

На правах рукописи



Мигловец Михаил Николаевич

**ЭМИССИЯ МЕТАНА В РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВАХ
МЕЗООЛИГОТРОФНОГО БОЛОТА СРЕДНЕЙ ТАЙГИ**

03.02.08 – экология (биология)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Сыктывкар 2014

Работа выполнена в отделе лесобиологических проблем Севера Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН

Научный руководитель: доктор биологических наук, старший научный сотрудник, заведующая отделом лесобиологических проблем Севера ФГБУН Института биологии Коми НЦ УрО РАН, заведующая кафедрой биологии Института естественных наук ФГБОУ ВПО Сыктывкарский Государственный Университет, г. Сыктывкар
Загирова Светлана Витальевна

Официальные оппоненты: **Сирин Андрей Артурович**
доктор биологических наук, старший научный сотрудник, директор ФГБУН Института лесоведения РАН, Московская обл., Успенский р-н, п/о Успенское
Головацкая Евгения Александровна
доктор биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Ведущая организация: Московский Государственный Университет им. Ломоносова, факультет почвоведения, г. Москва

Защита состоится 19 декабря 2014 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д 004.007.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН по адресу: 167982, г. Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, 28.

E-mail: dissovet@ib.komisc.ru

Сайт института: www.ib.komisc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Коми научного центра Уральского отделения РАН по адресу: 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 24.

Автореферат разослан ____ ____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кудяшева Алевтина Григорьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Болотные экосистемы являются естественными источниками поступления в атмосферу метана, который способен поглощать инфракрасное излучение в десятки раз активнее углекислого газа (IPCC, 2001). За последние 300 лет концентрация метана в атмосфере в результате деятельности человека возросла на 1.1 ppm (Бажин, 2000). По некоторым данным, удвоение CH_4 в атмосфере может привести к повышению её температуры на $0.2\text{--}0.4^\circ\text{C}$ (WDCGG, 2004).

Общее выделение метана природными источниками с земной поверхности в атмосферу в год составляет 145 - 260 Тг в год. Вклад болот в общий поток CH_4 в атмосферу оценен в 100 - 231 Тг год⁻¹ (Climate Change..., 2007).

Величина эмиссии метана с поверхности болот является результирующей двух основных процессов: 1) продукции метана метаногенными бактериями и 2) поглощения (окисления его метанотрофами (Panikov et al., 2001). Важную роль в регуляции поступления метана в атмосферу играют физико-химические процессы в торфяной залежи.

Процессы образования, поглощения и транспорта метана в болотных биогеоценозах зависят от экологических факторов, в том числе температуры воздуха и почвы (Глаголев и др., 2010; Roulet et al., 1993; Moore et al., 1994), влажности почвы и уровня болотных вод (Инишева, Сергеева, 2006; Глаголев и др., 2010; McDonald, 1998; Heikkinen et al., 2002), содержания углерода растворенных органических соединений (Charman et al., 1994; Kang, Freeman, 2002), а так же видового состава и биомассы растений (Глаголев, Смагин, 2006; Chanton et al., 1992; Schimel, 1995; Kutzbach et al., 2004).

Поток метана с поверхности болот в атмосферу является важным звеном круговорота углерода в болотных биогеоценозах. По оценкам некоторых авторов, за год с поверхности олиготрофных и мезотрофных болот Финляндии выделяется от 12.6 до 31 г CH_4 м⁻² в год (Huttunen et al., 2003; Rinne et al., 2007). Для олиготрофных и евтрофных болот США эти значения варьируют от 0.2 до 76.3 г CH_4 м⁻² (Wilson et al., 1989; Shannon, White, 1994). Более низкие величины годовой эмиссии метана (0.068 - 18 г CH_4 м⁻²) приведены в литературе для тундровых сообществ п-ова Ямал и Республики Коми (Neuer et al., 2002; Heikkinen et al., 2004), а так же сообществ черноольховых топей Тверской области - 0.53 - 0.8 г CH_4 м⁻² (Вомперский и др., 2000). Суммарное количество эмитируемого с поверхности болот в атмосферу метана на территории Западной Сибири составляет 3.20 Мт в год (Глаголев и др., 2010).

Для количественной оценки роли болот конкретного региона в поддержании газового состава атмосферы требуется детальный анализ и учёт пространственных и временных вариаций потоков в разных типах болотных экосистем (Глаголев и др., 2010). В Республике Коми болота занимают около 8% территории. Типичными для республики являются: олиготрофные выпуклые грядово-мочажинные сфагновые, мезотрофные сфагновые, евтрофные пойменные болота, приуроченные к подзонам северной и средней тайги; аапа-болота, характерные для подзон крайнесеверной и северной тайги; крупнобугристые и плоскобугристые болота лесотундры (Лесное хозяйство..., 2000). Имеются сведения о метанотрофных микробных сообществах для разных типов почв (торфянистые и грубогумусные криоземы), встречающихся в заполярной тундре (Берестовская и др., 2002), эмиссии метана в сообществах растений тундры на территории республики (Heikkinen et al., 2002). Работы по изучению динамики потоков метана в болотных биогеоценозах средней тайги европейского Северо-Востока единичны (Слободкин и др., 1992).

Цель исследования: Целью данной работы является количественная оценка эмиссии метана в растительных сообществах мезоолиготрофного болота средней тайги.

Задачи исследования:

1. Изучить разнообразие растительных сообществ, ботанический состав и некоторые физико-химические свойства торфяной залежи мезоолиготрофного болота;
2. Провести измерения скорости эмиссии метана с поверхности болота камерным методом в суточной и сезонной динамике;
3. Изучить влияние микроклиматических и эдафических факторов на поток метана в болотных фитоценозах;
4. Оценить вклад растений в транспорт метана из болота в атмосферу.

Положения, выносимые на защиту:

1. Величина потока метана с поверхности мезоолиготрофного болота в атмосферу зависит от уровня болотных вод. В прохладное с избыточным количеством осадков лето с понижением уровня болотных вод эмиссия метана снижается, а в теплое лето с недобором осадков наблюдается обратная тенденция. Влияние других экологических факторов на скорость выделения метана в болотных сообществах менее значимо.
2. С увеличением доли участия травянистых растений, таких как *Carex rostrata* и *Scheuchzeria palustris*, в болотных сообществах усиливается выброс метана в атмосферу. Поэтому, наиболее высокая скорость потока метана в атмосферу наблюдается на мезотрофном осоково-сфагновом сообществе.

Научная новизна: Впервые проведены многолетние исследования вертикальных потоков метана на мезоолиготрофном болоте таёжной зоны на европейском Северо-Востоке России и получены новые данные о пространственной и временной вариабельности количества метана поступающего из болотных экосистем в атмосферу. Дана характеристика суточной и сезонной динамики эмиссии метана в разных типах растительных сообществ исследованного болота. Изучено влияние уровня болотных вод и содержания в них углерода растворенных органических соединений, температуры торфяной залежи, температуры и давления атмосферного воздуха на потоки метана в атмосферу. Выдвинута гипотеза, что в период вегетации с избыточным количеством осадков с понижением уровня болотных вод поступление метана с поверхности болота снижается, при недоборе осадков может наблюдаться обратная тенденция. Выявлена положительная корреляция эмиссии метана с температурой торфяной залежи на глубине 20-30 см. Показано, что участие в растительном покрове мезоолиготрофного болота европейского Северо-Востока травянистых растений усиливает поступление метана в атмосферу. Установлено, что эмиссия CH_4 с поверхности болота сопряжена с массой надземных органов трав. Доказано, что наиболее активный транспорт исследуемого газа в атмосферу происходит через стебли *Carex rostrata* и менее активно через *Scheuchzeria palustris*. Установлен вклад высших сосудистых растений в общую эмиссию метана в атмосферу, составляющий более 50%. Впервые дана оценка суммарного количества эмитируемого метана с исследованного участка мезоолиготрофного болота для двух лет наблюдений.

Теоретическое и практическое значение работы: Результаты проведённых исследований могут быть использованы при прогнозировании влияния климатических изменений на эмиссию парниковых газов на европейском Северо-Востоке России, количественном определении объемов выбрасываемого метана в атмосферу с заболоченных территорий региона. Основные результаты исследований включены в курс «Экология бореальных лесов» для студентов 4 курса специальности «Экология» Института естественных наук Сыктывкарского госуниверситета.

Апробация работы: Основные результаты работы были представлены на Коми республиканской научной конференции студентов и аспирантов «Человек и окружающая среда» (Сыктывкар, 2007, 2008), Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы региональной экологии в условиях устойчивого развития» (Киров, 2007),

Всероссийской молодёжной научной конференции «Актуальные проблемы биологии и экологии» (Сыктывкар, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014), Международной научной конференции «Резервуары и потоки углерода в лесных и болотных экосистемах бореальной зоны» (Сыктывкар, 2011), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем» (Киров, 2012, 2013).

Личный вклад соискателя. Автор принимал активное участие на всех этапах подготовки диссертационной работы: в разработке темы и планировании исследований, проводил анализ литературы по теме исследований, выполнял пробоотбор воздуха и торфа, хроматографический анализ образцов болотного воздуха, анализ болотных вод на содержание углерода растворенных органических соединений, описание растительного покрова. Лично автором или при его участии проведена статистическая обработка данных и интерпретация полученных результатов, выполнена оценка значимости экологических факторов в суточной и сезонной динамике вертикальных потоков метана, подготовлены основные публикации по выполненной работе.

Публикации: По материалам диссертации опубликовано 13 работ, из них две в виде статей в журналах списка ВАК.

Объём и структура работы: Диссертация изложена на 119 страницах, состоит из введения, 6 глав, списка литературы. В тексте приведено 11 таблиц и 36 рисунков. Список литературы включает 153 источника, из них 97 на английском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава.1. Роль болот в глобальном потоке метана.

Из анализа литературных источников следует, что болота – уникальные биогеоценозы, где аккумулированы значительные запасы углерода и созданы оптимальные условия для продукции метана метаногенными бактериями. При изменении микроклиматических и эдафических условий может произойти сдвиг в величине и направлении потока метана в системе «болото-атмосфера». Приведенные в литературе данные об интенсивности эмиссии метана на болотах разных растительных зон сильно варьируют. В связи с этим, основная цель настоящего исследования состояла в выявлении суточной и сезонной динамики эмиссии метана в растительных сообществах мезоолиготрофного болота в среднетаежной подзоне, что позволит дополнить недостающие знания о роли болот Республики Коми в глобальном потоке метана в атмосферу.

Глава 2. Характеристика района и объекта исследований

Физико-географические и погодные условия в районе исследования. Приводится общая характеристика климатических условий, рельефа, типов ландшафта и почв района исследований. Установлено, что погодные условия района отличались для каждого года наблюдений, в зависимости от времени года. Из трех лет наблюдений вегетационный период 2008 г. был более прохладным и влажным, чем 2011 и 2013 гг., характеризовавшиеся недобором осадков с мая по сентябрь и высокими температурами. Общая продолжительность периода вегетации для 2008 и 2011 гг. составила около 149 и 159 дней соответственно, а для 2013 г. около 143 дней. Продолжительность летне-осеннего периода составила 160 дней для 2008 г. и 173 дня для 2011 г.

Характеристика объекта исследований. Объект исследований – мезоолиготрофное болото Медла-Пэв-Нюр, расположенное в Сыктывдинском районе Республики Коми (61° 56' с.ш. 56° 13' в.д.). Площадь болота составляет 2790 га, средняя мощность торфа – 1.4 м, максимальная – 3.4 м. Болото располагается на второй надпойменной террасе, его водоприемниками служат р. Пожег и р. Пычим (Торфяные ресурсы..., 2000). На

исследованном участке болота растительные сообщества относятся к трем основным типам фаций:

1) олиготрофная сосново-кустарничково-пушицево-сфагновая, где на кочках доминируют виды *Pinus sylvestris* L., *Andromeda polifolia* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr., *Rubus chamaemorus* L., *Eriophorum vaginatum* L., *Sphagnum angustifolium* (C.E.O. Jens. ex Russ.) C.E.O. Jensen, *Sphagnum fuscum* (Schimp.) H.Klinggr., *Polytrichum strictum* Brid., а в мочажинах – *Andromeda polifolia* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Oxycoccus palustris* Pers., *Eriophorum vaginatum* L., *Sphagnum angustifolium*, *Sphagnum magellanicum* Brid.

2) мезотрофная кустарничково-травяно-сфагновая, с доминированием на кочках видов *Andromeda polifolia* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Ledum palustre* L., *Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr., *Eriophorum vaginatum* L., *Carex pauciflora* Lightf., *Sphagnum angustifolium*, *Sphagnum fuscum*, *Sphagnum magellanicum* Brid., в мочажинах – *Carex lasiocarpa* Ehrh., *Carex limosa* L., *Carex rostrata* Stokes, *Menyanthes trifoliata* L., *Scheuchzeria palustris* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr., *Eriophorum vaginatum* L., *Sphagnum fallax* (H.Klinggr.) H.Klinggr., *Sphagnum magellanicum* Brid., *Warnstorfia exannulata* (Bruch et al.) Loeske, *Andromeda polifolia* L.

3) мезоевтрофная травяно-моховая проточная топь, с преобладанием на кочках таких видов, как *Andromeda polifolia* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Oxycoccus palustris* Pers., *Equisetum fluviatile* L., *Carex lasiocarpa* Ehrh., *Sphagnum magellanicum*, *Sphagnum fuscum*, в понижениях – *Oxycoccus palustris* Pers., *Carex lasiocarpa* Ehrh., *Eriophorum gracile* Koch, *Menyanthes trifoliata* L., *Pedicularis palustris* L., *Utricularia intermedia* Hayne, *Sphagnum fallax*, *Sphagnum magellanicum*, *Warnstorfia exannulata*, мхи р. *Calliergon* (Sull.) Kindb.

Площадь, которую занимают исследованные болотные фации, определяли с помощью спутниковых снимков высокого разрешения, путем наложения на них масштабированной метрической сетки в программе Adobe Photoshop CS5 (Лицензия института биологии Коми НЦ).

В работе приведены результаты измерений эмиссионных потоков метана на семи участках с различающимися сообществами растений и элементами микроландшафта: олиготрофное кустарничково-травяно-сфагновое - кочка (уч. № 3) и мочажина (уч. № 4); мезотрофное кустарничково-травяно-сфагновое - кочка (уч. № 6), межкочечное пространство (уч. № 5) и осоково-сфагновый ковер (уч. № 18); мезоевтрофная травяно-сфагновая промывная топь - кочка (уч. № 9) и топяное межкочечное пространство (уч. № 16).

Глубина торфяной залежи в олиготрофной части болота составляет 180 – 220 см, в мезотрофной - 190 см и мезоевтрофной травяно-моховой проточной топи - 180 см. В олиготрофной части верхние слои профиля сложены слабо- и среднеразложившимися (5-20%) сфагновыми верховыми торфами. Средний горизонт представлен переходными осоково-шейхцериевым, пушицево-шейхцериевым и древесно-травяно-сфагновым торфами средней степени разложения (25-30%). Нижние горизонты торфяного профиля состоят из переходных пушицево-шейхцериевого и древесно-шейхцериевого торфов со степенью разложения 30-40%. На мезотрофном участке и в районе мезоевтрофной травяно-моховой проточной топи верхние слои профиля образованы слаборазложившимся (5-10%) мхом *Sphagnum angustifolium*. Средние горизонты представлены древесно-пушицевым торфом переходного типа со степенью разложения 25%. Глубокие слои профиля представлены переходными пушице-шейхцериевым и древесно-шейхцериевым торфами со степенью разложения 35%.

По данным физико-химического анализа воды, участки, приуроченные к мезоевтрофной проточной топи, характеризуются наибольшим среднесезонным содержанием углерода растворенных органических соединений (DOC) и величиной pH,

близкой к шести. Высокие значения содержания органического углерода для этих участков обусловлены их местоположением в котловине мезоландшафта, которая является водоприёмником приграничных участков, а менее кислые условия – проточностью воды. Наименьшие значения DOC отмечены на мезотрофном участке. В олиготрофной мочажине в 2008 и 2011 гг. минимальные значения уровня болотных вод (УБВ) во второй декаде августа составили -18 и -35 см соответственно. В 2011 г. с конца мая по июнь на участке мезоевтрофной топи значения УБВ колебались от 0.5 до -1 см, после 30 июня уровень воды снижался. Для участка олиготрофной мочажины понижение уровня воды наблюдали уже в начале июня. По сравнению с 2008 г., июль – сентябрь 2011 г. характеризовались более низким расположением уровня болотных вод, и соответственно, более сухим состоянием торфяной залежи.

Глава. 3. Методы измерений скорости эмиссии метана с поверхности болота и обработки экспериментального материала

Для измерений скорости эмиссии метана с поверхности напочвенного покрова мезоолиготрофного болота использовали метод статических тёмных камер (Alm et al. 1999, 2007; Bubier et al., 2005; Christensen et al., 1995; Kutzbach et al., 2004; Saarnio et al., 2000; Shannon, White 1994). Принцип его заключается в изоляции небольшого участка болота с характерной растительностью герметичной рамкой, на которую сверху устанавливается камера, из которой отбираются пробы воздуха. Изучение потока метана было проведено с июня по октябрь 2008 г. и с конца мая по сентябрь 2011 г. Процесс отбора проб воздуха в 2008 г. проходил с использованием алюминиевых камер емкостью 0.108 м³. Площадь рамок, ограничивающих участок болотного фитоценоза, составляла 0.36 м². В 2011 г. использовали две камеры объемом 0.075 и 0.095 м³ для ускорения процесса измерения, площадь рамок составила 0.25 м². Герметичность системы обеспечивает гидрозатвор, который представляет собой желоб, расположенный в верхней части рамы-основания, и заполненный водой.

Камера снабжена термометром, вентилятором, перемешивающим воздух внутри, и трубкой, регулирующей постоянное атмосферное давление внутри камеры. Отбор проб воздуха осуществлялся пластиковыми шприцами объемом 60 мл с интервалом 4 мин при общей экспозиции камеры 20 мин. Одновременно регистрировали температуру внутри камеры, время отбора и pH грунтовых вод с участка.

Определение объемной доли метана в образцах воздуха было проведено с помощью метода газовой хроматографии. Использовался газовый хроматограф «Кристалл 5000.2» (ОАО «Хроматек», Россия) с пламенно-ионизационным детектором (ПВД 2.840.042-01). ПВД обнаруживает большинство органических соединений, содержащих связь С–Н. Набивная колонка (М 2*3) была заполнена адсорбентом Hayesep N 80/100. Газ-носитель - азот ОСЧ. В качестве газовой смеси, поддерживающей пламя горелки детектора, использовали водород и воздух. Водород генерировался в генераторе водорода (ОАО «Хроматек», Россия) и по системе газовых трубок через блок фильтров поставлялся непосредственно в детектор хроматографа. Воздух через воздушный компрессор поставлялся по аналогичной схеме. Температура колонки – 60 °С; температура детектора – 160 °С. Анализ пробы проходил в двух повторностях.

Скорость эмиссии рассчитывали с помощью уравнения:

$$F(\text{CH}_4) = \frac{M \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{dC}{dt}}{R \cdot A \cdot T}$$

где F_{CH_4} – величина скорости эмиссии метана (мкг м⁻²с⁻¹); M_{CH_4} – молярная масса метана (16.043 г моль⁻¹); ρ – атмосферное давление на момент измерения (Па); V – объем камеры (м³); dC/dt – изменение концентрации газа во времени t (ppm сек⁻¹); R – универсальная газовая постоянная (8.314472 Па м³ моль⁻¹ К⁻¹); A – площадь рамы,

ограничивающей поверхностью (м^2); T – температура внутри камеры на момент измерения (K).

Измерения скорости эмиссии метана сосудистым растением проводили в июле 2012 г. на растениях *Scheuchzeria palustris* и *Carex rostrata*, которые имеют высокую долю воздухоносных тканей в надземных органах. Суть метода заключается в накоплении воздуха, проходящего через надземные органы растений, помещенные в герметично закрытую камеру. Камера была изготовлена из прозрачной полипропиленовой бутылки объемом 1.5 литра без дна, которая имела основание из спененного полистирола, заранее покрытого силиконом с целью ограничения поступления дополнительного воздуха внутрь камеры. Камера была укомплектована пробкой и герметичным краном Luer-lock, к которому крепился шприц для отбора проб воздуха. Отбор воздуха проводился сразу после установки камеры на растение (нулевая концентрация) и по истечении 20 мин после установки. На момент отбора регистрировали время экспозиции камеры, температуру окружающего воздуха и его давления с помощью автоматических датчиков метеостанции (Campbell Scientific, США). Анализ полученных образцов воздуха проводили на хроматографе «Кристалл 5000.2». Скорость накопления метана в объеме камеры рассчитывали по вышеописанному уравнению. Эту величину использовали для расчета суммарного транспорта метана через все растения изучаемого вида, присутствующие на учетной площадке (0.25 м^2). Среднее ($\pm$ ошибка среднего) число побегов шейхцерии ($n=3$) составило 416 ± 16 шт. на м^{-2} на мезоевтрофной проточной топи и 292 ± 6 шт. на м^{-2} в олиготрофной мочажине. Плотность осоки в среднем составила 184 ± 3 шт. на м^{-2} .

Определение биологической продуктивности растений и физико-химических характеристик воды. Для оценки биомассы вырезали монолиты торфа с растениями размером 20×20 см и высотой 25 см, начиная от головок мха, в пятикратной повторности согласно методике (Козловская и др., 1978; Головацкая, 2009). После чего, каждый монолит разделяли на составляющие: фитомассу надземную (зеленые части мхов, трав, листья и стебли кустарничков) и подземную (корни), мортмассу (моховый очес, опад). Образцы высушивались в сушильном шкафу при температуре 105°C для определения содержания сухого вещества.

Анализ болотных вод проводился в течение периода вегетации в 2011 году. Для этого отбирались пробы воды с исследуемых участков болота на глубине 40 см, с использованием стальной трубки и шприца. Для анализа содержания углерода растворенных органических соединений в полевых условиях использовали спектрометр «spectro-lyser» (s-can, Австрия) с диапазоном длин волн 200-742.5 нм. Определение pH образцов воды осуществлялось pH-метром «Эксперт-pH» (ООО «Эконикс-Эксперт») с допустимой абсолютной погрешностью ± 0.05 pH. Уровень болотных вод измеряли с помощью пластиковых трубок, установленных в торфяную залежь. Измерения проводились от головок мха до зеркала воды. Если уровень болотной воды был ниже головок мха, то указывали значение с отрицательным знаком, если выше – с положительным.

Статистический анализ выполнен с использованием программного обеспечения STATISTICA v.10. Нормальность распределения проверяли с использованием критерия Шапиро-Уилка. Корреляционный анализ проводили с использованием непараметрического критерия Спирмена для малочисленных выборок (при определении сопряженности суточной динамики эмиссии метана и микроклиматических параметров) и параметрический критерий Пирсона (при анализе зависимости сезонной эмиссии от экологических факторов). При сравнении интенсивности эмиссии на разных участках использовали t-критерий Стьюдента. Значимость влияния микроклиматических факторов на изменение сезонной эмиссии оценена с помощью MANOVA («Main effects of ANOVA») с использованием критерия Фишера (F) и учитывая коэффициент детерминации (r^2) признаков. При этом высокие значения F-критерия и коэффициента

детерминации описывали максимальную правдоподобную зависимость. Все статистические расчеты осуществляли при заданном уровне значимости $P=0.05$. Определение выбросов осуществляли с помощью метода «ящик с усами». Сокращение выбросов в общем массиве данных при статистической обработке не проводилось.

Глава 4. Суточная и сезонная динамика микроклиматических параметров и скорости эмиссии метана в растительных сообществах мезоолиготрофного болота средней тайги

Суточная и сезонная динамика микроклиматических параметров в периоды наблюдений. Микроклиматические параметры в течение сезона регистрировали автоматическими датчиками фирмы «Нобо» (США), которые были установлены на высоте 1.5 м от поверхности растительного покрова. Дополнительно были установлены температурные датчики точностью ± 0.2 °C в торфяной залежи на глубинах 5 и 30 см. В 2013 г. датчики почвенных температур были установлены на глубинах 5 и 20 см, в связи с изменением модификации метеорологического регистратора.

Температура воздуха проявляла довольно значительную вариабельность в течение двух лет наблюдений. В конце мая и первой декада июня 2011 г. она была заметно выше, по сравнению с этим же периодом 2008 г. В середине июня 2011 г. погода была более прохладной, чем в 2008 г. Ход температур воздуха в июле обоих лет практически не отличался. Во второй декаде июля 2011 г. установилась жаркая погода, а в августе произошло резкое снижение температуры. Август 2008 г. был более тёплым, а сентябрь – более прохладным, чем в 2011 г.

В течение суток максимальные значения температуры воздуха в июле отмечали в период с 13 до 19 часов, а минимальные в 2 – 4 часа ночи. В 5 часов утра с восходом солнца температура воздуха начинала вновь возрастать.

Температура воздуха характеризуется более выраженной вариабельностью во времени, по сравнению с температурой почвы. Установлена значимая ($p<0.005$) высокая корреляция температур воздуха и почвы в течение сезона: в 2008 г. коэффициент корреляции (r) составил 0.81, а в 2011 г. – 0.88. В суточной динамике также установлена прямая зависимость температуры поверхности почвы от температуры воздуха, которая описывалась линейной функцией в 2011 г. $r=0.91$, при $p<0.01$, в 2008 г. корреляция этих параметров оказалась слабее ($r=0.61$, при $p<0.01$).

Температура почвы снижалась с увеличением глубины. Для верхних горизонтов характерна более сильная суточная и сезонная вариабельность этого показателя, что связано с влиянием температуры воздуха и солнечной радиации. В летний период на разных по степени обводнённости участках проявляется сходная динамика температуры почвы в течение суток. Однако, в один и тот же момент времени на соответствующих глубинах торфа на олиготрофном участке температура ниже, чем на мезоевтрофном.

В 2011 г. в течение вегетационного сезона атмосферное давление было значительно выше, чем в 2008 г. В оба года максимальные величины этого показателя наблюдали в конце июня – начале июля и в середине августа. Летом 2008 г. в первой декаде июля резкое снижение атмосферного давления сопровождалось ливневыми осадками и грозами, а самое низкое давление отмечено в первых числах сентября. В 2011 г. со снижением давления в конце июля – начале августа установилась прохладная и дождливая погода.

Суточная динамика скорости эмиссии метана. В литературе нет однозначного мнения о суточной динамике скорости эмиссии метана с поверхности болот. Одни авторы наблюдали увеличение выбросов метана в атмосферу в дневное время суток (Степанов, 2011; Alford et al., 1997), другие – в ночное (Глаголев, Смагин, 2006; Mikkela et al., 1995). М.В. Глаголев и Н.А. Шнырев (2007) указывают на отсутствие явно выраженной суточной динамики потоков метана в болотных экосистемах.

Проведенные нами в 2013 г. наблюдения на мезоолиготрофном болоте средней тайги показали, что в течение суток скорость выделения метана на разных участках может заметно различаться. В мае эмиссия метана усиливалась в ночное время суток, когда температура воздуха снижалась, а температура почвы на глубине 10-20 см практически не менялась (рис.1). Однако скорость выделения метана на мезоевтрофной топи была выше на 60-70%, чем на олиготрофном участке.

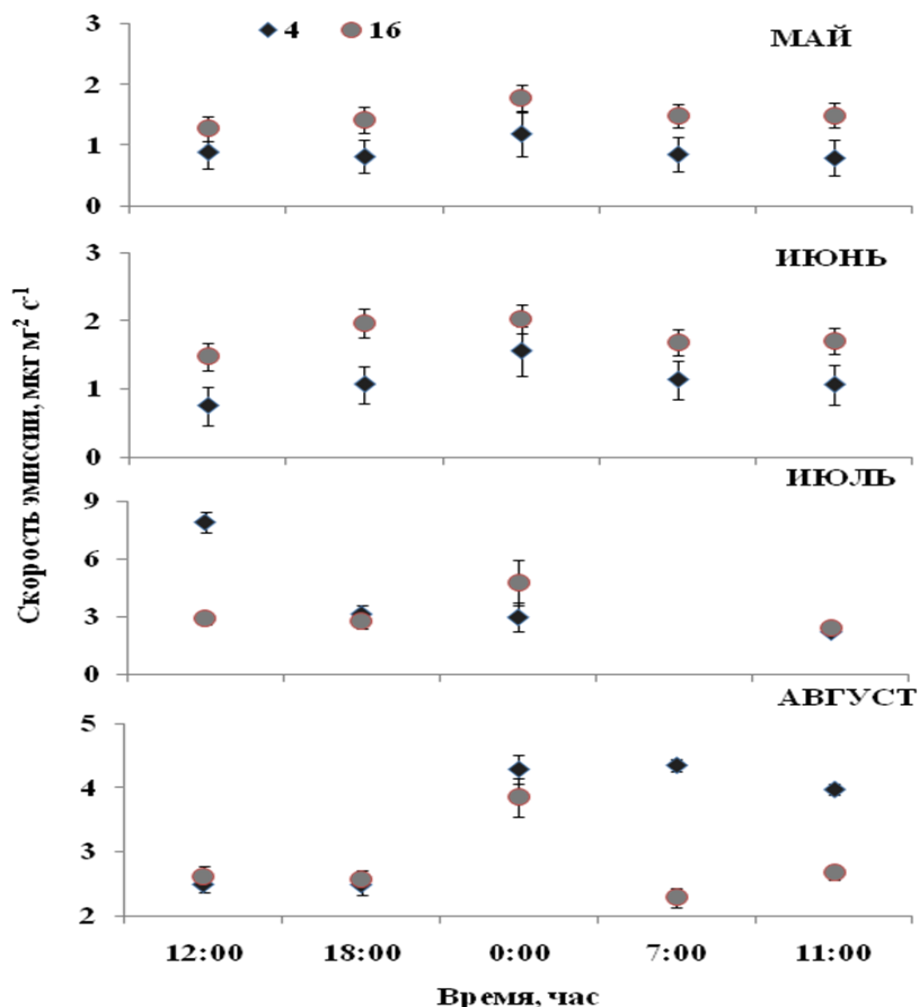


Рис.1. Суточная динамика скорости эмиссии метана на разных участках исследуемого болота в 2013 г. 4,16 – номер участка. Бары соответствуют стандартной ошибке измерения.

В период активного развития вегетативных органов трав (третья декада июня) различия в величине эмиссионного потока на этих участках сохранялись (t-тест, $\alpha=0.00002$), при этом в обоих случаях скорость выделения метана в атмосферу была выше, чем в мае. Усиление потока CH_4 с началом вегетационного периода другие авторы связывают с увеличением среднесуточных температур (Macdonald et al., 1998) или постепенным увеличением количества надземной фитомассы (Whiting, Chanton, 1992). Скорость эмиссии метана в июне достигала максимальных значений в вечернее и ночное время суток.

В третьей декаде июля и августа после ливневых осадков было выявлено усиление вариабельности потока метана с поверхности олиготрофной мочажины. Достоверные различия в интенсивности эмиссионного потока в течение суток на двух исследованных участках нами не установлены (t-тест, $\alpha=0.245$).

В 2013 г. в начале вегетационного периода суточные значения эмиссии находились в пределах $1.28\text{--}2.02 \text{ мг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на обводненном топяном участке и $0.75\text{--}1.55 \text{ мг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на

олиготрофном, а в середине лета возрастали до $4.8 \text{ мкг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $7.94 \text{ мкг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ соответственно. Увеличение потоков метана на болоте в вечернее и ночное время другие авторы связывают с возрастанием температуры почвы (Глаголев, Смагин, 2006; Mikkela et al., 1995). Выявленные нами максимальные значения скорости эмиссии в течение суток в большинстве случаев совпадали с максимальной температурой почвы на глубине 20 см.

Нами установлено, что сопряженность скорости выделения метана в атмосферу с экологическими факторами меняется в течение вегетационного периода. Так в мае активность выделения метана с поверхности олиготрофной мочажины в течение суток больше зависела от температуры воздуха, чем от температуры почвы и атмосферного давления. В июне для участка олиготрофной мочажины обнаружена тесная корреляция эмиссии с температурой почвы в слое 20 см. При этом для обоих участков, наблюдается тенденция усиления интенсивности потока метана с увеличением температуры на данной глубине, что согласуется с работами других авторов (Macdonald et al., 1998). В июле-августе такой тенденции не наблюдается.

В период резких изменений погодных условий и выпадения ливневых осадков скорость эмиссии метана с поверхности олиготрофного участка хорошо коррелирует с динамикой атмосферного давления, это происходит на фоне его падения. Специфика обратной направленной корреляции эмиссии CH_4 и атмосферного давления связана с физическим процессом воздействия давления на механизм пузырькового выноса метана. Установлено, что при ослаблении атмосферного или гидростатического давления в водных экосистемах усиливается доля пузырькового выхода метана в общем потоке (Deshmukh et al., 2014).

Таким образом, установлено, что за весь период наблюдений суточный ход выделения метана может меняться в течение сезона. Для двух исследуемых участков отмечено увеличение скорости эмиссии в вечернее и ночное время.

В весенний период суточная динамика скорости эмиссии метана зависит от изменения температуры воздуха, причём для двух разных участков она имеет схожую тенденцию. Для участка олиготрофной мочажины и мезоевтрофной топи коэффициент корреляции суточной эмиссии метана от температуры воздуха имеет отрицательное значение. В ясные летние дни без осадков на олиготрофном участке наблюдается тесная сопряженность скорости эмиссии от температуры почвы на глубине 20 см, что согласуется с данными Mikkela с соавторами (1995), которые связывают это с лимитированием экссудации (выделения) органического вещества корнями растений. В дни с ливневыми осадками для участка олиготрофной мочажины эмиссия метана тесно связана с изменениями атмосферного давления. Для мезоевтрофного участка такая зависимость не выявлена. По мнению других авторов, связь эмиссии с температурным фактором становится более явной при продолжительных по времени наблюдениях, например, от месяца до года (Глаголев, Смагин, 2006).

Сезонная динамика скорости эмиссии метана. Сезонная динамика скорости эмиссии метана на болотах является предметом исследований многих авторов. На олиготрофном болоте в Англии максимум выделения CH_4 в атмосферу отмечен в мае и августе (Kang, Freeman, 2002). Максимальные значения сезонной скорости эмиссии метана с поверхности мезотрофного болота в Германии были зафиксированы в конце июня – начале июля (Augustin et al., 1998). На территории России так же не выявлено общей динамики эмиссии метана в течение сезона. Одни авторы на болотах наблюдали наиболее активные выбросы метана в атмосферу весной и осенью, связывая это с высокими значениями УБВ (Инишева, Сергеева, 2006), другие – в летние месяцы, при высоких значениях температуры почвы и воздуха (Евграфова и др., 2010). Высокая пространственная и временная вариабельность эмиссии метана связана с влиянием на окисление и продукцию метана комплекса факторов, прежде всего климатических и эдафических (Dise, 1993; Kettunen et al., 1996). Из климатических факторов большинство исследователей наиболее важными считают температуру воздуха и почвы (Глаголев,

Смагин, 2006; Bubier et al., 1993), из эдафических – уровень болотных вод (УБВ) (Инишева, Сергеева, 2006; Moore, Roulet, 1993; Schimel, 1995), а так же содержание растворенного органического углерода в болотных водах (Kang, Freeman, 2002).

В течение двух лет наблюдений эмиссия метана с поверхности исследуемого болота характеризовалась меньшей вариабельностью в 2008 г., когда скорость выделения метана с поверхности болота постепенно возрастала в июне, достигая максимальных величин в конце июня – начале июля (рис. 2). В последующие месяцы этот процесс постепенно снижался и к середине сентября приблизился к нулевому значению.

Сходная динамика была отмечена в 2011 г., со второй половины мая до конца июня значения скорости эмиссии возросли почти в 8 раз (рис.2). Высокая скорость потока метана сохранялась до конца июля, после чего наблюдали постепенное ее снижение. В течение августа эмиссионный поток был нестабилен. Так же, как и в 2008 г., в середине сентября 2011 г. поступление метана в атмосферу приблизилось к нулю, однако полностью не прекратилось. Вероятно, в осенний период с понижением температур нижних горизонтов торфа происходит снижение метаболизма метаногенных бактерий.

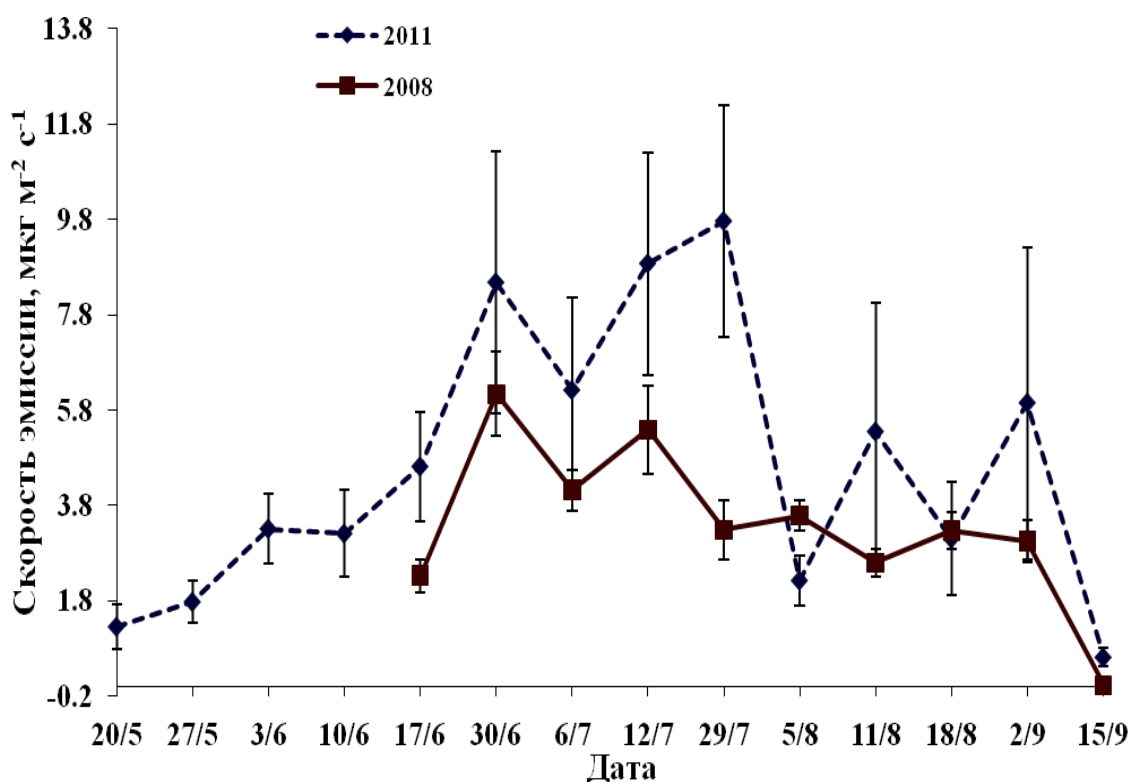


Рис.2. Сезонная динамика средневневной скорости эмиссии метана в разные годы наблюдений. Бары соответствуют ошибке среднеарифметических значений. Число участков n=7.

В целом скорость эмиссии метана в 2011 г. была значительно выше, чем в 2008 г., что могло быть связано с разными погодными условиями. В жаркое лето с недобором осадков в 2011 г. при низкой влажности почвы на фоне низких значений УБВ могло произойти высвобождение малорастворимого и слабо подвижного в воде метана в виде эпизодических пузырьковых всплесков. Ранее данное явление было описано в работе Moore и Roulet (1993). На возможность пузырькового потока метана в 2011 г. указывают также высокие значения ошибки средней скорости эмиссии и значительное отклонение полученных величин от нормального распределения. По мнению некоторых авторов, пузырьковый поток имеет лог-нормальное распределение и способствует значительному изменению общей эмиссии (Christensen et al, 2003).

В некоторые дни октября 2008 г. в мезотрофных и мезоевтрофных сообществах отмечали поток метана, направленный из атмосферы в болото, его скорость в среднем

составляла $-0.027 \text{ мкг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Данное явление ранее было описано другими авторами для осеннего периода (Наумов, 2009).

В 2008 г., который характеризовался обилием осадков, высокие значения эмиссии метана наблюдали в понижениях, где возрастало обилие травянистых растений в напочвенном покрове. Максимальные среднесезонные значения отмечены на участках, приуроченных к мезоевтрофной травяно-сфагновой проточной топи и мезотрофному кустарничко-травяно-сфагновому ковру (рис.3). Высокие значения эмиссии метана зафиксированы так же в олиготрофном кустарничко-травяно-сфагновом межкочечном пространстве (участок № 4). В целом средняя за сезон скорость эмиссии в 2008 г. на кочках была значительно ниже, чем в понижениях.

В 2011 г. при более сухой и жаркой погоде в период вегетации максимальные средние значения выделения метана на болоте так же наблюдали на участках с доминированием осоки (рис.3). Однако, эмиссия с участка осоково-сфагнового ковра была в 1.5 раза выше, чем в 2008 г. В этот год активный поток метана наблюдали также с олиготрофной кочки, что может быть связано с его кратковременными пузырьковыми выбросами в атмосферу в условиях жаркого и сухого лета.

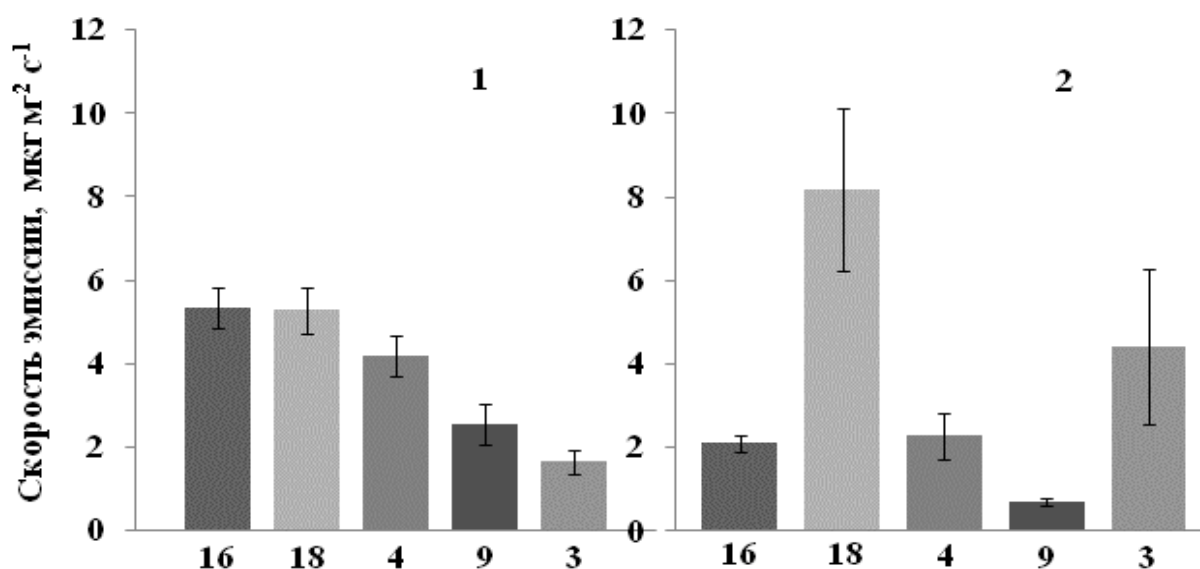


Рис.3. Средняя за сезон скорость эмиссии метана на разных участках болота в 2008 (1) и 2011 (2) гг. Число дней измерений $n=10$. 3-18 – номера участков. Бары соответствуют ошибке среднеарифметических значений

С использованием метода MANOVA нами установлено, что в 2008 г. при заданном уровне достоверности эмиссия метана в большей степени зависела от изменения уровня болотных вод ($F=22.03$, $r^2=0.69$, $p<0.001$) и в меньшей степени от температуры почвы ($F=3.78$, $r^2=0.26$, $p<0.05$). Температура атмосферного воздуха не оказывала статистически значимого влияния ($p=0.93$). В 2011 г. статистически значимое влияние на скорость потока метана оказывал уровень болотных вод ($F=52.6$, $r^2=0.85$, $p<0.001$).

Корреляционный анализ показал, что в сезонной динамике скорость эмиссии метана с поверхности болота Мэдла-Пэв-Нюр хорошо коррелирует с УБВ в пределах исследуемого диапазона данных (рис. 4). В 2008 г. отмечено увеличение скорости эмиссии при повышении УБВ, что некоторые авторы связывают с регулированием аэробного процесса окисления метана (Глаголев и др., 2010; MacDonald, 1998). В 2011 г. наблюдали обратную тенденцию, когда значения скорости потока метана в атмосферу возрастали при сильном понижении УБВ (ниже 20 см). Такая же тенденция описана в работе Rinne с соавторами (2007), что авторы связывают с включением механизма пузырькового выхода метана при снижении гидростатического давления в торфяной залежи. Благодаря способности торфяных почв к сорбции метана и нисходящей диффузии этого газа,

произведенный в болотных горизонтах метан может на долгое время удерживаться в торфяной залежи и не выходить в атмосферу. Поэтому снижение влажности торфов при понижении УБВ может так же повлечь за собой краткосрочные всплески эмиссии метана (Глаголев, Смагин, 2006).

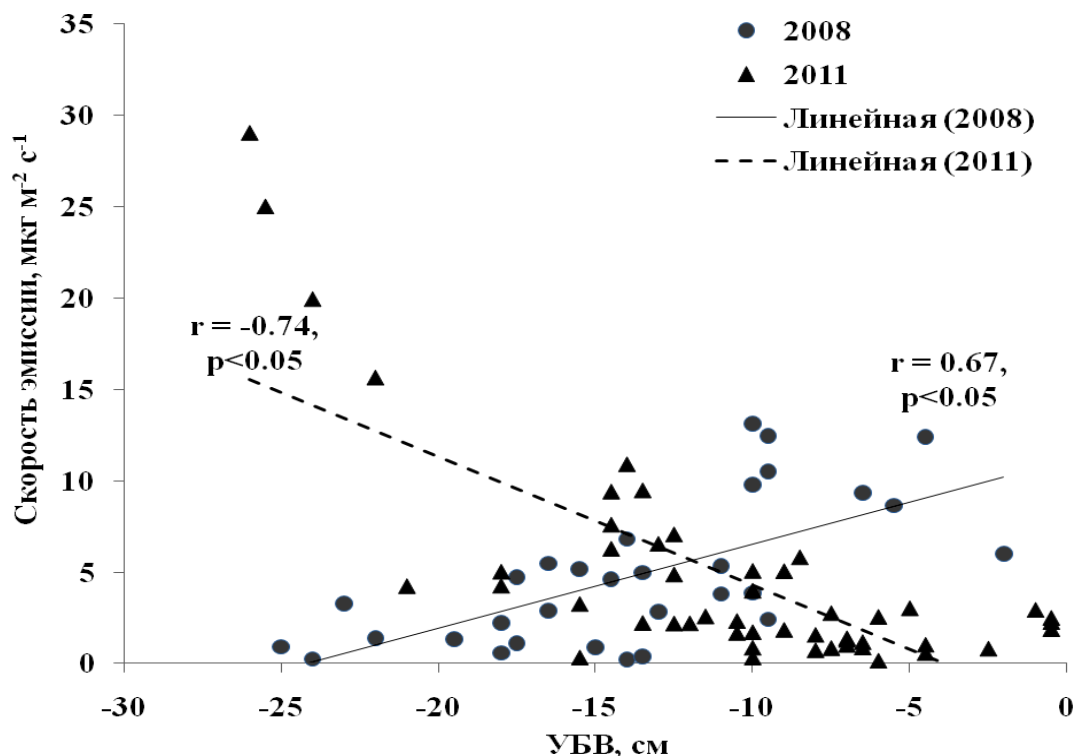


Рис.4. Зависимость скорости эмиссии метана от УБВ в 2008 и 2011 гг.

Нами выявлена сопряженность сезонной скорости эмиссии CH_4 с температурой почвы на олиготрофной мочажине и мезоевтрофной топи. Однако, при объединении данных с разных участков и увеличении объема выборки связь эмиссии с изменением температуры почвы на глубине 30 см становится менее тесной (в 2008 г. $r=0.5$, $p=0.01$; в 2011 г. $r=0.4$, $p=0.07$) и описывается экспоненциальной функцией, что согласуется с исследованиями других авторов (Bubier et al., 1993; MacDonald, 1998; Hargreaves et al., 2001; Глаголев и др., 2010).

В сезонной динамике зависимость скорости эмиссии метана от атмосферного давления не выявлена. Однако, влияние атмосферного давления на эмиссию метана становится значимым в течение суток, когда резко меняются погодные условия.

Связь процесса эмиссии CH_4 в течение сезона с содержанием углерода растворенных органических соединений в болотных водах нами не установлена. Олиготрофный участок характеризовался более низким содержанием растворённого (DOC) углерода, чем мезоевтрофный топяной. Отсутствие зависимости скорости эмиссии метана от DOC указывает на достаточное содержание доступного для метаногенов углерода растворенных в воде органических соединений в течение всего сезона. Так Kang и Freeman (2002) отмечают, что на лесном болоте в летний период скорость эмиссии метана находилась в пределах $0.004-0.008 \text{ мг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при концентрациях DOC $18-40 \text{ мг л}^{-1}$, а в осенний период увеличение концентрации DOC до 80 мг л^{-1} приводило к увеличению эмиссии метана на 85%.

Таким образом, в результате проведённых нами в течение двух лет наблюдений установлено, что в сезонной динамике наиболее активная эмиссия метана из болота в атмосферу происходит в июле. Вследствие сильных различий в погодных и микроклиматических условиях, величина потока метана в разные годы может существенно различаться. Для более влажного вегетационного сезона 2008 г. высокие

значения эмиссии метана наблюдали на хорошо увлажнённых участках в понижениях микрорельефа, что не было характерно для 2011 г. Максимальные средние за сезон значения скорости эмиссии CH_4 за два года наблюдений отмечены с поверхности осоково-сфагнового ковра, где сохраняются благоприятные условия для обильного роста трав р. *Carex*.

Скорость эмиссии метана в течение вегетационного периода зависит от УБВ ($r=0.67$ для 2008 г. и $r=-0.74$ для 2011г.). В 2008 г. наблюдали снижение выделения метана при понижении УБВ, а в 2011 г. выявлена обратная тенденция, что может быть связано с разными механизмами транспорта метана из торфяной залежи. Не выявлена зависимость скорости потока метана в течение сезона от температуры воздуха и атмосферного давления, однако эмиссия CH_4 сопряжена с температурой почвы на глубине 30 см.

Глава 5. Роль растений в транспорте метана в системе «болото-атмосфера»

Имеется значительное число публикаций, посвященных исследованиям роли сосудистых растений в процессе транспорта метана из торфяной залежи в атмосферу. По их мнению, плотность трав в надземной фитомассе на болоте является показателем величины эмиссионного потока метана (Schimel, 1995; Kelker, Chanton, 1997; Kutzbach et al., 2004). Однако, с увеличением плотности надземной фитомассы почти в 3 раза на кочке не происходит пропорциональное увеличение скорости эмиссии метана. Известно, что в ряду кочка→мочажина→осоково-сфагновый ковёр постепенно снижается доля кустарничков и возрастает доля трав в общей массе растений. Увеличение доли трав в надземной фитомассе, прежде всего видов р. *Carex*, на участке осоково-сфагнового ковра усиливает скорость выделения метана в атмосферу.

Параметрический корреляционный тест полученных нами данных подтвердил тесную связь скорости эмиссии метана с увеличением доли надземных органов трав в общей фитомассе в болотных сообществах. В работе Kelker и Chanton (1997) эта закономерность объясняется особенностями строения стебля этих растений и наличием в нем аэренхимы, которая способна проводить газы на границе раздела двух сред - торфа и атмосферы. В случае с массой кустарничков, коэффициент корреляции имел обратное, но столь же высокое значение.

Тесная линейная связь между надземными органами трав и скоростью вертикального потока метана так же описана в работе Whiting и Chanton (1992). В ходе эксперимента авторами было установлено, что на участках со срезанными травами количество растворенного метана в поровой воде значительно снижается. Это связано со снижением корневой экссудации свежего органического материала для метаногенных бактерий, использующих ацетатный путь метаногенеза.

Проведенные нами на болоте эксперименты со срезанием надземных органов осок так же показали значительное снижение концентрации эмитируемого метана в камере. В трех экспериментах менялась скорость накопления метана во времени, механизмы которого трудно объяснить. При измерении на промежутке времени 20 мин. в случае с вегетирующей осокой скорость увеличения концентрации описывалась логарифмической функцией, а со срезанной – линейной.

Выявлена сопряженность скорости выделения метана через надземные органы отдельно взятых растений *Carex rostrata* и *Scheuchzeria palustris* (эксперимент) и потоком CH_4 с поверхности разных участков болота, где эти растения произрастают (рис. 5).

В начале и конце июля максимальная скорость потока отмечена на участках с доминированием осоки (рис. 5). Такие же результаты представлены в работах других авторов (Глаголев, Смагин, 2006; Kutzbach et al., 2004). М.В. Глаголев и А.В. Смагин (2006) при сравнении скорости потока в пересчёте на сухой вес растений наблюдали значительное увеличение потока метана через стебли *Carex rostrata*. Для *Menyanthes trifoliata*, *Охycoccus palustris* и мхов р. *Sphagnum* значения эмиссии метана были значительно ниже. Транспорт метана через надземные органы осок при перерасчете нами

на сухую массу составило $0.093 \pm 0.04 \text{ мгС г}^{-1} \text{ час}^{-1}$, что соответствует данным вышеприведенных авторов. По всей видимости, различия в скорости транспорта метана из поровой воды торфяной залежи через травянистые растения связаны с их строением, а не с какими-либо физиологическими различиями этих видов (Schimel, 1995).

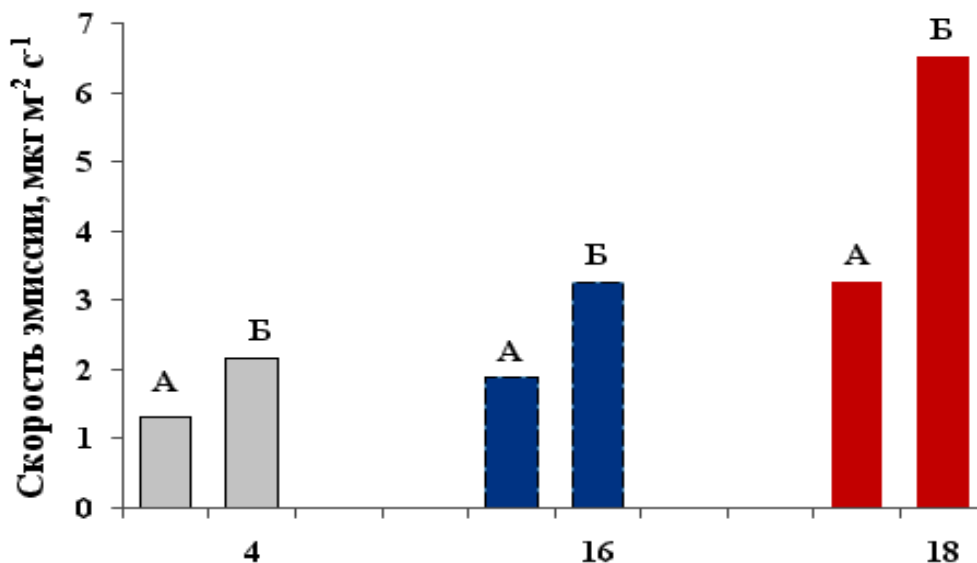


Рис.5. Скорость эмиссии через надземные органы растений (А) и с поверхности болота (Б) в начале июля 2012 г. Цифрами обозначены номера исследуемых участков: 4 – олиготрофная мочажина с доминированием шейхцерии (292 шт м^{-2}), 16 – мезоевтрофная проточная топь с доминированием шейхцерии (416 шт м^{-2}), 18 – мезотрофный участок с доминированием осоки (184 шт м^{-2})

На участках в присутствии шейхцерии в растительном покрове скорость эмиссии была несколько меньше (рис.5). Минимальная эмиссия метана зафиксирована на участке № 4, где плотность *Scheuchzeria palustris* почти в 1.5 раза ниже, чем на участке № 16. Однако, кроме плотности трав на общую эмиссию может также оказывать влияние ботанический состав торфяной залежи, степень её разложения и характер увлажнения.

В результате проведенного анализа полученных нами значений эмиссии метана установлено, что на участках с доминированием *Scheuchzeria palustris* вклад этих растений в общий поток метана составляет 60%, при скорости эмиссии с поверхности участка $2.1 - 3.25 \text{ мкг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Доля *Carex rostrata* в дневной эмиссии с поверхности осоково-сфагнового ковра составила 52% при общей скорости потока $4.09 - 6.52 \text{ мкг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. По оценкам других авторов на болотах вклад сосудистых растений в общий поток метана в атмосферу может составлять не менее 37% (Schimel, 1995), а иногда достигает 90% (Whiting, Chanton, 1992). Нами установлено, что скорость эмиссии CH_4 с поверхности болота не зависит от общей массы надземных органов и массы корней растений. Основным же предсказателем скорости потока в разных сообществах растений является масса надземных органов трав.

Установленные закономерности позволяют с большой долей вероятности говорить о значительном влиянии сосудистых растений в составе напочвенного покрова болота на скорость эмиссии метана, что согласуется с данными других авторов.

Глава 6. Эколого-географическая вариабельность эмиссии метана в болотных экосистемах северных широт

Для мезоолиготрофного болота Медла-Пэв-Нюр среднетаёжной подзоны Республики Коми за июнь-октябрь 2008 г. величина скорости эмиссии метана на всех участках варьировала в пределах от 0.033 до $8.4 \text{ мкг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, среднее значение составило 3.5

мкг м⁻²с⁻¹. В мае-сентябре 2011 г. пределы варьирования эмиссии метана составили 0.09 – 14.02 мкг м⁻²с⁻¹, среднее значение – 3.31 мкг м⁻²с⁻¹. Однако эпизодически выбросы достигали 21.5 мкг м⁻²с⁻¹ в 2008 г. и 35.2 мкг м⁻²с⁻¹ в 2011 г.

Полученные нами в 2008 г. значения скорости эмиссии метана с поверхности олиготрофной мочажины и мезоевтрофной топи на исследованном нами болоте были выше результатов, которые приводятся в литературе для сходных растительных сообществ болот Западной Сибири (Panikov et al., 2001; Sabrekov et al., 2011). В осоково-сфагновом сообществе, топи и олиготрофной сфагново-шейхцериевой мочажине эмиссия превышала в 2-4 раза опубликованные другими авторами результаты (Panikov et al., 2001; Sabrekov et al., 2011; Фёдоров и др., 2008). Более низкие значения потока метана на исследованных участках были получены нами в период вегетации 2011 г., за исключением осоково-сфагнового ковра и олиготрофной кочки, где этот процесс был выше в 2-3 раза, чем в 2008 г.

Скорость эмиссии с осоково-сфагнового сообщества составила 14.02 мкг м⁻²с⁻¹, а на олиготрофной кочке - 10.9 мкг м⁻²с⁻¹, что достаточно близко к экспериментально установленному максимуму для среднетаёжных болот Западной Сибири (Глаголев, Смагин, 2006). Полученные нами величины выбросов метана на мезоолиготрофном болоте оказались выше в несколько раз данных, полученных камерным методом для олиготрофного и мезотрофного болот среднетаёжной подзоны Республики Коми А.И. Слободкиным с соавторами (1992). Более низкие значения эмиссии метана наблюдали с поверхности аапа болота Финляндии (Hargreaves et al., 2001), мезотрофного болота Северо-Восточной Германии (Augustin et al., 1998) и мезоолиготрофного болота Канады (Bubier et al., 1993). Имеющиеся в литературе данные свидетельствуют о том, что изменение гидрологического режима болот влияет на выбросы метана.

Полученные нами значения эмиссии метана отличаются от результатов исследований газообмена на осушенных болотах (Сирин и др., 2012). Имеющиеся в литературе данные свидетельствуют о том, что выбросы метана с поверхности осушенных участков торфодобычи на несколько порядков ниже, а с поверхности дренажных каналов - выше полученных нами значений как для мезотрофного осоково-сфагнового ковра, так для мезоевтрофной травяно-сфагновой проточной топи.

Таким образом, по интенсивности потока метана в атмосферу мезоолиготрофное болото Медла-Пэв-Нюр может заметно отличаться от болот других регионов. Нами был рассчитан суммарный выброс метана, как произведение медианы скорости эмиссии и периода активной эмиссии метана (ПЭМ), который на 12.3% превышает продолжительность летне-осеннего периода (Суворов, Глаголев, 2007). Суммарная эмиссия для основных исследуемых сообществ в этом случае рассчитывается путем нахождения произведения медианы и ПЭМ.

Для 2008 г. период активной эмиссии метана составил 180 сут. (4320 часов). С учетом этого максимальная суммарная эмиссия за сезон в 2008 г. наблюдалась в мезоевтрофной топи и мезотрофном осоковом ковре и составила 71 и 68 г м⁻² соответственно, а в сообществах олиготрофных мочагин - 58 г м⁻². Минимальное суммарное значение эмитируемого метана наблюдали с поверхности олиготрофных кочек - 14 г м⁻².

В 2011 г (ПЭМ=4656 часов) в результате значительных эпизодических выбросов метана в атмосферу с поверхности олиготрофных кочек суммарная эмиссия составила 64 г м⁻², что на 22% выше, чем было в 2008 г. Для сообществ олиготрофных мочагин и мезоевтрофных топей наблюдали снижение этой величины на 41 и 52% соответственно. Максимальные значения для этого года отмечены с поверхности мезотрофного осоково-сфагнового ковра - 105 г м⁻².

Рассчитанные нами значения суммарных выбросов метана близки к значениям сезонного потока, наблюдаемым на болотах в США (Wilson et al., 1989; Shannon, White, 1994; Dise et al., 1993). Значительные расхождения выявляются при сопоставлении наших

данных с результатами исследований эмиссионных потоков в субарктических тундрах (Heyer et al., 2002; Heikkinen et al., 2004), черноольховых сообществах, а так же олиготрофных грядово-мочажинных болотах южной тайги (Вомперский и др., 2000). Рассчитанный за сезон суммарный поток метана по результатам измерений методом микровихревых пульсаций (Rinne et al., 2007) также оказался ниже полученных нами данных. В работах ряда авторов (Shannon, White, 1994; Huttunen et al., 2003) показано, что изменение суммарной эмиссии метана из болота в атмосферу связано с погодными условиями, поэтому может меняться в течение ряда лет.

С использованием космоснимков высокого разрешения и геоботанических описаний растительных сообществ нами рассчитана площадь, которую занимают основные типы сообществ на исследованном участке болота. Олиготрофная сосново-кустарничково-травяно-сфагновая фация была разделена условно на меньшие по площади зоны с учетом проективного покрытия кочек и мочагин. С учетом общей площади, занимаемой разными типами фаций, и скорости эмиссии с поверхности данных растительных сообществ, проведена оценка суммарного потока метана со всего исследованного участка на болоте Медла-Пэв-Нюр, имеющего площадь 1598581 м² (1.6 км²) (Таблица). В 2008 г. в атмосферу эмитировало около 75 т CH₄, а в 2011 г. - около 89.5 т CH₄. Согласно исследованиям Bubier с соавт. (2005) для влажного осокового болота площадью 6.9 км² (период наблюдений - 160 суток), величина суммарного потока метана достигала 147 т при холодной и сухой погоде и 276 т в теплое и влажное лето. Для олиготрофного болота суммарный поток составил 14 т на площади в 2 км² для двух лет наблюдений.

Таблица. Суммарное количество эмитируемого метана (гCH₄) в исследуемых сообществах за период вегетации двух лет наблюдений

Тип сообщества	Площадь, м ²	2008 г.	2011 г.
Олиготрофное (кочки 70-80%)	475181	6872714	30474098
Олиготрофное (кочки 30%)	294971	11445536	7710073
Олиготрофное (мочажины 80%)	82484	4836123	2025512
Мезотрофное	317385	21520836	33315569
Мезоевтрофное (топяное)	428560	30492215	16054768
Сумма	1598581	75167423	89580021

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, за период активной эмиссии с поверхности мезоолиготрофного болота в атмосферу поступает 75 – 89.5 т метана. В то же время исследованное болото является стоком углерода для CO₂ (Мигловец и др., 2014). Несмотря на то, что объемная доля метана в суммарном потоке углерода в системе «болото-атмосфера» незначительна, его способность усиливать парниковый эффект выше, чем у диоксида углерода. С учетом того, что приведенные в литературе данные по эмиссии метана существенно различаются для болот разных географических районов, для объективной оценки суммарных выбросов этого газа в атмосферу с заболоченных территорий немаловажное значение имеют методы измерений и расчётов эмиссионных потоков. Для получения достоверных результатов имеет смысл использовать в комплексе несколько методов измерений, например, совмещая камерный с методом микровихревых пульсаций.

Выводы

1. Величина потока метана в течение суток с поверхности мезоолиготрофного болота в атмосферу зависит от характера микрорельефа и ботанического состава напочвенного покрова. При благоприятных погодных условиях поток метана возрастает в вечернее и ночное время, что сопряжено с повышением температуры торфяной залежи на глубине 20 см. В дни с обильными осадками суточная динамика эмиссии метана не выражена.
2. В сезонной динамике величина эмиссии метана в атмосферу возрастает с мая по июль. В условиях влажного и прохладного вегетационного сезона максимальная скорость эмиссии составляет $8.4 \text{ мкг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, в условиях сухого и тёплого лета возрастает до $14.02 \text{ мкг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что может быть связано с высвобождением малорастворимого и слабо подвижного в воде метана при низких значениях УБВ. Наиболее высокая скорость потока метана установлена в мезотрофном осоково-сфагновом сообществе, где активное участие осоки в напочвенном покрове усиливает транспорт метана из болота в атмосферу.
3. Зависимость скорости потока метана от уровня болотных вод определяется погодными условиями в течение вегетационного сезона. В прохладное с избыточным количеством осадков лето с понижением уровня болотных вод эмиссия метана снижается, а в теплое лето с недобором осадков отмечается обратная тенденция. Во все годы наблюдений установлена положительная корреляция эмиссии CH_4 в течение сезона с температурой почвы и не выявлена ее зависимость от атмосферного давления и содержания растворенного углерода в воде.
4. Участие *Carex rostrata* и *Scheuchzeria palustris* в болотных сообществах усиливает выброс метана в атмосферу. В дневное время суток через растения *Carex rostrata* и *Scheuchzeria palustris* транспортируется 52 – 60% объема метана, эмитированного с поверхности исследованных участков болота.
5. За период вегетации с исследованных участков мезоолиготрофного болота площадью 1598581 м^2 в атмосферу поступает от 75 до 89.5 т метана, в зависимости от погодных условий.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Мигловец М.Н. Эмиссия метана в растительных сообществах мезоолиготрофного болота средней тайги / М.Н. Мигловец, С.В. Загирова, О.А. Михайлов // Теоретическая и прикладная экология. - 2014. - №1. - С. 93-98.
2. Мигловец М.Н. Вертикальные потоки CH_4 и CO_2 в растительных сообществах мезоолиготрофного болота средней тайги / М.Н. Мигловец, О.А. Михайлов, С.В. Загирова // Известия Самарского научного центра РАН. - 2014. - Т.16. - №1. - С. 193-197.

В прочих изданиях:

1. Мигловец М.Н. Эмиссия парниковых газов в болотных экосистемах Севера / М.Н. Мигловец, О.А. Михайлов // Человек и окружающая среда: тезисы докл. XVII Коми республ. науч. конф. студентов и аспирантов (Сыктывкар, 2-6 апреля 2007 г.). - Сыктывкар. - 2007. - С.70.
2. Михайлов О.А. Температурный режим болота Медла-Пэв-Нюр / О.А. Михайлов, М.Н. Мигловец // Проблемы региональной экологии в условиях устойчивого развития: Матер. докл. Всерос. науч.-практич. конф. (Киров, 26-29 ноября 2007 г.). - Киров. - Вып. V. - Ч.1. - 2007. - С. 71-73.
3. Мигловец М.Н. Микроклиматические особенности болота Медла-Пэв-Нюр (Сыктывдинский район) / М.Н. Мигловец, О.А. Михайлов // Человек и окружающая среда:

тезисы докл. XVIII Коми республ. науч. конф. студентов и аспирантов (Сыктывкар, 7-15 апреля 2008 г.). - Сыктывкар. - 2008. - С.67.

4. Мигловец М.Н. Эмиссия метана с поверхности болота Медла-Пэв-Нюр (Сыктывдинский район) / М.Н. Мигловец, О.А. Михайлов // Актуальные проблемы биологии и экологии: Матер. докл. XVII Всерос. молодежной науч. конф. (Сыктывкар, 5-9 апреля 2010 г.). - Сыктывкар. - 2010. - С.170-171.

5. Мигловец М.Н. Эмиссия метана в системе «фитоценоз-атмосфера» болотной экосистемы // Актуальные проблемы биологии и экологии: Матер. докл. XVIII Всерос. молодежной науч. конф. (Сыктывкар, 4-8 апреля 2011 г.). - Сыктывкар. - 2011. - С.190-191.

6. Михайлов О.А. Эмиссия парниковых газов в экосистемах мезо-олиготрофного болота средней тайги / О.А. Михайлов, М.Н. Мигловец, С.В. Загирова, Н.Н. Гончарова // Резервуары и потоки углерода в лесных и болотных экосистемах бореальной зоны: тезисы докл. Международ. науч. конф. (Сыктывкар, 26-30 сентября 2011 г.). - Сыктывкар. - 2011. - С.82-83.

7. Мигловец М.Н. Реакция эмиссии метана на сезонные изменения гидротермических и гидрохимических факторов на мезо-олиготрофном болоте средней тайги / М.Н. Мигловец, О.А. Михайлов // Актуальные проблемы биологии и экологии: Матер. докл. XIX Всерос. молодежной науч. конф. (Сыктывкар, 2-6 апреля 2012 г.). - Сыктывкар. - 2012. - С.159-161.

8. Мигловец М.Н. Суточная динамика эмиссии метана и ее зависимость от температуры почвы на различных участках мезо-олиготрофного болота подзоны средней тайги / М.Н. Мигловец, М.В. Лукашева // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Матер. X Всерос. науч.-практич. конф. с междунар. участием (Киров, 4-5 декабря 2012 г.). - Киров. - 2012. - Ч.1. - С.84-86.

9. Мигловец М.Н. Роль сосудистых растений в транспорте метана в атмосферу на мезоолиготрофном болоте средней тайги / М.Н. Мигловец, М.В. Лукашева // Молодежь и наука на Севере: Матер. докл. II Всерос. (XVII) молодеж. науч. конф. «Актуальные проблемы биологии и экологии» (Сыктывкар, 22-26 апреля 2013 г.). - Сыктывкар. - 2013. - С.91-92.

10. Лукашева М.В. Суточный ход эмиссии метана в сообществах растений *Carex* и *Scheuchzeria* на мезоолиготрофном болоте / М.В. Лукашева, М.Н. Мигловец // Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностика живых систем: Матер. XI Всерос. науч.-практ. конф.-выставки инновац. экол. проектов с междунар. участием (Киров, 26-28 ноября 2013 г.). - Киров. - 2013. - С. 271-275.

11. Разнообразие растительного покрова, запасы углерода и эмиссия парниковых газов в болотных экосистемах ООПТ средней тайги / Н.Н. Гончарова, С.В. Загирова, О.А. Михайлов, М.Н. Мигловец // Углерод в лесных и болотных экосистемах особо охраняемых природных территорий Республики Коми. Под ред. К.С. Бобкова, С.В. Загирова. - Сыктывкар, 2014. - 202 с.