

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Горбач Николай Михайлович

**Влияние пожаров на почвы болотных и лесных экосистем
(на северо-востоке европейской части России)**

Специальности 1.5.15. Экология, 1.5.19. Почвоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре экологии и геологии Сыктывкарского государственного университета имени Питирима Сорокина и в отделе почвоведения Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: *Дымов Алексей Александрович,*
доктор биологических наук, доцент

Официальные оппоненты: *Бобровский Максим Викторович,*
доктор биологических наук, доцент, Федеральный исследовательский центр «Пущинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, лаборатория моделирования экосистем, ведущий научный сотрудник
Сушкова Светлана Николаевна,
доктор биологических наук, Южный федеральный университет, научная лаборатория «Центр воспроизводства плодородия почв», Академия биологии и медицины им. Д.И. Ивановского, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов, заведующий научной лабораторией, профессор
Мергелов Никита Сергеевич,
кандидат географических наук, Институт географии Российской академии наук, отдел географии и эволюции почв, ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится 10 ноября 2026 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.3 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 12, факультет почвоведения, аудитория М-2.
E-mail: paramonovata@my.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертации научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/4030>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Т.А. Парамонова

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Почвы бореальной (таежной) зоны являются ключевым глобальным резервуаром углерода, депонируя около трети его наземных запасов (Scharlemann et al., 2014; Абакумов и др., 2022; Копчик и др., 2023). Особую роль играют органогенные почвы, включающие торфяные залежи, которые, помимо того, что служат депо углерода (Botch, 1995; Вомперский и др., 1999; Чернова и др., 2021), являются уникальными экосистемами (Инишева, 2006; Сирин и др., 2019), хранящими информацию о климатических и экологических изменениях на протяжении их развития (Дьяконов и др., 2017; Куприянов, Новенко, 2021). Современные прогнозы указывают на изменения климата, при которых возможно возрастание частоты и интенсивности пожаров, которые способны представлять прямую угрозу для органогенных горизонтов почв, особенно торфяных (Knoblauch et al., 2013; Rein, Huang, 2021). Воздействие пирогенного фактора на органогенные почвы, помимо трансформации почвенного органического вещества (ПОВ), может привести к необратимым изменениям в рамках экосистем, к масштабным выбросам углерода и усилению глобальных изменений климата (Whitlock et al., 2010; Kharuk et al., 2016).

Влияние пожаров на свойства органогенных горизонтов почв в научной литературе оценивается неоднозначно, а в условиях современных климатических изменений и повышающейся антропогенной нагрузки эта оценка становится ещё более сложной (Shvidenko, Schepaschenko, 2013). Исходя из вышеизложенного, исследования органические вещества (ОВ) верхних горизонтов почв, как наиболее подверженных пожарам, приобретают особую значимость. Реконструкция динамики пожаров и исследования состава ПОВ необходимы для фундаментального понимания глобальных процессов. Результаты исследования имеют важное прикладное значение, позволяя дополнять стратегии устойчивого управления органогенными почвами, включая меры по их восстановлению и контролю состава.

Цель работы оценить влияние пирогенного фактора на органогенные горизонты почв бореальных ландшафтов, включая реконструкцию динамики пожаров в голоцене.

Для реализации поставленной цели решали следующие **задачи**:

- 1) Охарактеризовать динамику пожаров на северо-востоке европейской части России в голоцене;
- 2) Выявить закономерности пирогенной активности в широтном ряду подзон тайги;
- 3) Установить сохранность пирогенных изменений органического вещества в торфяных олиготрофных почвах;
- 4) Оценить влияние макроскопических частиц угля на состав и свойства почвенного органического вещества в торфяных олиготрофных почвах;
- 5) Выявить особенности трансформации органического вещества верхних горизонтов почв при разных температурах горения и условиях доступа кислорода в рамках лабораторного эксперимента.

Научная новизна. Впервые для всех подзон тайги Республики Коми проведены комплексные палеоэкологические исследования торфяных олиготрофных почв. Показано нарастание частоты пожаров и, соответственно, концентрации макроскопических частиц угля в почвах при движении от крайнесеверной к южной подзонам тайги. Применение комплекса современных аналитических методов, включающих ^{13}C ЯМР спектроскопию и анализ полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), дополненных данными об элементном составе (C, N) ПОВ, реакции среды (pH) и плотности почв, позволило охарактеризовать изменения, происходящие в почвенном органическом веществе под воздействием пожаров. В ходе лабораторного пирогенного эксперимента установлены закономерности изменений органогенных горизонтов торфяной олиготрофной, подзола иллювиально-железистого и типичной подзолистей почв при различных условиях горения. Выявлены количественные и качественные изменения органогенных горизонтов почв, происходящие в результате пирогенной трансформации.

Теоретическая значимость. Впервые для Республики Коми проведена комплексная реконструкция палеопожаров и оценена их роль в трансформации органогенных почв. Получены оригинальные данные о влиянии пирогенного фактора на состав ПОВ и образование ароматических соединений в органогенных горизонтах почв, что дополняет фундаментальные представления о пожарной активности и ее последствиях в бореальной зоне.

Практическая значимость заключается в прогнозировании изменений почв и ПОВ при пожарах и возможном изменении пирогенной активности при климатических изменениях. Кроме этого, результаты могут быть использованы в лекционных курсах по палеоботанике и палеоэкологии, при подготовке практических и лабораторных работ, а также в ходе полевых практик для студентов экологов и почвоведов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Исследуемые экосистемы неоднократно подвергались пирогенному воздействию, период климатического оптимума голоцена характеризовался высокой пожарной активностью, тогда как в суббореальный период она снижалась. При этом заселение территории оказывало существенное влияние на частоту пирогенных событий.

2. Пирогенные остатки обнаружены по всей толще торфяных олиготрофных почв. Концентрация макроскопических частиц угля влияет на содержание ПАУ и степень ароматичности ОВ, а также статистически связана со степенью разложения торфа и с запасами углерода.

3. Воздействие высоких температур сопровождается существенными изменениями физических и химических свойств органогенных горизонтов почв, включая возрастание рН, удельной электропроводности и удельной площади поверхности. При этом горение в условиях ограниченного доступа кислорода приводит к формированию ароматических структур в составе органического вещества.

Методология и методы исследований. Работа основана на комплексном подходе к изучению органогенных почв и воздействия на них пожаров.

Динамика пожаров в голоцене, их влияние на свойства органогенных горизонтов почв были проанализированы в контексте зонального ряда Республики Коми как обширного репрезентативного региона бореальной зоны. Результаты и выводы получены с применением классических и современных методов, включая полевые наблюдения, химические, физические и статистические методы анализа.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются органогенные горизонты почв лесных и болотных экосистем Республики Коми. Предмет исследования – органическое вещество органогенных горизонтов почв и его трансформация в результате пирогенного воздействия.

Степень достоверности. Полученные результаты основаны на значительном числе повторностей и обработаны с применением программного пакета Statistica 10, сред программирования Python (версия 3.x) с использованием библиотек Pandas, SciPy и Matplotlib, а также языка R (R v3.6.1–4.3.2 и RStudio v1.3.1056–2024.12.1). Для минимизации погрешностей выполнены многократные измерения ключевых параметров.

Апробация исследований. Материалы исследований доложены на научных мероприятиях: XXVII–XXXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2020–2024), Международная научная конференция XXIV Докучаевские молодежные чтения (Санкт-Петербург, 2021), VI Международный полевой симпозиум «Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее» (Ханты-Мансийск, 2021), IV Всероссийская (XIX) молодежная научная школа-конференция «Молодежь и наука на Севере – 2022» (Сыктывкар, 2022), XXV Пущинская школа-конференция молодых ученых с международным участием «Биология – наука XXI века» (Пущино, 2022), II Всероссийская научная конференция (с международным участием) «Геохронология четвертичного периода: инструментальные методы датирования новейших отложений» (Москва, 2022), VIII съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв (Сыктывкар, 2022),

Международная молодежная научная школа «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки» в рамках международного форума «Степная Евразия – устойчивое развитие (Ростов-на-Дону, 2022), VI Всероссийская конференция с международным участием «Вопросы геологии и комплексного изучения экосистем Восточной Азии» (Благовещенск, 2022), Научно-практическая конференция «Современная экологическая обстановка и состояние биоразнообразия в Республике Коми» (Сыктывкар, 2022), XXX–XXXII Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы биологии и экологии» (с элементами научной школы) (Сыктывкар, 2023–2025), Всероссийская (с международным участием) конференция по мерзлотным почвам «Мерзлотные почвы в антропоцене» (Салехард, 2023), X Всероссийская (с международным участием) научная конференция «Актуальные вопросы теории и практики лесного почвоведения» (Петрозаводск, 2023), IX съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (Казань, 2024), XI Всероссийская научная конференция с международным участием «Экологические функции лесных почв и биоразнообразие лесов» (Красноярск, 2025).

Публикации. Основные положения, результаты и выводы диссертации отражены в 7 научных трудах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 186 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, выводов, списка литературы и 5 приложений, содержит 45 рисунков и 12 таблиц. Список литературы составляет 403 источника, из них 259 на иностранном языке.

Финансовая поддержка работы. Исследование реализовано при финансовой поддержке проектов Российского фонда фундаментальных исследований № 19-29-05111 мк «Механизмы пирогенной стабилизации углерода в почвах бореальных лесных и болотных экосистем» и Российского научного фонда № 25-17-00054 «Природоподобные и антропогенные технологии

для аккумуляции стабильных форм углерода в лесных почвах», бюджетных тем ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 122040600023-8 «Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и бореальных экосистем европейского Северо-Востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов» и 125021902454-1 «Почвы и почвенные ресурсы европейского Северо-Востока России в условиях современных климатических изменений, антропогенного пресса и социально-экономических вызовов».

Благодарности. Автор искренне благодарит своего наставника и научного руководителя доктора биологических наук Дымова Алексея Александровича за ценные советы, мудрые напутствия и всестороннюю поддержку на всех этапах выполнения работы. Особая признательность за вдохновение, поддержку и помощь в выполнении исследований адресована коллеге и другу кандидату биологических наук Старцеву Виктору Викторовичу. Автор также выражает глубокую признательность сотрудникам отдела почвоведения ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, а также работникам других отделов: к.б.н. Габову Д.Н., к.б.н. Гончаровой Н.Н., к.б.н. Дубровскому Ю.А., д.б.н. Кутявину И.Н. Автор благодарит сотрудника ИЛ СО РАН к.б.н. Прокушкина А.С. и сотрудника СГУ им. Питирима Сорокина к.б.н. Боброва Ю.А. за активное обсуждение результатов, ценные советы, замечания и рекомендации. Особая благодарность сотрудникам экоаналитической лаборатории ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН Тумановой Е.А. и Зуевой О.М. за проведение части химических анализов.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Торфяные олиготрофные почвы как источник палеоэкологической информации

В первой главе дан анализ литературы по современным проблемам палеоэкологии и педоантракологии, обоснована роль пожаров как значимого фактора трансформации бореальных экосистем и органогенных почв на протяжении голоцена (Barhoumi et al., 2019; Mazei et al., 2020; Макеев, Русаков, 2023; Bobrovsky et al., 2023; Mergelov et al., 2024). Систематизированы данные о

влиянии пирогенного фактора на динамику растительности (Santín, Doerr, 2016; Feurdean et al., 2020; Шопина и др., 2021; Blyakharchuk et al., 2024), формирование почвенных архивов и глобальный цикл углерода, с особым акцентом на торфяные экосистемы как уникальные архивы информации экологических и климатических изменений (Kirpotin et al., 2009, 2021; Ковалева, Ковалев, 2020; Shefer et al., 2024). Рассмотрены теоретические и методологические основы анализа органогенных горизонтов почв, а также современные подходы к изучению трансформации ПОВ под воздействием огня (Красильников, 2015; Bird et al., 2015; Rein, Huang, 2021; Vasilyeva et al., 2022).

Глава 2. Объекты и методы

Во второй главе охарактеризованы объекты, регион и методы исследований. Дана подробная характеристика района исследований. Объектами исследования выступили органогенные почвы бореальной зоны. Торфяные олиготрофные почвы девяти ключевых участков, расположенных на территории Республики Коми и образующих меридиональную трансекту регионального масштаба (табл. 1, рис. 1), были использованы для анализа постпирогенных остатков.

Таблица 1. Описание местоположения исследуемых торфяных олиготрофных почв

Название объекта	Координаты	Подзона тайги	Тип болота	Площадь, га	Ближайший населенный пункт
ТП-I	66°54'47" с. ш., 51°56'32" в. д.	Крайнесеверная	Бугристое (не криотурбированное)	2000	п. Харьяга (9 км к востоку)
ТП-II	65°55'40" с. ш., 52°40'22" в. д.	Крайнесеверная	Грядово-мочажин.	2.5	с. Хабариха (20 км к юго-западу)
ТП-III	65°23'9" с. ш., 52°20'0" в. д.	Крайнесеверная	Грядово-мочажин.	332	с. Усть-Цильма (8 км к юго-востоку)*
ТП-IV	65°18'40" с. ш., 53°36'28" в. д.	Северная	Грядово-мочажин.	1092	п. Щельяюр (9 км к западу)
ТП-V	63°30'11" с. ш., 50°40'13" в. д.	Средняя	Грядово-мочажин.	77	п. Седьюдор (12 км к югу)
ТП-VI	61°59'7" с. ш., 57°57'14" в. д.	Средняя	Грядово-мочажин. (залесенное)	103	с. Усть-Унья (20 км к югу)
ТП-VII	61°57'51" с. ш., 50°32'19" в. д.	Средняя	Грядово-мочажин.	661	п. Язель (3 км к востоку)
ТП-VIII	61°41'50" с. ш., 50°39'11" в. д.	Средняя	Грядово-мочажин. (залесенное)	32	г. Сыктывкар (9 км к востоку)
ТП-IX	59°58'39" с. ш., 50°10'12" в. д.	Южная	Грядово-мочажин. (залесенное)	68	с. Ношуль (42 км к северо-востоку)

* в непосредственной близости (1,5 км) к археологическому памятнику «Шиховское».

Органогенные горизонты, отобранные в сосняке лишайниковом, ельнике зеленомошном и верховом болоте, послужили материалом для пирогенного эксперимента. Приведена специфика каждого из девяти исследуемых болотных фитоценозов, обоснован их выбор в качестве палеоэкологических архивов. Описана методика полевого отбора торфяных колонок и образцов подстилок для пирогенного эксперимента. Представлен комплекс методов, примененных в работе, который включает радиоуглеродное датирование и калибровку возраста торфяных отложений, анализ ботанического состава, педоантракологический анализ, определение кислотности, электропроводности и элементного состава, изучение состава органического вещества методами ^{13}C -ЯМР спектроскопии и анализ полициклических ароматических углеводородов (ПАУ).

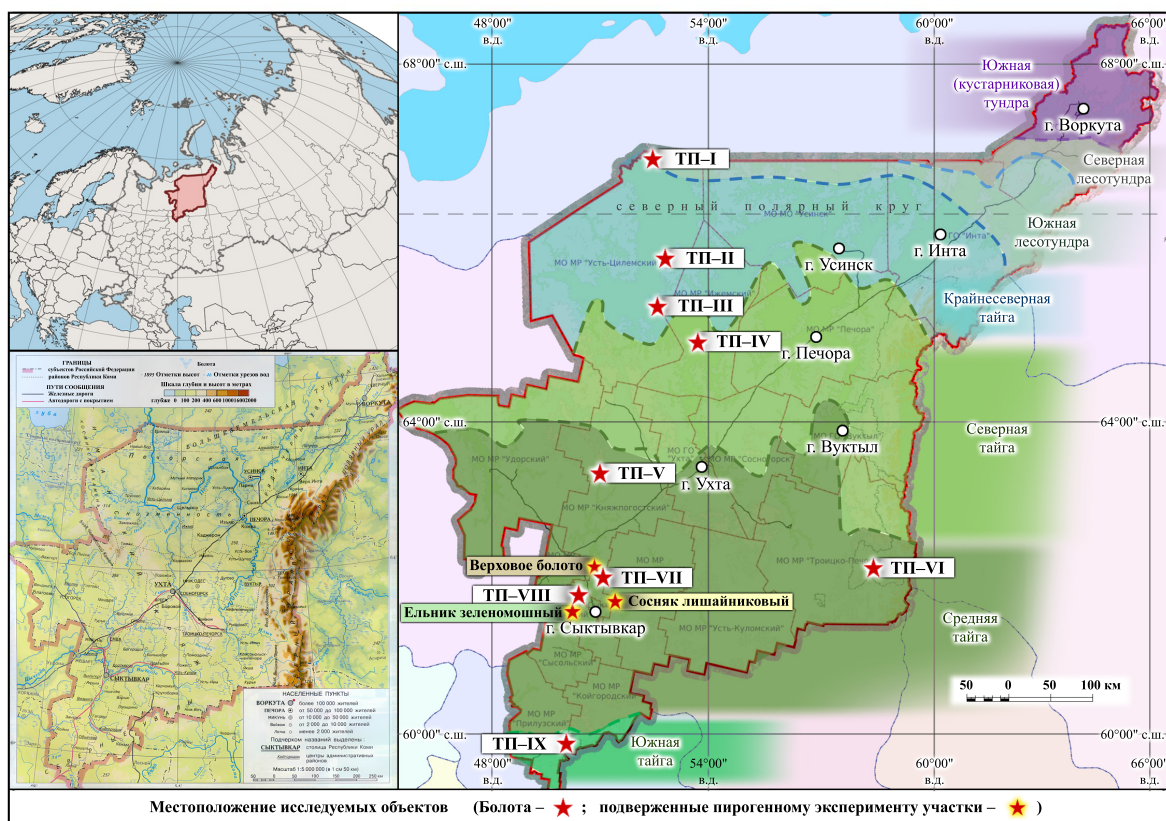


Рисунок 1. Расположение объектов исследования

Детально описан лабораторный пирогенный эксперимент по термической трансформации органогенных горизонтов при температурах в 200, 300 и 500 °C (рис. 2). Объектами исследования выступили органогенные горизонты (подстилки) сосняка лишайникового, ельника зеленомошного и верхового болота (типичных для бореальной зоны северо-востока европейской части

России экосистем). Образцы подвергались термическому воздействию при температурах 200, 300 и 500 °С в течение трех часов в условиях, как доступа, так и дефицита кислорода, что позволило смоделировать разные фазы пирогенного воздействия (тление и горение).

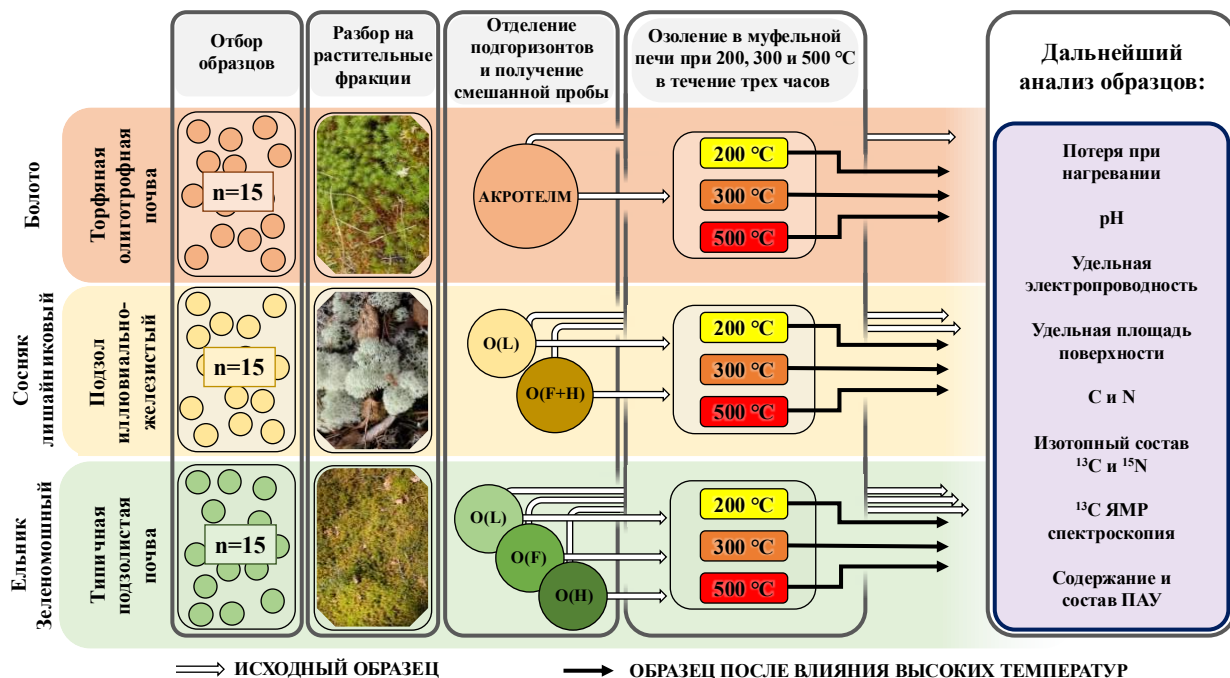


Рисунок 2. Схема дизайна пирогенного эксперимента

Статистическая обработка данных выполнена с использованием пакетов Excel, Statistica, сред программирования Python (версия 3.x) с использованием библиотек Pandas, SciPy и Matplotlib и в среде программирования R (R v3.6.1–4.3.2 и RStudio v1.3.1056–2024.12.1).

Глава 3. Торфяные олиготрофные почвы как архив пирогенной динамики в голоцене

Реконструирована динамика лесных пожаров на северо-востоке европейской части России за постледниковый период. Работы выполнены на девяти участках, на которых исследовали торфяные почвы (ТП) и проводили отбор торфяных колонок с ненарушенной структурой. Для трех из девяти ключевых участков были заложены полнопрофильные разрезы, для оценки запасов углерода в верхних 100 см. Исследования охватили временной интервал в ~10 тысяч калиброванных лет (кал. л.) (рис. 3).

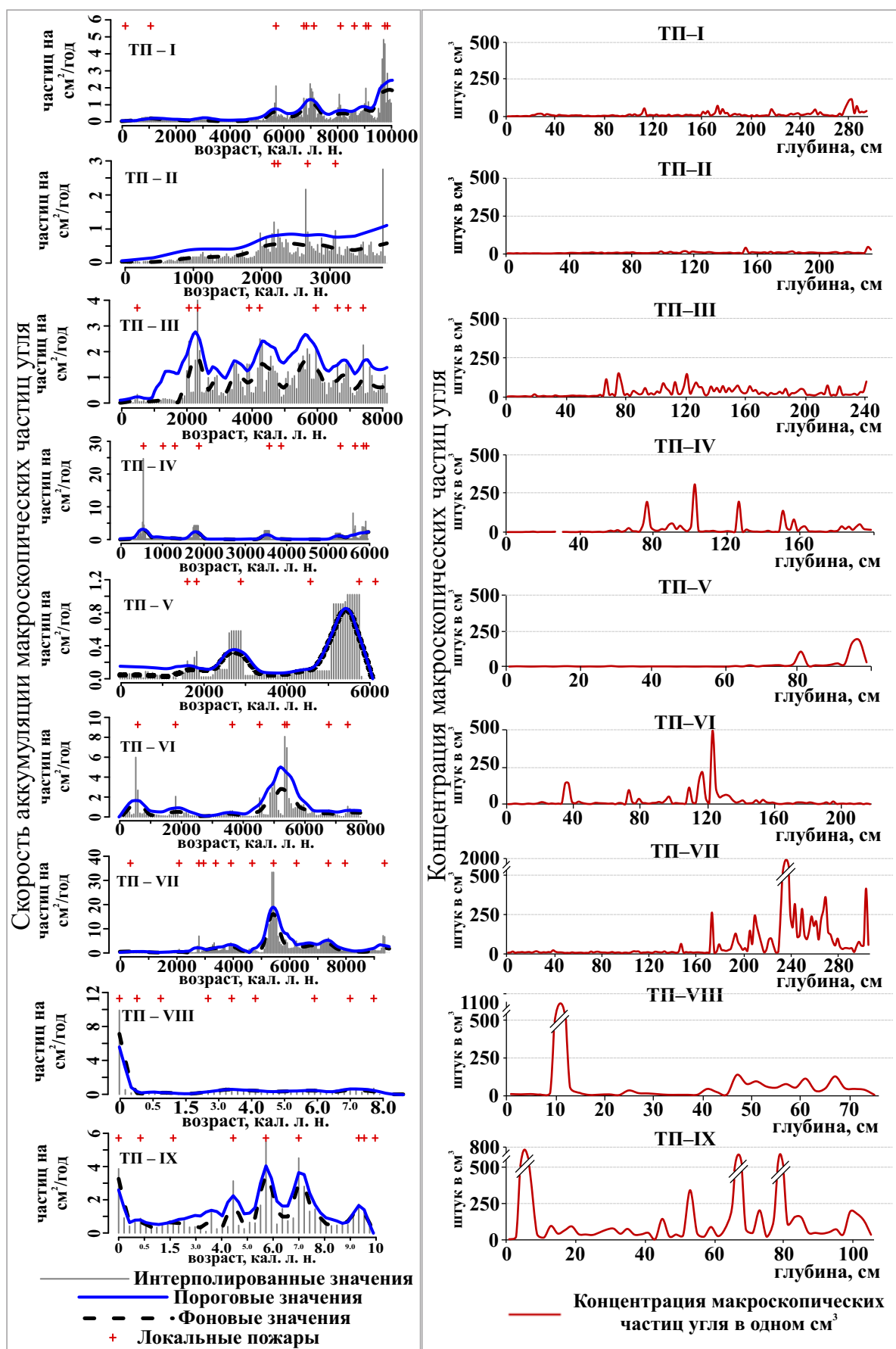


Рисунок 3. Скорость аккумуляции и концентрация макроопищеских частиц угля в исследуемых торфяных олиготрофных почвах

На основании радиоуглеродного датирования установлено, что формирование болот началось в разные периоды голоцена и охватывало возраст от ~10260 калиброванных лет (кал. л.) (ТП–I, рис. 3) до ~6100 кал. л. (ТП–IV, V, рис. 3) и в более позднее время (ТП–II, рис. 3). Скорость торфонакопления была наиболее высокой в начальные стадии развития болот и в период термического оптимума, варьируя от 0,33 до 1,42 мм год⁻¹, тогда как в более поздние периоды голоцена снижалась и стабилизировалась.

Анализ макроскопических частиц угля выявил чёткую связь между климатическими изменениями и пожарной активностью. Максимальная частота и интенсивность пожаров зарегистрированы в период голоценового оптимума (в период около 9,0–4,5 тыс. кал. л. н.), когда температура на исследуемой территории была на 2–4 °C выше современной (Голубева, 2008, 2010).

На большинстве участков пиковое содержание углистых частиц (достигающих до 1931 шт см⁻³ в ТП–VII, рис. 3) и наибольшее количество идентифицированных локальных пожарных событий (до 12 на отдельных болотах) приходится на оптимум голоцена. Таким образом, в условиях более тёплого и влажного климата атлантического периода пирогенный фактор оказывал влияние на трансформацию экосистем. В последующие, более прохладные и сухие периоды (суббореальный, субатлантический) частота и интенсивность пожаров снижались. Вместе с тем выявлен рост пирогенной активности в направлении от крайнесеверной подзоны тайги к южной, что отражает прямую зависимость динамики пожаров от температурного режима, условий увлажнения, запасов и состава растительной биомассы. Пожарная динамика на участке ТП–III, расположенном близ археологического памятника «Шиховское» (Karmanov, Zaretskaya, 2021), заслуживает отдельного внимания. Для участка характерны нетипичные значения накопления макроскопических частиц угля, где пиковые значения (до 149 шт см⁻³) соответствуют холодному и сухому суббореальному периоду, что контрастирует с общей региональной тенденцией снижения пожаров в это время. Вероятно, причиной таких отклонений пожарного режима стало антропогенное воздействие.

Эволюция растительных сообществ, установленная по данным анализа ботанического состава, указывает на типичное для региона развитие. Эвтрофные травяные сообщества поэтапно перешли к олиготрофным сфагновым. Выявлена значимая положительная корреляция между степенью разложения торфа и содержанием макроскопических частиц угля ($r = 0,53$), что указывает на связь периодов сухости (и вероятной повышенной микробной активности) с пирогенной динамикой в истории развития болот. Согласно результатам непараметрического дисперсионного анализа (критерий Краскела–Уоллиса, тест Данна с поправкой Холма), выявлены статистически значимые различия в содержании некоторых групп растительных остатков в зависимости от концентрации макроскопических частиц угля. Рост доли содержания органических остатков по мере увеличения концентрации макроскопических частиц угля установлена для остатков хвойных ($H = 13,85$, $df = 2$, $p < 0,001$), осок ($H = 8,19$, $df = 2$, $p = 0,017$) и хвоща ($H = 17,93$, $df = 2$, $p < 0,001$). Для сфагновых мхов обнаружена отрицательная связь ($H = 20,66$, $df = 2$, $p < 0,001$), их содержание было максимальным при низкой концентрации макроскопических частиц угля и значительно снижалось в образцах с высокой концентрацией. Растительные остатки остальных групп (береза, вересковые, пушица) не показали значимой связи с концентрацией макроскопических частиц угля ($p > 0,05$) (рис. 4). В результате комплексного анализа физических и химических свойств почв торфяных залежей с целью изучения влияния пирогенного фактора на свойства ПОВ и углеродный баланс установлено, что пожары оказывают долгосрочное воздействие на состав и свойства почв. Последствия этого воздействия способны сохраняться на протяжении тысячелетий. Установлены статистически значимые положительные корреляции между содержанием макроскопических частиц угля и параметрами, характеризующими запасы углерода и азота. Связь концентрации макроскопических частиц и запасов общего углерода составила $r = 0,54$, тогда как запасов азота $r = 0,52$.

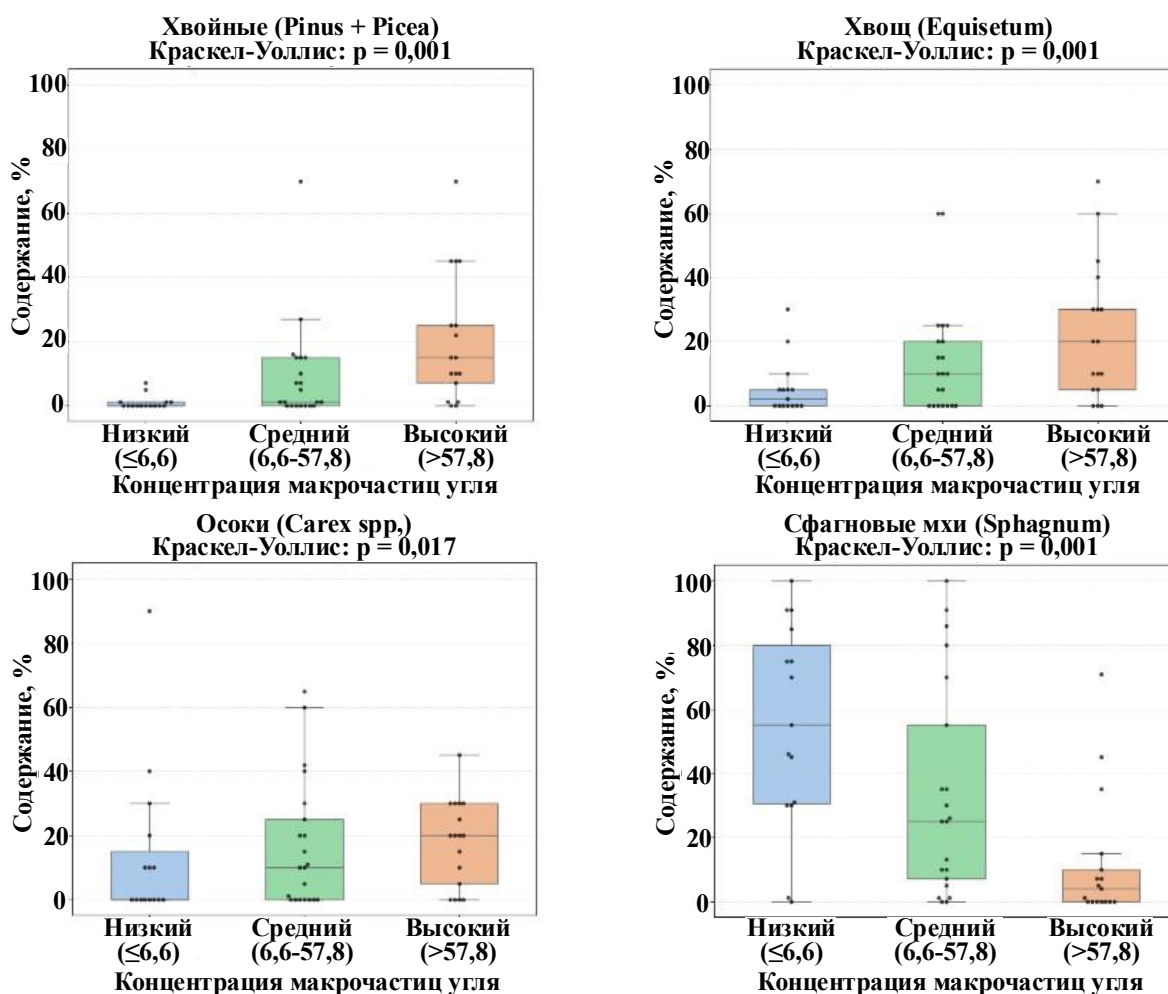


Рисунок 4. Содержание растительных остатков в группах с разной концентрацией макроскопических частиц угля

Методом ^{13}C -ЯМР спектроскопии определена доля ароматического углерода от общего содержания углерода (степень ароматичности, f_a) как суммарное содержание ароматических компонентов (CAr-H,C и CAr-O,N) (Федорова и др., 2003). Установлена значимая корреляция концентрации макроскопических частиц угля с долей углерода, сосредоточенного в ароматических структурах (f_a) ($r = 0,51$, $p < 0,05$, $n = 50$). Выявленные связи, вероятно, свидетельствуют о том, что соединения пирогенного углерода (PyC) не просто инертно сохраняются, а существенно меняют химический состав и стабильность окружающего органического вещества, способствуя долговременной аккумуляции углерода в почвах.

Данные, полученные в результате анализа содержания ПАУ, служат дополнительным доказательством аккумуляции PyC . В горизонтах,

обогащенных углем, зафиксированы максимальные концентрации ПАУ. Выявлены достоверные корреляции содержания макроскопических частиц угля с концентрациями нафталина ($r = 0,64$, $p < 0,05$, $n = 53$), бенз[*k*]флуорантена ($r = 0,44$, $p < 0,05$, $n = 53$) и дибенз[*a,h*]антрацена ($r = 0,43$, $p < 0,05$, $n = 53$), а также с общей суммой ПАУ ($r = 0,39$, $p < 0,05$, $n = 53$). Качественный состав ПАУ в этих горизонтах смещен в сторону высокомолекулярных 4–6-ядерных соединений, являющихся надежными маркерами пирогазения. Полученные данные свидетельствуют о пирогазном генезисе и формировании «устойчивого» пула углерода в изученных почвах. Однако долгосрочная, педогенная и микробиологическая трансформация почв усложняет и ограничивает интерпретацию диагностических соотношений ПАУ (Yunker et al., 2002; Габов и др., 2019; Сушкова и др., 2020).

Результаты по запасам общего углерода в исследованных почвах указывают на значимую роль пожаров в формировании долгосрочных пулов углерода. На участке ТП–IX (национальный парк «Койгородский»), где в относительно небольшой по мощности торфяной толще из-за высокой плотности сложения ($0,28 \text{ г см}^{-3}$) наблюдается обогащенность пирогазными остатками и большие запасы углерода, достигающие $112,8 \text{ кг м}^{-2}$ в верхних 100 см (табл. 2). В качестве сопоставления, на других исследованных участках ТП–VI и ТП–VIII запасы углерода составили 43,8 и $83,1 \text{ кг м}^{-2}$ в верхних 100 см, соответственно.

Результаты изучения показывают, что пирогазные события голоцена, с повышенной активностью в период климатического оптимума, не только сформировали историю пожаров за постледниковый период, но также существенно повлияли на ОВ торфяных залежей. Образовавшиеся пирогазные соединения углерода выступают важным параметром долгосрочной стабилизации углерода в почвах на протяжении тысячелетий. В условиях прогнозируемого увеличения частоты и интенсивности пожаров в бореальной зоне учет пирогазного углерода является важным для точной оценки роли торфяников в глобальном углеродном цикле и прогнозировании их реакции на современные климатические изменения.

Таблица 2. Запасы углерода и азота исследованных почв

Глубина	Мощность, см	Плотность, г см ⁻³	С, %	Н, %	Запасы С, кг м ⁻²	Запасы N, кг м ⁻²
ТП-VI (Печоро-Илычский заповедник)						
0–20	20	0,03±0,01	48,7±1,7	1,09±0,12	2,9	0,07
20–40	20	0,09±0,01	49,1±1,7	1,43±0,16	8,8	0,26
40–60	20	0,11±0,01	50,6±1,8	1,54±0,17	11,1	0,34
60–80	20	0,10±0,01	51,2±1,8	1,60±0,18	10,2	0,32
80–100	20	0,11±0,01	49,2±1,7	1,52±0,17	10,8	0,33
<i>Запас в верхних 100 см</i>					43,8	1,32
ТП-VIII (Максимовский стационар)						
0–10	10	0,05±0,01	44,0±1,5	0,95±0,10	2,2	0,05
10–20	10	0,05±0,01	43,3±1,5	1,22±0,13	2,2	0,06
20–30	10	0,11±0,03	45,8±1,6	1,52±0,17	5,0	0,17
30–40	10	0,11±0,03	55,2±1,9	1,20±0,13	6,1	0,13
40–50	10	0,11±0,03	51,8±1,8	1,50±0,16	5,7	0,17
50–60	10	0,28±0,02	53,3±1,9	1,50±0,16	14,9	0,42
60–70	10	0,28±0,02	51,6±1,8	1,58±0,17	14,4	0,44
70–80	10	0,28±0,01	50,0±1,8	1,42±0,16	14,0	0,40
80–90	10	0,33±0,02	51,1±1,8	1,23±0,14	16,9	0,41
90–100	10	1,71±0,03	0,99±0,2	0,05±0,01	1,7	0,09
<i>Запас в верхних 100 см</i>					83,1	2,34
ТП-IX (Койгородский национальный парк)						
0–10	10	0,08±0,03	48,5±1,7	1,39±0,15	3,9	0,11
10–15	5	0,19±0,02	56,8±2,0	0,95±0,10	5,4	0,09
15–30	15	0,19±0,02	54,1±1,9	1,50±0,16	15,4	0,43
30–50	20	0,21±0,01	49,1±1,7	1,13±0,12	20,6	0,47
50–70	20	0,23±0,01	54,1±1,9	1,41±0,16	24,9	0,65
70–90	20	0,26±0,01	55,5±1,9	1,30±0,14	28,9	0,68
90–100	10	0,26±0,01	52,9±1,9	1,20±0,13	13,8	0,31
<i>Запас в верхних 100 см</i>					112,8	2,74

В результате непараметрического дисперсионного анализа (критерий Краскела–Уоллиса с апостериорным попарным сравнением с применением теста Данна с поправкой Холма), установлено, что содержание макроскопических частиц угля имеет статистически значимую зависимость с суммарной концентрацией полициклических ароматических углеводородов ($H = 8,84$, $df = 2$, $p = 0,012$), со степенью ароматичности углерода ($H = 16,13$, $df = 2$, $p < 0,001$) и степенью разложения органического вещества ($H = 15,19$, $df = 2$, $p < 0,001$) (рис. 5).

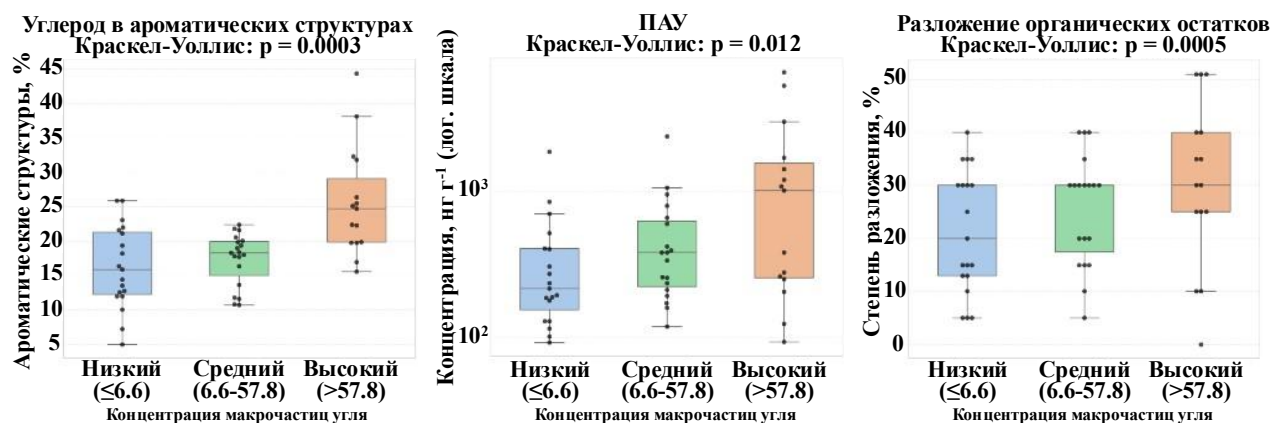


Рисунок 5. Содержание углерода в ароматических структурах, концентрация ПАУ и степень разложения органических остатков в группах с разной концентрацией макроскопических частиц угля

Глава 4. Трансформация органогенных горизонтов почв в результате воздействия пожаров (лабораторный эксперимент)

Для детального изучения трансформации ОВ под пирогенным воздействием был проведен лабораторный эксперимент, моделирующий условия низового пожара. Эксперимент выявил закономерную и значительную потерю массы образцов, напрямую зависящую от температуры и доступа кислорода. В условиях дефицита кислорода потери массы прогрессивно возрастали от 7,8–18,3% при 200 °С до 45,7–64,9% при 500 °С, при этом торф демонстрировал наибольшие потери. При доступе кислорода деструкция была интенсивнее, при 200 °С потери достигали 30,3–34,6% для лесных подстилок, а при 500 °С значения варьировали в пределах от 61,6 до 84,7%.

Ключевым изменением явилось резкое подщелачивание среды. В анаэробных условиях pH последовательно возрастал от исходных слабокислых значений (4,6–5,2) до нейтральных и слабощелочных (6,6–8,4) при 300 °С и сильнощелочных (7,4–10,0) при 500 °С. В присутствии кислорода подщелачивание было еще более выраженным, и достигало pH 10,2–10,9 при 500 °С, что, вероятно, связано с минерализацией органических кислот и накоплением зольных элементов. Параллельно наблюдалась сложная динамика удельной электропроводности (УЭП) с ростом на порядки при 500 °С (до 12 160 мкСм·см⁻¹

в торфе), что, вероятно, свидетельствовало о высвобождении растворимых солей.

Важным результатом стало увеличение удельной площади поверхности (УПП) обугленного материала, особенно в условиях дефицита кислорода. Наиболее существенный рост УПП зафиксирован для торфа с $0,75 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ в исходном состоянии до $171,6 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ при $500 \text{ }^\circ\text{C}$, что указывает на формирование высокопористой структуры соединений пирогенного углерода (PyC) с повышенной сорбционной способностью.

Термическое воздействие привело к глубокой перестройке молекулярной структуры органического вещества. Данные ^{13}C -ЯМР спектроскопии показали, что в среде с дефицитом кислорода происходит активная ароматизация ОВ: степень ароматичности (fa) возрастала с исходных 7,2–23,2% до 82,8–90,3% при $500 \text{ }^\circ\text{C}$. В условиях доступа кислорода максимальная ароматизация (fa=44–79%) наблюдалась уже при $300 \text{ }^\circ\text{C}$, с последующим почти полным разрушением ароматических структур при $500 \text{ }^\circ\text{C}$ из-за интенсивного окисления. Полученные данные подтверждают, что именно режим тления (дефицит O_2), характерный для горения органогенных горизонтов в природе, способствует образованию стабильных, конденсированных ароматических форм углерода, потенциально способных к долгосрочному накоплению в почвенной среде (Preston, Schmidt, 2006).

Анализ ПАУ выявил нелинейную динамику их накопления, также сильно зависящую от условий окисления. При дефиците кислорода для всех типов образцов был характерен выраженный пик концентраций ПАУ при $300 \text{ }^\circ\text{C}$ (до $2326 \text{ нг} \cdot \text{г}^{-1}$), с последующим снижением при $500 \text{ }^\circ\text{C}$. При свободном доступе кислорода пиковые концентрации были ниже и смещены к $200 \text{ }^\circ\text{C}$, а при $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ПАУ практически полностью разрушались. Полученные данные указывают на то, что условия тления не только способствуют сохранению PyC, но и приводят к синтезу большего количества стойких и часто токсичных более высокомолекулярных ПАУ. В результате анализа качественного состава ПАУ установлено преобладание легких фракций при низких температурах и

появление тяжелых при 300 °С, что подтверждает их пирогенное происхождение.

Изучение изотопного состава углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и азота ($\delta^{15}\text{N}$) выявило относительно слабое, но направленное изменение, в основном в сторону облегчения изотопного состава углерода на 0,4–0,8‰, что вероятнее всего связано с термической деградацией более тяжелых биополимеров.

Лабораторный эксперимент наглядно продемонстрировал, что пирогенное воздействие вызывает необратимые и разнонаправленные изменения свойств органогенных горизонтов почв. Основными факторами, определяющими динамику почвенного углерода, являются температура горения и доступ кислорода. Более интенсивное горение в условиях доступа кислорода приводит к активному улетучиванию, быстрой минерализации органики и образованию золы. В свою очередь, в условиях дефицита кислорода, что типично для горения влажных подстилок и торфа, способны синтезироваться устойчивые, конденсированные пирогенные соединения углерода, которые могут накапливаться и сохраняться в почвах тысячелетиями. Одновременно в этих же условиях синтезируются значительные количества ПАУ, что указывает на двойственную экологическую роль пожаров: они могут выступать как фактор долгосрочного депонирования углерода, так и быть источником химического загрязнения ПАУ. Полученные данные имеют фундаментальное значение для понимания и количественной оценки роли пирогенного фактора в углеродном цикле бореальных экосистем.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Функционирование бореальных лесоболотных экосистем во многом определяется пирогенным фактором. В работе проанализированы торфяные олиготрофные почвы девяти участков, охватывающих зональный ряд от крайнесеверной до южной подзон тайги. Данные, полученные в результате педоантракологического анализа, позволили установить периодизацию активности пожаров и выделить особенности, обусловленные антропогенным воздействием на ранних этапах заселения исследуемой территории. Установлено, что пирогенные

изменения органического вещества в торфяных олиготрофных почвах способны сохраняться на протяжении тысячелетий и влиять на состав и свойства почвенного органического вещества, включая степень разложения органических остатков и запасы углерода. Особенности воздействия высоких температур на органическое вещество органогенных горизонтов установлены в рамках лабораторного пирогенного эксперимента. Оценена зависимость изменения почвенного органического вещества от температуры и условий доступа кислорода для органогенных горизонтов трех наиболее распространенных типов почв бореальной зоны. Исследование показало, что пирогенез можно рассматривать как один из механизмов долговременной стабилизации соединений углерода в бореальных лесоболотных экосистемах.

ВЫВОДЫ

1. Высокие темпы накопления и концентрация макроскопических частиц угля характерны для интервала 9,0–4,5 тыс. кал. лет назад, совпадающие с климатическим оптимумом, тогда как минимальные показатели соответствуют суббореальному периоду 4,5–2,5 тыс. кал. л.н., что позволяет провести периодизацию динамики пожаров и соотнести периоды пирогенной активности с ключевыми климатическими этапами голоцена.

2. Выявлено, что частота пожаров возрастала от крайнесеверной к южной подзонам тайги. Концентрация макроскопических частиц угля в южной подзоне кратно выше, чем в крайнесеверной. На участке, приближенном к древней стоянке человека, зафиксировано повышенное содержание постпирогенных остатков, не характерное для других ландшафтов, что указывает на антропогенное влияние на ранних этапах заселения территории.

3. Установлено, что пирогенные изменения в торфяных олиготрофных почвах способны сохраняться на протяжении тысячелетий. Наиболее чутким показателем пирогенного воздействия является число углистых частиц. Выявлена статистически значимая связь между содержанием макроскопических частиц угля и степенью разложения торфа ($r = 0,53$, $p < 0,05$, $n = 77$), а также запасами общего углерода ($r = 0,54$, $p < 0,05$, $n = 22$) в отдельных горизонтах. Запасы углерода в метровой толще варьировали от 43,8 до 112,8 кг м⁻², достигая

максимума на участке с наиболее высокой концентрацией макроскопических частиц угля в подзоне южной тайги.

4. В горизонтах с высокими концентрациями макроскопических частиц угля зафиксированы максимальные концентрации ПАУ. Связь пирогенных остатков и индивидуальных полиаренов установлена для нафталина ($r = 0,64$), бенз[*k*]флуорантена ($r = 0,44$) и дибенз[*a,h*]антрацена ($r = 0,43$) при $p < 0,05$, $n = 53$. Выявлена положительная корреляция между содержанием макроскопических частиц угля и долей соединений углерода в ароматических структурах органического вещества ($r = 0,51$, $p < 0,05$). Согласно результатам непараметрического дисперсионного анализа (критерий Краскела–Уоллиса с применением теста Данна с поправкой Холма), значения концентрации ПАУ статистически значимо различались между группами с низким, средним и высоким содержанием макроскопических частиц угля ($H = 8,84$, $df = 2$, $p = 0,012$). Схожие различия выявлены для углерода в ароматических структурах ($H = 16,13$, $df = 2$, $p < 0,001$).

5. В условиях лабораторного эксперимента при нагреве органогенных горизонтов почв до 200, 300 и 500 °С установлено повышение значений реакции среды от 4,6–5,2 в исходных образцах до 8,7–10,0 ед. рН при 500 °С, а также кратное увеличение удельной электропроводности (до 12160 мкСм·см⁻¹) и удельной площади поверхности (до 171,6 м²·г⁻¹). В условиях дефицита кислорода степень ароматичности (f_a) органического вещества возрастала с 7,2–23,2 % до 82,8–90,3 % при 500 °С. При доступе кислорода максимум f_a (44–79 %) зафиксирован при 300 °С с последующим снижением до 1,8–5 % при 500 °С.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

1. Горбач Н.М., Кутявин И.Н., Старцев В.В., Дымов А.А. Динамика пожаров на Северо-Востоке европейской части России в голоцене // Теоретическая и прикладная экология. – 2021. – № 3. – С. 104–110. EDN: WRKDW. Импакт фактор 0,714 (РИНЦ). 0,88 п.л. / 0,45 п.л.

2. Дымов А.А., Старцев В.В., **Горбач Н.М.**, Паюсова И.В., Габов Д.Н., Доннерхак О. Сравнение методов определения соединений углерода пирогенно измененных органических соединений // Почвоведение. – 2021. – № 11. – С. 1332–1345. EDN: OZHLTJ. Импакт фактор 1,319 (РИНЦ). 1,75 п.л. / 0,5 п.л.

[Dymov A.A., Startsev V.V., **Gorbach N.M.**, Pausova I.N., Gabov D.N., Donnerhack O. Comparison of the methods for determining pyrogenically modified carbon compounds // Eurasian Soil Science. – 2021. – vol. 54. – № 11. – P. 1668-1680. EDN: TEFNYL. Импакт фактор 0,496 (SJР). 1,63 п.л. / 0,46 п.л.]

3. **Горбач Н.М.**, Яковлева Е.В., Дымов А.А. Влияние температуры горения и состава органогенных горизонтов почв на содержание ПАУ (результаты лабораторного эксперимента) // Почвоведение. – 2024. – № 5. – С. 756–769. EDN: YLDEXC. Импакт фактор 1,319 (РИНЦ). 1,75 п.л. / 0,88 п.л.

[**Gorbach N.M.**, Yakovleva E.V., Dymov A.A. Influence of combustion temperature and composition of organic soil horizons on the PAH content (laboratory experiment) // Eurasian Soil Science. – 2024. – vol. 57. – № 5. – P. 853-864. EDN: DEBJQZ. Импакт фактор 0,496 (SJР). 1,5 п.л. / 0,75 п.л.]

4. **Gorbach N.**, Startsev V., Mazur A., Milanovskiy E., Prokushkin A., Dymov A. Simulation of smoldering combustion of organic horizons at pine and spruce boreal forests with lab-heating experiments // Sustainability. – 2022. – vol. 14. – № 24. – P. 16772. EDN: HXZEWC. Импакт фактор 0,750 (SJР). 2,0 п.л. / 1,0 п.л.

5. Dymov A.A., **Gorbach N.M.**, Goncharova N.N., Karpenko L.V., Gabov D.N., Kutuyavin I.N., Grodnitskaya I.D. Holocene and recent fires influence on soil organic matter, microbiological and physico-chemical properties of peats in the European North-East of Russia // Catena. – 2022. – vol. 217. – P. 106449. EDN: XEXNCG. Импакт фактор 1,759 (SJР). 1,4 п.л. / 0,5 п.л.

6. **Gorbach N.M.**, Startsev V.V., Yakovleva E.V., Mazur A.S., Dymov A.A. Paleoenvironmental analysis of three bogs in Northeastern European Russia: Peatland development and fire influence // Catena. – 2025. – vol. 249. – P. 108607. EDN: AQDTSM. Импакт фактор 1,759 (SJР). 1,4 п.л. / 0,7 п.л.

7. **Gorbach N.M.**, Startsev V.V., Yakovleva E.V., Mazur A.S., Dymov A.A. Pyrogenic Transformation and Carbon Sequestration in Forested Bog Soils of the Middle Taiga in Northeastern European Russia // Soil Systems. – 2025. – vol. 9. – № 3. – P. 74. EDN: WWSVDA. Импакт фактор 0,954 (SJР). 1,36 п.л. / 0,68 п.л.