На правах рукописи

ШНЫРЕВ Николай Андреевич

РЕЖИМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И ОЦЕНКА ГАЗООБМЕНА НА ГРАНИЦЕ ПОЧВЫ И АТМОСФЕРЫ (НА ПРИМЕРЕ ПОТОКОВ МЕТАНА СТАЦИОНАРА СРЕДНЕ-ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ «МУХРИНО»)

Специальность 06.01.03 – АГРОФИЗИКА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Научные руководители:

Смагин Андрей Валентинович, доктор биологических наук, профессор кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Официальные оппоненты:

Курганова Ирина Николаевна
доктор биологически наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода ФГБУН «Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН»

Курбатова Юлия Александровна
кандидат биологических наук, доцент, временно исполняющий обязанности заведующего лабораторией биогеоценологии им. В.Н. Сукачева ФГБУН «Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Почвенный институт имени В.В. Докучаева»

Защита диссертации состоится «17» мая 2016 года в 15 часов 30 мин. в аудитории М-2 на заседании Диссертационного совета Д 501.002.13 при ФГБОУ ВО «Московский государственный университет» имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1. стр. 12, факультет почвоведения.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д.27, отдел диссертаций) и на сайтах https://istina.msu.ru/dissertations/18838290/ и http://soil.msu.ru/nauka/uchenyj-sovet

Автореферат разослан «15» марта 2016 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Костина Наталья Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Газообмен с атмосферой является одной из важнейших биосферных функций почв и сложным физическим процессом, контролирующим плодородие и продуктивность в природных и антропогенных ландшафтах [*Добровольский, Никитин, 1990; Шеин, Гончаров, 2006*]. Ему присущи интенсивные временные изменения и значительное пространственное варьирование [*Карпачевский, 1997; Law et al., 2001*], поэтому проблема репрезентативного, адекватного мониторинга газовых потоков на границе почвы и атмосферы остается не решенной в полной мере даже для диоксида углерода [*Пулы и потоки…, 2007; Курганова, 2010*]. Для парникового газа метана, второго по значимости компонента углеродного газообмена, проблема усугубляется еще большим варьированием, присущим гидроморфным ландшафтам с феноменом преимущественных потоков газов из зон локальной ненасыщенности [*Смагин и др., 2000; Поздняков и др., 2003*]. Мало исследованными остаются вопросы количественной оценки газовых потоков в холодное время года, несмотря на возможный вклад для почв умеренного климата до 30% [*Смагин и др., 1992; Курганова, 2010*], а также углеродного газообмена при вовлечении болотных экосистем в сельскохозяйственное использование и лесоразведение [*Зайдельман и др., 2001; Сирин и др., 2012*]. Наиболее используемый камерно-статический метод может давать различные результаты в зависимости от особенностей реализации, а его теория и традиционные способы расчета потоков все чаще подвергаются физически обоснованной критике [*Машика, 2006; Davidson et al., 2002; Jensen et al., 1996; Venterea et al., 2009; Смагин, 2015*]. Эти и ряд других нерешенных вопросов объясняют выбор темы инструментальной количественной оценки газообмена почвы и атмосферы на примере метана, актуальность которой определяется ролью газовых потоков в формировании физических факторов плодородия и продуктивности, углеродного бюджета почв и его динамики при антропогенных изменениях и в регуляции климата, согласно концепции парникового эффекта.

Цель работы:

Разработка физических основ количественного мониторинга, оценки и моделирования газовых потоков метана на границе почвы и атмосферы.

Задачи:

1. осуществить режимные наблюдения газообмена и контролирующих его факторов для почвенного покрова болотного ландшафта;
2. выявить закономерности пространственно-временной динамики метана в различные периоды, включая холодный сезон;
3. разработать подход (физические основы) ландшафтной снеговой съемки для оценки газообмена в холодный период года и провести сравнение результатов с данными традиционных камерно-статических измерений;
4. разработать метод и методику количественной оценки потоков метана малой интенсивности в аэрированной торфяной толще с учетом действия метанотрофного фильтра.

Материалы, используемые в работе

Концентрация CH_4 хроматографически определена в более чем 20 000 проб воздуха, сделано не менее 1 300 измерений потоков газов в различных экосистемах. Автором разработаны и были использованы в работе автоматические камеры (использовались в ручном режиме) для измерения потоков газов. Неоднократно были модернизированы приборы, используемые на различных этапах исследований.

Научная новизна работы

Впервые исследована динамика газообмена с атмосферой характерных элементов структуры почвенного покрова типичного болотного ландшафта Западносибирской низменности не только в течение вегетационного сезона, но и холодное время года со снеговым покровом (банк данных более 1300 измерений). Выявлена зависимость результатов оценки газовых потоков на границе почвы и атмосферы камерно-статическим методом от способов (моделей), использующихся для расчета потоков по трендам динамики концентраций газов в камере-изоляторе. Показана вероятность сильного (до 2-10 раз и более) занижения результатов при использовании общепринятого метода расчета по линейной аппроксимации трендов. Предложены новые методики ландшафтной снеговой съемки газовых потоков и оценки эмиссии метана с учетом его внутрипочвенного окисления (метанотрофного фильтра) в условиях глубокого залегания уровня болотных вод.

Практическая значимость

Полученные результаты характерных величин потоков метана в различных элементах болотного ландшафта и закономерности их динамики могут быть использованы для уточнения оценок регионального вклада болот среднетаежной зоны в общую эмиссию метана. Данные о профильном распределении метана в аэрированной торфяной толще, эмиссионных потоках и их блокировании метанотрофным фильтром представляют интерес для прогноза углеродного баланса и газовых эмиссий при освоении болотных ландшафтов (осушение и противопожарное обводнение). Разработанные методы и модели внедрены в учебно-образовательный процесс в МГУ имени М.В. Ломоносова и ЮГУ.

Защищаемые положения:

– количественная оценка газообмена почв и атмосферы камерно-статическим методом может давать сильно различающиеся значения газовых потоков в зависимости от используемых устройств и аппроксимационых моделей;

– использование камер без перемешивания воздуха и общепринятый расчет по линейной модели в подавляющем большинстве случаев занижают оценку газовых потоков;

– внутрисуточная изменчивость потоков метана из болота увеличивается с внутрисуточной изменчивостью температуры воздуха и уменьшается с увеличением глубины залегания болотных вод;

– годовая динамика потоков метана из исследованного верхового западносибирского болота имеет куполообразный характер с максимумом эмиссии в июле-августе;

– распределение метана в снеговом покрове и аэрированной торфяной почве является результатом сочетания биогенных источников/стоков и процессов массопереноса, что позволяет производить физически обоснованный расчет газовых потоков по форме стационарных газовых профилей;

– оценка эмиссии метана по стационарным распределениям концентраций в толще снега (метод снеговой съемки) в большинстве случаев значительно превышает величины, измеренные в полевых условиях методом закрытых камер.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на конференциях и симпозиумах: «Биогеоценология и ландшафтная экология: итоги и перспективы» (Томск, 2012), «Биология – наука XXI века» (Пущино, 2014), «Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее» (Ханты-Мансийск, 2007, 2011). Работа прошла апробацию на кафедре физики и мелиорации почв ф-та почвоведения МГУ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из 3 глав, выводов, списка литературы содержащего 293 источника, из них 120 на иностранных языках. Работа изложена на 184 страницах формата А4, содержит 55 рисунков и 2 таблицы.

Благодарности

Автор глубоко признателен руководству кафедры физики и мелиорации почв ф-та почвоведения МГУ и научно-образовательного центра «Динамика окружающей среды и глобальные изменений климата» ЮГУ в лице проф. Е.В. Шеина и проф. Е.Д. Лапшиной за возможность проведения исследований по теме диссертации и всестороннюю организационную помощь, а также научным коллективам этих организаций и персонально к.б.н. М.В. Глаголеву, д.б.н. Т.А. Архангельской за профессиональную и товарищескую поддержку. Отдельную благодарность автор выражает научному руководителю проф. А.В. Смагину за помощь в обобщении экспериментального материала, обосновании и четкой формулировке физически обоснованных математических моделей и подготовке публикаций по результатам диссертации. Сердечную благодарность хочется выразить моим родным и близким, друзьям, без повседневной поддержки и заботы которых, работа никогда бы не состоялась.

Публикации. Материалы диссертационной работы в полной мере опубликованы автором в 8 работах, в том числе в 4 статьях в реферируемых журналах, входящих в список ВАК Минобрнауки РФ для опубликования результатов диссертационных работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ (ПРОБЛЕМА ИЗУЧЕНИЯ ГАЗООБМЕНА ПОЧВ С АТМОСФЕРОЙ). КРАТКИЙ ОБЗОР

Почвенный воздух, или газовая фаза – важнейшая составная часть почвы, находящаяся в тесном взаимодействии с твердой, жидкой и живой фазами почвы. Начало систематизированного изучения газообмена почв и атмосферы было положено в начале XX столетия работами Костычева [1940], Бэкингема [*Buckingham*, 1904], Дояренко [1910], Лезы [*Leather*, 1915], Рассела и Эпплярда [*Russell*, *Appleyard*,1915], Ромелля [*Romell*, 1923], Мак-Кула и Буйюкоса [*Bouyoucos*, *McCool*, 1924], Люндегарда [*Lündegårdh*, 1927], Хамфильда [*Humfield*, 1930], Кина [*Keen*, 1931] и ряда других исследователей.

Пик экологических исследований углеродного газообмена в связи с проблемой парникового эффекта и глобальных климатических изменений пришелся на конец девяностых годов и первое десятилетие нового века [*Минько*, 1988; *Заварзин*, 1994, 1995, 1998, 2000; *Кудеяров* и др., 1995; *Вомперский*, 1995; *Паников*, 1998; *Наумов*, 2003, 2004; *Степанов* и др., 1996, 1997; *Смагин*, 1998, 1999, 2000, 2005; *Бажин*, 2000; *Сирин* и др., 2001; *Замолодчиков* и др., 2004; *Кудеяров*, *Курганова*, 2005; *Умаров* и др., 2007; *Глаголев*, 2010; *Курганова*, 2010; *Степанов*, 2011; *Post* et al, 1992; *Houghton*, 1992, 1995; *Sitaula* et al, 1995; *Bridges*, *Batjes*, 1996; *Yagi*, 1997; *Beauchamp*, 1997; *Bouwman*, 1998]. В итоге была выявлена биосферная роль почвенного покрова как источника, стока и резервуара газообразных веществ по отношению к атмосфере. Оценены почвенные вклады в глобальную эмиссию парниковых газов, достигающие 1/3 для CO_2 и метана.

Среди естественных источников метана болота занимают лидирующую позицию [IPCC, 2007]. Поток CH_4 из всех болот составляет по данным разных авторов 50 Тг/год [*Бажин*, 2000; *Nakagawa* et al., 2002], 92 Тг/год [*Cao* et al., 1996], 110 Тг/год [*Matthews, Fung*, 1987], 115 Тг/год [*Morishita* et al., 2000; *Christensen,* 1992], 150 Тг/год [*Nakagawa* et al., 2002], 175 Тг/год [*Bergamaschi* et al., 2007] или даже 260 Тг/год [*Walter* et al., 2001]. Около 60% глобальной эмиссии из болот обусловлено богатыми торфом болотами, находящимися в полосе от 50 до 70° с.ш. [*Matthews, Fung*, 1987]. Метан, поступающий из болот, особенно значим для нашей страны, где торфяные болота согласно данным земельного учета составляют более 8% площади [*Торфяные болота России*…, 2001], а вместе с заболоченными мелкооторфованными землями около 22% [*Вомперский* и др., 1994; *Вомперский с соавт.,* 2005]. Природное разнообразие болот таежной зоны определяет существенные различия в их вкладе в эмиссию углеродсодержащих газов и метана, в частности [*Sirin,* 2004]. Очевидно, что успешное решение проблемы долгосрочного прогнозирования климатических изменений, углеродного цикла и газообмена с атмосферой невозможно без физически-обоснованных моделей наземных источников и стоков газообразных веществ и их информационного мониторингового обеспечения, что и определило выбор темы настоящих диссертационных исследований.

Глава 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Режимные наблюдения за газовыми потоками и контролирующими их гидротермическими факторами осуществлялись в 2010-2014 гг на полевой учебно-экспериментальной станции «Мухрино», Югорского Государственного Университета. Станция «Мухрино» (болото «Мухрино», координаты стационара 60°53'20" с.ш., 68°42'10" в.д.) расположена в средне-таежной подзоне Западной Сибири. Непосредственные наблюдения за газовыми потоками осуществлялись на объекте «Мухрино» по 4 элементам болотного ландшафта с учетом повторностей – топь (2 точки), мочажина (3 точки), гряда (2 точки) и рям (2 точки). Экспериментальные исследования газообмена (газовых потоков) на границе почвы и атмосферы включали измерения потоков метана в атмосферу с поверхности почвы или снега методом статических камер в разных вариантах. Для определения вертикального распределения метана в толще снега в зимний период, а также в торфяной залежи на участках с глубоким залеганием уровня болотных вод (УБВ) в летний период использовался метод отбора проб воздуха по профилю с помощью тонких стальных трубок (модернизированная игла-бур Ястребова [*Ястребов*, 1956]). Образцы газовой фазы метана в 20 мл пластиковых шприцах герметизировались с помощью резиновых заглушек и транспортировались в лабораторию стационара «Мухрино». Концентрация метана в пробах в лабораторных условиях определялась на газовом хроматографе «Кристалл 5000.1». На хроматографе были установлены пламенно-ионизационные детекторы. Относительная ошибка повторных определений концентраций газов составляла менее 0.4 % или не более 0.02 ppm.

В работе использовалось большое количество приборов для определения вспомогательных показателей. Режимные наблюдения проводились по следующим показателям: Rotronic HygroClip S3 (температура и относительная влажность воздуха); Young Wind Monitor 05103 (скорость и направление ветра); Li-Cor LI-190SA Quantum Sensor (входящая и отраженная фотосинтетически-активная радиация); NR Lite 2 Net Radiometer (баланс солнечной радиации); PR2 - Profile Probe (влажность торфа); HFP01SC (потоки тепла в почве); STP01 (температура почвы); Baro-Diver DI500 (температура, УБВ и атмосферное давления); DS1921G (температура снега); RG3 (осадки) и еще не менее 20 наименований.

Статистическая обработка измерений, а также аппроксимация трендов динамики содержания метана в камере, математические расчеты потоков метана, построение графических иллюстраций проводились с использованием программ Statistica 6.1, SigmaPlot 9 и Excel 2003 с помощью стандартных пакетов функций и авторских макросов. При расчетах газовых потоков по традиционной методике (линейное приближение) тренды динамики концентраций углерода метана в камере аппроксимировались уравнением прямой.

Глава 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Режимные наблюдения за гидротермическими факторами, контролирующими газообмен на границе почвы и атмосферы

Анализ фрагментов инструментального мониторинга температур почвы объектов исследования (рямы, мочажины) на разных глубинах позволил выявить ряд особенностей, представляющих интерес с позиций газообмена (**Рис. 1**). Почва является мощным буфером по отношению к холоду или теплу, поступающему из атмосферы. Годовые амплитуды температур внутри почвы были существенно ниже, чем для атмосферного воздуха, и не превышали 20 ^{o}C даже для самого верхнего 1 см слоя почвы на границе с атмосферой. Это явление во многом обусловлено эффектом антифриза в зимний период, благодаря которому почва даже в очень холодную погоду (минус 30-40 ^{o}C) не остывала ниже температуры фазового перехода «вода/лед», составляющей для поверхностных горизонтов торфяника значения -0.4 – -0.9 ^{o}C. Холодный период характеризовался инверсией температур с неустойчивой

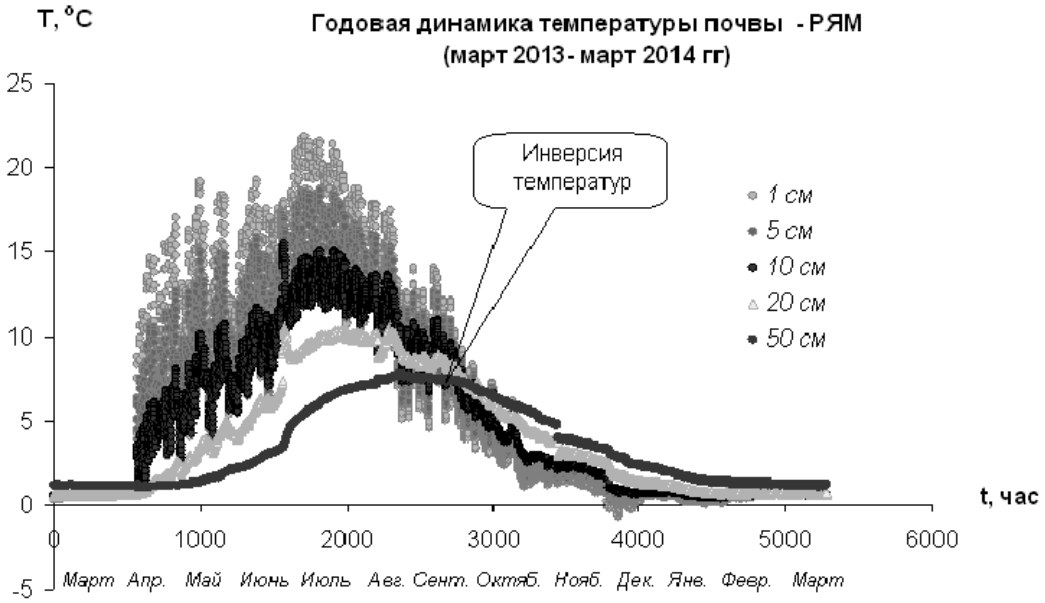

Рис. 1. Фрагмент мониторинга годовой динамики температуры почвы

стратификацией (нижние слои теплее верхних). Для оценки газообмена важно то обстоятельство, что даже в очень холодные зимы подповерхностный слой торфяно-болотной почвы характеризовался температурой и потенциалом влаги, способными поддерживать их микробиологическую активность [*Бабьева*, *Зенова*, 1989; *Судницын*, *Степанов*, 2014].

Датчики влажности почвы устанавливались на участке с верхней аэрированной толщей. Однако и в типичных гидроморфных условиях на относительно однородных затопленных участках в глубине могут формироваться условия локальной ненасыщенности в виде достаточно больших и протяженных на десятки метров зон

сплошной газовой фазы при пористости аэрации порядка 10 % и более [*Смагин*, 2005]. Такая структура подтверждается как прямыми измерениями влажности и плотности сложения торфяно-болотных почв, так и косвенными методами электрического зондирования и диэлькометрии [*Смагин* и др., 2000; *Смагин* 2005; *Поздняков* и др., 2003]. Данные мониторинга на участке с аэрированной верхней толщей за период с 2010 по 2014 гг. приведены на **Рис. 2**. На глубинах 30-40 см влажность варьировала в пределах 500-1000 % от массы абсолютно сухого вмещающего торфа, а в аэрированной вышележащей толще (10-20 см) – преимущественно в диапазоне 200-300 %.

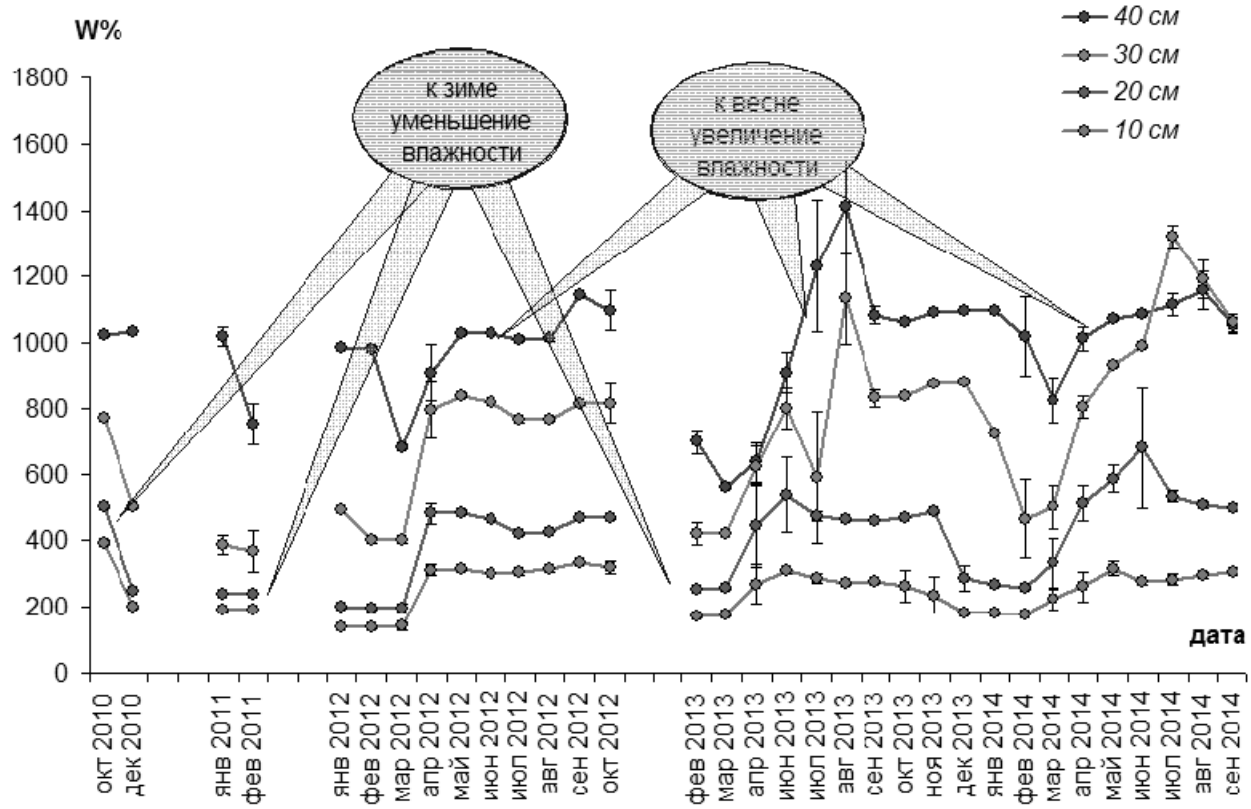

Рис. 2. Фрагменты мониторинга влажности почвы (здесь и далее вертикальные планки – стандартные отклонения).

К зиме влажность снижалась в 1.5-2 раза и более, что с одной стороны, могло быть артефактом измерительной системы, реагирующей на жидкую влагу, а с другой – реальным событием, вызванным, например, отжимом влаги из очеса при дополнительной нагрузке снегового покрова и/или с глубинным оттоком (дренажом) влаги болотного ландшафта в незамерзшей торфяной залежи при отсутствии поступления жидких осадков на поверхность. К весенне-летнему сезону влажность возрастала из-за снеготаяния и обычных для исследуемого региона дождевых осадков.

Выявленная картина динамики влажности представляет интерес с позиций газообмена болота с атмосферой. Весной и летом обводнение торфяника, по-видимому, усиливает метаногенез наряду с прогревом (повышением температуры). Однако и в зимний период толща активного метаногенеза (от 20 см и глубже) остается не замерзшей (температуры до 2 ^{o}C) и сильно увлажненной (500-800 %), что с одной стороны обеспечивает возможность слабой генерации метана, а с другой – его отвода (транспорта) в атмосферу из-за частичной дренированности торфа и формирования воздухоносной пористости.

3.2. Результаты мониторинга потоков метана камерно-статическим методом на болотном стационаре «Мухрино»

3.2.1. Суточная изменчивость потоков метана

При оценках газообмена почв и атмосферы с целью определения углеродного баланса, вклада почвы в эмиссию парниковых газов и иных характеристик, важно учитывать факторы пространственно-временной изменчивости. Были выбраны периоды с контрастной разницей дневных и ночных температур для выявления изменчивости потока в течение суток в зависимости от контролирующих гидротермических факторов окружающей среды. Измерения проводились в 2011 г. 26 – 27, 30 – 31 июля, а также 19 – 20 августа. В целом с понижением температуры воздуха от 26 – 27 июля к 19 – 20 августа происходит уменьшение средних величин удельных плотностей потоков метана. Для обводненных элементов ландшафта в отдельных случаях наблюдаются всплески эмиссии в дневное время суток (с 12 до 15 (18) часов и к утру (8 – 10 часов). Однако выявить какую-либо явную закономерность колебаний внутри суток от температуры не получилось.

После расчетов средних за сутки и медианных значений потоков по 20 круглосуточным циклам измерений в основных элементах болотного ландшафта (7 – в мочажинах, 5 – в топи, по 4 – на грядах и в рямах) и сопоставления полученных величин со значениями полевых измерений, проведенных в интервале от 12 до 15 часов дня, оказалось что они хорошо скоррелированы (r=0.98) (**Рис. 3**). Если производить полевые измерения в интервале 12-15 часов, то получаемые данные оценивают среднесуточные потоки. Для получения медианных оценок следует умножить измеренные в диапазоне 12-15 часов потоки на эмпирический коэффициент 0.94.

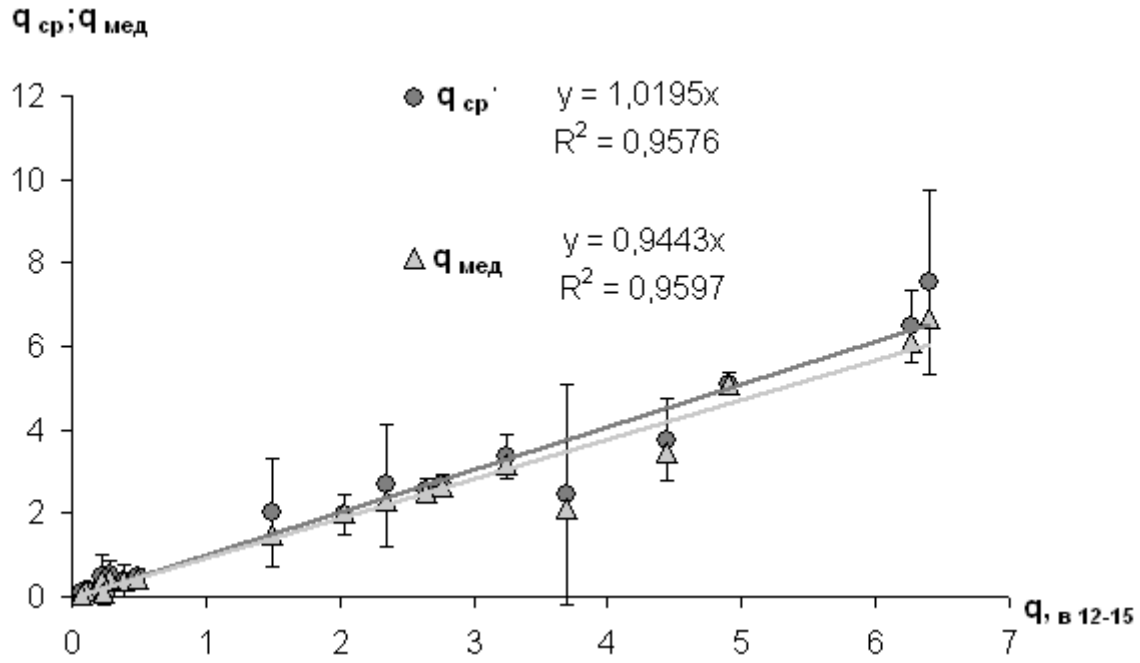

Рис. 3. Связь среднесуточных и медианных за сутки значений потоков метана с измерениями в интервале 12 – 15 часов

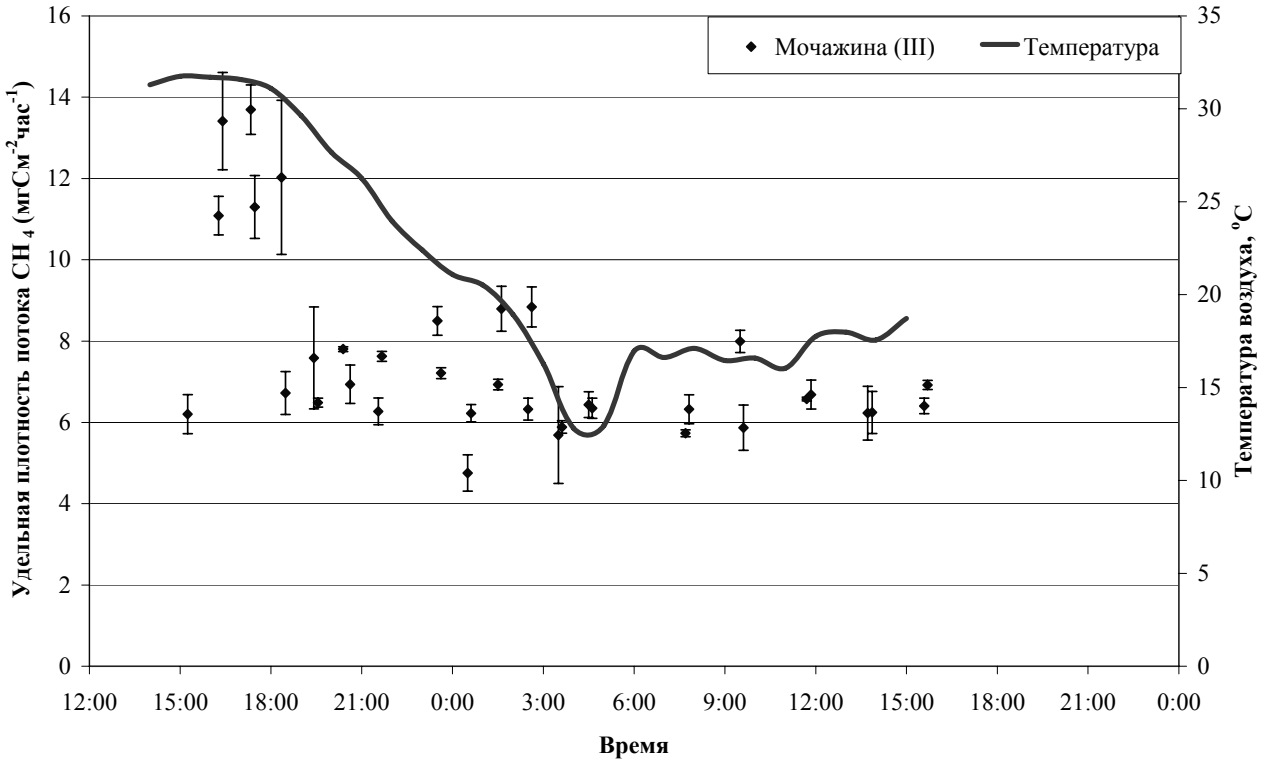

Рис. 4. Суточная изменчивость потоков метана 26-27 июля

Сопоставим диапазон суточной изменчивости потоков метана с диапазоном суточных изменений температуры воздуха (**Рис. 4**). Для оценки суточной изменчивости потоков метана использовали межквартильное расстояние ($R(q)=x(0.75) - x(0.25)$). Величина суточного хода температуры 19-20.08 – 4.7 °С, 30-31.07 – 11.8, 26-27.07 – 19 °С. По зависимости *R(q)* для потоков метана от суточного

хода температуры на разных площадках в течение отдельных суток определили коэффициент угла наклона (*k*, мгС·м$^{-2}$час$^{-1}$/^{o}С). Коэффициент *k* имеет смысл чувствительности потока метана к суточной температуре воздуха. Подобные коэффициенты были получены для всех девяти экспериментальных площадок и они составили ряд от 0.004 до 0.3 мгС·м$^{-2}$час$^{-1}$/^{o}С, закономерно увеличиваясь при переходе от дренированных (рямы, гряды) к обводненным (мочажины, топь) элементам болотного ландшафта.

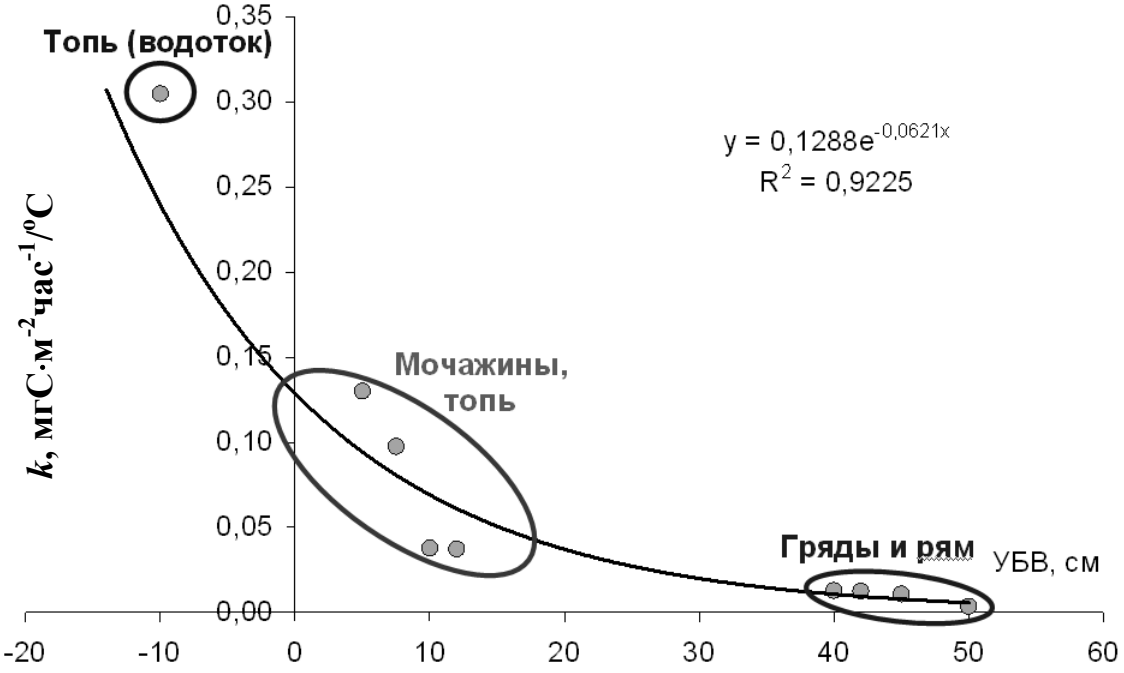

Рис. 5. Зависимость потоков метана от УБВ и чувствительность к изменению суточной температуры воздуха

Отложив по оси «Y» коэффициенты *k* для каждой из экспериментальных площадок, а по второй оси - величины УБВ, получаем зависимость, которая хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией (**Рис. 5**). Площадки «гряды и рямы» тесно сгруппировались, так как и в тех, и других залегание болотных вод глубокое. Метаногенные бактерии, которые являются анаэробами, располагающиеся в глубине торфяной залежи на удалении от поверхности, испытывают наиболее слабое влияние суточных колебаний температуры воздуха (*k*=0.004–0.013 мгС·м$^{-2}$час$^{-1}$/^{o}С). Следующая группа – это мочажины и участки топи, где уровень болотных вод уже располагается ближе к поверхности, соответственно, быстрее происходит теплообмен со слоем, в котором находятся метаногенные бактерии, откуда и большая чувствительность к суточным изменениям температуры (*k*=0.04–0.13 мгС·м$^{-2}$час$^{-1}$/^{o}С). Выделяются площадки мочажин I и VII, которые сходны по составу растительности и по гидротермическому режиму, поэтому и на графике они расположены рядом. Обособленно на графике расположилась площадка топи (*k*=0.3 мгС·м$^{-2}$час$^{-1}$/^{o}С), участок которой был полностью залит водой (часть внутриболотного ручья). Здесь вертикальный перенос метана локальными конвективными потоками (пузырьковый

транспорт) сочетается с его латеральным движением с током поверхностных болотных вод. Оба эти механизма весьма чувствительны к изменениям температуры воды и воздуха. В целом, можно заключить, что внутрисуточная изменчивость потоков метана из болота увеличивается с внутрисуточной изменчивостью температуры воздуха и уменьшается с увеличением глубины залегания болотных вод.

3.2.2. Сезонная динамика потоков метана в годовом цикле

Обратимся к анализу закономерностей динамики газообмена в годовом цикле по данным камерно-статического мониторинга потоков метана. Ведущим контролирующим фактором эмиссии метана для однородных по УБВ местообитания будем считать температуру. Поскольку обычно среди метеопараметров чаще всего определяется температура воздуха, а не почвы, рассмотрим эмиссию метана в зависимости от этого показателя.

На **Рис. 6** приведены результаты статистической и математической обработки данных по газовым потокам (генерализованы до одного значения в сутки) и температуре воздуха, полученные в ходе круглогодичного мониторинга на объекте «Мухрино» в 2011 г. Стандартные отклонения нанесены на графики в виде вертикальных планок. Различия в потоках между отдельными элементами болотного ландшафта могут быть весьма существенными (**Рис. 6** – А и Б). Обводненные элементы с высоким УБВ характеризуются в 5-10 раз более высокими значениями удельных потоков по сравнению с таковыми на дренированных участках с глубоким залеганием УБВ (гряды, рямы). Наиболее высокие разовые значения потоков метана (13.7 ± 0.7 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$ на мочажине III и 6.9 ± 0.2 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$ на мочажинах I и VII), наблюдались в конце июля, самые низкие (около нуля) – в период с декабря по март. Для гряд наибольшие разовые летние величины потоков метана составляют 1.30 ± 0.01 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$ (были отмечены в конце августа), а для рямов – 1.5 ± 0.5 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$ (были отмечены в конце июля).

Минимальные значения потоков для топи, мочажин, гряд и рямов за двухлетний период составили -3.79, -0.08, -1.61 и -0.34 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$ соответственно, максимальные в том же ряду – 6.49, 13.73, 1.61 и 1.46 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$. Среднегодовые за двухлетний период значения потоков были равными 0.91 ± 1.1 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$ в топи, 2.62 ± 3.09 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$ на мочажинах, 0.21 ± 0.27 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$ на грядах и 0.09 ± 0.21 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$ в рямах. Медианные значения составили 0.71, 2.46, 0.15 и 0.04 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$ в рассматриваемом ряду топь-мочажины-гряды-рямы. В целом годовой ход эмиссии имеет традиционный куполообразный вид, причем для обводненных участков он достаточно симметричен относительно максимума в конце июля. Для более дренированных – скорость роста потоков метана от зимы к весне несколько медленнее, чем скорость уменьшения потоков от осени к зиме.

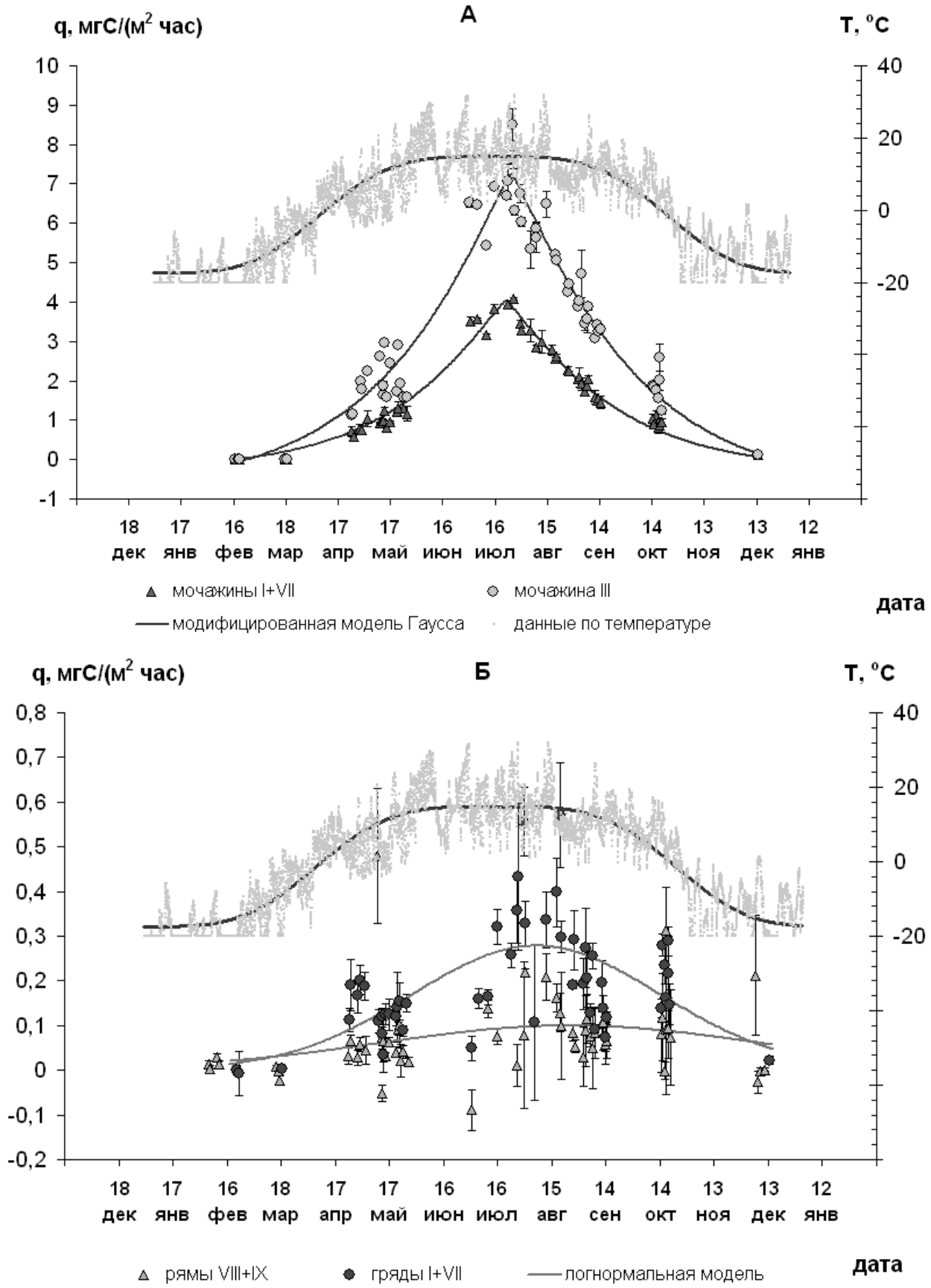

Рис. 6. Сезонная динамика температур воздуха и осредненных потоков метана в годовом цикле (мониторинг 2011 г.): А – обводненные, Б – дренированные элементы болотного ландшафта. Точками на графиках обозначена температура с шагом в 1 час

Максимальный вклад интегральных потоков (***Q***) за весь период наблюдений (порядка 300 сут.) имеют обводненные элементы (мочажина III: 18520±525 мгСм$^{-2}$год$^{-1}$, мочажины I+VII: 10120±607 мгСм$^{-2}$год$^{-1}$). Дренированные элементы с глубоким УБВ дают в 10-40 раз меньшую эмиссию: гряды I+VII 931±230 мгСм$^{-2}$год$^{-1}$, рямы VIII+IX 478±343 мгСм$^{-2}$год$^{--2}$. Здесь к средним значениям даны стандартные отклонения интегральной оценки. Если предположить, что на всех участках генерация метана метаногенными микроорганизмами одна и та же, а различия в итоговой эмиссии в атмосферу связаны с неодинаковой деятельностью метанотрофного фильтра, можно оценить активность работы последнего по разности между максимальным годовым потоком на мочажине III $Q_{мах}$=18520 мгСм$^{-2}$год$^{-1}$, считая, что здесь активность метанотрофного фильтра близка к нулю, и потоками на других элементах, где действие метанотрофного фильтра тем интенсивнее, чем глубже УБВ. В результате имеем следующую оценку активности метанотрофного фильтра: на мочажинах I+VII 8381 мгСм$^{-2}$год$^{-1}$ или 45.3% от гросс-продуцирования метана и 82.7% от его эмиссии в атмосферу; на грядах I+VII 17589 мгСм$^{-2}$год$^{-1}$ или 95.0% от гросс-продуцирования метана 1888.9% от его эмиссии; на рямах VIII+IX 18042 мгСм$^{-2}$год$^{-1}$ или 97.4% от гросс-продуцирования метана и 3771.6% от годового эмиссионного потока. Сходные данные об окислении от 30 до 80% генерируемого в болотах и рисовниках метана по мере его продвижения в атмосферу через метанотрофный фильтр приводят [*Yagi*, 1997; *Glagolev* et al., 2000].

В литературе иногда гряды и рямы с точки зрения величин потоков объединяют в одну группу. Доверительные интервалы при 0.05 уровне значимости в связи с большим числом повторностей (порядка 50) показывают на достоверность различий средних оценок (478±89 и 931±62 мгСм$^{-2}$год$^{-1}$). На основании данных мониторинга эмиссии метана в разных элементах болотного ландшафта и их статистической обработки можно заключить, что рямы и гряды достоверно различаются по потокам метана.

Как видно из **Рис. 6**, и ход температур, и газовые потоки в динамике представляют собой зависимости с экстремумом (максимумом), приходящимся на летние месяцы. Модель Гаусса подошла для аппроксимации данных по динамике температуры воздуха и по динамике газовых потоков в обводненных элементах болотного ландшафта. Логнормальная модель была использована для аппроксимации данных по годовой динамике потоков метана в элементах с глубоким залеганием УБВ. Эмпирические модели были адекватны и удачно воспроизводили реальные тренды динамики исследуемых показателей с величинами достоверности R^2 от 0.80 до 0.99 и статистически-значимыми параметрами на уровне P<0.001. Они были использованы для синхронного анализа влияния температуры на эмиссию метана. При этом сезонная динамика потоков метана во всех элементах болотного ландшафта, исключая рямы, оказалась тесно связанной (R=0,85-0,87) с динамикой температур воздуха, однако воздействие этого фактора проявляется с запаздыванием через распространение

температурных волн в торфяно-болотной почве, тем дольше, чем глубже УБВ. Из **Рис. 1** следует, что пик температур на глубинах метаногенеза (от 20 до 50 см) смещается относительно атмосферного именно в такой последовательности.

3.2.3. Потоки метана в холодный период года

Особый интерес и малую изученность представляет эмиссия метана в холодное время года со снеговым покровом, оценка, которой осложнена по методическим причинам. В данном разделе приводятся результаты экспериментальных исследований потоков метана на границе с атмосферой в различных элементах болотного ландшафта в холодный период года, а также обсуждаются методологические проблемы оценки этого явления традиционным методом закрытых камер. На **Рис. 7** приведены результаты экспериментального определения потоков болотного метана в холодный период года на полигоне «Мухрино» в 2010-2011 гг.

Обращает на себя внимание сильное варьирование исследуемой величины и наличие не только положительных (эмиссия), но и отрицательных потоков (сток газа), доля которых составляет 22% измерений. Предварительно из всей выборки были исключены три значения, резко отличающиеся по масштабу потоков: –2.40 ± 0.03; –0.90 ± 0.01; –0.30 ± 0.2 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$. Распределение потоков характеризовалось сильно выраженной правосторонней асимметрией (А = 1.11±0.11) и эксцессом средней

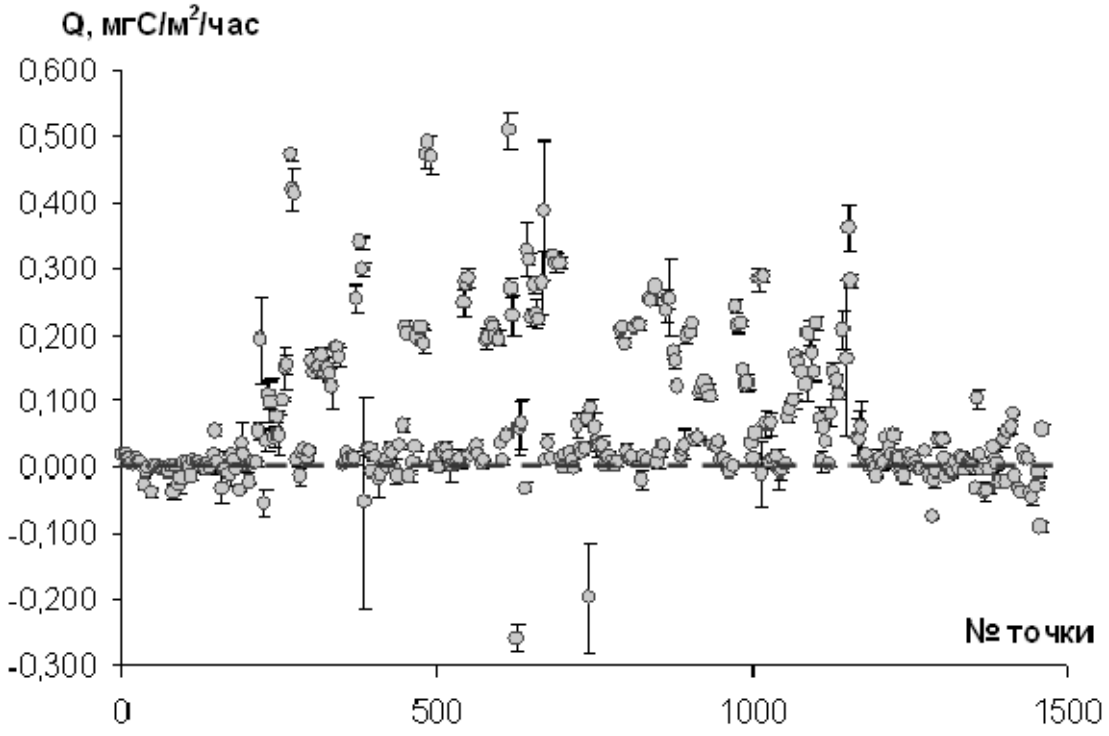

Рис. 7. Потоки болотного газа в холодное время года (стационар «Мухрино»,16.10-22.02; 15.03-27.05).

степени (Э = 2.59±0.22), согласно [*Дмитриев*, 2009]. Проверка гипотезы на нормальность распределения с использованием двух критериев (Колмогорова–

Смирнова и χ^2) в обоих случаях дала отрицательный результат. Поэтому при анализе данных наряду со стандартными среднеарифметическими характеристиками использовали медианные значения потоков. Средняя величина по выборке составила 0.06±0.01 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$ при медиане 0.02 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$ с размахом выборки от -0.3 до +0.5 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$. По сравнению с типичными значениями эмиссии метана в летний период, порядка нескольких мгСм$^{-2}$час$^{-1}$, полученная оценка оказывается пренебрежимо малой, и ее вклад в общегодовую эмиссию, даже с учетом доминирования холодного периода не превышает первых процентов. Вместе с тем полученный результат может объяснить, почему при аккумуляции значительных запасов органического субстрата бореальные болота западносибирского региона имеют относительно малую долю в глобальной эмиссии из ветландов, составляющую не более 2–5%, согласно оценкам [*Глаголев*, 2010; *Glagolev* et al., 2011].

По всей видимости, в холодный период года в исследуемом ландшафте развиваются конвективные потоки по причине неустойчивой температурной стратификации торфяной залежи (**Рис. 1**), когда нижние слои более теплые, чем верхние, при которой метан как более легкий и теплый по сравнению с воздухом начинает перемещаться из-за разности плотностей под действием естественной конвекции [*Смагин*, 2005]. Факт отсутствия промерзания торфяной залежи (**Рис. 1**) в большинстве элементов болотного ландшафта или неглубокого (до 10 см) промерзания по причине теплоизоляции мощным снеговым покровом объясняет возможность конвективного переноса в торфяной толще, в отличие от чистого льда водоемов, который служит надежным изолятором газообмена с атмосферой.

В холодный период, после точки инверсии температур (октябрь) и установления мощного снегового покрова (ноябрь-декабрь) основное значение в генерации и эмиссии метана будет принадлежать температуре почвы, а не атмосферного воздуха, а она, с учетом запаздывания годовой температурной волны, становится минимальной именно концу зимы, началу весны (**Рис. 1**). В октябре и мае среднемесячные температуры воздуха были больше нуля, не превышая 3 ^{o}C (октябрь) и 8 ^{o}C (май) при сходе снега в первую декаду мая. В результате эмиссионные потоки возрастали до 0.15–0.25 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$, но при этом максимальные значения в отличие от февраля и марта были характерны уже для переувлажненных элементов (мочажин, топи), где, вероятно, происходил более интенсивный метаногенез, а возможно, и конвективный массоперенос накопленного в глубине газа под давлением поверхностных паводковых вод и дождевых осадков.

Интегральные значения эмиссии за весь исследуемый холодный период в 214 сут. в ряду рямы–гряды–топь–мочажины составили 113±42, 200±41, 265±36 и 495±59 мгС/м^2 за сезон соответственно. Сравнивая их с полученной ранее интегральной оценкой (Q) за теплый период (**стр. 17**), легко убедиться, что они не превышают 3-5 % от соответствующих потоков в теплое время для увлажненных (мочажины) и 20 % для дренированных (гряды, рямы) элементов.

3.3. Физическое обоснование и результаты метода снеговой съемки потоков метана в холодное время года

Оценка потоков метана камерным методом в условиях наличия снежного покрова представляет большую проблему Альтернативу камерным методам исследования газообмена в холодное время года составляет методика снеговой съемки. Как показано в наших работах [*Смагин* и др., 2011*;* *Смагин*, *Шнырев*, 2015; *Шнырев*, *Смагин*, 2014], существует принципиальная возможность количественной оценки потоков метана в холодное время по данным профильного распределения метана в снеговой толще на основе интегральных аналитических решений соответствующих моделей диффузионного газообмена в стационарном состоянии. То же следует из анализа публикаций [*Solomon*, *Cerling*, 1987; *Zimov* et al., 1993; *Mast* et al., 1998, *Panikov*, *Dedysh*, 2000], в которых, в отличие от наших исследований, использовалась обычная дифференциальная форма закона Фика с расчетом потоков по градиенту концентраций и эффективному коэффициенту диффузии газов, и лишь в случае [*Solomon*, *Cerling*, 1987] – численные методы интегрирования для нестационарных и стационарных задач диффузионного массопереноса. Вместе с тем эксперименты указывают на наличие нелинейных профильных распределений метана в снеговой толще. Поэтому в данном разделе работы была поставлена задача обобщенного количественного описания линейных и нелинейных распределений метана в снежном покрове болот на базе достаточно простых физически обоснованных моделей, сочетающих различные механизмы массопереноса и источник постоянной мощности на поверхности почвы, в связи с задачей оценки эмиссионных потоков этого газа в холодное время года.

На **Рис. 8** приведены типичные концентрационные распределения метана в снеговом покрове. По форме профиля их можно сгруппировать в три основных типа – прямолинейные (***А***), нелинейные вогнутые (***Б***) и нелинейные выпуклые (***В***). Чаще всего тип *А* был свойственен рямовым, типы *Б* и *В* – мочажинным и грядовым комплексам.

Рассмотрим простую физически-обоснованную модель для распределения метана в *однородном инертном снеговом покрове* (**Рис. 8** – *А*), лишенном способности удерживать (адсорбировать) газ и трансформировать его в какие либо иные химические соединения. Функция стационарного профиля метана в снеговой толще может быть представлена в виде уравнения прямой

$$C_{(z)} = -a \cdot z + b, \text{ где } a = \frac{Q}{D_{\text{эф}}}, \; b = \frac{Q}{D_{\text{эф}}} + C_0 .$$

Аппроксимируя профиль концентраций метана в толще снега линейной зависимостью, можно рассчитать искомый эмиссионный поток (Q) по данным

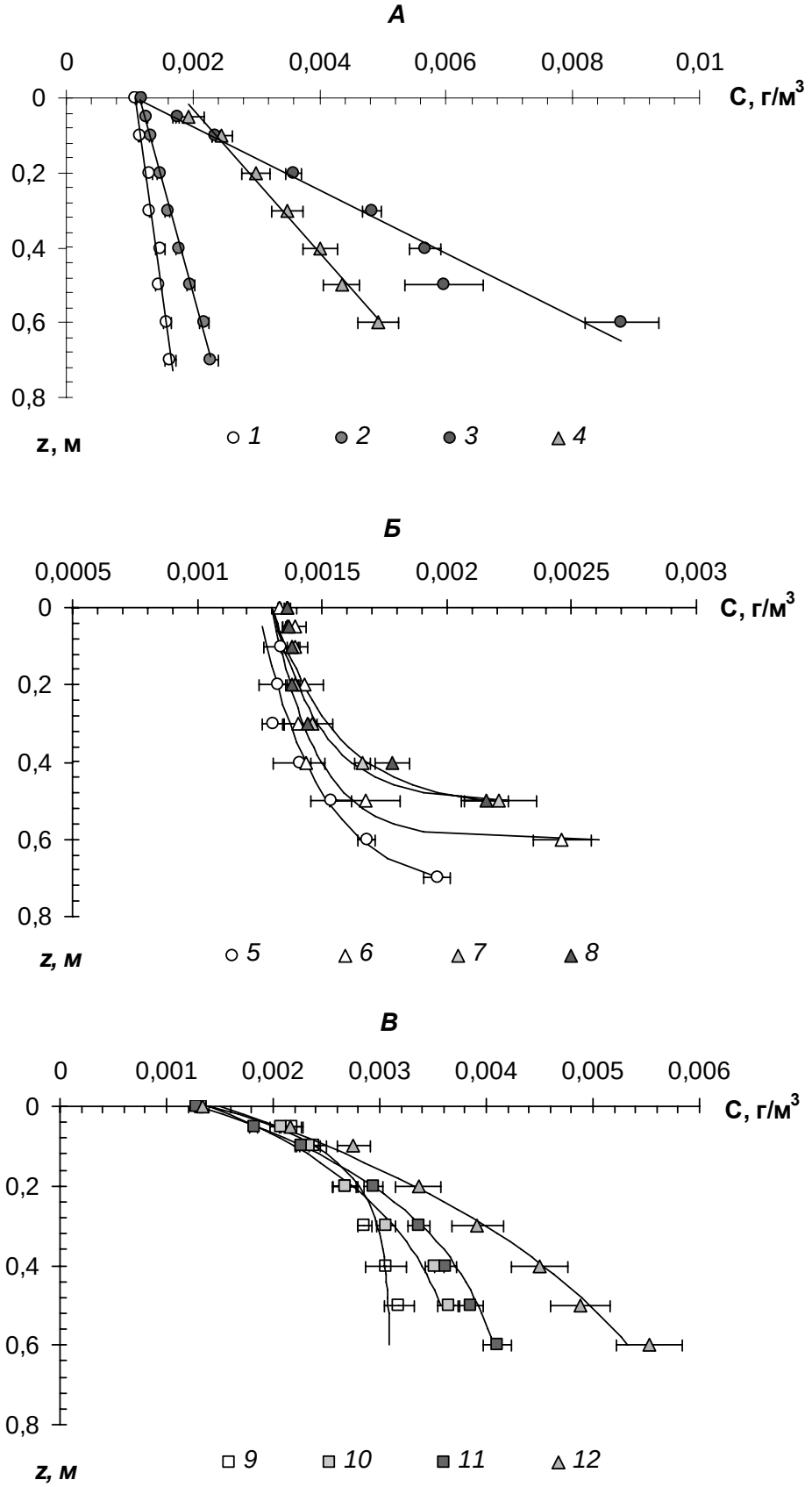

Рис. 8. Профильные распределения концентрации метана в толще снега (10.03.11–21.03.11). *А* – прямолинейные, *Б* – вогнутые, *В* – выпуклые, *1,2,3,5* – рямы, *4,6,7,8,12* – мочажины, *9,10,11* – гряды

углового коэффициента прямой (a), эффективного коэффициента диффузии газа ($D_{эф}$) и пористости (P). Второй способ расчета – по данным остаточного члена (b), эффективного коэффициента диффузии ($D_{эф}$), пористости (P), параметра мощности снеговой толщи (H) и концентрации метана в атмосфере (C_0). С учетом того, что в макропористой среде эффективный коэффициент диффузии линейно связан с пористостью, получаем соответствующие формулы вычисления Q:

$$Q = 0,66 \cdot a \cdot P \cdot D_{st} \left(\frac{T}{273}\right)^{1.75} \left(\frac{101.3}{Д}\right) \text{ и } Q = 0,66 \cdot P \cdot \frac{D_{st}}{H} \left(\frac{T}{273}\right)^{1.75} \left(\frac{101,3}{Д}\right)(b - C_0)$$

где, Q – эмиссионный поток, a – углового коэффициента прямой, b – остаточный член прямой, D_{st} – стандартный коэффициент диффузии газа, Д – барометрическое давление, T – абсолютная температура.

Рассмотрим модель для распределения метана в неоднородной толще (**Рис. 8** – *Б*). В модели для случая (**Рис. 8** – *А*) предполагалось, что снежная толща однородна и характеризуется одинаковым по всей глубине эффективным коэффициентом диффузии. Однако анализ плотности снега (ρ) выявил ее фактически линейное увеличение с глубиной ($\rho_{(z)} = 0.282 \cdot z + 0.084$; R^2=0.93) и соответствующее снижение пористости. Экспериментальное подтверждение связи выпуклой формы концентрационного профиля с линейным нарастанием плотности снега с глубиной можно найти также в [*Mast* et al., 1998]. Физический смысл состоит в том, что в более плотных нижних слоях диффузионная проницаемость невысока, и поэтому концентрация газа увеличена. По мере приближения к поверхности снежного покрова диффузия облегчается, и метан имеет возможность достаточно свободно выходить в атмосферу, что в свою очередь уменьшает концентрацию и соответствующий градиент. Достаточно удачно описывает вогнутую форму распределения (**Рис. 8** – *Б*) предложенная нами модель: $C_{(z)} = C_0 - \frac{Q}{D_0 m} \ln(1 - m \cdot z)$, где, $m = (D_0 - D_H)/(HD_0)$, D_0 – коэффициент диффузии на поверхности снега, D_H - коэффициент диффузии на нижней границе толщи снега, H – мощность толщи снега, C_0 - концентрация в атмосфере, Q – эмиссионный поток из почвы, z – вертикальная координата (на поверхности почвы z=0).

Рассмотрим расчет потоков для случаев «выпуклых» распределений (**Рис. 8** – *В*). Одной диффузионной модели без функции «источник/сток» уже недостаточно. Вместе с тем, включение конвективного механизма массопереноса со скоростью (υ, м/час) позволяет получить подобные профильные распределения. С физической точки зрения это, по-видимому, могут быть механизмы как вынужденной конвекции, например, под действием ветра на поверхности снега, так и естественной конвекции локальных скоплений метана, более легкого по сравнению с атмосферным воздухом газа. Стационарные профили распределения, которые имеют выпуклую форму (**Рис. 8** – *В*) занимают промежуточное положение между двумя крайними линиями –

наклонной прямой (диффузия) и вертикальной прямой (конвекция). Аппроксимируя реальные профильные распределения уравнением нелинейной регрессии $C_{(z)}=y_0+a\cdot\exp(-b\cdot z)$, где $y_0 = Q/(Pq)$, $a = C_0 - Q//(Pq)$, $b = q/D$, находим выражения для расчета скорости приведенного конвективного потока (q) и эмиссии метана (Q) по известной пористости (P) и величине приведенного эффективного коэффициента диффузии ($D=D_{эф}/P$):

$$q = b \cdot D = 0,66 \cdot b \cdot D_{st} \left(\frac{T}{273}\right)^{1.75} \left(\frac{101.3}{Д}\right),$$

$$Q = y_0 \cdot q \cdot P = 0.66 \cdot y_0 \cdot b \cdot P \cdot D_{st} \left(\frac{T}{273}\right)^{1.75} \left(\frac{101.3}{Д}\right),$$

$$Q = (C_0 - a) \cdot q \cdot P = 0,66 \cdot (C_0 - a) \cdot b \cdot P \cdot D_{st} \left(\frac{T}{273}\right)^{1.75} \left(\frac{101.3}{Д}\right).$$

При аппроксимации экспериментальных данных распределения метана в толще снега уравнениями стационарных профилей для всех случаев были получены высокие коэффициенты достоверности аппроксимации $R^2 = 0.96\text{-}0.99$ при минимальных стандартных ошибках $s \sim 10^{-4}–10^{-5}$ и статистической значимости параметров при уровне значимости α=0.05–0.001, что свидетельствует об адекватности моделей. Сравнивая данные расчетов и полученные камерным методом, нетрудно убедиться в сильном различии результатов, градиентным методом получались более высокие значения. Для линейных трендов (модель диффузии с постоянным коэффициентом) различия варьируют от 3 до 47 раз, для нелинейных вогнутых (модель диффузии с уменьшающимся с глубиной коэффициентом) – от 2 до 3 раз, а для нелинейных выпуклых распределений (модель диффузии и конвекции с постоянными коэффициентами) – от 33 до 77 раз!

Камерный метод, может давать заниженные величины эмиссии [*Norman* et al., 1997; *Björkman* et al., 2010]. Таким образом, предложенный метод снеговой съемки указывает на возможность существования в холодный период года значительно более интенсивных газовых потоков по сравнению с традиционной камерной оценкой. Осредненный по пространству метод газовых профилей, включая снеговую съемку в холодное время года, дает, по-видимому, более объективную оценку.

3.4. Физическое обоснование и результаты профильно-градиентного метода оценки потоков метана малой интенсивности в аэрированной торфяной залежи

Профильно-градиентный метод, может быть применен и для оценки эмиссии метана из аэрированных (дренированных) элементов болотного ландшафта с глубоким залеганием УБВ, где определение камерным методом также как и для предыдущего случая, имеет ограничение из-за малой величины потоков метана и

некоторых других факторов (непрочная установка основания, диссипация локальных потоков и т.д.). В отличие от снегового покрова, в аэрированной толще наряду с диффузией метана будет действовать механизм его поглощения метанотрофным фильтром (локальная функция «сток»). Однако на удалении от поверхности поглощение начинает уступать производству газа метаногенными микроорганизмами (функция «источник»).

Аппроксимируя реальные профильные распределения полиномом 3 степени $C(z) = -az^3+bz^2+dz+A$, где $a = k/6D$, $b = U/2D$, $d = Q/D$, A – константа интегрирования, определяемая из второго граничного условия постоянства концентрации или потока (q), D – эффективный коэффициент диффузии (осредненный по толще) получаем уравнения для расчета: $Q=Dd$, $U=2Db$, $k=6Da$. Первое уравнение позволяет оценить искомый поток метана в атмосферу (Q), а два другие – функцию «источник-сток», ответственную за генерацию и поглощение метана в толще торфяника. Поскольку торф является макропористой средой, в первом приближении эффективный коэффициент диффузии можно определить по формуле:

$$D_{\text{эф}} = 0,66 \cdot P \cdot D_{st} \left(\frac{T}{273}\right)^{1.75} \left(\frac{101.3}{\text{Д}}\right).$$

Оценка потока по профильному распределению концентрации в аэрируемой части торфа на тестовом примере дала потенциальный поток метана на поверхности почвы 0.08 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$. Измеренная в этот период эмиссия метана методом камер составила фактически такую же величину $Q_{\text{изм}}$= 0.08±0.02 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$. Таким образом, расчетная (модельная) величина фактически совпала с измеренной. Это подтверждает адекватность предложенной модели и возможность оценки потоков метана почвенно-градиентным методом и анализа закономерностей профильного распределения газа и его диффузивности.

ВЫВОДЫ

1. Эмиссия метана характеризуется большой пространственной неоднородностью по основным элементам болотного ландшафта. Наибольший вклад принадлежит обводненным участкам с высоким стоянием УБВ (мочажины, топь) и составляет 10-20 гСм$^{-2}$год$^{-1}$, что на порядок больше, чем для элементов с низким залеганием УБВ, где интегральная годовая оценка эмиссии не превышает 1±0.2 гСм$^{-2}$год$^{-1}$ (гряды) и 0.5±0.3 гСм$^{-2}$год$^{-1}$ (рямы). Столь сильные различия могут быть обусловлены деятельностью метанотрофного фильтра, блокирующего по балансовой оценке от 0 до 45 % потока метана при движении в атмосферу в обводненных элементах и до 95-97 % на участках с глубоким залеганием УБВ. Суммарный годовой поток (Q, [гСм$^{-2}$год$^{-1}$]) связан с УБВ, [см] зависимостью Q=31·exp(-0,09·УБВ); R^2=0,99.
2. Суточная динамика потоков метана в исследованном болотном ландшафте в летний период довольно хаотична, однако прямые измерения в интервале от 12 до 15 часов дня весьма точно (R^2=0,96) характеризуют среднесуточные и медианные потоки. Внутрисуточная изменчивость потоков метана из болота увеличивается с внутрисуточной изменчивостью температуры воздуха и уменьшается с увеличением глубины залегания болотных вод, при этом получена следующая эмпирическая зависимость между коэффициентом температурной чувствительности (k, [мгС·м$^{-2}$час$^{-1}$/^{o}С]) и УБВ, [см]: k=0,13·exp(-0,06УБВ) при R^2=0,92.
3. Сезонная динамика потоков метана в годовом цикле характеризуется летним максимумом, и во всех элементах болотного ландшафта, исключая рямы, она тесно связана (r=0,85-0,87) с динамикой температур воздуха, однако воздействие этого фактора проявляется с запаздыванием через распространение температурных волн в торфяно-болотной почве, тем дольше, чем глубже УБВ. Максимум эмиссии летом (6-13 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$) в обводненных участках (мочажины, топь) по отношению к максимуму температур воздуха (середина июля) запаздывает на 7-10 дней, а на дренированных участках (1-2 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$, гряды, рямы) – на 20 дней и более.
4. Многолетними режимными наблюдениями гидротермических параметров на объекте установлены факты отсутствия или неглубокого (до 10 см) промерзания торфяно-болотной почвы при большом (до двух раз) снижении ее влажности, а также инверсии температур с возникновением неустойчивой стратификации (нижние слои теплее верхних) в течение всего холодного периода с октября по апрель.

5. Такие благоприятные гидротермические условия в холодный сезон возникают предположительно из-за высокого запаса летнего тепла в гидроморфной почве и теплоизоляции мощным (60-90 см) снеговым покровом и определяют возможность метаногенеза и эмиссии метана в атмосферу через воздухоносную пористость торфяника и снеговой толще, включая восходящие конвективные потоки (естественную конвекцию).
6. Оценка потоков метана в холодный период камерно-статическим методом дает для типичных обводненных элементов суммарно 0.50±0.06 гСм$^{-2}$год$^{-1}$ (мочажины), 0.30±0.03 гСм$^{-2}$год$^{-1}$ (топь) или не более 3 % от общегодовой эмиссии, а для участков с глубоким УБВ: 0.20±0.04 гСм$^{-2}$год$^{-1}$ (гряды) и 0.10±0.04 гСм$^{-2}$год$^{-1}$ (рямы) или 15-20 % от годовой эмиссии.
7. Аналогичная оценка предложенным в работе методом снеговой съемки на основе оригинальных моделей распределения метана в снежном покрове указывает на возможность на порядок более высоких значений потоков метана, особенно на обводненных участках. Тоже следует из замены моделей расчета потоков в камерно статическом методе с традиционных линейных, обоснованных лишь в 50 % трендов динамики концентраций в камере, на новые – нелинейные.
8. Новая методика определения потоков метана на базе физически обоснованных моделей профильного распределения газа в аэрированной торфяной толще выше УБВ позволила оценивать потоки малой интенсивности (порядка 0.01-0.1 мгСм$^{-2}$час$^{-1}$) с учетом действия метанотрофного фильтра на количественном уровне.
9. Хранение газовых проб, содержащих метан в пластиковых шприцах при малом (атмосферном) содержании (~1 ppm) на свету сопровождается фиктивным приростом концентрации метана из-за фотохимической деструкции полипропилена; при более высоком исходном содержании (~10 ppm) происходит постепенная потеря метана из-за диффузии в атмосферу со скоростью порядка 0.1 ppm/сут.
10. Оценка газообмена камерами большого объема (40-100 л и более) стабильно выше по сравнению с малыми (1-10 л), что может быть связано как с артефактом воздействия мощных вентиляторов для перемешивания воздуха внутри больших камер, так и с реальным эффектом поступления метана из спорадически встречающихся в болоте локальных источников, при их более вероятном покрытии камерами с большой площадью поперечного сечения.

СПИСОК РАБОТ, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. *Смагин А.В.,* ***Шнырев Н.А****., Садовникова Н.Б.* Потоки метана в холодное время года: оценка методом закрытых камер // *Почвоведение*. 2016, № 2. С. 227-234.
2. *Смагин А.В.,* ***Шнырев Н.А.*** Потоки метана в холодное время года: распределение и массоперенос в снежном покрове болот // *Почвоведение*. 2015, № 8. С. 943–951.
3. *Смагин А.В.,* ***Шнырев Н.А.*** Эмиссия и диффузия метана в снежном покрове болот // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2014. Т. 118, № 8, С. 45-49.
4. ***Шнырев Н.А.,*** *Смагин А.В.* Распределение и потоки метана в снежном покрове западносибирских болот // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2014, Т. 170, № 9, С. 156-159.

Статьи в журналах, не входящих в список ВАК:

5. *Смагин А.В.,* ***Шнырев Н.А.,*** *Витязев В.Г.* К теории профильно-градиентного метода оценки эмиссии метана из болот в зимнее время // *Экологический вестник Северного Кавказа*, 2011, т. 7. № 2, с. 23-30.

Тезисы:

6. ***Шнырев Н.А.*** К вопросу о потоках метана с верховых болот в зимний период // Вомперский С.Э. (ред.). Материалы третьего международного полевого симпозиума “Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее” (г. Ханты-Мансийск, 27 июня – 5 июля 2011 г.). – Новосибирск, 2011. С. 139-140.
7. ***Шнырев Н.А.,*** *Смагин А.В.* К методике расчета потоков метана по профильным распределениям в снеговом покрове // Вомперский С.Э. (ред.). Материалы третьего международного полевого симпозиума “Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее” (г. Ханты-Мансийск, 27 июня – 5 июля 2011 г.). – Новосибирск, 2011. С. 137-138.
8. ***Шнырев Н.А.,*** *Смагин А.В.* Модель динамики метана в профиле и методика оценки потока метана на поверхности по данным о профильном распределении концентраций в торфе // Материалы 18-ой Международной Пущинской школы-конференции молодых ученых «Биология – наука XXI века», 21-25 апреля 2014 г., Пущино, Россия, серия Биология – наука XXI века, место издания Пущино, тезисы, с. 310-311.