

*На правах рукописи*

**Петров Дмитрий Григорьевич**

**ПИРОГЕННЫЕ ПОЧВЫ БОРЕАЛЬНЫХ И СУБАРКТИЧЕСКИХ  
ОБЛАСТЕЙ РОССИИ: ДИНАМИКА СВОЙСТВ И  
ИНФОРМАЦИОННАЯ РОЛЬ**

Специальность: 1.6.12 – Физическая география и биогеография,  
география почв и геохимия ландшафтов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в отделе географии и эволюции почв Института географии Российской академии наук.

**Научный руководитель:** **Мергелов Никита Сергеевич**  
кандидат географических наук, ведущий  
научный сотрудник отдела географии и  
эволюции почв Института географии РАН

**Официальные оппоненты:** **Бадмаев Нимажап Баяржапович**  
доктор биологических наук, заведующий  
лабораторией географии и экологии почв,  
заместитель директора Института общей  
и экспериментальной биологии СО РАН,  
г. Улан-Удэ

**Смирнова Мария Андреевна**  
кандидат географических наук, доцент  
кафедры геохимии ландшафтов и  
географии почв географического  
факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,  
г. Москва

**Ведущая организация:** Институт биологии Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук, г. Сыктывкар

Защита состоится «17» ноября 2023 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании  
диссертационного совета 24.1.049.02, в Институте географии РАН по адресу:  
119017, Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке  
Института и на сайте Института географии РАН: <http://www.igras.ru/defences>.

Автореферат разослан «    » октября 2023 г.

Отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения по месту  
работы, просим направлять по указанному адресу Ученому секретарю  
Диссертационного совета и по электронной почте [d00204603@igras.ru](mailto:d00204603@igras.ru)

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат географических наук



Е.А. Белоновская

**Актуальность темы исследования.** На протяжении миллионов лет пожары участвовали в изменениях экосистем планеты. История пожаров началась около 420 млн. л. н., с появлением и развитием сосудистых растений на суше – основных поставщиков топлива для горения. Первые пожары не касались лесных экосистем, только после появления лесной растительности на рубеже девона и карбона (360-350 млн. л. н.) количество лесного горючего материала (далее ЛГМ) и концентрация кислорода воздуха на Земле повысились настолько, что это сделало возможным распространение лесных пожаров [Scott, 2009; Ходаков, Жарикова, 2011; Doerr, Santin, 2016].

Частота пожаров контролируется изменениями климата, однако в разных локальных условиях одни и те же климатические параметры как увеличивают, так и снижают вероятность возникновения пожаров. Таким образом, межпожарный интервал одного региона может демонстрировать изоморфизм и буферный эффект по отношению к изменениям климата и погоды. Исследование почвенных пирогенных палеоархивов, позволяет выявлять не только региональные, но и локальные изменения в периодах пирогенной активности, и, таким образом, оценивать вклад региональных и локальных факторов в их наступление [Бобровский, 2010; Дымов и др., 2014; Bobrovsky et al., 2019; Куприянов и др., 2020; Дымов, 2020; Лойко и др., 2022].

Природный пожар, как явление, сопровождается: (1) генерацией продуктов горения, которые взаимодействуют с почвенным профилем не только косвенно, через физико-химические процессы, но и на прямую, мигрируя в горизонты почв, и (2) постпирогенной эрозией, скорость и масштабы которой связаны с параметрами пожара. Продукты пожара сохраняются в почвах в зависимости от условий погребения, типа ЛГМ, температуры пиролиза и свойств почвенных горизонтов на временных отрезках от десятков лет до тысячелетий и более [Wildland Fire..., 2005; Fire Effects..., 2009; Bird et al., 2015]. Интенсивная постпирогенная эрозия создает для почв особые по своей суровости условия среды [Fire Effects..., 2009], что может необратимо менять направление почвообразования.

Современные почвы Европейской территории России (далее ЕТР) и севера Западной Сибири (далее СЗС), испытавшие пирогенное воздействие, могут быть по-разному отражены в классификации. Постпирогенные изменения охватывают как морфологию почвенного профиля, так и его физико-химические свойства, что обуславливает их выделение в новой редакции КиДПР [Чевычелов 1997, 1998; Краснощеков, 2011, 2012; Дымов, 2020].

В настоящий момент, в условиях общей нестабильности климата, обусловленной, среди прочего, антропогенным фактором, необходимо уметь прогнозировать частоту и силу пожаров – трансформацию свойств почв и изменения растительности после пирогенных событий разного характера. Прогноз должен отвечать на фундаментальные и практические вопросы: когда экосистема приблизится к допожарным показателям по физико-химическим и биологическим свойствам; какое количество элементов питания растений будет выведено за пределы экосистемы; как изменится межпожарный интервал в будущем; есть ли риски человеческим жизням и имуществу, и какие затраты понадобятся для восстановления территории. Для каждого отдельного случая пожаров разной интенсивности и силы в разных типах экосистем, нужно понимать, по какому сценарию пойдет послепожарное восстановление – требуется ли вмешательство человека для его ускорения или оно нецелесообразно [Rothermel, 1991; Simard, 1991; Бобровский, 2010; Doerr, Santin, 2016; Гераськина и др., 2021; Gaboriau et al., 2022].

**Цель работы:** рассмотреть почвенную запись пирогенных событий голоцена в ледниково-карстовых ландшафтах северной тайги ЕТР; сравнить свойства и особенности миграции пирогенных продуктов по профилю современных почв средней и северной тайги, а также кустарниковой тундры.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Изучить голоценовые серии пирогенных почв северной тайги ЕТР, погребенные вследствие послепожарной эрозии (глава 4);
2. Выявить периоды повышенной пирогенной активности на основе определения радиоуглеродного возраста погребенных углистых частиц (глава 4);
3. Определить направления почвообразования в межпирогенные фазы в ледниково-карстовых ландшафтах бассейна Кулоя (глава 4);
4. Исследовать хроноряды постпирогенных почв (до 300 лет) в средней и северной тайге; определить послепожарные изменения, а также скорость и степень восстановления почвенных свойств и растительности на основе собственного материала и литературных источников (главы 5-6, а также 8);
5. Провести оценку вертикальной миграции углистых частиц ( $\geq 0,5$  мм) в почвах северной и средней тайги ЕТР, а также кустарниковой тундры СЗС (глава 7).

Работу можно условно разделить на два блока исследований: (1) *информационной роли* почв голоценового возраста и (2) *динамики свойств* современных постпирогенных почв (возрастом до 300 лет, непогребенных).

**Объекты и методы исследования.** Информационная роль пирогенных почв изучалась в подзоне северной тайги на севере Архангельской области в бассейне Кулоя на территории Пинежского лесничества и на севере Пинежского заповедника. Было заложено 8 разрезов – 5 в карстовых воронках; 1 – в воронке ледникового происхождения; 2 – на повышениях между воронками. Почвы были представлены подбурами, подзолами и псаммоземами актуальными и погребенными. **Предмет исследования** – запись пожаров в почвенных палеоархивах.

Для определения *динамики свойств* пирогенных почв было проанализировано 43 почвенных разреза: 20 разрезов на территории Пинежского заповедника и его окрестностей и 11 разрезов на территории Печоро-Илычского заповедника (респ. Коми) в подзоне средней тайги (с влиянием предгорий Урала). Для изучения миграции продуктов пожара в почвах и условий пирогенной экстремальности было описано 12 разрезов на СЗС. Объектами исследований на севере Архангельской области на территории Пинежского заповедника стали подзолы и подбуры иллювиально-железистые и подзолистые почвы с микропрофилем подзола на моренных отложениях и гипсопетроземы на выходах плотных пород, а также подзолы иллювиально-железистые на территориях лесничеств Пинежского и Кулойского на моренных и аллювиальных отложениях [Горячкин, 2010]. В респ. Коми изучались почвы подзолистого и подзолисто-глеевого ряда на кристаллических сланцах и морене, а также буроземы грубогумусовые под темнохвойной тайгой кордонов Строганая доска, Елма и Шежим [Почвы и почвенный покров..., 2013]. Около пос. Якша изучались подзолы иллювиально-железистые и иллювиально-гумусовые на аллювиальных песках [Почвы и почвенный покров..., 2013]. На территории СЗС – криоземы потечно-гумусовые в зоне кустарниковой тундры; подзолы иллювиально-железистые и псаммоземы в подзоне северной тайги. **Предмет исследования** – постпирогенные трансформации морфологических и физико-

химических свойств почв и пути миграции продуктов пожара в почвенном профиле, а также необратимые воздействия пожаров на экосистемы, создающие экстремальные условия для почвообразования.

В работе использовался комплекс полевых и лабораторных методов. В основу положены сравнительно-географический и морфологический методы; они совмещены с группой методов радиоуглеродного датирования, химико-аналитическими методами, моделированием и статистической обработкой данных. Эффективность комплекса этих методов показана в работах отечественных и зарубежных исследователей пожаров [Чевычелов, 1997, 1998; Wildland Fire..., 2005; Fire Effects..., 2009; Бобровский, 2010; Ходаков, Жарикова, 2011; Bird et al., 2015; Куприянов, Новенко, 2019; Дымов, 2020; Лойко и др., 2022 и др.].

**Новизна работы.** Впервые для ледниково-карстовых ландшафтов севера Архангельской области проведена реконструкция хронологии палеопожаров по почвенной записи и выявлены периоды повышенной пирогенной активности. Установлены основные закономерности и характерные времена вертикальной миграции углистых частиц и изменения их формы и размера в зависимости от времени и условий залегания в профиле почв подзон северной и средней тайги, а также кустарниковой тундры. Определены особенности изменения концентрации антракомассы в пирогенных горизонтах с глубиной для актуальных почв и древних почв геоморфологических ловушек (карстовых воронок). Неоднородность пожара по силе, интенсивности и устойчивости изучена как его существенное свойство, определяющее трансформацию почв, растительности и температуры горения ЛГМ. Впервые для лесных пожаров по данным рамановской спектроскопии реконструированы максимальные температуры карбонизации углистых частиц, которые коррелировали с неоднородностью параметров пирогенеза как в пределах гари, вызванной одним пожаром, так и между гарями, вызванными пожарами разной силы. Предложено выделять слабо-, средне- и сильнотрансформированные почвы в зависимости от степени пирогенных изменений их морфологических и физико-химических свойств.

**Теоретическая и практическая значимость.** Полученные в работе теоретические и практические результаты позволяют:

- дополнять палеореконструкции климатических параметров на качественном уровне, а также реконструкции растительности и пирогенной активности (частоты пожаров) в течение голоцена;
- прогнозировать изменения свойств почв после пожаров, а также скорости восстановления растительных сукцессий;
- оценивать продолжительность естественного интервала между пожарами;
- оценивать интенсивность и дальность миграции углистых частиц, элементов питания растений и минеральных компонентов почвы в зависимости от параметров пожара.

В работе предложена концепция пирогенной экстремальности, в рамках которой в северной и средней тайге выделены уязвимые и устойчивые к пожарам экосистемы и их почвенные компоненты.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на заседаниях Отдела географии и эволюции почв и на Ученом совете ИГ РАН. Результаты исследований были представлены в докладах и тезисах на следующих конференциях:

1. V Всероссийская научная конференция с международным участием «Динамика экосистем в голоцене» (к 100-летию Л.Г. Динесмана), М., 11-15 ноября 2019 г.;

2. VIII Всероссийская научная конференция с международным участием «Лесные почвы и функционирование лесных экосистем», ЦЭПЛ РАН, М., 24-27 сентября 2019 г.;

3. III и IV Молодежная конференция «Почвоведение: Горизонты будущего», Москва, 13-15 февраля 2019 и 11-14 февраля 2020 гг.;

4. XXIII Докучаевские молодежные чтения, СПб., 2-4 марта 2020г.;

5. XII международная молодежная школа-конференция «Меридиан. Глобальные процессы и их региональные аспекты», КБС ИГ РАН, 30 мая-2 июня 2019 г.;

6. 5-я и 6-я научная школа-семинар "Криогенные процессы и свойства почв», М., 13-16 марта 2020 и 27 марта-2 апреля 2021 гг.;

**Публикации.** Материалы исследований изложены в девяти печатных работах, из них 3 включены в список рекомендованных ВАК РФ, входят в базы Web of Science, Scopus, а также перечень журналов RSCI и входят или приравниваются к изданиям категории K1 по коэффициенту научной значимости.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 9 глав, выводов, заключения, списка литературы, включающего 293 источника, из них 155 на иностранном языке, 7 интернет источников и 4-х приложений. Содержательная часть диссертации изложена на 202 страницах, иллюстрирована 17 таблицами, 88 рисунками, общий объем диссертации с приложениями 284 страницы.

#### **Защищаемые положения:**

1. Карстовые формы являются источником информации о пирогенных событиях прошлого. Объем этой информации зависит от концентрации антракомассы, которая резко увеличивается от элювиальных позиций ( $2600 \pm 140$  ppm) к центру карстовых форм ( $110000 \pm 33670$  ppm). С раннего голоцена (10200 кал. л. н. – по настоящее время) в ледниково-карстовых ландшафтах бассейна Кулоя регулярно происходили лесные пожары, которые не приводили к смене направления почвообразования: альфегумусовые почвы регулярно воспроизводились. Длительность межпирогенных интервалов менялась незначительно на протяжении голоцена; исключением является последнее тысячелетие, уменьшение интервалов для которого связано с началом антропогенного освоения региона.

2. Характер повреждений подстилки и растительности после прохождения пожара неоднороден и коррелирует с температурой образования углистых частиц, установленной по данным рамановской спектроскопии. Наибольшей вариабельностью температур карбонизации обладают угли, образовавшиеся после прохождения пожара средней интенсивности, что связано с мозаичным характером повреждений. Сильные пожары могут приводить к устойчивой неоднородности почвенных свойств в пределах одного участка прохождения пожара. Такая неоднородность соразмерна изменениям почвенных свойств, фиксируемым на гаях и в горельниках разного возраста.

3. Пожары, которые не экспонируют верхние минеральные горизонты, меняют почвенные физико-химические свойства обратимо и на непродолжительное время. Пожары, которые воздействуют непосредственно на минеральную часть профиля и сопровождаются эрозией, меняют почвенные свойства на продолжительный период, а в случае близкого залегания плотных пород – необратимо.

4. Глубина вертикальной миграции макроскопических углистых частиц ( $\geq 0,5$  мм), зависит от гранулометрического состава почвы, влажности ее верхней минеральной части (ВМЧ), наличия многолетнемерзлых пород, а также времени, прошедшего с момента пожара. В зависимости от соотношения постоянных и временных барьеров распределение углистых частиц по профилю описывается четырьмя моделями: (1) барьерной для почв с тяжелой и/или влажной ВМЧ, (2) равномерно-диффузной для почв с легкой и сухой ВМЧ, (3) неравномерно-диффузной для почв с утяжелением гранулометрического состава с глубиной и (4) турбационной для мерзлотных почв.

**Личный вклад автора.** Автор принимал участие в постановке целей и задач исследования, в полевых и лабораторных работах. Провел обзор отечественных и зарубежных литературных источников. Подготовил текст диссертации. Выполнил большую часть химических анализов. Осуществил статистическую обработку данных и моделирование процессов миграции антракомассы.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность А. А. Семиколенных, А. А. Алейникову, Л. В. Пучниной, администрациям Печоро-Илычского и Пинежского заповедников, лесничествам Пинежского лесхоза. Г. В. Матышаку, О. Ю. Гончаровой и всей научной группе SoilArt, НП «Российский Центр Освоения Арктики» благодарен за возможность участия в экспедиции и предоставленные данные из ИКЗ СО РАН. Особая благодарность выражается С. В. Горячкину, Н. С. Мергелову, Э. П. Зазовской и А. В. Долгих за научное руководство и консультации. Выражаю благодарность А. А. Гольевой за антракологический анализ и научную консультацию; А. М. Чугуновой, Е. Е. Куликовой и Е. А. Агафоновой за организацию и помощь в лабораторной работе; Н. М. Фазульдиновой за помощь в обработке образцов, А. Г. Шматовой за помощь в работе с картами.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 19-29-05238 “мк” и 18-05-60279 “Арктика”, а также государственного задания ИГ РАН № 0148-2019-0006 и мегагранта (соглашение № 075-15-2021-599 от 08.06.2021).

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. Пожары и постпирогенная эрозия: понятия, параметры, воздействие на окружающую среду, природные и антропогенные факторы их возникновения и распространения**

В главе рассматриваются основные функции, описывающие поведение пожара, а также основные изменения, которые он вызывает после своего прохождения. Основные взаимосвязи драйверов пожара, объектов воздействия пирогенной активности и постпирогенных изменений почв обобщены на рисунке 1 [Certini, 2005; Wildland Fire..., 2005; Andrew, 2009; Moody, Martin, 2009; Cedra, Robichaud, 2009; Ubeda, Outeiro, 2009; Mataix-Solera et al., 2009; Scott et al., 2009; Бобровский, 2010; Ходаков, Жарикова, 2011; Bird et al., 2015; Дымов, 2018, 2020; Maezumi et al., 2021]. Сила, интенсивность и устойчивость пожара, образующие т. н. «треугольник» его основных параметров, занимают место между драйверами пожара и объектами пирогенной активности, определяя постпирогенные изменения почв.



Рисунок 1. Схема воздействия пожара на свойства почв; основные направления исследований.

С точки зрения воздействия на почвы большинство процессов, вызываемых пожаром, носят двойственную физико-химическую природу, однако можно выделить преимущественно физические и химические изменения свойств почв.

Изменения **физических свойств почв** обусловлены прямым и косвенным влиянием пожара.

Прямые воздействия пожара включают:

- температурное воздействие на биомассу в ходе горения, тления или нагрева ЛГМ [Бобровский, 2010; Fire Effects..., 2009];
- разрушение и/или спекание почвенных агрегатов в зависимости от их минералогического состава и прочности при воздействии высоких температур, что ведет к изменению агрегатного и минерального состава почв [Doerr et al, 2009; Зайдельман, 2011; Maezumi et al., 2021];
- испарение, перенос с огненным штормом, перемещение в ходе размывов и раздувов во время пожара или сразу после него биогенных элементов С, N, P, S и др. [Certini..., 2005; Ubeda, Outeiro, 2009].

Косвенные воздействия пожара включают:

- долговременное потепление верхнего слоя почвы после изменения альбедо поверхности [Wildland Fire..., 2005; Certini, 2005; Ubeda, Outeira, 2009; Li et al., 2022];
- влияние продуктов пожара на водный режим почв, например, закупорка пор почвы гидрофобными продуктами пожара [Fire Effects..., 2009].

**Химические свойства** постпирогенных почв меняются в связи с прямым выводом некоторых элементов и веществ из биологического круговорота (С, N, P и др.) с одновременным поступлением зольных элементов (Ca, K, Mg и др.) и продуктов неполного пиролиза [Certini, 2005; Глазовская, 2007; Fire Effects..., 2009; Дымов, 2020], включая углистые частицы с разной температурой карбонизации, полициклические ароматические углеводороды (далее ПАУ) и другие компоненты, которые различаются по лабильности и



способности к длительному сохранению в почвах [Wildland Fires..., 2005; Максимова и др., 2014; Низовцев, Дымов, 2015; Цибарт и др., 2016; Язрикова, Кошовский, 2017].

Изменение в составе химических веществ находит наибольшее отражение в таких показателях как pH, количество несиликатного, «аморфного» и слабо окристаллизованного железа, насыщенности основаниями, содержании и составе ПАУ, содержании органического углерода и общего азота. В свою очередь, изменение этих показателей определяет среду протекания физико-химических реакций, определяя косвенное воздействие пожара. Следовательно, пожар изменяет среду протекания реакций в почве, что сказывается на процессах почвообразования – их направлении и интенсивности.

Миграция **живого вещества** может быть направлена вглубь подстилки или почвы (почвенная мезофауна) или за территорию распространения пожара латерально (почвенная макрофауна). При сильных пожарах пищевые цепочки мезофауны нарушаются; их восстановление качественно – по количеству звеньев – завершается на 5-6 год в условиях средней и северной тайги [Горбунова, 2022].

В зависимости от типа пожара повреждаются разные ярусы растительности [Мелехов, 1947]:

- низовой пожар делится на подстильно-гумусовый, напочвенный и подлесно-кустарниковый. Первые два повреждают подстилку, что приводит к негативным последствиям для растительности с поверхностной корневой системой и микоризных грибов. Растения-пирофиты начинают развитие либо получая температурные сигналы после прохождения пожара, либо после уничтожения видов конкурентов, захватывая территорию гари. Многие виды-пирофиты тяготеют к развитию в отсутствии конкурентов, а не к пожарам как таковым (например, иван-чай). Повреждение кустарничкового и кустарникового яруса может привести к его быстрому вегетативному размножению. В зависимости от силы пожара в его воздействии преобладает либо деструктивный, либо стимулирующий элемент. Низовые пожары составляют 95-97% от всех пожаров;

- верховые пожары приводят к угнетению или уничтожению не только напочвенного покрова, но и древесной растительности. Большинство деревьев умирает при повреждении 30% кроны (сразу после пожара или на следующий год), однако отдельные хвойные породы деревьев бореальных областей, например отдельные породы сосны, устойчивы к ее повреждению (способны выжить при повреждении 50-70% кроны). Большое значение на пожароустойчивость дерева оказывает возраст, фенотип и условия произрастания породы. Беглые верховые пожары не всегда сопровождаются сменной древесной растительности и могут не поддерживаться низовым пожаром. Верховые пожары составляют 1-5% от всех пожаров;

- Подземные пожары распространяются медленно, с преобладанием тления и составляют около 1% от всех остальных типов пожаров. В экосистемах тундры могут охватывать большие территории и определяются как наиболее опасные типы пожаров.

Устойчивый верховой пожар ведет к повреждению всех ярусов растительности на территории гари, т. к. горение каждого следующего яруса (подстилка-кустарнички-кустарники-деревья) поддерживается температурой от горения предыдущего, т. е. ключевым фактором устойчивого пожара является горение напочвенного покрова, как основного поставщика энергии [Lloret, Zedler, 2009; Ferreira et al., 2009].

## Глава 2. Современные представления об информационной роли постпирогенных почв

В данной главе рассмотрены морфологические трансформации постпирогенных почв и основные продукты пожара с точки зрения их информационной ценности. Основные источники информации в почвенных пирогенных палеоархивах представлены на рисунке 2 [Сычева, 2008; Бобровский, 2010; Bird, 2015; Чевычелов, Шахматова, 2018].

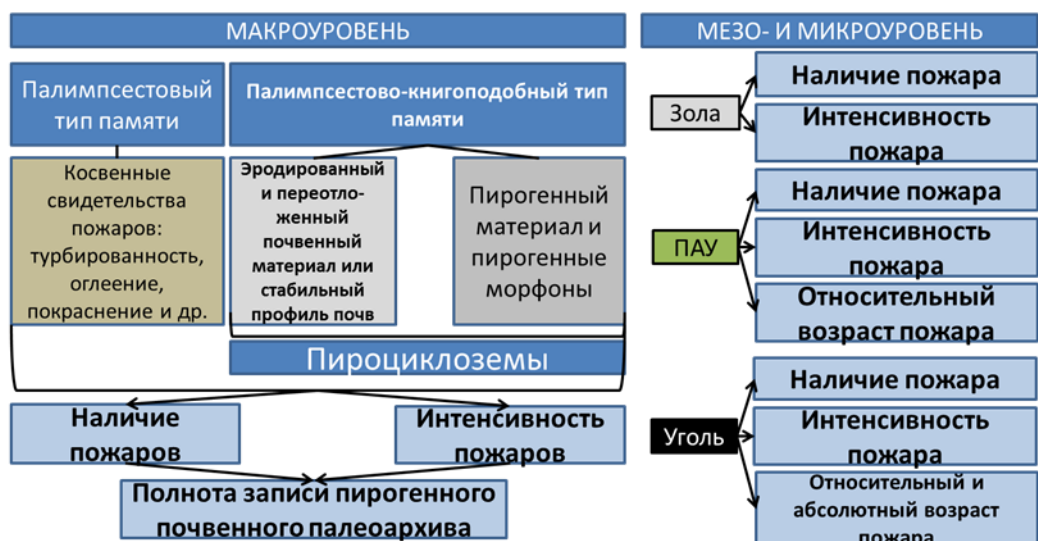


Рисунок 2. Основные источники информации пирогенного почвенного палеоархива: морфология почвенного профиля (слева) и продукты пожара (справа) [Память почв..., 2008; Scott, 2009; Таргульян, 2019].

Глава основана на представлении почвы как **памяти природной среды** по В. О. Таргульяну и И. А. Соколову [Таргульян, Соколов, 1978; Васенев, Таргульян, 1995; Таргульян, 2008; Таргульян, 2019]. Раскрыта специфика почвенной памяти постпирогенных почв – особенности палимпсестового типа памяти как регулярно стирающейся и наслаивающейся, и книгоподобного типа памяти как четко указывающего на время образования морфонов. Эти типы памяти могут действовать вместе там, где стабильное развитие почвы прерывается периодическим накоплением материала [Таргульян, Александровский, 1976; Богатырев и др., 2004; Александровский, 2008; Bobrovsky et al., 2019; Лойко и др., 2020], например, в некоторых пирогенных почвенных палеоархивах (пироциклоземах по А. П. Чевычелову (1997)). Палимпсестовый тип памяти отражает локальные процессы, специфичные для данной территории в период развития почвы у дневной поверхности; книгоподобный тип памяти – следствие быстрого погребения дневной почвы после постпирогенной эрозии. Таким образом, почвенная память пирогенных почвенных палеоархивов по генезису является палимпсестово-книгоподобной или книгоподобно-палимпсестовой в зависимости от соотношения циклов пожара-эрозии-стабилизации почв.

Пироциклоземы [Чевычелов, 1997] – почвенные серии, в которых записаны этапы пирогенной активности, чередующиеся с этапами стабильного развития почв. Пироциклоземы диагностируются в профиле по серии погребенных почв, которые разделены выраженными пирогенными горизонтами, часто с высоким содержанием углистых частиц и золы. Понятие «пироциклозем» описывает структуру макроуровня пирогенного почвенного палеоархива. В главе представлено краткое описание климата и растительности этапов голоцена на

территории ЕТР, с отсылкой к вероятным периодам пирогенной активности в региональном масштабе.

**Продукты пожара** отличаются между собой количеством и объемом сохраняемой информации. Высокой разрешающей способностью записи и широким набором дополнительных сведений обладает уголь – продукт неполного пиролиза. Рассматривается информационная емкость продуктов пожара в палеоархиве: золы, ПАУ и углей, образованных при разной температуре [Scott, Jones, 1991; Lupia, 1995; Sediment Records of..., 1997; Lertzman et al., 2002; Каздым и др., 2003; Canti, 2003; Александровский, 2007; Scott, 2009; Killips, Massoud, 2009; Цибарт, Геннадиев, 2012; Bird et al., 2015; Геннадиев и др., 2015; Magne et al., 2019; Дымов, 2020].

Угли представляются наиболее перспективным объектом абсолютного и относительного датирования в почвенных пирогенных палеоархивах.

### Глава 3. Материалы и методы исследования

Исследования проводились в районах и на участках, указанных на рисунке 3. Все участки исследования отмечены на карте почвенно-экологического районирования (2019); участки на ЕТР также отображены на физической карте (врезка) с границами заповедников; участки исследований на СЗС показаны на спутниковых снимках, чтобы подчеркнуть неоднородность рельефа.

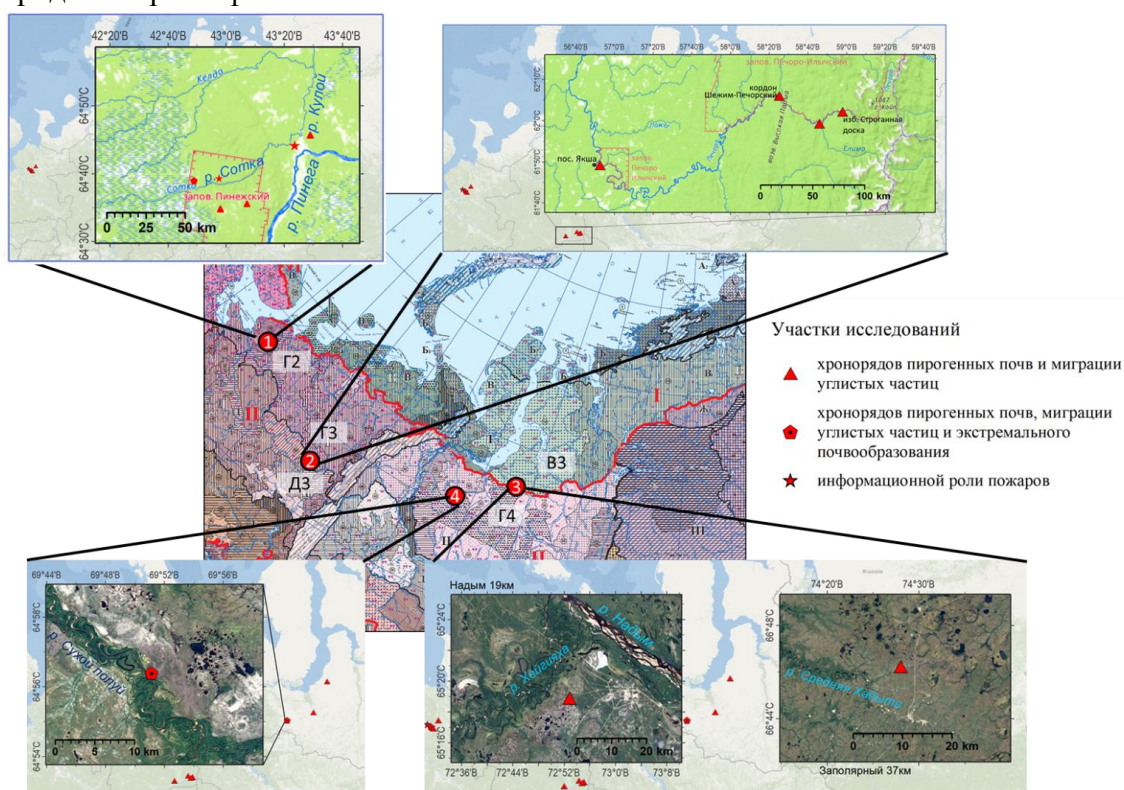


Рисунок 3. Районы и участки исследований. Районы исследования на карте почвенно-экологического районирования 1:8 млн. [Карта почвенно-экологического..., 2019]. 1 – подзона глееподзолистых почв, глееземов и подзолов северной тайги ЕТР; 2 – граница подзон глееподзолистых почв глееземов и подзолов северной тайги ЕТР и подзолистых почв средней тайги ЕТР; 3 – граница подзон тундровых глеевых почв и подбуров субарктической тундры и глееподзолистых почв глееземов и подзолов северной тайги СЗС; 4 - подзона глееподзолистых почв, глееземов и подзолов северной тайги СЗС.

#### Участки исследований и направления работ, проводимых на них:

##### Зона севера ЕТР:

1. Северная тайга. Исследование информационной роли пирогенных почв, почвенного покрова современных хронорядов пожаров, послепожарных растительных сообществ, разработка типизации миграции углей в профиле почв и классификация условий пирогенной экстремальности для почв;

2. Средняя тайга и районы предгорий Урала. Исследование почвенного покрова современных хронорядов пожаров, послепожарных растительных сообществ, а также разработка типизации миграции углей в профиле почв (влияние микро- и макрофауны на разложение углистых частиц не рассматривалось);

#### **Зона севера СЗС:**

3. Кустарниковая тундра и северная тайга. Исследование послепожарных растительных сообществ, разработка типизации миграции углей в профиле почв и классификация условий пирогенной экстремальности для почв;

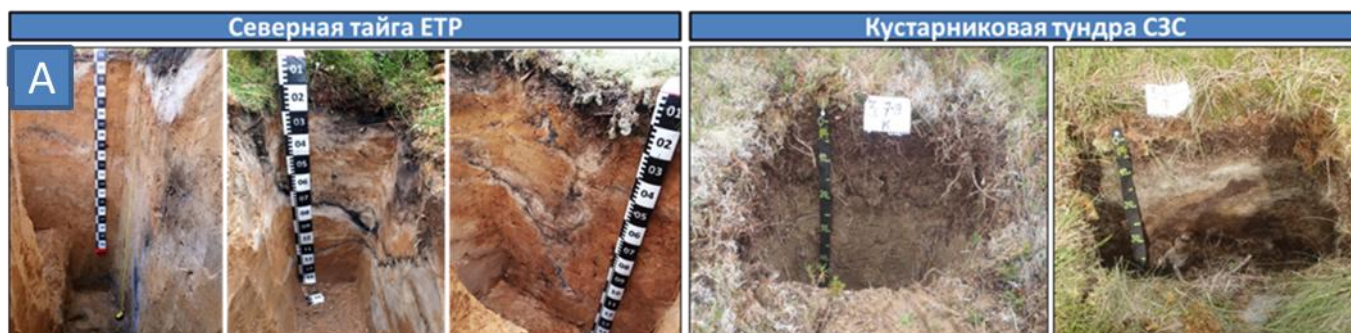
4. Северная тайга в бассейне р. Сухого Полуя. Классификация условий пирогенной экстремальности для почв.

Основные параметры, а также почвы и растительный покров районов исследований обобщены в таблице 1 [Горячкин, Шаврина, 1997; Москаленко, 1999; Структура и динамика..., 2000; Матышак, 2009; Атлас почв..., 2010; Москаленко, 2012; Почвы заповедников..., 2013; Семиколенных и др., 2013; Эволюция почв..., 2015; Попов, Пучнина, 2017].

Таблица 1. Параметры районов исследований. С. – сосняк.

Район	Координаты/ рельеф	Тян./ Тиул./ $\Sigma$ акт. т., °С	Осадки, мм/год	Породы/ почвы	Современная растительность	ММП
Пинежский р-н Архангельской обл.	64° с.ш., 42-43° в.д.	-14.7/ +14.3/ 1305	570	Моренные отложения, плотные породы/ подзолы, подзолистые, гипсо- петроземы	Сосняк зеленомошник и С. лишайниковый, ельник зеленомошник	Нет
Печорский р-н респ. Коми	61° и 62° с.ш., 56-58° в.д.	-18.2/ +16.8/ 1600	675	Моренные отложения, плотные породы, аллювий/подзолистые, буроземы, подзолы	То же. Лиственничники и пихтарники папоротниковые и разнотравные	Нет
Надымский р-н ЯНАО	65° с.ш., 71-73° в.д.	-23.0/ +15.5/ 800	550	Аллювиальные и эоловые отложения/подзолы, подбуры, глееземы	Сосняк зеленомошник и С. лишайниковый, тундровая пустошь	Есть
Надымский р-н ЯНАО (бассейн р. Сухой Полуя)	64° с.ш., 69° в.д.	-25.0/ +20.0/ 900	550	Аллювиальные и эоловые отложения/подзолы, псаммоземы	Сосняк зеленомошник и С. лишайниковый	Нет

Объекты исследования представлены постпирогенными почвами в экосистемах с разной частотой пожаров и межпожарным интервалом (рисунок 4).





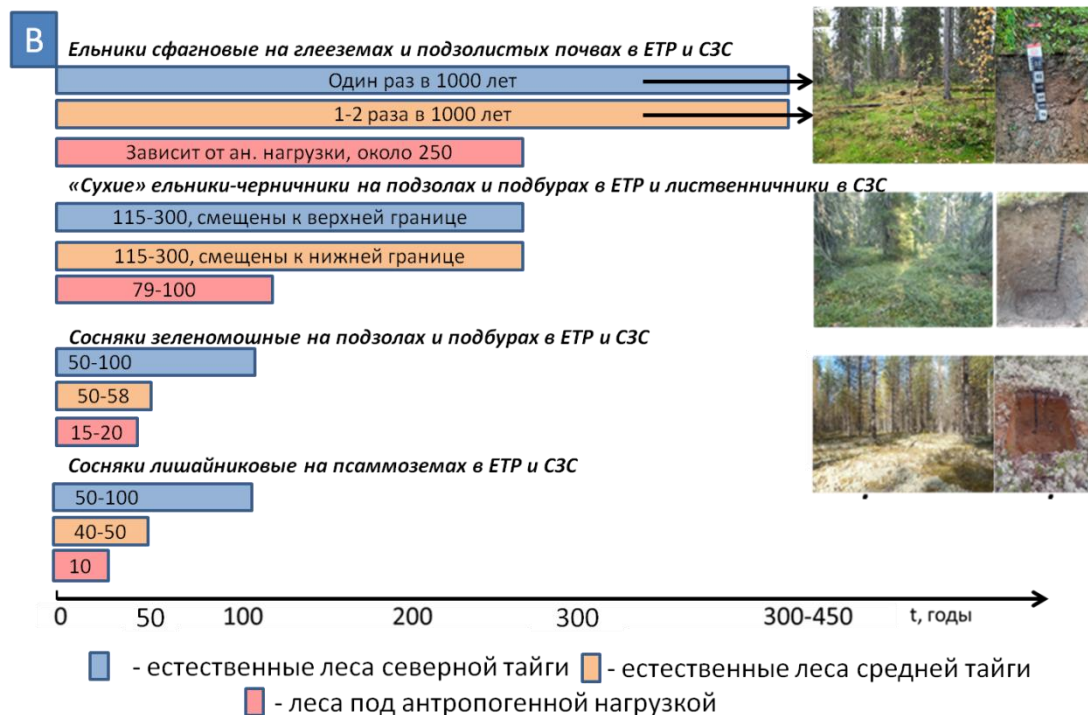
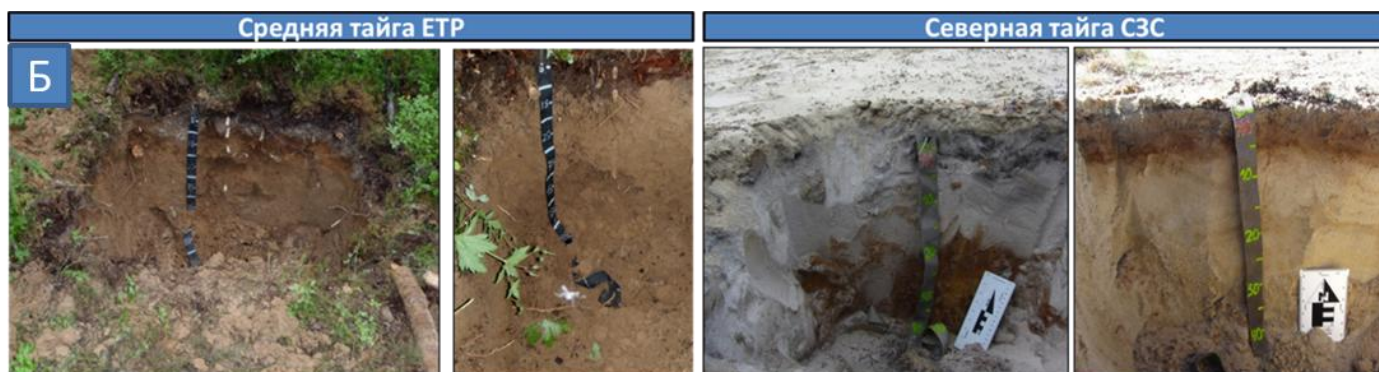


Рисунок 4. Объекты исследования с севера на юг ЕТР и СЗС (А и Б) и их средний межпожарный интервал (В) [Громцев, 2008; Кутявин, 2018; Харук, Пономарев, 2020; Dymov et al., 2022].

Основные методы исследований пирогенных почвенных палеоархивов:

1. Определение радиоуглеродного возраста углистых частиц и органического вещества почв методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS) [Плихт и др., 2016; Зазовская, 2016; Лойко и др., 2022; Bobrovsky et al., 2019]. Выполнено в ЦКП ИГ РАН – Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии;
2. Определение концентрации и фракционного состава антракомассы  $\geq 0,5$  мм методом сухого и мокрого просеивания [Carcaillet and Thinon, 1996];
3. Антракологический анализ с интерпретацией пород сгоревшей древесины с использованием световой и электронной микроскопии (JEOL JSM-6610LV) [Вихров, 1959; Golyeva, 2016];
4. Содержания  $C_{орг}$  и  $N_{общ}$  в углистых частицах и почве методом сухого сжигания (Vario ISOTOPE Cube CHNS-analyzer);
5. Реконструкция температуры образования углистых частиц с помощью рамановской спектроскопии (метод «палеотермометра») [Deldicque et al., 2016; Deldicque and Rouzaud, 2020].

Основные методы исследований актуальных постпирогенных почв:

1. Определение актуальной (водной и солевой) и гидролитической кислотности;
2. Определение обменных оснований Ca и Mg по Каппенну-Гильковицу и насыщенности основаниями ( $V=S/(S+H)*100$ );
3. Определение несиликатного железа в вытяжке Мера-Джексона и «аморфного» железа в вытяжке Тамма [Аринушкина, 1970; Теория и практика..., 2006; Воробьева, 1998].

#### Глава 4. Информационное содержание пирогенных палеоархивов севера Европейской территории России

В главе представлены результаты радиоуглеродного датирования углистого материала из пирогенно-почвенных палеоархивов карстовых ландшафтов бассейна Кулоя (рисунок 5). Палеоархивы дополняли друг друга по временному охвату пирогенной записи: разрез 1 хорошо описывает бореальный и атлантический периоды голоцена, т. е. ранний и средний голоцен; разрез 2 – поздний голоцен; разрез 3 – границу среднего и позднего голоцена. Из представленных данных можно сделать три вывода: (1) пожары в карстовых ландшафтах бассейна Кулоя проходили во все периоды голоцена; (2) сами палеоархивы в карстовых воронках просадочного происхождения – разновозрастные и (3) в связи с этим записывают разные периоды голоцена с разной степенью полноты и детальности.

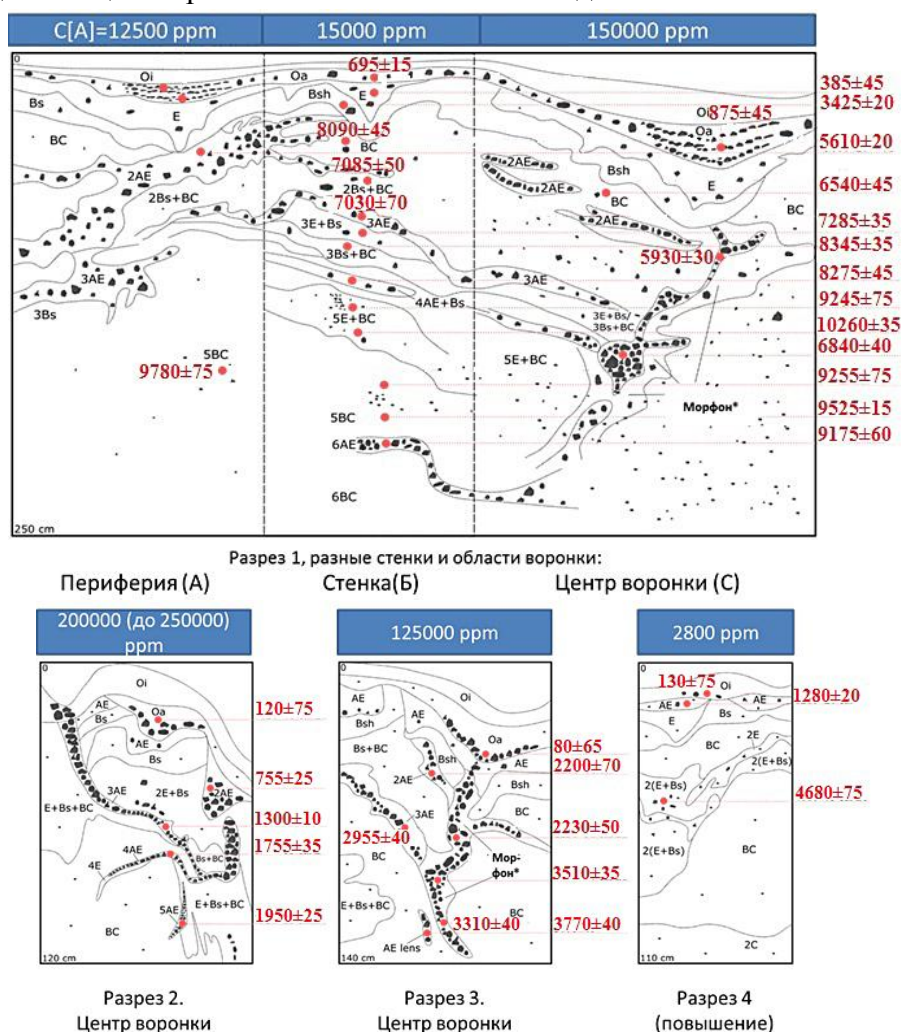


Рисунок 5. Возраст сгоревшей древесины исследованных пирогенных палеоархивов. Все даты – калиброванные (кал. л. н.); C[A] – концентрация антракомассы; представлена в среднем по морфонам в ppm. Горизонты названы по стандарту WRB. \* – пирогенные морфоны, заполненные материалом ОН+Е.

Структура всех исследованных пирогенно-почвенных палеоархивов по распределению концентрации антракомассы (рисунок 6) была сходной – повышения между воронками (остаточные поверхности) характеризовались минимальным количеством углистого материала на уровне  $2600 \pm 140$  ppm; склоны карстовых воронок –  $12330 \pm 2870$  ppm; центр воронки –  $110000 \pm 33670$  ppm. С увеличением количества пирогенного материала информационная емкость архива увеличивалась, что выражалось в более мощных пирогенных морфонах и горизонтах. Наблюдалось резкое уменьшение размеров углистых частиц с глубиной, они становились более окатанными и делились на пластинки по исходной структуре древесины. В центре воронок до глубины 180 см по-прежнему содержались угли хорошей сохранности размером  $>5$  мм, тогда как в почвах между воронками углей крупнее 1 мм не было уже на глубине 50-60 см, и часть из них имела признаки механической деградации.

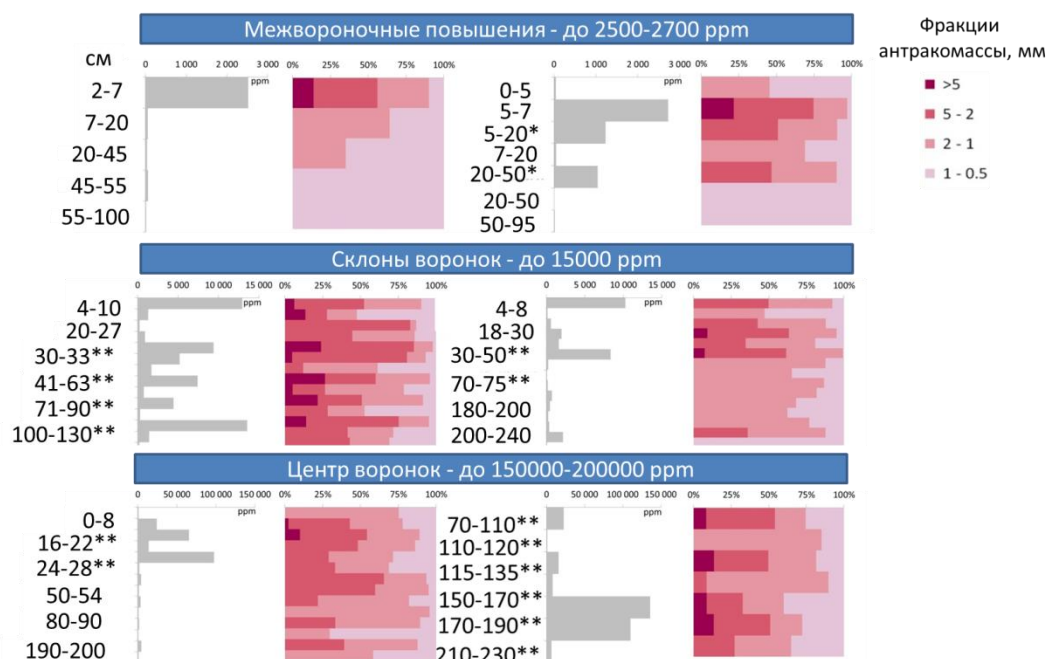


Рисунок 6. Линейчатые гистограммы распределения углистых частиц по профилю почв карстовых воронок и межвороночных поверхностей – абсолютное содержание | доли фракций антракомассы. Обозначены глубины с наибольшей концентрацией антракомассы: \*-морфоны вывалов; \*\*-пирогенные горизонты.

Антракологический анализ ( $n=32$ ) показал, что абсолютное большинство углей из всех пирогенных горизонтов принадлежало сосне, в редких случаях был найден можжевельник.

Для всех датированных углистых частиц ( $n=68$ ) было построено распределение суммарной плотности вероятности в пределах интервалов калиброванного радиоуглеродного возраста ( $2\sigma$ , вероятность 95,4%). Данное распределение отражает хронологию фаз активного накопления углистых частиц в почвах карстовых ландшафтов бассейна Кулоя (в рамках изученных ключевых участков). Мы сопоставили полученную хронологию, которая косвенно указывает на этапы повышенной пирогенной активности в голоцене, с обобщенными реконструкциями климата Фенноскандии (рисунок 7а и 7б, пример реконструкции для Центральной Фенноскандии). По данным палеоклиматической реконструкции наибольшие изменения параметров температуры и влажности относятся к началу голоцена ( $T = \pm 4$  °C;  $P = \pm 100$  мм/год) после чего, к среднему голоцену, изменчивость снизилась ( $T = \pm 2$  °C;  $P$  до 50 мм/год). Наши данные указывают на появление пожаров к концу



пребореала – началу бореала, вероятнее всего в ответ на повышение температуры и трансформацию растительных сообществ [Александровский, Александровская, 2005; Филимонова, Лаврова, 2015]. Это может объясняться постепенной сменой тундровых степей с перигляциальной флорой на хвойные и смешанные леса с бореальной флорой. Наиболее выраженный пик приходится на  $9600 \pm 200$  кал. л. н. Последняя серия пиков – 1000 кал. л. н. – по настоящее время, связывается нами с антропогенной деятельностью (ближайшее к объектам исследования поселение Пинега существует начиная с первой половины XII в.). Менее выраженный пик в среднем голоцене около 5600 кал. л. н. может быть обусловлен сочетанием природных факторов – сухого климата [Александровский и др., 2018], большой массы ЛГМ хвойных пород [Елина, 1981] и песчаными, хорошо дренированными почвами. Почвы альфегумусового отдела – подзолы и подбуры регулярно воспроизводились после пожарных нарушений и систематически представлены в изученных пирогенно-почвенных архивах, что говорит о сходных по направленности и относительно стабильных условиях почвообразования на исследованной территории на протяжении ~10000 лет.

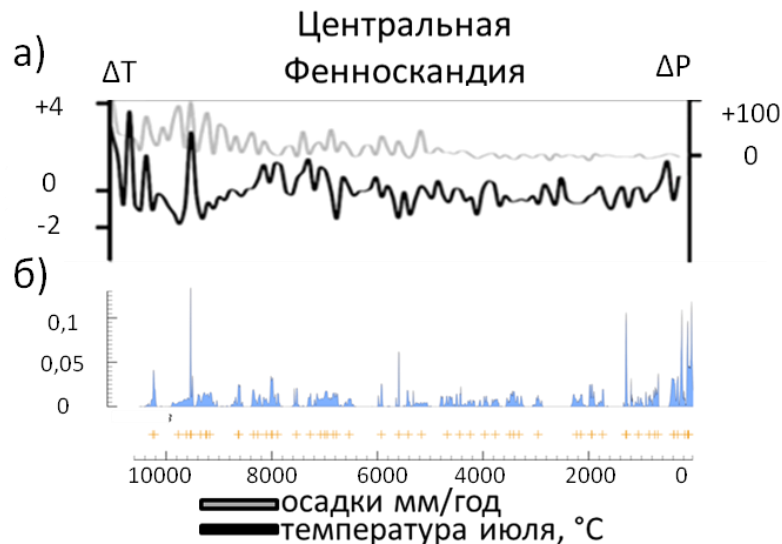


Рисунок 7. График изменения температуры июля и осадков в голоцене (а) и плотности вероятности возраста сгоревшей биомассы (б, наши данные) [Mauri et al., 2015; Molinari et al., 2018]. Нулевые точки температуры и влажности приняты как средние за период 4000-200 кал. л. н. Медианы интервалов калиброванного <sup>14</sup>С-возраста отмечены желтыми крестиками.

После пожаров в экосистемах с песчаными почвами в бассейне Куляя восстанавливались в основном пирогенные сосновые растительные сообщества, подверженные пирогенным автосукцессиям, что создавало условия регулярных пожаров на протяжении большей части голоцена. Дополнительные причины устойчивости сукцессий сосны заключаются в хорошем дренаже (сухости) почв и их бедности элементами питания. Частота сильных пожаров, приводивших к интенсивной послепожарной эрозии и формированию протяженных погребенных углистых горизонтов, составляла в среднем от 1 до 3-4 каждые 400 лет. Нами не было выявлено межпожарного интервала, который бы превышал 650 лет – такой интервал приходится на рубеж суббореала и субатлантика в позднем голоцене. Полученные данные несколько отличаются от реконструкций пожаров по архивам книгоподобного типа для ЕТР и СЗС, которые указывают на существенное повышение пирогенной активности в оптимуме голоцена [Горбач и др., 2021; Startsev et al., 2022, Dymov et al., 2022]. Возможными объяснениями отсутствия выраженного пика в атлантический



период по нашим данным могут быть: (1) указанные выше свойства хорошо дренированного карстового ландшафта, способствующего регулярным пожарам на протяжении практически всего голоцена, (2) более интенсивные пожары атлантического периода голоцена, которые не оставили после себя достаточного количества углистых частиц (полный пиролиз или дожигание). Часть углистых частиц могла быть утрачена в связи с эффектом «дожигания» при прохождении нескольких пожаров.

### **Глава 5. Постпирогенная трансформация морфологии почв и растительного покрова**

В главе рассматривается неоднородная структура разновозрастных гарей и горельников, которая определяется интенсивностью пожара, степенью нарушения напочвенного растительного покрова, органогенных и минеральных горизонтов почв. В структуре гарей предлагается выделять зоны множественных очагов или единичного очага, периферии и границы пожара. Каждая из таких зон может повторяться на территории гари или горельника, образуя пятнистый рисунок повреждений. В отдельных случаях выделяется одна зона, в которой интенсивность пожара менялась незначительно.

На основе изучения нарушений растительного и почвенного покровов реконструированы основные сценарии распространения пожаров на исследованных ключевых участках (рисунок 8а).

«А» – неоднородный. Наиболее типичный сценарий развития пожара, наблюдался в сосняках-зеленомошниках;

«Б» – однородный. Распространение пожара было резко подавлено влажностью окружающей гарь экосистемы, сценарий реализовался при значительном изменении влажности и/или типа ЛГМ;

«В» – неоднородный с обрезанной границей. Распространение пожара было ограничено естественным препятствием или пожарным рвом;

«Г» – очаговый. В условиях высокой неоднородности рельефа пожар сформировал множество очагов интенсивного горения на повышениях, их консолидацию ограничивали естественные препятствия (аккумулятивные формы, влажные участки и др.). Каждый очаг мог иметь свои зоны периферии и границы. Сценарий характерен для сильных пожаров;

«Д» – без выраженной зоны периферии. Из-за резкого изменения в составе и влажности ЛГМ пожар резко терял силу и интенсивность, образуя гарь или горельник с невыраженной зоной периферии.

Предполагаем, что данные сценарии распространения пожаров носят общий характер для севера ЕТР и СЗС.

Мы сопоставили данные по пожарам разной силы и пожарам в разных структурных зонах гарей, основанные на полевых наблюдениях, с максимальной температурой карбонизации (далее МТК) углистых частиц, рассчитанной на основе данных рамановской спектроскопии для углей с разных гарей (горельников) и их структурных зон (очаг, граница).

Слабые пожары и пожары на границе гари оставляли после себя угли с МТК  $740 \pm 29$  °С и при этом характеризовались наименьшей вариабельностью значений (рисунок 8б). Пожары средней силы оставляли после себя угли с МТК  $773 \pm 48$  °С и характеризовались наибольшей вариабельностью ( $V=6\%$ ) из современных пожаров, что мы связываем с их наибольшей пространственной неоднородностью. Сильные пожары и пожары в очаге гари оставляли после себя угли с МТК  $788 \pm 33$  °С и достоверно отличались от слабых пожаров (и пожаров на границе гари) по t-критерию при уровне значимости 0,01. Таким образом,

расчетные МТК коррелировали с определенной в поле силой пожара и выделенными структурными зонами гари, а распределение МТК углистых частиц подтверждает положение о пространственной неоднородности гарей по интенсивности температурного воздействия. По сравнению с современными углями, углистые частицы из глубоких палеоархивов характеризовались более высокими значениями МТК и их большей вариабельностью ( $V=10\%$ ), что может быть связано с диагенетическими изменениями углей при длительном нахождении в почве, а также избирательным сохранением углей, образовавшихся при более высоких температурах.

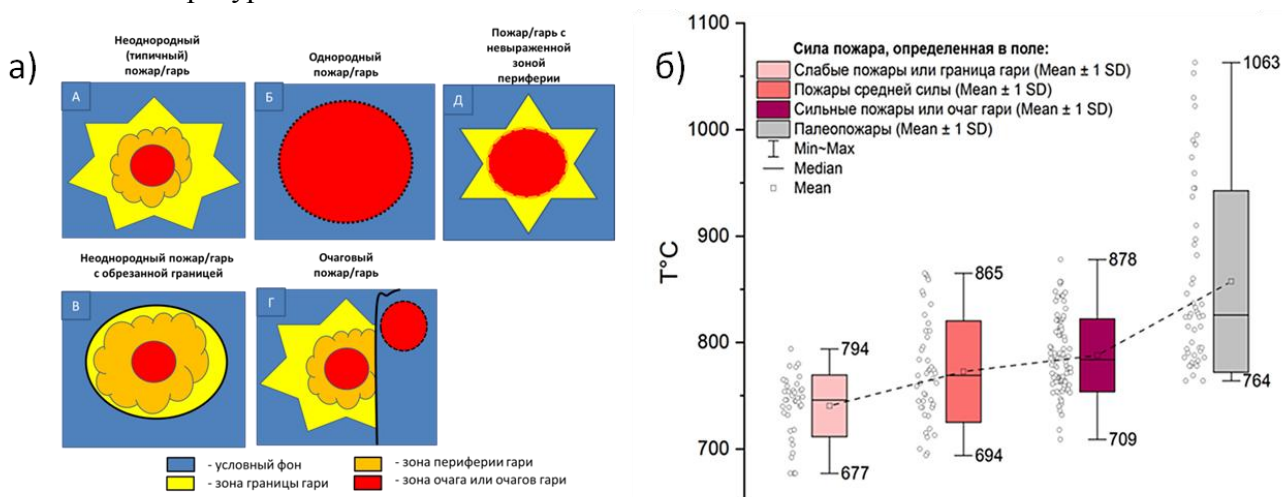


Рисунок 8. Основные схемы (сценарии) распространения лесных пожаров на исследованных территориях ЕТР и СЗС (а) и максимальные температуры карбонизации в зависимости от силы пожара и зоны гари (б). Принято, что ветра нет, и распространение гари идет с одной скоростью по всем направлениям. Для построения схем использовались работы Н. П. Курбатского (1970, 1978).

Исследование хронорядов пирогенных почв выявило основные сценарии их послепожарной трансформации. В альфегумусовых почвах ( $n=41$ ) при воздействии слабоинтенсивного пожара менялся характер и мощность верхнего горизонта; при воздействии высокоинтенсивного пожара возникала почвенная эрозия, через год или два после пожара – вывалы, диагностируемые в профиле по многочисленным морфонам. Текстурно-дифференцированные и текстурно-метаморфические почвы ( $n=22$ ) при воздействии слабоинтенсивного пожара обычно сохраняли морфологическую целостность; при воздействии интенсивного пожара с высокой частотой подвергались заболачиванию, причем через несколько лет после пожара увеличивалась мощность подстилки, последняя становилась более оторфованной. Глеевые почвы ( $n=10$ ) демонстрировали изменение характера и мощности верхних горизонтов при пожарах слабой интенсивности; при пожарах сильной интенсивности при близком залегании ММП наблюдалось изменение растительного покрова в сторону увеличения числа гидрофильных видов (сфагнум, осоки, пушицы и др.), а также усиление криотурбаций, приводящих к погребению углей в минеральной части почвы. При глубоком залегании ММП наблюдалась смена растительности на злаки и иван-чай (рудеральные виды). Кроме собственных наблюдений ( $n$ ), мы использовали следующие литературные источники: Wildland Fire..., 2005; Fire Effects..., 2009; Бобровский, 2010; Ходаков и Жарикова, 2011; Дымов, 2020 (рисунок 9А).

Особой сложностью характеризовался почвенный покров юго-востока Беломоро-Кулойского плато, из-за наличия карстовых форм рельефа, облекаемых четвертичными

отложениями. М. А. Смирновой и А. Н. Геннадиевым (2011), на основе микрокатенарного подхода, описана структура двух основных типов карстовых воронок: (1) облекаемых супесчаными моренными отложениями и (2) облекаемых двучленными моренными отложениями. Почвы межвороночных пространств могут отличаться от почв центров карстовых воронок, облекаемых супесчаным материалом на уровне типа; для карстовых воронок, облекаемых двучленными моренными отложениями, характерно увеличение мощности почвенного профиля к центру воронки по сравнению с почвами межвороночных пространств. Чем воронка больше, тем менее выражена дифференциация почвенного профиля на ее склонах. Постпирогенные трансформации накладываются на эту исходную почвенную неоднородность, что приводит к эрозии почв с межвороночных пространств и склонов воронок с последующим заболачиванием и возможным развитием оглеения в наиболее выраженных понижениях.

Растительность, в нераздельной связи с почвами, в значительной мере контролирует частоту, тип и параметры пожара, что отражается на величине межпожарного интервала [Чебыкина и др., 2022] (рисунок 9Б).



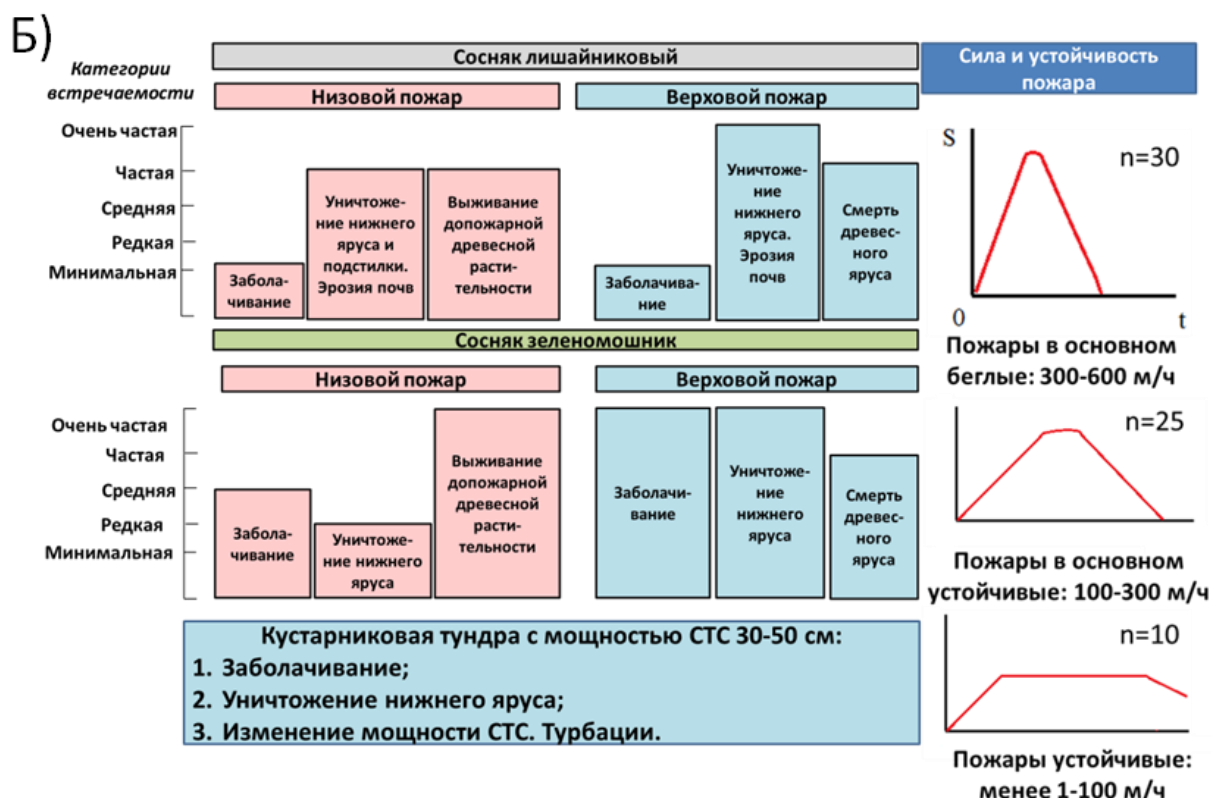


Рисунок 9. Относительная вероятность (P, %) изменения почвенного покрова (А) и категории встречаемости постпирогенной трансформации растительности (Б). Использованы материалы диссертации и литературные источники [Fire Effects..., 2009; Алейников и др., 2018; Дымов, 2020]. Для оценки устойчивости пожара использованы источники: [Мелехов, 1948; Курбатский, 1970; 1978; Залесов, 2011]. n – объем выборки.

Представленные схемы носят общий характер. На локальном уровне каждый пожар обладает специфичным набором внешних и внутренних факторов, которые и определяют его воздействие.

## Глава 6. Постпирогенная трансформация физико-химических свойств почв гарей

Представлено распределение по профилю постпирогенных почв  $pH$ ,  $Fe_{\text{дит}}$  и  $Fe_{\text{окс}}$ , обменных оснований,  $C_{\text{орг}}$  и  $N_{\text{общ}}$ . Показано быстрое восстановление отношения  $C/N$  в верхних горизонтах почв гарей до допожарного уровня и выше; увеличение несиликатного железа в минеральных горизонтах почв гарей; совместное увеличение  $C_{\text{орг}}$  и обменного  $Ca$  и совместное увеличение гидролитической кислотности и  $Fe_{\text{дит}}$  в горизонте Е в зависимости от силы пожара.

Показана неоднородность в распределении  $pH$ ,  $Fe_{\text{дит}}$  и  $C/N$  по зонам гари в зависимости от интенсивности пожара. Физико-химические свойства постпирогенных почв разделены на категории по сохранности и выраженности (рисунок 10).

Наиболее выраженными, но непостоянными постпирогенными признаками обладают верхние органогенные почвенные горизонты. Наиболее выраженные и постоянные послепожарные свойства – окраска и содержание  $Fe_{\text{дит}}$  железа – диагностированы в верхних и срединных минеральных горизонтах.



Рисунок 10. Алгоритм типизации свойств постпирогенных почв по их сохранности и выраженности [Wildland Fire..., 2005; Certini, 2005; Raison et al., 2009; Ubeda, Outeiro, 2009; Ходаков, Жарикова, 2011; Дымов, 2020; Kuzmina et al., 2022]. Под гарями подразумевается вся пройденная пожаром площадь, также площадь горельников.

В соответствии с проведенными морфологическими и физико-химическими исследованиями определена зависимость между возможностью диагностирования параметра и определения возраста гари или горельника (рисунок 11). Таким образом, большинство постпирогенных свойств обладают определенным характерным временем пребывания (восстановления до исходного состояния) и приурочены к определенным участкам гари или горельника. Наиболее продолжительным временем пребывания обладают морфологические признаки прошедших пожаров, в особенности аккумуляции (горизонты, морфоны) углистых частиц и типы их распределения по профилю почв.

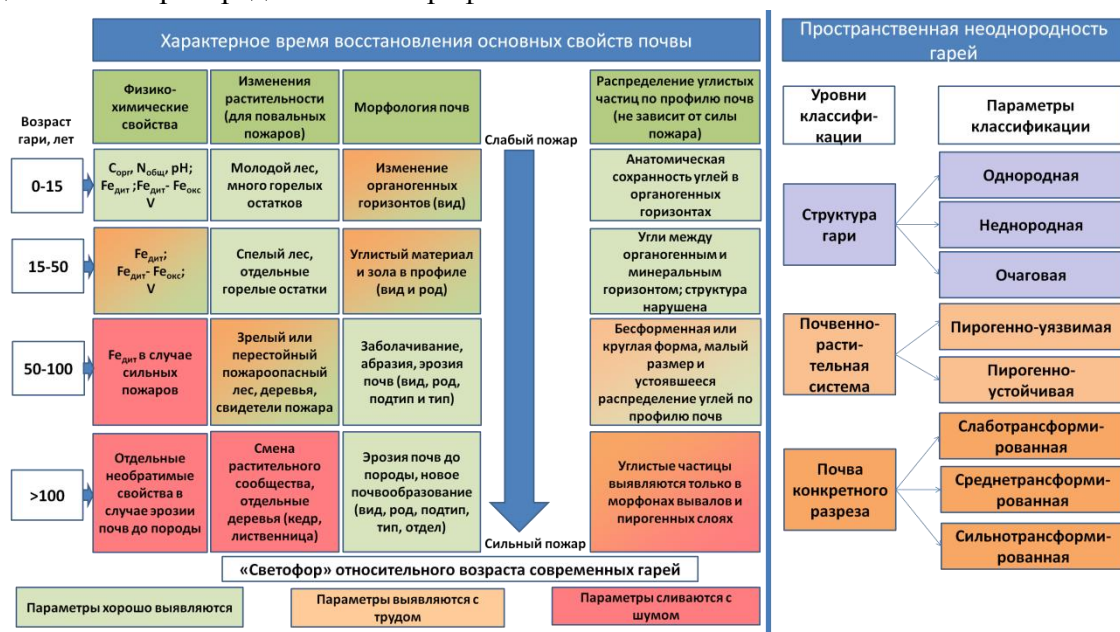


Рисунок 11. Характерное время пребывания (восстановления) морфологических и физико-химических постпирогенных признаков и пространственная неоднородность гари и/или горельника. Для определения степени трансформации использованы данные и предложения: [Краснощекоев, 2011; Краснощекоев, Чередникова, 2012, Чевычелов, 2018; Дымов, 2020; Чебыкина и др. 2021, 2022].



## Глава 7. Типизация вертикальной миграции углистых частиц по профилю почв

В данной главе представлены модели миграции углистых частиц в постпирогенных почвах – оценена миграция и сохранность углистых частиц ( $\geq 0.5$  мм) в почвах песчаного, супесчаного, суглинистого и глинистого (в том числе с тиксотропными свойствами) гранулометрического состава под покровом мхов, торфа и лишайников на молодых гарях и горельниках. Глубина вертикальной миграции углистых частиц зависела от гранулометрического состава почвы, влажности ее верхней минеральной части (ВМЧ), наличия многолетнемерзлых пород, а также времени, прошедшего с момента пожара (вне морфонов вывалов обычно ограничиваясь 15-30 см). В зависимости от соотношения постоянных и временных барьеров распределение (миграция) углистых частиц по профилю описывается четырьмя моделями (рисунок 12, продольный срез): (1) барьерной для почв с тяжелой и/или влажной ВМЧ, (2) равномерно-диффузной для почв с легкой и сухой ВМЧ, (3) неравномерно-диффузной для почв с утяжелением гранулометрического состава с глубиной и (4) турбационной для мерзлотных почв.

Определено, что горизонты с гранулометрическим составом тяжелее тонкого песка, сцементированные железом и насыщенные водой надежно блокируют вертикальную миграцию большинства углистых частиц, если она не обусловлена вывалами и криотурбациями. Насыщенные водой почвы, таким образом, могут формировать барьерный тип миграции, вне зависимости от гранулометрического состава. Характерное время стадий вертикальной миграции углистых частиц:  $t_1$  – попадание углей на почву, завершение пожара, начало миграции;  $t_2 \approx n \cdot 10^1$  – восстановление подстилки;  $t_3 \approx n \cdot 10^2$  или  $n \cdot 10^3$  (в зависимости от гранулометрического состава почвы и/или наличия органического или железистого цемента) – проникновение в минеральный профиль почвы.

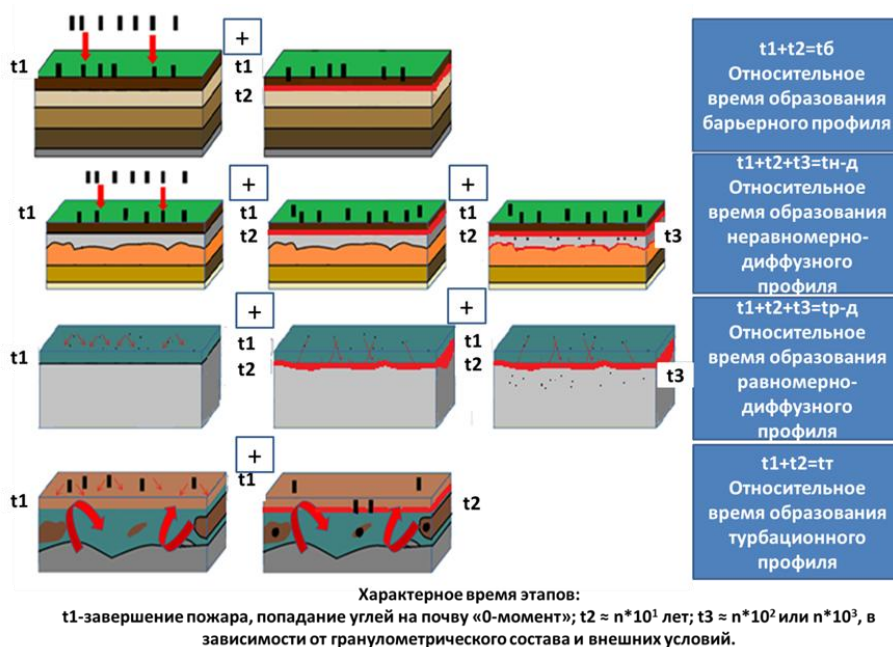


Рисунок 12. Относительное время образования профилей вертикальной миграции углистых частиц. Красная линия – накопление углистых частиц в профиле. Сверху вниз: барьерная ( $t_6$ ); неравномерно-диффузная ( $t_n-p$ ); равномерно-диффузная ( $t_r-d$ ) и (криогенно-)турбационная ( $t_t$ ) модели миграции. Относительное соотношение времен полного распределения углей 1)  $t_6 \approx t_r$ ; 2)  $t_n-p > t_r-d$ ; 3)  $t_n-p$  и  $t_r-d > t_6$  и  $t_t$ .

Отдельно рассмотрено изменение морфологии углистых частиц в зависимости от времени, прошедшего после пожара, и влажности вмещающего материала (рисунок 13, поперечный срез).

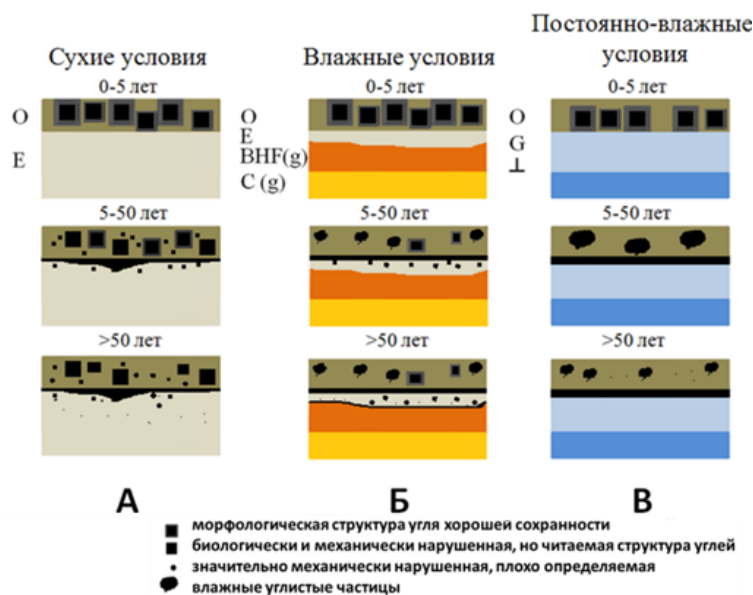


Рисунок 13. Влияние возраста пожара на морфологический облик и глубину проникновения углей. Черная линия показывает максимумы накопления углистых частиц. Поперечный срез.

Главным фактором, определяющим сохранность углистых частиц – их анатомическую целостность – выступает влажность подстилки и почвы. Во влажных почвах углистые частицы более уязвимыми к механическому измельчению. В соответствии со своим морфологическим состоянием угли были разделены на три стадии разрушения, а также группу углей, насыщенных влагой: (1) крупный уголь с ясно читаемой структурой (размер зависит от сгоревшей растительности); (2) угли до 2 мм, в форме прямоугольных пластинок; (3) угли до 1 мм, округлой формы, структура не читается; (4) угли насыщенные водой, мягкие на ощупь (перед определением стадии разрушения уголь необходимо высушить). Обоснованно выделение особого типа углистых частиц, адсорбированных на минеральной матрице.

## **Глава 8. Пирогенез как один из факторов образования экстремальных почв северных территорий России**

На наиболее поврежденных пожарами гарях складываются особые по своей суровости условия для почвообразования и восстановления почвенного покрова. Пирогенные почвы могут быть оценены с позиций концепции экстремального почвообразования [Горячкин и др., 2019, 2022]. Почвы экстремальных условий, которые вызваны пирогенезом, мы предлагаем называть «пирогенно-экстремальными».

Концепция экстремальности почв предполагает, что в экстремальных условиях образуются ортоэкстремальные почвы, то есть «правильные», настоящие экстремальные, и параэкстремальные почвы, то есть «почти экстремальные». Последние являются переходной формой от экстремальных к нормальным или оптимальным почвам [Горячкин, 2022] (рисунок 14).

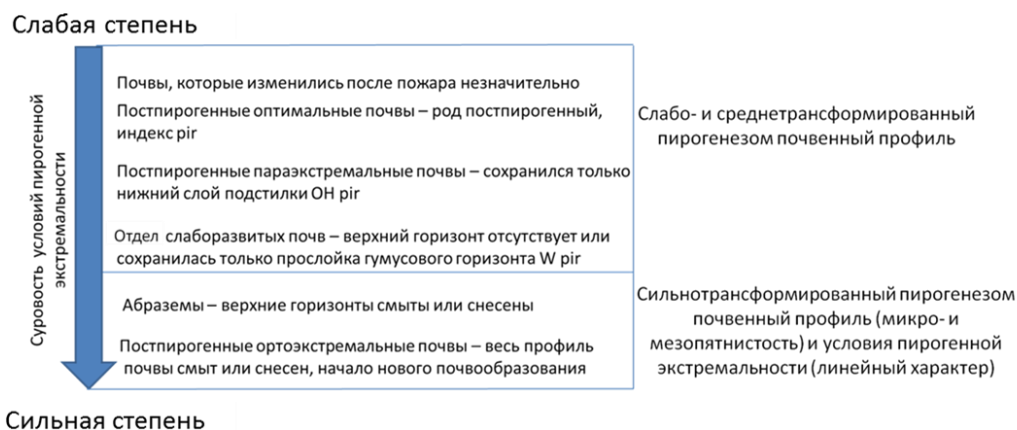


Рисунок 14. Положение пирогенно-экстремальных почв в КиДПР, 2004 г.

Каждое из условий пирогенной экстремальности имеет характерное время пребывания, после которого почва может развиваться с изменением направления почвообразования (рисунок 15). В данном примере влияние последующих пожаров не рассматривается.

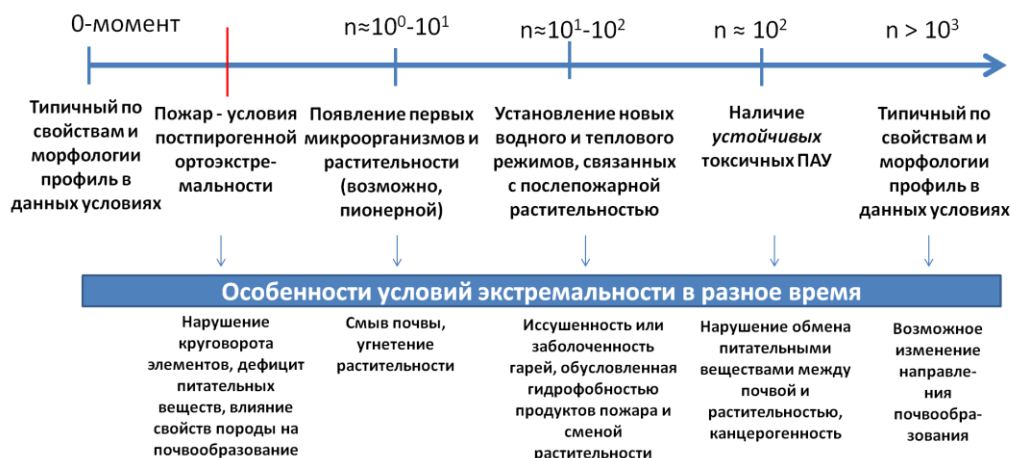


Рисунок 15. Восстановление почв после наступления условий пирогенной экстремальности.

Условия пирогенной экстремальности почв широко распространены на территории Европейского и Сибирского севера России; почвы в пирогенно-уязвимых экосистемах после прохождения пожаров не могут в полной мере выполнять свои экосистемные функции.

## Глава 9. Предложения по классификации пирогенных почв в зависимости от степени их трансформации пожаром

О необходимости изменения классификации – включении в нее почв, нарушенных пирогенезом, говорили такие исследователи, как Ю. Н. Краснощеков [Краснощеков, 2011; Краснощеков, Чередникова, 2012], А. П. Чевычелов (2018), А. А. Дымов (2020), Е. Ю. Чебыкина с соавторами (2021, 2022) и др.

Обуславливается необходимость изменения классификации пирогенных почв – деление их по степени пирогенной трансформации профиля. Слаботрансформированная почва сохраняет большую часть подстилки,  $C_{орг}$  может увеличиться в ВМЧ; среднетрансформированная почва имеет многочисленные пирогенные морфоны, интенсивность повреждений мозаична, резко уменьшены  $C_{орг}$  и  $N_{общ}$  в подстилке, увеличено содержание  $Fe_{дит}$  в ВМЧ; сильнотрансформированная почва испытывает условия почвенной пирогенной экстремальности, эродирована, трансформация химических свойств необратима. Представлен алгоритм изучения пирогенных почв. Предлагается анализировать территорию



гари и горельников на разных масштабных уровнях – от макро- и мезомасштаба, до описания почвенного профиля – чтобы показать зависимость пирогенной трансформации экосистемы от пространственной неоднородности параметров пожара.

Каждая гарь или горельник могут быть разделены по неоднородности фактического воздействия пожара (по зонам), неоднородности допожарной (и послепожарной) растительности и по неоднородности пирогенной трансформации почвенного профиля.

### **Выводы**

1. По данным радиоуглеродного датирования максимальный возраст продуктов пирогенеза в погребенных почвах ледниково-карстовых ландшафтов севера ЕТР составил  $10260 \pm 40$  кал. л. н. Морфологический анализ пирогенно-почвенных архивов показал, что альфегумусовые почвы систематически воспроизводились на протяжении большей части голоцена.

2. Почвенные палеоархивы карстовых воронок бассейна Кулоя записывают преимущественно локальные условия пирогенеза, которые не всегда совпадают с региональными трендами, зафиксированными в пирогенных летописях торфяных и озерных отложений. Монотонная почвенная запись после бореала в почвах – локальный тренд; перерыв в записи в атлантический период голоцена – региональный тренд, записанный в торфяниках.

3. Морфологический анализ погребенных почв выявил большое количество сдвоенных почв и аккумулятивно-синпедолитогенных почвенных систем (по С. А. Сычевой) во всей толще палеоархива, что мы связываем с интенсивной послепожарной эрозией, за которой следовали экстремальные условия почвообразования, вызванные смывами и намывами почвенного материала. Две почвы продемонстрировали полнопрофильный аккумулятивно-ритмичный тип записи – актуальная и бореальная ( $9175 \pm 60$  кал. л. н.), что мы связываем, с неоконченной историей развития актуальной почвы и стабильными условиями в случае бореальной почвы.

4. Структура всех исследованных пирогенно-почвенных палеоархивов по распределению концентрации антракомассы была сходной – повышения характеризовались минимальным количеством углистого материала,  $2600 \pm 140$  ppm; склоны карстовых воронок –  $12330 \pm 2870$  ppm; центр воронки –  $110000 \pm 33670$  ppm. С увеличением количества пирогенного материала информационная емкость архива увеличивалась, что выражалось в оформленных и более мощных пирогенных морфонах и горизонтах. Мы предполагаем, что данные закономерности – кратное увеличение концентрации антракомассы и увеличение содержания записи по направлению к центру воронки – общая особенность всех песчаных пирогенных палеоархивов карстовых ландшафтов.

5. Значения максимальной температуры, достигнутой при образовании углей, возрастают в сходных экосистемах с увеличением силы пожаров в ряду: слабый пожар или зона границы –  $740 \pm 29$  °C; средний –  $773 \pm 48$  °C; сильный или зона очага –  $788 \pm 33$  °C. Наибольшей вариабельностью значений обладали угли, образовавшиеся при пожарах средней силы, что связано с мозаичным характером пирогенных повреждений.

6. Показана вариабельность физико-химических свойств пирогенных почв в пределах современных гарей и горельников. Сравнение почвенных свойств между разновозрастными гарями и горельниками необходимо проводить с учетом их структурных

зон – очага, периферии и границы. Сильные пожары могут приводить к устойчивой неоднородности почвенных свойств в пределах одного участка прохождения пожара. Такая неоднородность соразмерна изменениям почвенных свойств, фиксируемым на гарях и в горельниках разного возраста.

7. Глубина вертикальной миграции углистых частиц ( $\geq 0,5$  мм), зависит от гранулометрического состава почвы, влажности ее верхней минеральной части (ВМЧ), наличия многолетнемерзлых пород, а также времени, прошедшего с момента пожара. В зависимости от соотношения постоянных и временных барьеров распределение углистых частиц по профилю описывается четырьмя моделями: (1) барьерной для почв с тяжелой и/или влажной ВМЧ, (2) равномерно-диффузной для почв с легкой и сухой ВМЧ, (3) неравномерно-диффузной для почв с утяжелением гранулометрического состава с глубиной и (4) турбационной для мерзлотных почв. Диагностирована фракция углей субмикроскопического размера, тесно связанная силами адсорбции с минеральной матрицей почвы. Она не отделяется от почвы механически, путем мокрого и сухого просеивания и сообщает вмещающему горизонту серые тона окраски. Мы предлагаем назвать эту группу продуктов пожара «углистыми частицами, адсорбированными на минеральной матрице».

8. Некоторые почвы исследованных районов тайги и тундры формируются в условиях неоднородной пирогенной экстремальности. Реакция почв на пожары азональна и в большей степени связана с гранулометрическим составом и локальными условиями, чем с климатом. Наиболее тяжелые последствия пирогенной экстремальности относятся к «перезапуску» почвообразования на новом субстрате и формированию слаборазвитых почв – псаммоземов, петроземов и гипсопетроземов.

9. На классификационном уровне пирогенные почвы могут быть разделены на слабо-, средне- и сильнотрансформированные в зависимости от степени пирогенного воздействия на органические горизонты и ВМЧ, включая содержание в них пирогенного углерода, общего азота и несиликатного железа, выраженности углистых морфонов, а также эродированности профиля.

## ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в научных журналах из перечня ВАК, Web of Science и Scopus, входящие или приравненные к изданиям категории K1:**

1. Петров, Д. Г. Пути миграции углистых частиц в постпирогенных почвах тайги и тундры в зависимости от особенностей пожара и факторов среды / Д. Г. Петров // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. М.: ФГБНУ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева», 2020. – № 105. – С. 109-145. – DOI 10.19047/0136-1694-2020-105-109-145.

2. Soils in karst sinkholes record the Holocene history of local forest fires at the north of European Russia / Mergelov N., **Petrov D.**, Zazovskaya E., Dolgikh A., Golyeva A., Matskovsky V., Bichurin R., Turchinskaya S., Belyaev V., Goryachkin S. // Forests. – 2020. – Vol. 11. – № 12. – С. 1268. – DOI 10.3390/f11121268.

3. Петров, Д. Г. Пирогенно-экстремальные почвы северной и средней тайги России / Д. Г. Петров, А. А. Гольева // Вестник МГУ. Серия 17. Почвоведение – 2023. – № 1. – С. 16-24. – DOI 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-1-16-24.

**Статьи, в сборниках материалов конференций**

4. Пирогенно-почвенные архивы лесных пожаров на севере Архангельской области / **Д. Г. Петров**, Н. С. Мергелов, Э. П. Зазовская, А. В. Долгих, С. В. Горячкин // Динамика экосистем в голоцене (к 100-летию Л. Г. Динесмана) : материалы V Всероссийской конф. с международным участием, М., 11-15 ноября 2019 г. – М.: Медиа-Пресс, 2019. – С. 258-260.

5. Пирогенные почвы карстовых областей севера Архангельской области: архивы лесных пожаров / **Д. Г. Петров**, Н. С. Мергелов, Э. П. Зазовская, А. В. Долгих, С. В. Горячкин // Лесные почвы и функционирование лесных экосистем: материалы VIII Всероссийской конф. с международным участием, М. 24-27 сентября 2019 г. – М. : ЦЭПЛ РАН, 2019. – С. 129-131.

6. Пирогенные почвы севера Архангельской области: архивы динамики пожаров и особенности почвообразования / Д. Г. Петров // Почвоведение: Горизонты будущего 2019 : Сборник материалов третьей открытой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева, Москва, 13–15 февраля 2019 года. – Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2019. – С. 171-172.

7. Архивы лесных пожаров в почвах карстовых районов Архангельской области / Д. Г. Петров // Почва в условиях глобального изменения климата : Материалы Международной научной конф. "XXIII Докучаевские молодежные чтения", посвященной 115-летию Центрального музея почвоведения им. В. В. Докучаева, Санкт-Петербург, 01–04 марта 2020 года. – Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2020. – С. 230-231.

8. Интенсивность миграции углистых частиц в постпирогенных почвах тайги и тундры в зависимости от характера растительности и параметров климата / Д. Г. Петров // Почвоведение: Горизонты будущего 2020 : Сборник тезисов докладов четвертой открытой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева, Москва, 11–14 февраля 2020 года. – Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2020. – С. 105-107.

9. Пирогенные почвы карстовых областей севера Архангельской области: архивы лесных пожаров и особенности почвообразования / **Д. Г. Петров**, Н. С. Мергелов, С. В. Горячкин, А. В. Долгих, Э. П. Зазовская // «Меридиан» Глобальные процессы и их региональные аспекты / Ред. А. А. Медведев, М. Е. Кладовщикова : Сборник материалов 12-ой международной молодежной школы-конференции, Курск, 30 мая - 02 июня 2019. – М.: ИГ РАН, 2019. С. 111-112. – DOI: 10. 15356/ Meridian2019.