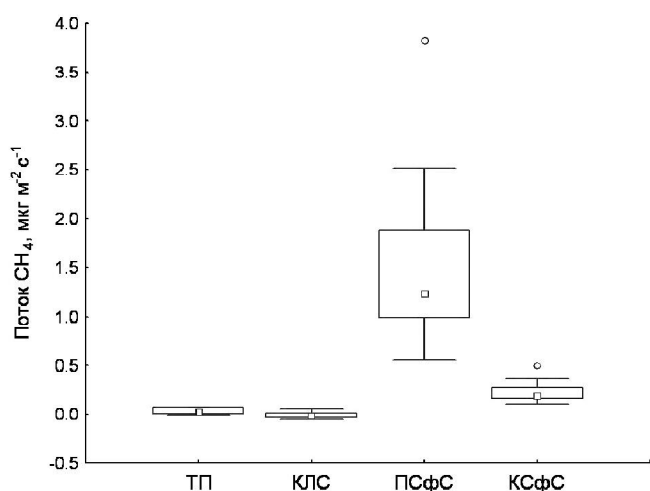


Рис. 2. Сезонная медиана потока метана с поверхности исследуемых сообществ в 2016 г. Сокращения соответствуют табл. 1.

В летний период 2016 г. поток метана с поверхности мочажин зависел от уровня болотных вод и атмосферного давления (табл. 2), что можно объяснить доминированием пузырькового выхода метана из торфяной залежи в атмосферу. По имеющимся в литературе данным, в засушливые периоды снижение гидростатического давления в результате снижения содержания влаги в торфе или повышения атмосферного давления приводит к активному высвобождению накопленного в торфяной залежи газа (Moore, 1993; Biotic..., 2003). При проведении полевых наблюдений мы также отмечали кратковременные выбросы CH₄ с поверхности травянистых мочажин, в шесть раз превышающих сезонную медиану для этих участков.

Роль температурных условий и мощности активного слоя торфяной залежи в газообмене болотных ландшафтов криолитозоны в мировой практике изучена достаточно подробно, так как эти факторы регулируют метаболизм метаногенных архей. Так, увеличение коэффициента Q₁₀ до 11.8 стимулировало увеличение продукции CH₄ на 349% (Controls..., 1996). Невысокую аппроксимацию потоков метана с температурой торфа и глубиной СТС на участках мерзлотного бугра исследованного нами болота (табл. 2) можно объяснить низкими температурами залежи на глубине 15-20 см (до 7 °С). В работе Р. Dunfield с соавторами (1993) отмечено заметное торможение метаногенеза при температурах торфа ниже 10 °С, однако, при этом поглощение CH₄ метанотрофами усиливалось. На торфяном бугре исследованного нами болота при сухой и жаркой погоде в летние месяцы 2016 г. содержание влаги в торфе стало лимитирующим фактором для эмиссии метана, что не было отмечено в предыдущие годы.

Использование двух методов расчета суммарной эмиссии метана за сезон показало сходство полученных результатов (табл. 3), однако использование медианы скорости потока не требует ре-

Таблица 3

Суммарный поток метана (гС-CH₄ м⁻²) за сезон (104 дня)

| Тип сообществ | Уравнение 3 | Уравнение 4 |
|---------------|-------------|-------------|
| ТП | 0.53±0.16* | 0.35±0.11** |
| ЛС | -0.5±0.18 | -0.3±0.13 |
| ПСФС | 13.7±9.2 | 11.8±8 |
| КСФС | 1.5±0.9 | 1.55±0.5 |

* Указана ± стандартная ошибка расчета уравнения (г м⁻²), ** указан ± доверительный интервал для медианы (г м⁻²).

гистрации эдафических и микрометеорологических параметров, что значительно облегчает сбор полевого материала. В целом рассчитанная нами величина суммарного потока метана на крупнобугристом болоте согласуется с результатами исследований субарктических болот Аляски (Controls..., 1996) и европейского северо-востока России (Carbon..., 2004).

Заключение

Проведенные нами исследования газообмена показали, что на крупнобугристом болоте крайнесеверной тайги основным источником поступления метана в атмосферу являются избыточно увлажненные пушицево-сфагновые мочажины (11.8-13.7 гС-CH₄ м⁻²). На многолетнемерзлых сухоторфяных буграх эмиссия наблюдалась с поверхности оголенных торфяных пятен, а сток атмосферного метана характерен для кустарничково-лишайниковых сообществ.

Регрессионный анализ показал, что поток метана с поверхности мерзлотного бугра зависит от изменения температуры торфяной залежи на глубине 15 см и глубины СТС. Однако, при длительном отсутствии дождей в летний период содержание влаги в верхнем слое торфа лимитирует интенсивность потока метана в атмосферу. Эмиссия CH₄ с поверхности мочажин зависит от глубины залегания УБВ и величины атмосферного давления. За летний период 2016 г. с поверхности исследованного участка болота (11.8 га) в атмосферу выделилось 0.55 т метана по данным регрессионного анализа и 0.48 т при использовании в расчетах медианы скорости потока за сезон, что сопоставимо с результатами исследований субарктических болот других регионов.

Работа выполнена в рамках проекта «Вертикальные потоки углеродсодержащих парниковых газов в экосистемах бореальных лесов и болот в условиях современного климата» (№ 18-4-17) Комплексной программы Уральского отделения РАН 2018-2020 гг.

ЛИТЕРАТУРА

Суворов, Г. Г. Продолжительность «периода эмиссии метана» / Г. Г. Суворов, М. В. Глаголев // Болота и биосфера : материалы VI Всероссийской научной школы, 10–14 сентября 2007 г., Томск. – Томск, 2007. – С. 270–274.

Annual CO₂ exchange and CH₄ fluxes on a subarctic palsa mire during climatically different years / H. Nykanen, J. E. P. Heikkinen, L. Pirinen, K. Tiilikainen, P. J. Martikainen // *Global biogeochemical cycles*. – 2003. – Vol. 17, N 1. – P. 18–1. – doi:10.1029/2002GB001861.

Biotic controls on CO₂ and CH₄ exchange in wetlands – a closed environment study / T. R. Christensen, N. Panikov, M. Mastepanov, A. Joabsson, A. Stewart, M. Oquist, M. Sommerkorn, S. Reynaud, B. Svensson // *Biogeochemistry*. – 2003. – Vol. 64. – P. 337–354.

Carbon balance in East European tundra / J. E. P. Heikkinen, T. Virtanen, J. T. Huttunen, V. Elsakov, P. J. Martikainen // *Global biogeochemical cycles*. – 2004. – Vol. 18. – P. GB1023. – doi:10.1029/2003GB002054.

Controls on CH₄ flux from an Alaskan boreal wetland / S. C. Moosavi, P. M. Crill, E. L. Pullman, D. W. Funk, K. M. Peterson // *Global biogeochemical cycles*. – 1996. – Vol. 10, N 2. – P. 287–296.

Environmental and physical controls on northern terrestrial methane emissions across permafrost zones / D. Olefeldt, M. Turetsky, P. Crill, D. McGuire // *Global*

Global biogeochemical cycles. – 1992. – Vol. 6. – P. 225–231.

Change Biology. – 2013. – N 19. – P. 589–603. – doi : 10.1111/gcb.12071.

Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: response to temperature and pH / P. Dunfield, K. Knowles, R. Dumont, T. Moore // *Soil Biol. Biochem.* – 1993. – Vol. 25. – P. 321–326.

Moore, T. R. Methane flux: water table relations in northern wetlands / T. R. Moore, N. T. Roulet // *Geophysical research letters*. – 1993. – N 20. – P. 587–590.

Schimel, J. P. Plant transport and methane production as controls on methane flux from arctic wet meadow tundra / J. P. Schimel // *Biogeochemistry*. – 1995. – Vol. 28. – P. 183–200.

Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region/ C. Tarnocai, J. G. Canadel, E. A. G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova, S. Zimov // *Global Biogeochemical Cycle*. – 2009. – Vol. 23. – doi: 10/1029/2008GB003327.

Whiting, G. J. Plant-dependent CH₄ emission in a subarctic Canadian fen / G. J. Whiting, J. P. Chanton //

TOTAL METHANE EMISSION AT THE PALSA MIRE OF EXTREME NORTHERN TAIGA IN SUMMER

M.N. Miglovets, S.V. Zagirova, N.N. Goncharova, O.A. Mikhaylov

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar

Summary. The paper presents the data of ecological observations of methane fluxes from the surface of the palsa mire in the European northeast of Russia. A wide range of flux regulating factors has been established for typical communities of the investigated mire area. In the course of the regression analysis, it was established that methane fluxes from the surface of the palsa areas were described by changes in the peat temperature at a depth of 15 cm and the thickness of the seasonally thawed layer. The CH₄ emission from the surface of hollows was regulated by the depth of water table level and the atmospheric pressure.

The total values of the CH₄ flux were determined using two calculation methods. The maximum values were observed from the surface of cotton grass-sphagnum hollows – 11.8–13.7 gC-CH₄ m⁻². For 104 days of calculation, the exposed peat spots of palsa were characterized as weak sources of methane (0.5 gC-CH₄ m⁻²). Shrub-lichen plots of the palsa were characterized by uptake of CH₄ (–0.5 gC-CH₄ m⁻²). According to the results of the regression calculation for the summer period 2016, 0.55 tons of methane were released from the surface of the investigated area of palsa mire (11.8 hectares). The estimation of the total emission by the seasonal median was 0.48 tons. It is established that the method for calculating the total methane emission by seasonal median is quite comparable with the calculations by regression equations.

Key words: palsa mire, methane fluxes