

На правах рукописи



Нестерук Галина Владимировна

**ГЕОХИМИЯ МАКРО-, МИКРОЭЛЕМЕНТОВ И МЕТАНА В
ЛАНДШАФТАХ БОЛОТ ПСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

Специальность 25.00.23 – «Физическая география и биогеография, география почв
и геохимия ландшафтов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Пермь – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет»

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор,
Федоров Юрий Александрович,
заведующий кафедрой физической географии,
экологии и охраны природы ФГАОУ ВО «Южный
федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону),
почетный работник Гидрометеослужбы России

Официальные оппоненты: **Ергина Елена Ивановна**,
доктор географических наук, профессор кафедры
конструктивной географии и ландшафтоведения
Таврической академии ФГАОУ ВО «Крымский
федеральный университет имени В.И. Вернадского»
(г. Симферополь)

Хорошавин Виталий Юрьевич
кандидат географических наук, доцент, директор
Института наук о Земле ФГАОУ ВО «Тюменский
государственный университет» (г. Тюмень)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный университет»
(г. Воронеж)

Защита состоится 20 февраля 2020 г. в 13-30 на заседании диссертационного
совета Д212.189.10 при Пермском государственном национальном
исследовательском университете по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15,
корп.8, ауд.215.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале научной библиотеки
ПГНИУ. Текст и автореферат диссертации размещен на сайте ПГНИУ:
<http://www.psu.ru> и официальном сайте ВАК РФ vak.ed.gov.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.189.10
кандидат географических наук, доцент

Т.А. Балина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Работа посвящена изучению важной проблемы дисциплины «Физическая география» – геохимии макро-, микроэлементов и метана в болотных экосистемах Псковской области. Изучаемый массив болот слабо затронут техногенезом, но находится на пересечении воздушных масс из стран Европы, агломераций гг. Санкт-Петербурга, Мурманска, Архангельска, Москвы, поэтому актуальным является выявление уровней содержания химических элементов по площади и разрезу его ландшафтов. Другим веществом, которому уделено большое внимание, является «парниковый» газ метан и его сопряженное образование во времени и пространстве с формированием Полистово-Ловатской системы верховых болот.

Объекты исследования – компоненты ландшафтов болот Псковской области: почвы, донные отложения, биота (растение *Ledum palustre* L.).

Предмет исследования – уровни содержания, латеральное и вертикальное распределение в почвах и донных отложениях макро-, микроэлементов и метана, а также его потоков в системе «атмосфера – почвы – гидросфера».

Район исследования. На территории Псковской области выбрано два участка: охраняемая Полистовским заповедником Полистово-Ловатская болотная система и не находящийся под охраной Радилковский болотный массив.

Цель работы: определить особенности накопления, распределения макро-, микроэлементов, метана и потоки метана в компонентах ландшафтов болот Псковской области.

В задачи исследования входило:

1. Изучение ландшафтной структуры Полистово-Ловатской болотной системы (на примере Полистовского заповедника) и Радилковского болотного массива, определение классификационного положения и диагностика почв.
2. Определение содержаний и закономерностей распределения химических элементов по профилю почв в поверхностных 0-15 см почв и донных отложениях.
3. Оценка накопления химических элементов багульником болотным.
4. Расчет эмиссии метана болотами Полистово-Ловатской системы и Псковской области, построение регрессионных моделей, определение содержания метана в компонентах природных комплексов болот и выявление связи этого показателя с содержанием химических элементов.

Научная новизна:

1. Впервые описана структура ландшафтов Полистовского заповедника и Радилковского болотного массива, выполнена диагностика ранее неисследованных почв, выявлены местные особенности почвообразования, установлены закономерности поведения химических элементов в зависимости от физико-химических свойств педосферы.

2. Исследованы содержание и распределение химических элементов по площади и разрезу почв и донных отложений ландшафтов болот Псковской области, которые обоснованы в качестве фоновых региональных значений, выявлены особенности накопления химических элементов багульником.

3. Впервые определено содержание и закономерности распределения метана по латерали и вертикали в компонентах болотных ландшафтов, выполнена оценка его потоков в системе «атмосфера – почвы – гидросфера» с учетом вклада микроландшафтов в общую эмиссию Полистово-Ловатской системой и другими болотами Псковской области.

4. Предложены универсальные регрессионные модели связи концентраций метана с его потоками в атмосферу и зависимости между содержанием метана и химических элементов в компонентах ландшафтов верховых болот.

Соответствие паспорту специальности. Тема диссертации соответствует паспорту специальности 25.00.23 – «Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов». Область исследования:

1. Структура, функционирование и динамика ландшафтов; 3. География и картография почв, происхождение и трансформация почвенного покрова; 4. Геохимия ландшафтов, изучение и моделирование ландшафтно-геохимических процессов; 9. Ландшафтно-геохимические условия миграции элементов в природной среде, специальное почвенно-геохимическое картографирование.

Основные защищаемые положения:

1. На охраняемой заповедником территории преобладают грядово-мочажинные комплексы (35,8% площади) и сфагновые переходные топи (32,0%), на участках, подвергшихся торфоразработкам или рекреационному воздействию, представлены менее устойчивые в сукцессионном отношении сосняки и березняки-зеленомошники, вершинные сосново-сфагновые и сосново-пушицево-сфагновые комплексы.

2. Литологический состав оказал определяющее влияние на уровни и распределение химических элементов в интразональных, зональных и аazonальных почвах болот Псковской области, которые не загрязнены тяжелыми металлами – содержание химических элементов в поверхностных 0-15 см данных почв можно использовать в качестве фоновых значений при проведении регионального почвенно-экологического мониторинга.

3. Содержание метана в воде, верхних горизонтах почв и донных отложений коррелируют с его потоками в атмосферу – их величины максимальны в микроландшафтах переходных топей, черных мочажинах грядово-мочажинного комплекса, озерах озерно-денудационного комплекса.

4. В почвах и донных отложениях валовые содержания макроэлементов Fe, Al и микроэлементов Mn, Ni, Cr, Cu, Zn проявляли значимую обратную связь с

содержанием метана, соотношение содержаний Pb, As с метаном носило сложный противоречивый характер, связь содержания Cd с CH₄ была незначимой.

Фактический материал и личный вклад автора. В основу диссертации положен оригинальный фактический материал, собранный в экспедициях 2008-2016 гг., проводимых сотрудниками ЮФУ (кафедр физической географии, экологии и охраны природы; почвоведения и оценки земельных ресурсов) с участием автора. Диссертант принимала участие в полевых исследованиях, производила отбор, подготовку, анализ материала. Обобщено более 2000 данных из 45 станций опробования воды, воздуха почв, донных отложений и растительности, 42 ландшафтных профилей, 9 почвенных разрезов. Проведены определения содержаний и потоков метана – 620, органического углерода (C_{орг}) – 600, физико-химических свойств почв – 1207.

Практическая значимость работы заключается в учете вклада болот Европейской территории России (ЕТР) в общую эмиссию метана болотами РФ. Данные по содержанию микроэлементов в почвах и донных отложениях будут положены в основу мониторинга состояния почв и водных объектов Северо-Запада России, их охраны от загрязнения. Основные результаты диссертационной работы используются в Институте наук о Земле при подготовке и чтении курсов лекций «Общая гидрология», «Современные проблемы экологии и природопользования», «Экологический мониторинг: теория и практика» по направлению бакалавриата «География», магистерской программе «Экологический мониторинг: теория и практика», «Региональная экология» и выполнении работ по теме № ВнГр-07/2017-24, проекты РФФИ №16-05-00976, НШ-5658.2012.5, НШ-5548.2014.5 и Министерства образования и науки РФ № 5.948.2017/ПЧ.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены на 35-ти конференциях, основные из которых международные: «Экологический мониторинг, моделирование и проектирование в условиях природных, городских и агроэкосистем MOSES-2015» (Москва, 2015); «Экологические проблемы. Взгляд в будущее» V-VI, VIII (Лиманчик, 2008, 2010, 2017); «Мониторинг и оценка состояния растительного мира» IV (Минск, 2013); «Геохимия химических элементов и соединений в природных средах» II-III (Тюмень, 2016, 2018); всероссийские с международным участием: «Болота и биосфера» VIII, IX (Томск, 2012, 2015); «Современные тенденции развития особо охраняемых природных территорий» (Полистовский заповедник, 2014); «Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны» VII съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (Белгород, 2016). Результаты исследований по теме работы вошли в Летопись природы Полистовского заповедника (2008-2009, 2011-2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 44 работы, в т.ч. в базе РИНЦ – 21, статей в научных журналах, рекомендуемых ВАК РФ – 4, в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science – 1.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 226 наименований. Общий объем текста составляет 196 страниц, включая 48 рисунков и 22 таблицы и 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор литературы и характеристика природных особенностей района исследования

Ландшафты Полистово-Ловатской болотной системы и Радиловского массива мало изучены. Из фундаментальных трудов по Полистовскому заповеднику известна монография. Почвы двух локальных участках заповедника исследованы только на предмет общих свойств и содержания ПАУ. Элементный состав почв, содержание и потоки метана ранее не были изучены. При анализе литературных источников оказалось, что связь содержания метана *in vitro* и *in situ* содержанием химических элементов и их влияние на его генерацию в почвах слабо изучены, а результаты противоречивы.

2. Объекты, методы и материалы исследования

Глава 2 содержит описание объектов, методов исследования и фактического материала. Заложены ландшафтные профили с ключевыми участками (КУ), построены карты с выделением типов ландшафтов и станций геохимического опробования (рис. 1). Определены морфометрические показатели, экологическое состояние древостоя на КУ. Для химического анализа отобраны образцы почв, донных отложений по глубинам 0-2,5, 2,5-5, 5-10, 10-15 см, по генетическим горизонтам и пробы зеленой массы багульника болотного. Валовое содержание макро- (Al, Fe, Ca, Mg, Ti, P, K), микроэлементов (V, Sr, Cr, Zn, Ni, Cu, Co, Pb, As, Mn, Cd) определен рентген-флуоресцентным методом на спектрокане «МАКС-GV», подвижные формы элементов в вытяжке из почв 1н раствором ААБ с рН 4,8 и в экстракте из растения 20% раствором HCl – на атомно-абсорбционном спектрометре «МГА-915» и «NOVA A300». Определены свойства почв по общепринятым в почвоведении методикам и их классификационное положение, кларки концентрации, рассеяния элементов и геохимические коэффициенты. Для багульника рассчитаны биогеохимическая активность вида (БХА), коэффициент биологического поглощения (КБП) и коэффициент накопления элементов (Кн).

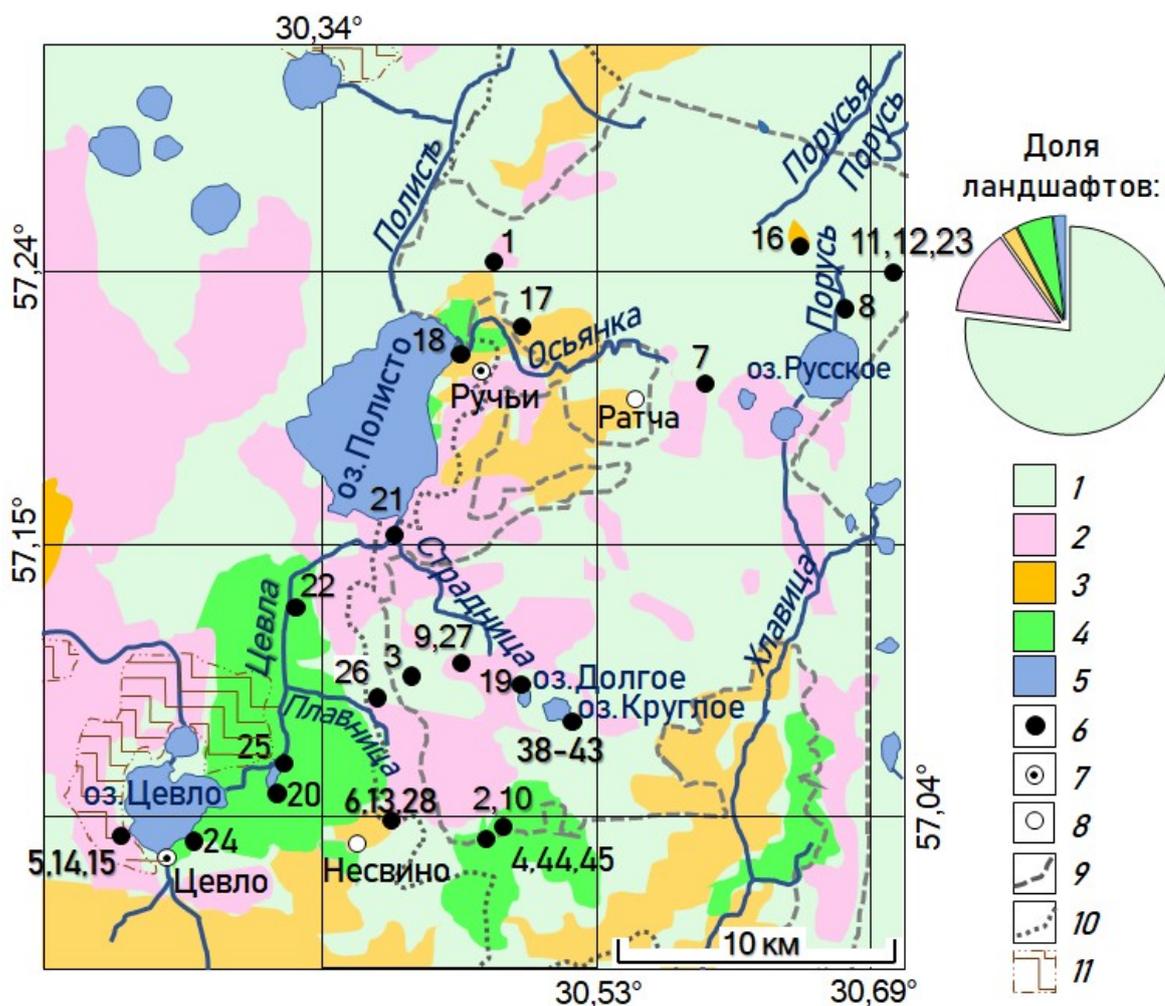


Рисунок 1. Положение станций геохимического опробования в пределах различных типов ландшафтов Полистово-Ловатской болотной системы. *Ландшафты:* 1 – болотные, 2 – лесоболотные, 3 – лесные, 4 – луговые, 5 – водные; 6 – станции опробования. *Деревни:* 7 – жилые, 8 – нежилые. *Границы:* 9 – Полистовского заповедника, 10 – его охранной зоны, 11 – торфоразработок

В пробах воздуха, почв, воды, донных отложений определены содержания метанаметодом фазово-равновесной дегазации на хроматографе «Цвет-100», подсчитаны величины потока CH_4 в атмосферу. Корреляционный, дисперсионный анализ проведены в программах Microsoft Excel 2010, Statistica 6.0.

3. Ландшафтная структура территории и свойства почв

В структуре ПК Полистовского заповедника преобладают водно-болотные ландшафты (~77%), среди которых выделяются микроландшафты или природные комплексы (ПК): топи сфагновые переходные, топи переходные, грядово-мочажинные комплексы (ГМК), озёрно-денудационные комплексы (ОДК). Лесоболотные ландшафты (13,4%) включают вершинные сосново-сфагновые, сосново-пушицево-сфагновые ПК; лесные – моховые и травяные ельники, сосняки, березняки, дубравы; луговые – луга и тростниково-осоковые сообщества;

водные – озера, реки, мелиоративные каналы. Водные, лесные, луговые ландшафты занимают ~10%.

Ландшафтная структура Радиловского массива сходна: доля водно-болотных ландшафтов – 55%, лесоболотных – 25%, водных, лесных и луговых – 20%. В структуре ландшафтов ГМК занимают 35,8% площади Полистовского заповедника, сфагновые переходные топи – 32,0, вершинные сосново-сфагновые ПК – 10,7%; меньше ОДК – 4,7, переходных топей – 4,4 и сосново-пушицево-сфагновых ПК – 2,7%. Согласно анализу состояния древостоя (рис. 2), в лесных (КУ3-4 профиля №2 и КУ1 профиля №15) и лесоболотных ПК (КУ4 профиля №6) более благоприятные условия дренажа, по сравнению с болотными ПК (КУ3 профиля №6), способствуют улучшению состояния древостоя, а приближение грунтовых вод к поверхности и подтопление территории или пожар – угнетению деревьев (Мартынова и др., 2010). На пирогенных участках бывших торфоразработок (ландшафтный профиль №39) состояние молодняка благоприятное, взрослые деревья в основном сильно ослабленные, отмирающие исухостойные (КУ10 профиля №39).

Естественному состоянию болот Полистовского заповедника соответствует невысокий процент регрессивных сообществ (ОДК). Устойчивое состояние ПК, нативную смену сукцессий поддерживает заповедный режим, сводящий к минимуму потенциальные нагрузки на экосистему и вероятность развития регрессивных явлений. Полистово-Ловатская болотная система является сорбентом аэрогенных примесей, регулятором поверхностного стока и газового режима атмосферы.

Устойчивость болотных ПК к нарушениям диагностируется на контрасте ландшафтной структуры Полистовского заповедника и неохраняемой территории. Под влиянием иссушения дренажными каналами торфоразработок 1980-х гг. и последствий низовых пожаров происходят пирогенные сукцессии: смена сосново-кустарничково-сфагновых сообществ сосняками-зеленомошниками. В естественном состоянии эти ПК наименее подвержены механическим нарушениям. Спровоцированные естественными катастрофическими явлениями и антропогенной деятельностью регрессивные явления (деградация сфагнового покрова, появление черных мочажин) могут привести к смене растительных сообществ и отразиться на эмиссии метана в атмосферу в сторону увеличения его потоков. Торфоразработки повлияли на экологическое состояние озера Цевло, вызвав его обмеление, зарастание и заболачивание. Дноуглубительные работы улучшили состояние русла р. Цевла, уменьшив скорость заболачивания. Небольшой участок Радиловского массива несет на себе последствия рекреационной деятельности населения (отлов рыбы, сбор грибов и ягод, разведение костров, грунтовые дороги), в последнее время усилилась эвтрофикация Радиловского озера (Крыжевич и др., 2015).

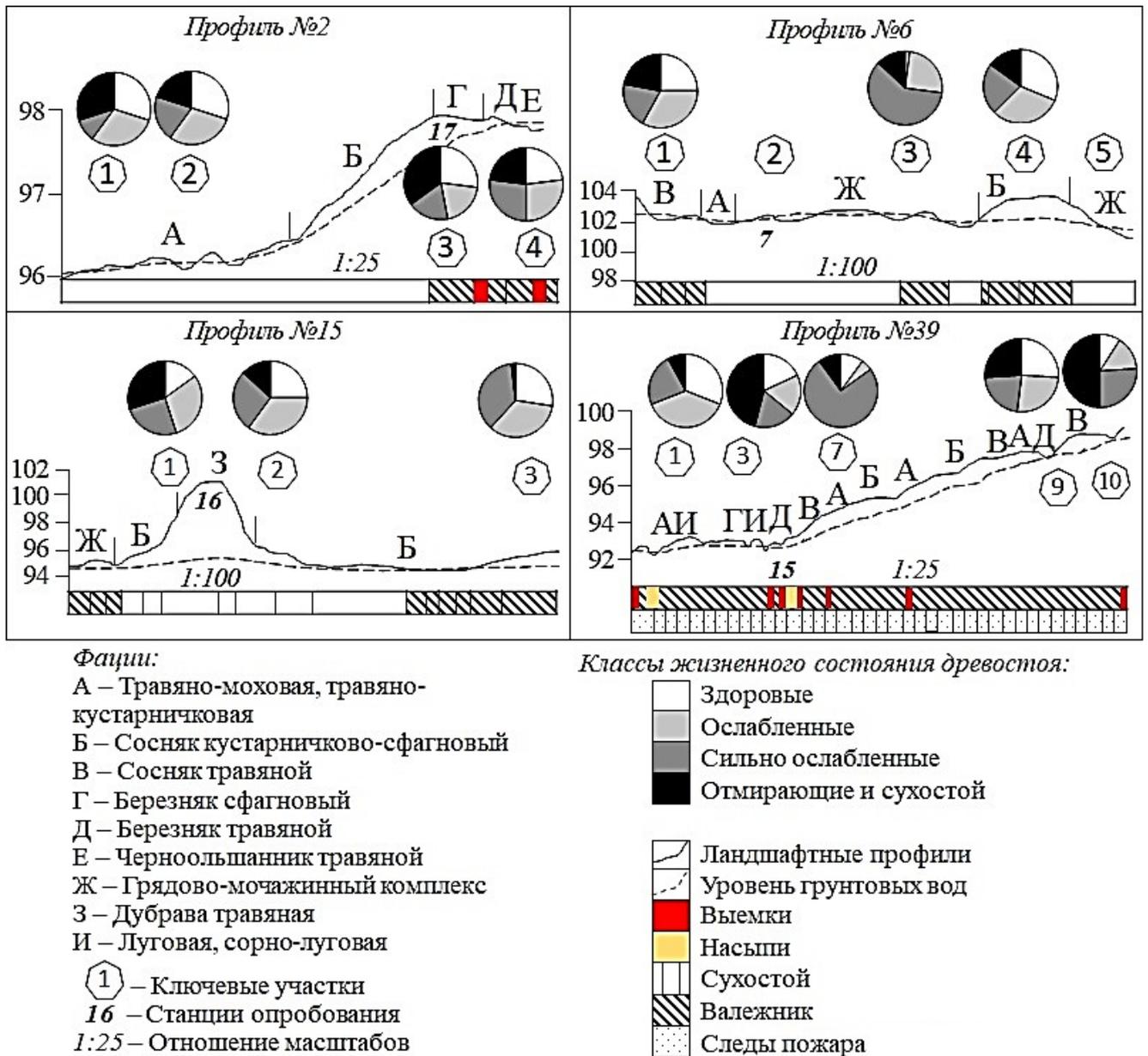


Рисунок 2. Ландшафтные профили и распределение древостоя на ключевых участках по классам жизненного состояния (%)

Продиагностированы различные типы почв и определены их свойства. Азональные и зональные типы минеральных почв сформированы на моренных отложениях разного гранулометрического и химического состава. Бурозем типичный малогумусный маломощный легкосуглинистый на среднесуглинистых литологической неоднородных моренных отложениях (O-AУ-AB-BM-C). Оглинивание (превращение первичных минералов во вторичные) *insitu* и иллювиирование глинистых частиц по профилю диагностируется на макроморфологическом уровне в виде лакировки на гранях педов горизонтов BM и C. Ржавозем типичный среднегумусный маломощный супесчаный (O-AУ_{ao}-BFM-C-D) на двучлене, с усилением бурого оттенка горизонта BFM. Дерново-буро-подзолистая типичная малогумусная маломощная легкосуглинистая почва на среднесуглинистых моренных отложениях (O-AУ-BEL-BT-BC-

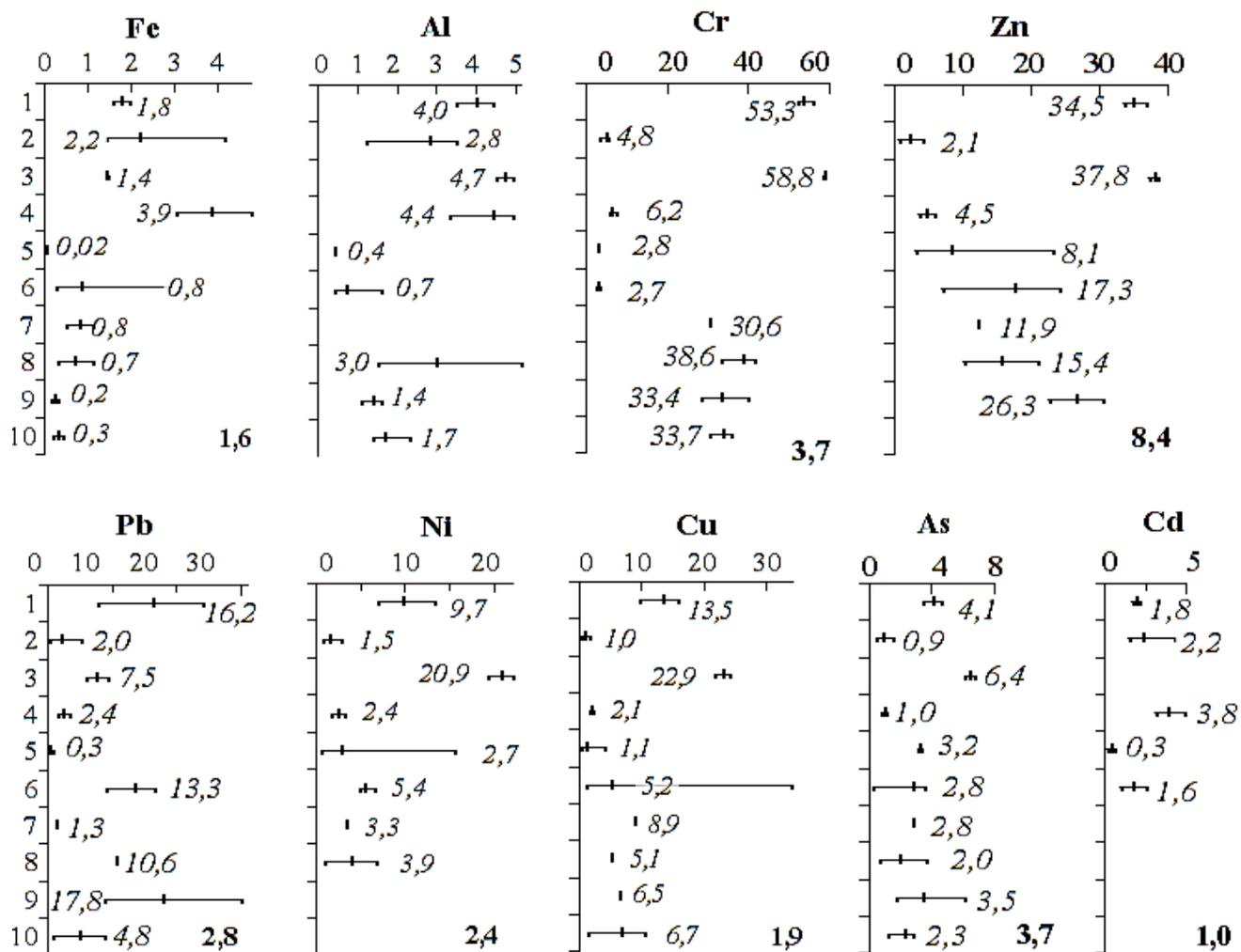
С) имеет кутаны и иллювиования, железистые новообразования в горизонте ВС. Литологическая неоднородность почвообъясняет вариации содержаний физической глины (ФГ) от 3,0-26,8 в верхних до 32,5-42,3% в нижних горизонтах почвы усложняет диагностику почвообразовательных процессов. Дерново-палево-подзолистую песчаную мелкоподзолистую слабогумусовую почву на песчаных моренных отложениях (O-ELf-EL-BEL-BT-BC-C) отличают оподзоливание, лессивирование, в нижней части профиля оглеение, эллювиально-иллювиальное профильное распределение компонентов элементного состава. Дерновая остаточно-карбонатная малогумусная маломощная каменистая супесчаная почва на рыхлых карбонатных супесях (O-AУ-AC'_{Ca}-C'_{Ca}-C''_{Ca}) отличается однородным литологическим составом, карбонатами в профиле, высокой степенью насыщенности основаниями высокая (91-98%) и низкими ЕКО (5,7-9,5 смоль(+) \cdot кг⁻¹) по сравнению с другими почвами (10,1-22,8 смоль(+) \cdot кг⁻¹). В отличие от других почв, содержание ФГ уменьшается от верхних горизонтов (14,5-16,0%) к нижним (7,8-9,5%). Среди минеральных почв максимальные значения С_{орг} в гумусовых горизонтах ржавозема типичного, дерновой остаточно-карбонатной почвы (2,62-5,5%); минимальные – в дерново-подзолистой, дерново-буро-подзолистой почвах и буроземе (0,3-1,0%).

Интразональные торфяные почвы отличаются оподзоливанием и оглеением профиля. Подзол иллювиально-железистый неглубоко подзолистый иллювиально-среднегумусовый на песчаных отложениях, подстилаемых суглинком (O-E-BF-BC-C), торфяно-глеезём типичный на суглинках (O-T-CG) и торфяно-глеезём потечно-гумусовый на песках (T-Ghi-C) состоят из торфяного горизонта и минеральной толщи. Неоднородность строения профиля полугидроморфных и гидроморфных почв объясняет вариацию их свойств по профилю. От торфяных к минеральным горизонтам снижается почти на порядок содержание С_{орг} (от 11,7-39,7% до 1,2-3,7%) и значительно обменная кислотность (от 68,0-162,0 до 9,1-26,0 м-экв/100 г почвы) и ЕКО (38,7-169,0 до 16,3-19,8 м-экв/100 г почвы), а степень насыщенности основаниями возрастает (от 3,5-7,2 до 8,8-53,9%). Реакция среды торфяных горизонтов сильно кислая (рН=3,7-3,9), минеральных – кислая (4,6-5,1). Отмечено увеличение рН среды в ряду: дерново-буро-подзолистая почва → бурозем → ржавозем → дерновая почва. Цветовая и текстурная дифференциация почв Радиловского массива по эллювиально-иллювиальном типу вызвана процессами выщелачивания и выноса органоминеральных компонентов в нижние горизонты.

4. Геохимия макро- и микроэлементов в ландшафтах болот Псковской области

Приведены содержания химических элементов в поверхностном слое почв, донных отложений, их распределение в системе «почва–растение» (на примере багульника болотного *Ledum palustre*) и по профилю почв.

Определены диапазоны и средние содержания элементов в 0–15 см почв. Средние содержания элементов в почвах Полистовского заповедника можно использовать как региональные фоновые при разработке основ мониторинга загрязнения почв ландшафтов верховых болот Северо-Запада ЕТР: Fe – 1,6%, Mn – 91,1 мг/кг, Cr–3,7, Zn–8,4, Pb–2,8, Ni–2,4, Cu–1,9, As–3,7, Cd–1,0 мг/кг (рис.3).



· – минимум, максимум – 33,7 – среднее 3,7 – среднее для почв Полистовского заповедника

Рисунок 3. Диапазоны и средние содержания Fe, Al (%), микроэлементов (мг/кг) в верхних 0-15 см почв Полистовского заповедника: 1 – буроземы, 2 – ржавоземы, 3 – дерново-буро-подзолистые, 4 – дерновые остаточные-карбонатные, 5 – торфяные олиготрофные, 6 – торфяные олиготрофные пирогенные, 7 – торфяно-глееземы; Радилковского массива: 8 – торфяно-глееземы, 9 – дерново-подзолистые, 10 – подзолы (составлено по данным (Федоров и др., 2017))

Низкие содержания подвижных форм элементов (табл. 1) подтверждают отсутствие загрязнения почв Полистовского заповедника тяжелыми металлами.

Содержания Fe, Cr, Mn максимальны в дерново-буро-подзолистых, дерновых остаточно-карбонатных почвах, ржавоземах, буроземах, донных отложениях и минимальны в торфяных почвах (рис. 3). Средние уровни Pb в торфяных (0,3-13,3 мг/кг) и минеральных почвах (2,0-17,8 мг/кг) сопоставимы. Содержания Fe, Pb на порядок, а Cu в 5 раз выше пирогенных, чем в незатронутых пожаром почвах. Выявленные более высокие содержания Pb в верхних горизонтах незатронутых пожаром торфяных почв Радиловского массива, возможно, связаны с его приближенным положением по сравнению с Полистовским заповедником к крупным городам как потенциальным источникам аэрогенного переноса ТМ.

Установлены вариации содержаний элементов в донных отложениях озер Полистовского заповедника: Al – от 0,6 до 4,0% (в среднем 3,0%), Fe – 0,7-1,3 (1,0)%, Mn – 149,6-420,6 (248,4) мг/кг, Ni – 1,2-17,8 (8,2), Cu – 1,1-31,7 (9,6), Zn – 3,7-34,3 (17,9), As – 0,4-5,5 (1,8), Pb – 0,2-27,3 (8,4) мг/кг. Эти значения ниже по сравнению с отложениями рек прилегающей неохраваемой территории: Al – 2,4-7,1 (3,8)%, Fe – 0,8-2,4 (1,3)%, Mn – 115,0-347,0 (184,0) мг/кг, Ni – 27,3-53,4 (43,4), Cu – 4,7-30,0 (20,1), Zn – 22,7-82,7 (48,6), As – 3,1-9,5 (6,7), Pb – 5,1-40,0 (22,7) мг/кг. Причины высокого накопления элементов в донных отложениях р. Цевла: преобладание в их составе ила и органики, подчиненное (субаквальное) положение в пределах катены, аллохтонное поступление частиц с участков суши, перемещение грунта при дноуглубительных работах. Содержания элементов в донных отложениях рек Радиловского массива были на уровне озер Полистовского заповедника: Al – 2,4-2,9 (2,7)%, Fe – 0,9-1,2 (1,0)%, Mn – 168,9-348,0 (235,6) мг/кг, Cu – 4,7-12,5 (9,6), Zn – 22,7-34,2 (27,8), As – 3,1-4,4 (4,0), Pb – 5,1-23,4 (14,1) мг/кг.

Таблица 1. Накопление подвижных форм элементов почвами и багульником

	Cu	Zn	Mn	Fe	Pb	Ni	Cr	Cd
Содержание в 0-15 см почв, мг/кг с.м.	0,1-1,3 (0,7)	0,5-4,3 (1,3)	1,1-58,7 (7,7)	0,5-16,3 (4,6)	0,2- 1,4(0,7)	0,1-1,5 (0,5)	-	-
Содержание в багуль- нике, мг/кг золы	2,2-4,8 (3,6)	9,8-18,8 (14,3)	46,9-165,0 (103,2)	7,4-42,2 (17,4)	<0,05	0,1-1,0 (0,4)	-	-
Коэффициент накопления	12,0	11,0	13,4	3,8	<0,1	0,8	-	-
Коэффициент биологи- ческого поглощения	1,91	1,71	1,13	0,03	0,02	1,70	0,01	0,17

Отмечено сходство рядов концентраций элементов в почвах минеральных островов и донных отложениях (рис.4). В торфяных почвах болот Ni занимает менее значимое место в ряду элементов. Для багульника ряд содержаний сходен с рядом подвижных форм элементов в почвах.

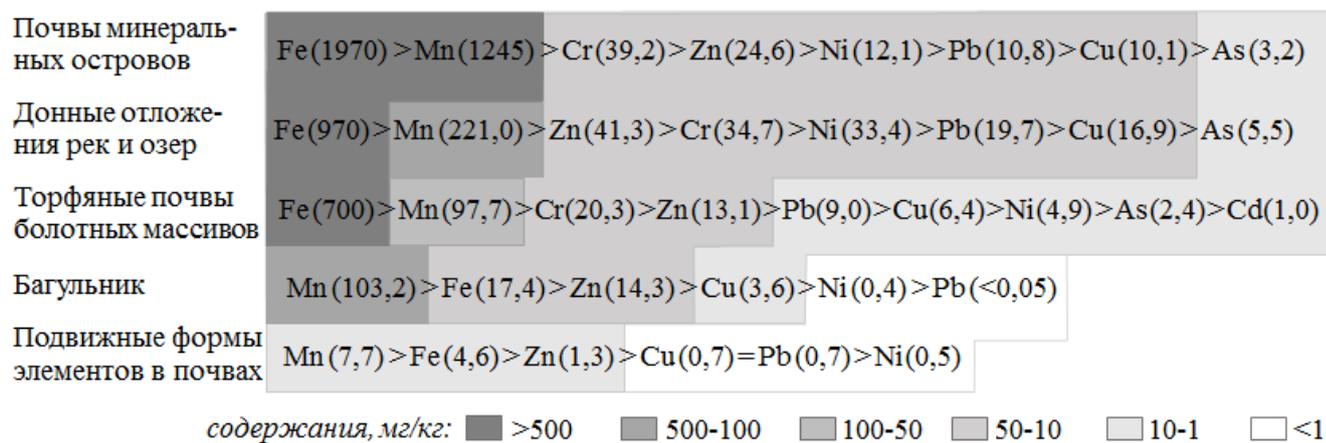


Рисунок 4. Ряды содержаний элементов (мг/кг) в компонентах ландшафтов болот Псковской области

В зеленой массе багульника накапливаются органотфильный Mn, халькофильные Cu, Zn (табл. 1) с высокими коэффициентами накопления биологического поглощения. Содержание в нем Fe, Mn, Ni, Cu, Zn, Pb ниже чем в багульнике зоны тундр, однако Кн Cu выше, а Cd ниже и биогеохимическая активность вида меньше ($BXA=5,14$), чем для тундр, что объясняется зональными ландшафтно-геохимическими особенностями. По показателю БХА багульникболотный Псковской области и растения болот Томской области близки. Следовательно, БХА тем выше чем севернее регион произрастания.

Распределение элементов по профилю почв Полистовского заповедника осложнено вариациями их содержаний в почвообразующих и подстилающих породах: V – 23,1-134,1, Cr – 44,7-269,1, Mn – 142-1230, Co – 6,5-56,4, Ni – 0,1-57,7, Cu – 7,4-61,4, Zn – 11,5-63,3, As – 3,6-9,3, Sr – 88,0-210,4, Pb – 2,1-29,9. Высокому накоплению V, Cr, Mn, Cu, As, Pb и Fe в нижних горизонтах ржавозема способствует механический и сорбционный геохимический барьер, создаваемый подстилающей породой. Разбросы значений TiO_2/Al_2O_3 по профилю почв подтверждают литологическую неоднородность почвообразующего материала ржавозема (0,17-0,10), бурозема и дерново-буро-подзолистой почвы (0,10-0,05). С ней связаны вариации кларков концентрации (КК) Co (1,3-2,4), As (1,7-2,1), Pb (1,1-1,8), Cu (1,2-1,5) и кларков рассеяния (КР) Cr (1,9-3,4), Sr (2,1-3,0), Fe (1,1-2,8), Ni (1,2-2,2), V (1,1-1,7), Zn (1,1-1,3). По содержанию Fe (2,01-7,18%) в профиле выделяется ржавозем типичный, который отличается проявлением железистого метаморфизма. Содержание Al согласуется с количеством ФГ: в суглинистых почвах оно вдвое выше, чем в супесчаных. Значения коэффициента окисления Fe_2O_3+MnO/Al_2O_3 (0,2-0,3) в почвах (кроме ржавозема, где они равны 0,7-1,0) указывают на низкую биологическую активность и слабую переработку первичных минералов, что типично для молодых моренных ландшафтов. В буроземе, дерново-буро-подзолистой почве наблюдается органогенное

накопление для Mn: соотношение содержания в верхнем горизонте и в породе (TOP/BOT) равно 1,3-2,0. Распределение большинства элементов по профилю дерновой остаточно-карбонатной почвы регрессивно-аккумулятивное (TOP/BOT=1,1-2,9), дерново-буро-подзолистой – элювиально-иллювиальное, осложненное неоднородностью, бурозема – литологически неоднородное. Цветовая и текстурная дифференциация почв Радиловского массива по элювиально-иллювиальном типу – следствие кислотного гидролиза и выноса элементов в иллювиальные горизонты. В подзоле содержания Fe, Zn, Cu, Pb, As резко снижаются от органического горизонта O (0,69%; 15,6, 20,8, 6,4, 16,5 мг/кг) к горизонту E (0,23; 0,9, 3,8, 4,9, 0,4) и увеличиваются в BF (0,7; 3,2, 5,0, 13,8, 2,0).

5. Содержания и потоки метана их взаимосвязь с макро- и микроэлементами в компонентах ландшафтов

Определены содержания, потоки метана (табл. 2), их суточная динамика и моделирование для Полистово-Ловатской системы и Радиловского массива. Содержание метана в воде варьировало в диапазоне 17,0-7600,0 мкл/л, в верхних 0-15 см торфа и почв – <0,01-33,0 мг/кг влажной массы (в.м.), в донных отложениях рек, озёр – 8,3-70,0 мг/кг. Максимальные уровни фиксировались в воде черных мочажин и переходных топей (1300-7600 мкл/л), пушицево-сфагновых мочажин ГМК (424-521), сфагновых топей (227-433), покрытых осоками берегов озер, рек (426-433); высокие – в торфах ОДК (2,7-29,8 мг/кг) и топей (1,8-33,0) благодаря обводненности и высокой доле органики. Содержания и потоки CH₄ минимальны на аэрированных грядах болот и в почвах минеральных островов. В воде и донных отложениях исследуемых рек и озёр содержание метана выше, чем в водных объектах Северо-Запада ЕТР, расположенных вне болотных массивов.

Скорость эмиссии CH₄ в атмосферу варьировала от <0,1 до 87,7, в среднем составляя 16,3 мг/(м²·ч) с максимальными значениями на переходных топях (31,3-87,7), мочажинах ГМК и озерах ОДК (12,8-21,8), реках, мелиоративных канавах (11,5-16,2), местах впадения рек в озера (22,9-24,1), тростниково-осоковых сообществах (22,9-24,1 мг/(м²·ч)).

Содержание метана в воде ГМК и сфагновых топей тесно связано (при p<0,05) с температурой воздуха (r=0,74-0,77), менее – с температурой воды (r=0,43). От температуры воды и воздуха зависит содержание метана в 0-15 см слое торфа (r=0,63-0,84) и 0-5 см слое донных отложений (r=0,71-0,91). Выявлена тесная связь потока CH₄ и его концентраций в воде (r=0,72) и 0-2 см слое почв и донных отложений (r=0,86).

Таблица 2. Эмиссия метана в атмосферу микроландшафтами Полистово-Ловатской болотной системы и Радилковского болотного массива

ПК и их компоненты		Содержание CH ₄		Поток CH ₄		
		вода, мкл/л	почвы, донные отложения, мг/кг	Скорость мг/(м ² ·ч)	кг/сут	% от общего
ГМК	<i>мочажины</i>	424-7600 (2465)	-	12,8-21,8 (17,3)	208430	35,5
	<i>гряды, бугры</i>	-	<0,01-0,01 (0,01)	<0,1-0,9 (0,5)	2568	0,4
ОДК	<i>озерки</i>	134,3	2,71-29,8 (14,0)	18,2	4368	0,7
	<i>ковры</i>	-	-	5,4	8294	1,4
	<i>гряды, бугры</i>	-	<0,01-0,01(0,01)	н.об-0,9 (0,5)	240	<0,1
Топи сфагновые		227-433 (330)	1,8-13,6 (8,0)	4,5-15,0 (8,6)	132096	22,5
Топи переходные		1300-3132 (2866)	1,9-33 (11,1)	31,3-87,7(62,0)	130944	22,3
Вершинные сосново-сфагновые ПК		185,8	0,02-2,7 (0,61)	2,0-7,5 (5,5)	28248	4,8
Сосново-пушицево-сфагновые ПК		25,7	0,11-0,34 (0,23)	0,9-3,6 (2,3)	2981	0,5
Водоемы		17-124 (64,4)	16-70 (49,2)	0,3-24,8 (12,2)	8198	1,4
Водотоки		17,3-254,7 (119)	1,92-49,4 (21)	11,5-24,1 (17,3)	2491	0,4
Тростниково-осоковые ПК		433	-	22,9-24,1 (23,5)	57528	9,8
Лесные ПК		-	0,01-0,05 (0,03)	<0,1-1,1 (0,6)	662	0,1
Итого					587048	

Максимальные потоки CH₄ наблюдались в периоды 07:30-13:30 и 18:30-00:30; на топях потоки возрастали с 07:00 до 08:00, на ГМК незначительно изменялись во времени (рис. 5). В суточном ходе потоков и содержаний метана в водене выявлено прямой зависимости от изменения температур воды и воздуха.

Объединив полученные результаты с данными для других водных объектов и почв мы получили универсальные графики (рис. 6) и уравнения зависимости потока метана от его содержания, которые вполне применимы для моделирования потоков CH₄ в атмосферу с поверхности болотных массивов:

$$\lg F_{CH_4} = 0,882 \cdot \lg C_{CH_4} + 1,821 \quad (r=0,72, p<0,01)$$

$$\lg F_{CH_4} = 1,13 \cdot \lg C_{CH_4} \cdot D_{CH_4} - 0,095 \quad (r=0,86, p<0,01),$$

где $\lg F_{CH_4}$ – логарифм потока метана в атмосферу, $\text{мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $\lg C_{CH_4}$ – логарифм содержания метана в воде, $\text{мкл}/\text{л}$, $\lg D_{CH_4}$ – в донных отложениях, $\text{нг}/\text{г}$.

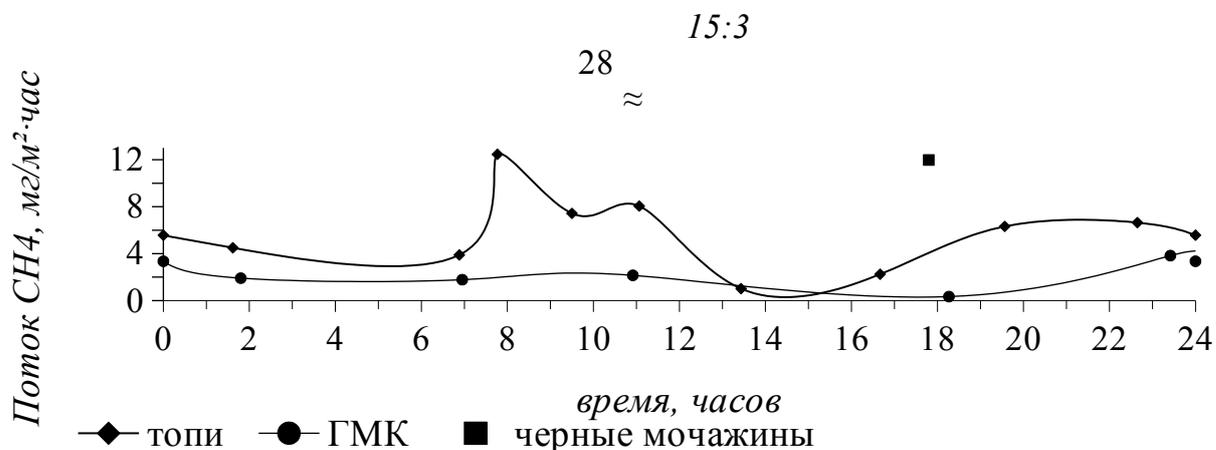
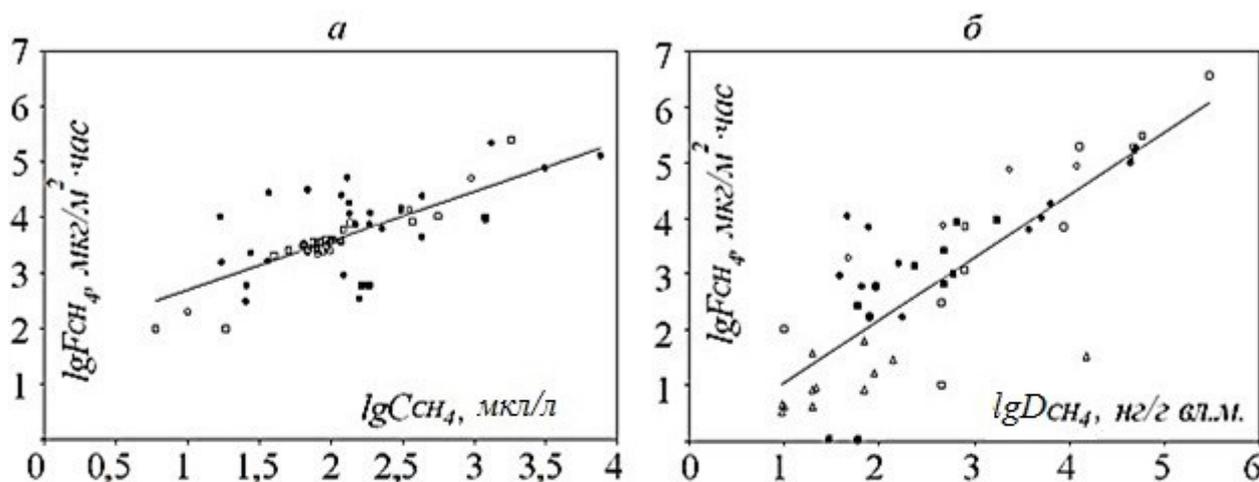


Рисунок 5. Суточное изменение потока CH_4 на топях и ГМК



- – Полистово-Ловатская болотная система
- ◇ – Радиловский болотный массив
- – Иласский болотный массив (Федоров и др., 2008)
- – Ростовская станция аэрации (Гарькуша и др., 2011)
- – водные объекты Ростовской области (Федоров и др., 2007)
- △ – почвы Ростовской области (Гарькуша и др., 2011)

Рисун
ок 6. Зависимость потока метана в атмосферу от его содержания в поверхностном слое воды (а) и в 0-5-см слое почв и донных отложений (б)

Суммарная эмиссия CH_4 Полистово-Ловатской болотной системой ~ 587 т/сут (табл. 2), из них 83% поставляют водно-болотные, 5,3 – лесоболотные, 11,7 – водные ландшафты. Наибольший вклад вносят топи (44,8%) и ГМК (35,9%). Скорости потока CH_4 в атмосферу ($< 0,01-87,7$ $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) сопоставимы с данными по Васюганской торфяно-болотной области (14,5-34,6, но выше, чем для

Иласского массива (0,0-9,84 мг/(м²·ч) при близких его концентрациях в грунтах и болотных водах. Это связано с температурами воздуха, воды (13,0-26,5°С), почв, донных отложений, вероятно, благоприятными для деятельности бактерий-метаногенов. Не исключено влияние увеличения растворимости СН₄ в воде при снижении температуры среды. Эмиссия метана Полистово-Ловатской болотной системой за бесснежный период составила ~106 тыс. т, болотами Псковской области ~340 тыс. т.

Связь между содержанием химических элементов и СН₄ проанализирована косвенно при помощи регрессионных уравнений, построенных для массивов данных: I – торфяные почвы, II – минеральные почвы, III – донные отложения, IV – пара минеральные почвы + донные отложения (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициенты корреляции (r, при p<0,05) между содержанием метана и химических элементов в почвах и донных отложениях

	Fe	Al	As	Cr	Cu	Ni	Zn	Mn	Pb	Cd
торфяные почвы	-0,27	-0,24	-0,43	-0,19	-0,38	-0,38	-0,43	-0,46	-0,4	0,07
минеральные почвы	-0,27	-0,46	0,7	-0,49	-0,29	-0,41	0,05	-0,11	0,75	-
донные отложения	0,08	-0,31	0,21	-0,73	-0,47	-0,14	0,19	-0,26	0,12	-0,18
минеральные почвы+ донные отложения	-0,06	-0,17	0,1	-0,74	-0,47	-0,32	0,08	-0,28	0,02	-0,18

курсивом выделена незначимая связь

В верхних 0-15 см торфяных почв (торфяных олиготрофных, торфяно-глеезёмов, подзолов) органическое вещество и степень его разложенности проявляют более заметную связь с содержанием СН₄, чем литологический состав. Чем сильнее в торфяной залежи развит процесс оглеения, тем выше её плотность, больше содержание глинистых частиц, Al и восстановленных соединений Fe, меньше лабильного органического вещества и СН₄. Выявлена общая тенденция для массива данных по торфяным почвам: слабая отрицательная связь Fe, Al и большинства микроэлементов (As, Cu, Ni, Zn, Mn, Pb) с содержанием СН₄ (r = -0,38...-0,43). Подобный характер связи Fe и Al с метаном объясняется одной из причин: ингибирующим воздействием их высоких содержаний на метаногенез и/или тем, что Fe и Al способствуют усилению окисления СН₄ на границах раздела «почва – атмосфера» и «донные осадки – вода» в болотных ландшафтах.

В отличие от торфяных почв, тесная прямолинейная зависимость между содержанием Pb, As и СН₄ (r = 0,70...0,75) в минеральных почвах имеет литохимическую природу: сорбция Pb, As и метана на тонкодисперсных частицах. Противоречивые корреляции содержания СН₄ (высокие отрицательные с Cr (r = -0,73...-0,74) и незначимые с Pb, As, Mn, Cd) в донных отложениях и паре

минеральные почвы – донные отложения требуют углубленных исследований, в т.ч. синхронного изучения поведения археобактерий и других микроорганизмов.

Заключение

1. Выявлено преобладание в структуре ПК Полистовского заповедника грядово-мочажинных комплексов (35,8% площади) и сфагновых переходных топей (32,0%). На соседних преобразованных торфоразработках мипирогенных торфяниках доминируют менее сукцессионно устойчивые сосняки и березняки-зеленомошники, вершинные сосново-сфагновые, сосново-пушицево-сфагновые ПК, происходят процессы заболачивания, зарастания берегов водных объектов и деградация мохового покрова. Черные мочажинные регрессивных сообществ отличаются большей интенсивностью деструкции органического вещества и процесса метанообразования. Для сохранения экологической, гидрологической и газовой функции болот важно обеспечивать режим их постоянной охраны.

2. Впервые исследованы интразональные торфяные олиготрофные почвы, торфяно-глеезёмы, подзолы и азональные буроземы, дерново-буро-подзолистые, ржавоземы, дерново-карбонатные почвы внутриболотных минеральных островов Полистовского заповедника. Высокие содержания микроэлементов в нижних горизонтах ржавозема связаны с механическим и сорбционным геохимическим барьером и литологической неоднородностью. Цветовая и текстурная дифференциация почв Радиловского массива по элювиально-иллювиальному типу – результат выщелачивания и выноса органоминеральных компонентов в нижние горизонты.

3. Выявлены невысокие содержания элементов в компонентах ландшафтов Полистовского заповедника. Их уровни в 0-15 см слое почв и донных отложений рек и озер могут быть использованы как региональные фоновые для Северо-Запада ЕТР. Багульник активно аккумулирует Cu, Zn и Ni, но слабо Fe, Cd. Его биохимическая активность ниже, чем в северных районах произрастания. Ряды концентраций элементов в почвах минеральных островов и донных отложениях схожи; в гидроморфных почвах Ni занимает менее значимое положение.

4. Установлены средние скорости потока (16,3 мг/(м²·ч)) и рассчитана величина эмиссии метана Полистово-Ловатской болотной системой за бесснежный период (340 тыс. т). Наибольший вклад вносят сфагновые переходные топи (44,8%) и грядово-мочажинные комплексы (35,9%). Скорость эмиссии метана тесно связана с его концентрациями в воде и в поверхностном слое почв и донных отложений. Его потоки максимальны в периоды 07:30-13:30 и 18:30-00:30; на топях они возрастали с 07:00 до 08:00, на ГКМ незначительно изменялись во времени.

5. Выявлено, что связь уровней большинства элементов с содержанием метана слабая отрицательная, для Pb, As противоречивая, а для Cd – незначимая. Слабая отрицательная связь между содержаниями Fe, Al, микроэлементов и CH₄ в торфяных почвах объясняется физико-химическими процессами, с одной стороны благоприятствующими накоплению Fe и связанных с ним микроэлементов, с другой – уменьшению содержания лабильного органического вещества и CH₄. Тесная положительная корреляция содержания CH₄ с Pb и высокая отрицательная с C_{гв} минеральных почвах требует дополнительных исследований.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах перечня ВАК РФ

1. Крыжевич М.И., Зубкова П.С., Шипкова (Нестерук) Г.В. Радиловский болотный массив: состояние и геоэкологические проблемы // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. №1 2015. С. 84-88.
2. Мартынова М. И., Яблоков М.С., Шипкова (Нестерук) Г.В., Михайлова Е.А. Современные природные комплексы окраинных лесов Полистово-Ловатского болотного массива // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2010. №2. С. 127-130.
3. Федоров Ю.А., Минкина Т.М., Шипкова (Нестерук) Г.В. Тяжелые металлы в ландшафтах верховых болот Псковской области // География и природные ресурсы. 2017. №2. С. 46-55.
4. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Шипкова (Нестерук) Г.В. Эмиссия метана торфяными залежами верховых болот Псковской области // География и природные ресурсы. 2015. № 1 С. 88-97.

Научные статьи, опубликованные в журналах Web of Science

5. Shipkova (Nesteruk) G.V., Minkina T.M., Fedorov Yu.A., Goncharova L.Yu., Sherstnev A.K., Mandzhieva S.S. Accumulation and distribution features of micro- and macroelements in Luvisols of plain and mountainous regions // Journal of Geochemical Exploration. V. 184, Part B. January 2018. P. 394-399.

Работы, опубликованные в других изданиях

6. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Шипкова (Нестерук) Г.В. Уровни содержания и особенности распределения метана в почвах различных географических зон России // Материалы IX Всероссийской с международным участием научной школы молодых ученых «Болота и биосфера». Томск. 2015. С. 172-177.
7. Шипкова (Нестерук) Г.В. Особенности накопления и распределения микроэлементов в буроземах заповедников равнинных и горных областей // «Антропогенная трансформация природной среды», ред. С.А. Бузмаков; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь. 2016. С. 179-183.
8. Шипкова (Нестерук) Г.В. Особенности накопления тяжелых металлов в бурых лесных почвах Псковской области // Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны: тезисы докладов VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева 2016 г. Отв. ред.: С.А. Шоба, И.В. Савин. – Москва-Белгород: Изд. дом «Белгород». 2016. Часть I. С. 392-393.
9. Шипкова (Нестерук) Г.В. Элементный состав почв Полистово-Ловатской болотной системы // Материалы Московской международной летней экологической

школы MOSES-2015 «Экологический мониторинг, моделирование и проектирование в условиях природных, городских и агроэкосистем». Москва. 2015. С. 189-192.

10. Шипкова (Нестерук) Г.В., Минкина Т.М., Сушкова С.Н. Геохимическая характеристика почв ландшафтов Полистовского заповедника // Сборник материалов Международной научной конференции «Современные проблемы состояния и эволюции таксонов биосферы», 12-15.06.2017. М.: ГЕОХИ-РАН, 2017. С. 314-318.

11. Шипкова (Нестерук) Г.В., Минкина Т.М., Федоров Ю.А. Биогеохимическая оценка компонентов ландшафтов Полистовского заповедника // Материалы III Международной школы-семинара «Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах». г. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2018. С. 311-317.

12. Шипкова (Нестерук) Г.В., Минкина Т.М., Федоров Ю.А. Особенности накопления тяжелых металлов в почвах и растениях ландшафтов верховых болот Псковской области // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах. Материалы II Международной школы-семинара молодых исследователей / ред. В.А. Боев, А.И. Сысо, В.Ю. Хорошавин. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. университета, 2016. С. 315-318.

13. Шипкова (Нестерук) Г.В., Федоров Ю.А. Накопление и распределение тяжелых металлов в почвах Псковской области // Материалы Международной научно-практической конференции «Агроэкологические аспекты применения удобрений в садоводстве». Сочи. 2016. С. 212-216.

14. Шипкова (Нестерук) Г.В., Федоров Ю.А., Минкина Т.М., Афанасьев К.А. Биогеохимическая оценка компонентов ландшафтов Полистовского заповедника // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Экологические проблемы взгляд в будущее». СОЛ Лиманчик – БП и СОТ «Витязь». 2017А.С. 532-536.

15. Шипкова (Нестерук) Г.В., Федоров Ю.А., Минкина Т.М., Шерстнев А.К., Сушкова С.Н. Аккумуляция микроэлементов растением *Ledumpalustre* L. и почвами Полистовского заповедника // Труды Шестого международного молодежного симпозиума «Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов (LFPM – 2017)». г. Ростов-на-Дону – г. Туапсе. 2017Б. Т.2.С. 383-385.

