

Институт географии РАН

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
кандидат географических наук
Н.С. Мергелов

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
ГЛАВА 1. ПОЖАРЫ И ПОСТПИРОГЕННАЯ ЭРОЗИЯ: ПОНЯТИЯ, ПАРАМЕТРЫ, ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ, ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ	14
1.1. Влияние природных и антропогенных факторов на циклы пожаров	16
1.1.1. Влияние природных факторов на интенсивность и распространение пожаров	17
1.1.2. Влияние природных факторов на постпирогенную эрозию	21
1.2. Постпирогенная динамика свойств почв и растительности в северных экосистемах	27
1.2.1. Физические свойства постпирогенных почв	30
1.2.1.1. Изменение показателей температуры почв на гарях	30
1.2.1.2. Изменение параметров водоотталкивающей способности почв после пожара	32
1.2.1.3. Изменения окраски профиля почв после пожара	33
1.2.2. Химические свойства постпирогенных почв	35
1.2.2.1. Пирогенная трансформация и миграция химических элементов	35
1.2.2.2. Основные химические показатели, изменяющиеся в почвах гарей	37
1.2.2.3. Пирогенная трансформация органических веществ в почве	39
1.2.2.4. Общие химические показатели минерализации и гумификации	43
1.2.3. Постпирогенные изменения биоты	44
1.2.3.1. Постпирогенные изменения растительности	44
ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ИНФОРМАЦИОННОЙ РОЛИ ПОСТПИРОГЕННЫХ ПОЧВ	48
2.1. Особенности почвы как пирогенного палеоархива	48
2.2. Морфология почвенных палеоархивов	52
2.2.1. Изменение классификационного положения почв после пожара	53
2.2.2. Эффект эродирования почв	54
2.2.3. Образование пирогенных морфонов	54
2.3. Описание продуктов пожаров в палеоархивах	56
2.3.1. Зола	57
2.3.2. ПАУ	58
2.3.3. Уголь и сажа	59
2.4. Объекты относительного и абсолютного датирования в пирогенном палеоархиве: их преимущества и недостатки	61
2.4.1. Зола	61
2.4.2. ПАУ	62

2.4.3. Уголь	64
2.5. Связь динамики экосистем и климата в голоцене с записью пирогенных событий в палеоархивах	68
ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	72
3.1. Районы изучения в подзоне северной тайги Европейской территории России	73
3.1.1. Географическое положение и климатические параметры.....	74
3.1.2. Геологические и геоморфологические особенности региона	75
3.1.3. Растительный покров.....	76
3.1.4. Почвенный покров.....	77
3.2. Методы изучения информационной роли почв.....	78
3.2.1. Полевые методы.....	78
3.2.2. Лабораторные и теоретические методы.....	78
3.3. Районы изучения в подзоне средней тайги Европейской территории России	80
3.3.1. Географическое положение и климатические параметры.....	81
3.3.2. Геологические и геоморфологические особенности региона	82
3.3.3. Растительный покров.....	82
3.3.4. Почвенный покров.....	83
3.4. Методы исследования хронорядов пожаров.....	83
3.4.1. Полевые методы.....	83
3.4.2. Лабораторные и теоретические методы.....	84
3.5. Районы исследования в подзонах северной тайги и кустарниковой тундры севера Западной Сибири	85
3.5.1. Географическое положение и климатические параметры.....	85
3.5.2. Геологические и геоморфологические особенности региона	86
3.5.3. Растительный покров.....	86
3.5.4. Почвенный покров.....	87
3.6. Методы типизации путей миграции углистых частиц.....	87
3.6.1. Полевые методы.....	87
3.6.2. Лабораторные и теоретические методы.....	88
3.7. Район исследования в подзоне северной тайги севера Западной Сибири	88
3.7.1. Географическое положение и климатические параметры.....	88
3.7.2. Геологические и геоморфологические особенности региона	89
3.7.3. Растительный покров.....	89
3.7.4. Почвенный покров.....	89
3.8. Методы разработки классификации пирогенно-экстремальных почв	89

3.8.1. Полевые методы.....	89
3.8.2. Лабораторные и теоретические методы.....	90
ГЛАВА 4. ИНФОРМАЦИОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ ПИРОГЕННЫХ ПАЛЕОАРХИВОВ СЕВЕРА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ.....	91
4.1. Общие особенности палеоархивов карстовых районов северной тайги Европейской территории России, влияющие на подходы к их расшифровке	91
4.2. Результаты радиоуглеродного датирования угля пирогенных почвенных палеоархивов бассейна Кулоя и Беломоро-Кулойского плато.....	92
4.2.1. Радиоуглеродный возраст, морфология и состав стабильных изотопов углерода и азота в трех пирогенных палеоархивах ледниково-карстовых ландшафтов бассейна Кулоя	92
4.2.2. Радиоуглеродный возраст и морфология пирогенного палеоархива на плоской заболоченной водораздельной равнине Беломоро-Кулойского плато (Пинежский заповедник)	102
4.3. Морфология и концентрация углистых частиц в пирогенных почвенных палеоархивах севера Европейской территории России	104
4.3.1. Антракологический анализ	104
4.3.2. Концентрация антракомассы пирогенных почвенных палеоархивов	105
4.4. Результаты сравнения хронологии пожаров и морфологии палеопочв с климатическими реконструкциями голоцена в северной тайге Европейской территории России	108
4.4.1. Динамика пожаров в течение голоцена	108
4.4.2. Связь частоты пожаров в голоцене с многовековыми климатическими ритмами	113
ГЛАВА 5. ПОСТПИРОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ МОРФОЛОГИИ ПОЧВ И РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА.....	117
5.1. Морфологические свойства постпирогенных экосистем северной тайги Европейской территории России.....	117
5.2. Морфологические свойства постпирогенных экосистем средней тайги Европейской территории России.....	139
5.3. Грельники кустарниковой тундры севера Западной Сибири.....	147
5.4. Типизация морфологических свойств постпирогенных экосистем.....	150
5.4.1. Схемы распространения лесных пожаров	150
5.4.2. Типизация постпирогенных изменений почв.....	153
5.4.3. Типизация постпирогенных изменений растительного покрова.....	155
ГЛАВА 6. ПОСТПИРОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ	159
6.1. Физико-химические свойства почв после молодых пожаров	159
6.2. Физико-химические свойства почв после средневозрастных пожаров	161
6.3. Физико-химические свойства почв после старовозрастных пожаров.....	162
6.4. Закономерности постпирогенных изменений физико-химических свойств почв	163

6.4.1. Постпирогенное распределение $C_{орг}$ и $N_{общ}$ по профилю почв.....	163
6.4.2. Постпирогенное распределение несиликатного, подвижного и слабоокристаллизованного железа по профилю почв	168
6.4.3. Связанные изменения некоторых химических свойств пирогенных почв.....	169
6.4.4. Пространственная неоднородность химических свойств постпирогенных почв	172
6.5. Типизация физико-химических свойств постпирогенных почв	173
ГЛАВА 7. ТИПИЗАЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ УГЛИСТЫХ ЧАСТИЦ ПО ПРОФИЛЮ ПОЧВ	178
7.1. Концептуальные схемы путей миграции углистых частиц.....	178
7.2. Стадии разрушения углистых частиц в почвах	183
ГЛАВА 8. ПИРОГЕНЕЗ КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ ОБРАЗОВАНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПОЧВ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ.....	187
8.1. Концепция пирогенной экстремальности почв	187
8.2. Пирогенно-уязвимые и пирогенно-устойчивые почвенно-растительные системы	189
8.3. Пирогенные трансформации почвенного покрова.....	191
ГЛАВА 9. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО КЛАССИФИКАЦИИ ПИРОГЕННЫХ ПОЧВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ИХ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОЖАРОМ	196
ВЫВОДЫ	201
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	203
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Материалы и методы исследования	233
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Информационная роль почв	250
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Постпирогенная трансформация морфологии почвенного профиля.....	252
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Пирогенная трансформация физико-химических свойств почв.....	267

Введение

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. После появления лесов на рубеже девона и карбона количество лесного горючего материала (ЛГМ) и концентрация кислорода в атмосфере Земли повысились, что сделало возможным распространение лесных пожаров [Scott, 2000(a); Scott, 2009; Ходаков, Жарикова, 2011; Doerr, Santin, 2016; URL: <https://www.paleofire.org/>].

В настоящее время трудно найти место на планете, где нельзя было бы обнаружить свидетельства современной или древней пирогенной активности. Следы пожаров отмечаются в почвенных горизонтах, прослеживаются в геологических, торфяных и озерных архивах природной среды. Во все периоды истории, в которые температура и уровень кислорода позволяли происходить процессам горения, пожары входили в ряд наиболее важных факторов, определяющих эволюцию и трансформацию растительности и почвенного покрова [Scott, 2000(a); Scott, 2009; Bird et al., 2015; Zobitz et al., 2021; URL: <https://fires.ru/>].

Региональные климатические реконструкции предполагают значительную динамику температуры и влажности в голоцене [Александровский, Александровская, 2005; Александровский, 2008; Sejrup et al., 2016; Sjögren, 2021]. Частота пожаров зависит от изменений климата, однако в разных локальных условиях одни и те же климатические параметры как увеличивают, так и снижают частоту пожаров. Таким образом, даже пожары одного региона могут демонстрировать изоморфизм и буферный эффект по отношению к изменениям климата и погоды. Исследование почвенных пирогенных палеоархивов, поможет изучить не только региональные, но и локальные изменения в пирогенной активности, и, таким образом, оценить вклад локальных и региональных факторов в наступление периодов пирогенной активности [Куприянов и др., 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 напрямую, 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; Scott, 2009; Bird et al., 2015].

Современные почвы Европейской территории России (далее ЕТР) и севера Западной Сибири (далее СЗС), испытавшие различное пирогенное воздействие, трансформируются в разной степени.

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 [Чебыкина и др., 2021]. 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 пожарный интервал в будущем; есть ли риски человеческим жизням и имуществу и какие затраты понадобятся на восстановление 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].

Степень разработанности темы исследования. Начиная с позднего плейстоцена и в голоцене все большее влияние на природу Европейской территории России (ЕТР) стала оказывать деятельность человека. Одно из последствий этого влияния – значительное повышение частоты пожаров по сравнению с естественным пирогенным фоном [Бобровский, 2010; Попов и Пучнина, 2017; Алейников и др., 2018; Дымов, 2020]. В сложившихся условиях, осложненных общим потеплением климата, необходимо прогнозировать частоту и силу пожаров, изменения свойств почв и изменения растительности после пирогенных событий разного характера. Несмотря на то, что все исследователи признают важность контроля за пожарами, нет общего взгляда на то, подлежит ли пирогенное воздействие полному подавлению, или является процессом, необходимым для наземных экосистем [Rothermel, 1991; Simard, 1991; Scott, 2009; Marlon et al., 2016; Doerr and 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 в послепожарных хронорядях 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 слепожарной 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 слепожарные 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.

Объекты и методы исследования. *Информационная роль* почв изучалась в подзоне северной тайги на севере Архангельской области в бассейне Кулоя на территории Пинежского лесничества и на севере Пинежского заповедника на левом берегу р. Сотка у оз. Глухое. 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 пирогенных 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. Для изучения миграции продуктов пожара в почвах и условий пирогенной экстремальности было описано 12 разрезов на СЗС: шесть поблизости от г. Новый Уренгой и г. Надым в подзонах кустарниковой тундры и северной тайги со сплошным и островным распространением многолетнемерзлых пород (ММП), а также шесть в подзоне северной тайги, в бассейне р. Сухой Полуй, без ММП. 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 гипсов и ангидритов, а также подзолы иллювиально-железистые на территориях Пинежского и Кулойского лесничеств на аллювиальных песчаных породах под смешанным типом тайги (Горячкин, 2010). В респ.

Коми изучались почвы подзолистого и подзолисто-глеевого ряда на дериватах кристаллических сланцев и морене, буроземы грубогумусовые под темнохвойной тайгой кордонов Строганая доска, Елма, Шежим [Почвы и почвенный покров..., 2013], а около поселка Якша – подзолы иллювиально-железистые и иллювиально-гумусовые на аллювиальных песках [Почвы и почвенный покров..., 2013]. На территории СЗС изучены 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 [Чевычелов, 1997, 1998; Wildland Fire., 2005; Scott, 2009; Ubeda, Outeiro, 2009; Бобровский, 2010; Ходаков, Жарикова, 2011; Bird et al., 2015; Куприянов, Новенко, 2019; Дымов, 2020; Гынинова и др., 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. Выведены 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 методом реконструкции температуры по данным рамановской спектроскопии определены 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. Впервые предложено делить степень пирогенного изменения почв на слабо-, средне- и

сильнотрансформированные в зависимости от их морфологических и физико-химических свойств после пожара.

Теоретическая и практическая значимость исследования. 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 средней и северной тайге выделены уязвимые и устойчивые к пожарам экосистемы и их почвенные компоненты.

Результаты исследований использованы при подготовке отчетов по проектам РФФИ (19-29-05238 “мк”, 18-05-60279 “Арктика”), а также мегагранту (соглашение № 075-15-2021-599 от 08.06.2021).

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 конференции с международным участием «Динамика экосистем в голоцене» (к 100-летию Л.Г. Динесмана), Москва, 2019.
2. сб. VIII Всероссийская научная конференция с международным участием «Лесные почвы и функционирование лесных экосистем», Москва, ЦЭПЛ РАН, 2019.
3. 6-я научная школа-семинар "Криогенные процессы и свойства почв". Москва, Почвенный стац. МГУ, 2021.
4. 5-я научная школа-семинар "Криогенные процессы и свойства почв". Звенигород: Звен. биол. ст. им. С.Н. Скадовского, 2020.
5. XXIII Докучаевские молодежные чтения "Почва в условиях глобального изменения климата", Санкт-Петербург, СПбГУ, 2020 г.
6. IV Молодежная конференция «Почвоведение: Горизонты будущего», Москва, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2020 г.

7. XII международная молодежная школа-конференция "Меридиан". Глобальные процессы и их региональные аспекты. Курск, ИГ РАН, 2019 г.

8. III Молодежная конференция «Почвоведение: Горизонты будущего». Москва, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2019.

Публикации. Материалы исследований изложены в девяти печатных работах, включая три статьи в базах данных Scopus, Web of Science и RSCI, представленные ниже:

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.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 9 глав, выводов, списка литературы, включающего 277 источников, из них 146 на иностранном языке, 7 интернет-источников и 4 приложений. Содержательная часть диссертации изложена на 201 странице, иллюстрирована 17 таблицами, 88 рисунками, общий объем диссертации с приложениями 277 страниц.

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 ± 140 ppm) к центру карстовых форм (110000 ± 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 горях 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 типизацию 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 научной группе SoilArt, НП «Российский Центр Освоения Арктики» за возможность участия в экспедиции и предоставленные данные и 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).

ГЛАВА 1. ПОЖАРЫ И ПОСТПИРОГЕННАЯ ЭРОЗИЯ: ПОНЯТИЯ, ПАРАМЕТРЫ, ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ, ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Лесная пирология, как наука, содержит много терминов – выделим среди них наиболее подходящие для нашего обзора. Основными понятиями, которыми оперируют отечественные и зарубежные исследователи (США, Австралия, страны Средиземноморья), являются сила, интенсивность и устойчивость пожара [Мелехов, 1948; Курбатский, 1970; Wildland Fire..., 2005; Ubeda, Outeiro, 2009; Бобровский, 2010; Залесов, 2011; Ходаков, Жарикова, 2011]. Рассмотрим содержание этих понятий в отечественной и зарубежной литературе. Вначале следует разделить «гари» и «горельники». Гарь – это участок леса, который погиб при прохождении пожара; в горельниках лес сохраняется.

Принципиальная разница между понятиями «интенсивности» и «силы пожара» в отечественной и зарубежной литературе заключается в том, что сила пожара может пониматься как синоним его интенсивности и измеряется как скорость прохождения пожара через территорию [м/мин] [Мелехов, 1948; Курбатский, 1970; Залесов, 2011]. В зарубежной литературе (Англия, США, Австралия, некоторые страны Европы) интенсивность пожара (fire intensity) оценивается по величине энергии горения или скорости нагревания воздуха над топливом на 1 °С [°С/сек] или как расчетный параметр $I=w \cdot H \cdot R$, где I – интенсивность; H – энергия сгорания единицы топлива Дж/г; R – скорость распространения, м/с; w – масса сожженного топлива, г [Byram, 1959; Wildland Fires..., 2005; Ubeda, Outeiro, 2009; Scott, 2009; Li Gang et al., 2022]. Сила пожара (fire severity) может оцениваться как процент сгоревшей растительности (например, полностью сгорело около 2% – слабый, 10% – средний, более 10% – сильный) или как глубина прогорания органического горизонта почвы (горизонт обуглен – слабый, прогорел до гумусового горизонта – средний, сгорел подстилочный и гумусовый горизонт – сильный) [Wildland Fire..., 2005; Lloret, Zelder, 2009].

Абсолютная интенсивность может быть определена только во время пожара и оборудование, необходимое для ее регистрации имеет ограниченную точность (термопары, специальные термометры и т.д.) [Wildland Fire..., 2005; Certini, 2005; Ubeda, Outeiro, 2009]. «Эталонная» интенсивность пожара измеряется, в основном, в лабораторных условиях; менее точная, но более реальная интенсивность – в подготавливаемых полевых экспериментах. Как прокси интенсивности пожара в литературе иногда используются наборы эмпирических данных о степени сгорания растительности и подстилки – сила пожара (fire severity); после чего составляются таблицы соответствия силы и интенсивности для определенного типа

растительности [Simard, 1991; Wildlands Fire..., 2005; Ходаков, Жарикова, 2011; Залесов, 2011]. В представленной работе интенсивность определяется как качественный оценочный параметр в терминах высокой, средней и низкой, что связано с невозможностью точного ее определения по параметрам гарей в абсолютных величинах [Certini, 2005; Wildland Fire..., 2005]. Такое деление представляется возможным благодаря тесной связи интенсивности с силой пожара и его устойчивостью [Wildland Fire..., 2005; Ubeda, Outeiro, 2009]. Интенсивность пожара, выраженная в абсолютных температурах, имеет приблизительный характер, т. к. зависит от неоднородных в пространстве факторов, например, влажности топлива. В настоящий момент, с помощью методов колебательной спектроскопии (инфракрасной, рамановской) можно достаточно точно определить температурные интервалы некоторых современных пожаров в локальном масштабе [Deldicque et al., 2016; Deldicque, Rouzaud, 2020].

Характеристика устойчивости/длительности пожара (duration) является временной функцией присутствия горения. В процессе горения устойчивость пожара влияет на то, полностью ли пожар переработал топливо на данной территории, уничтожил ли микробиоту и корни деревьев. Устойчивый пожар длится более 30 мин., беглый пожар обычно длится до 10 мин [Mataix-Solero et al., 2009; Бобровский, 2010; Дымов, 2018, 2020]. В реальных условиях на разных участках гари может одновременно присутствовать как беглое, так и устойчивое горение. Слабые, беглые пожары низкой интенсивности редко затрагивают минеральную составляющую почв напрямую, средние и сильные, устойчивые пожары высокой интенсивности – провоцируют почвенную эрозию и повреждают древостой [Abney, Verhe, 2018; Moody, Martin, 2009; Бобровский, 2010; Дымов, 2018, 2020]. В российской классификации устойчивость пожара может также определяться отдельно по ярусам (подземный/низовой/смешанный/верховой). Среди иностранных источников редко можно найти описание подземного типа пожара [Мелехов, 1948; Курбатский, 1970; Wildland Fires..., 2005; Robichaud, 2009; Залесов, 2011].

Таким образом, существует разница между отечественными и зарубежными источниками – иностранные источники дают лучшее понимание параметров пожара с точки зрения физики, в частности, в них лучше описана интенсивность пожара [Byram, 1959; Simard, 1991; Wildland Fire..., 2005]. В российской классификации лучше рассмотрены региональные особенности пожаров, хотя, конечно, есть работы по физическим свойствам горения [Мелехов, 1948; Курбатский, 1970; Залесов, 2011; Ходаков, Жарикова, 2011; Дымов, 2020]. Так, пожары в российской классификации могут делиться по типу экосистемы, через которую проходят – тундровая, лесная, кустарниковая, луговая и др. и по месту прохождения внутри

этой экосистемы – напочвенные, валежные, пневые, стволовые, вершинные и др. [Мелехов, 1948; Курбатский, 1964; Залесов, 2011].

Основные отечественные и зарубежные термины лесной пирологии сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Основные параметры отечественной и зарубежной пирологии.

Понятия			
Русский термин	Английский термин	Буквенные обозначения	Качественные и количественные единицы измерения; принцип выделения
Параэкстремальность	Para-extreme	-	Классы экстремальности
Ортоэкстремальность	Ortho-extreme	-	Классы экстремальности
Тип пожара	Fire type	-	Типы пожара по основному горящему компоненту растительного покрова
Параметры			
Сила пожара	Fire severity	S	(%) сгоревшей растительности; в (см) прогоревшей подстилки; в классах: средний, сильный и слабый
Устойчивость пожара, продолжительность пожара	Fire sustainability, Fire duration	t	минуты (мин), секунды (с), часы (ч)
Скорость распространения пожара	Fire rate of spread	R	м/с
Интенсивность пожара (по Вугам, 1959)	Fire intensity	I	кВт/(м*с)
Температура горения	Combustion temperature	T	К; °С; летальные температуры; температуры улетучивания элементов
Энергия сгорания единицы топлива	Combustion energy	H	Дж/г
Антракомасса (как совокупность углистых частиц в почве)	Anthracomass; Concentration of Anthracomass	A	мг/кг; ppm; т/га; по размерным фракциям: <0.5; 0.5-1; 1-2; 2-5; >5 мм
Масса топлива, запасы топлива	Fuel weight	w	т/га
Пирогенный углерод, «черный» углерод	Pyrogenic carbon, Black carbon	PyC	г/кг; ppm

1.1. Влияние природных и антропогенных факторов на циклы пожаров

Полный пирогенный цикл включает сам пожар и последствия послепожарной эрозии [Чевычелов, 1998; Moody, Martin, 2009; Scott et al., 2009; Abney et al., 2018; Чевычелов, Шахматова, 2018].

Для прогнозирования вероятности прохождения, площади и степени воздействия пожара требуется знать основные свойства топлива [Simard, 1991; Ходаков, Жарикова, 2011; Губенко, Рубинштейн, 2012; Drobyshev et al., 2016; Walker et al., 2021; Dorian et al., 2022; Carcaillet et al., 2022; Gaboriau et al., 2022]. Большинство пожаров имеют мозаичный характер распределения силы горения в пространстве, который отражает изначальную неоднородность растительности и внешних условий [Rothermel, 1991; Curran, Scott, 2009]. Неоднородность силы воздействия пожара называют «пятнистостью» или «мозаичностью» [Ходаков,

Жарикова, 2011]. Почвенный покров, как и растительность, приобретает неоднородность верхних горизонтов, [Карпачевский, 1977; Бобровский, 2010; Дымов 2018, 2020]. Далее мы будем использовать термин «очаговый» (hearth), принятый в иностранной литературе, чтобы подчеркнуть места наиболее сильных температурных воздействий пожара, со сгоревшей подстилкой; пятнистость или мозаичность для определения менее поврежденных участков. Выраженный эффект очаговости, неоднородный в пространстве, может быть определен как «пирогенная или очаговая экстремальность». Подробнее зависимость пожаров и постпирогенной эрозии от внешних факторов раскрыта в подглавах ниже.

Наиболее катастрофичные по своему воздействию, пожары рассмотрим в рамках концепции экстремального почвообразования (extreme pedology), предложенной С.В. Горячкиным с соавторами (2019, 2022) в результатах работы (главе 8). Далее речь будет идти о пирогенных событиях типичной для рассматриваемого района интенсивности.

Современные изменения природных факторов определяют частоту пожаров. Они делятся на (условно) естественные, например, динамика площади природных зон и глубины ММП, и прямые антропогенные, например, поджоги, монокультурные посадки и вырубки [Alghen, 1959; Simard, 1991; Tongway, Hondgkinson, 1992; Peterson et al., 1992; Pitkänen et al., 2002; Marlon et al., 2013; Robin, Nelle, 2014; Dyakonov et al., 2017; Kuosmanen et al., 2018; Novenko, 2019; Kupriyanov, Novenko, 2019; Гераськина и др., 2021; Cheng et al., 2021; Marlon, 2020; Gaboriau et al., 2022]. Как пример долгосрочного антропогенного влияния на экосистемы можно привести участвовавшие в XX-XXI вв. рубки, которые способствовали «антропогенной аридизации» ландшафтов [Александровский, 2008; Бобровский, 2010; Алейников и др., 2018; Дымов, 2020] и увеличивали вероятность пожаров в некоторых вторичных сукцессиях послерубочных территорий.

Схемы, построенные далее в литературном обзоре, носят чисто описательную функцию и не претендуют на роль математических моделей [Основы математического моделирования..., 2019].

1.1.1. Влияние природных факторов на интенсивность и распространение пожаров

Вопрос выбора временного и пространственного масштаба применительно к изучению пожаров влияет на результаты исследований [Doerr, Santin, 2016; Simard, 1991]. Следует различать общий тренд пожарной активности, многолетний и сезонный. Симард (1991) предпринял попытку разделить пространственный и временной масштаб на восемь категорий: от планетарного до точечного и от мгновенного до долговременного. Цель такой

классификации – лучшее понимание процесса горения и создание единой терминологии для исследователей пожаров [Simard, 1991].

Глобальный фактор, охватывающий большие масштабы времени и целые геологические эпохи – состав атмосферы [Scott, 2009; Bird et al., 2015; Li et al., 2022]. Было показано, что при содержании менее 13% кислорода пожар не распространяется, а при более чем 30% наоборот, риск пожаров экстремально высок [Scott, 2009]. Огромные объемы CO₂, выделяющиеся в результате пожара, усиливают парниковый эффект и способствуют потеплению климата в глобальном масштабе, создавая некоторый эффект самоиндукции [Zobitz et al., 2021].

Климат – второй по масштабу фактор, определяющий общую интенсивность распространения и частоты пожаров [Carrega, 1991; Brenner, 1991; Rothermel, 1991; Potter, 1996; Scott, 2009; Talon, 2005; Talon et al., 2010; Kupriyanov, Novenko, 2019; Gaboriau et al., 2022; Лойко и др., 2022; Gaboriau et al., 2022]. На вероятность пожара и варьирование его параметров значительно влияет сезонная и многолетняя погода [Potter, 1996; Vadmaev, Bazarov, 2021; Carcaillet et al., 2022]. Частота пожаров напрямую связана с многолетними параметрами влажности и температуры; характер этой связи может быть как прямым, так и обратным. Примером обратной связи является смена хвойной растительности на широколиственные породы при общем потеплении климата в атлантический период голоцена [Александровский, 2018] с уменьшением частоты пожаров в записях книгоподобного типа [Горбач и др., 2021]. Обратный пример: суховеи, к примеру, суховеи в степи на юге России или в Португалии, могут существенно повысить риск пирогенных событий в пожароопасный сезон [Ferreira et al., 2009; Ходаков и Жарикова, 2011].

В качестве естественных факторов применительно к лесам северной и средней тайги будут рассмотрены: температура, осадки, влажность органогенной части почв, рельеф, растительность, а также направление и сила ветра.

Повышение температуры на севере ЕТР приводит к учащению пирогенных событий, что видно, например, по статистике лесных пожаров в Республике Коми за последние годы [Алейников и др., 2018; Дымов, 2020]. Кроме того, повышение температуры также сдвигает на север положение экотона северная тайга – южная лесотундра и приводит к таянию ММП, что является одной из причин учащения пожаров на Севере ЕТР и Западной Сибири [Masrug et al., 2018; Cheng et al., 2021; Kuzmina et al., 2022]. Однако в рассмотренных выше регионах повышение температуры также может способствовать смене хвойного древесного яруса на более резистентные к пожарам лиственные породы [Бобровский, 2010; Дымов, 2020].

Сильные, высокоинтенсивные, устойчивые пожары вызываются аномальными погодными условиями в пожарный сезон при наличии ЛГМ.

Интенсивные осадки в сезон пожаров всегда снижают пирогенную активность. Степень этого снижения в разных регионах зависит от уровня грунтовых вод, наличия водоупора, типа и обилия растительности, почвенного типа и степени дренированности территории. Так, близкое залегание грунтовых вод, в купе с интенсивными осадками может привести к затоплению, что уменьшит саму возможность возгорания. Древесная растительность тесно связана с водным режимом территории, т. к. запасает в себе часть влаги, поглощая значительный объем осадков. В некоторых случаях это приводит к пожарной опасности даже в случае повышенного количества осадков. Напочвенный покров определенного типа, такой как сфагнум и зеленые мхи, может удерживать влагу, что препятствует возгоранию [Viney, Cathpol, 1991; Дымов, 2020; Shabaga et al., 2022]. Гранулометрический состав почв также определяет тип водного режима, и количество поглощаемой и удерживаемой почвой влаги. Песчаные почвы способствуют промывному водному режиму, вследствие чего экосистема быстрее «осушается» в пожарный сезон [Rothermel, 1991; Carrega, 1991].

Определение силы и направления ветра необходимо для прогнозирования распространения и силы пожара [Byram, 1959; Viegas, Neto, 1991; Rothermel, 1991; Mercer, Weber, 1994; Wildland Fire..., 2005; Ходаков, Жарикова, 2011; Masrur et al., 2018; Walsh et al., 2020; Gaboriau et al., 2022]. Например, предполагаемый пожар, при прогнозировании сильного ветра, сразу приобретает в системе пожароопасности США высокий класс опасности [Rothermel, 1991; Ходаков, Жарикова, 2011]. Огненный шторм, возникающий во время пожара важный фактор пирогенного события, т. к. пожар, продуцирующий интенсивный огненный шторм, способен пересекать овраги и мелкие реки, игнорируя неоднородности рельефа и способствуя распространению горения. Периоды пирогенной активности и роза ветров часто связаны с определенным пожароопасным сезоном [Doerr, Satin, 2016; Gaboriau et al., 2022].

Рельеф служит или естественной преградой для распространения пожара (рисунок 1), или своеобразным трамплином, переводящим низовой пожар в верховой [Залесов, 2011; Doerr et al., 2009; Moody, Martin, 2009; Abney et al., 2018 Carcaillet et al., 2022]. Пример роли рельефа в распространении пожара можно наблюдать для карстовых и горных районов, где лога и воронки с выходом гипсовых пород препятствуют распространению сильного пожара и обуславливают очаговость и пятнистость интенсивности горения.

Сила и тип пожара напрямую зависят от типа сгораемых древесных пород. Ель и сосна характеризуются легкостью возгорания, тогда как экосистемы с доминированием осины и

березы более устойчивы к нему [Бобровский, 2011; Ходаков, Жарикова, 2011; Дымов, 2018, 2020] (рисунок 1).

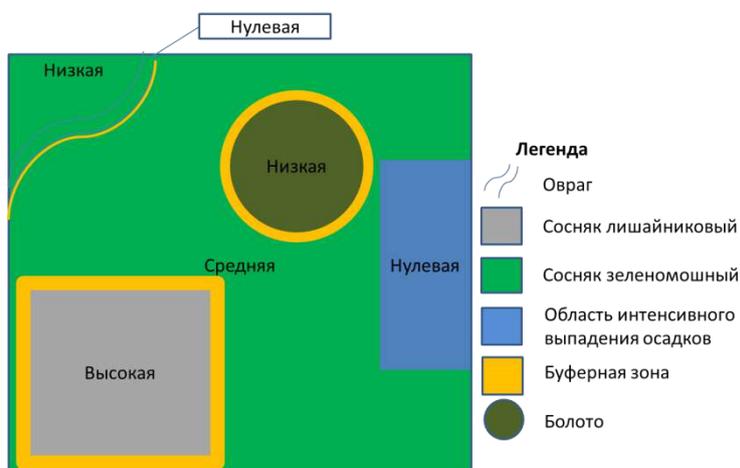


Рисунок 1. Модель мозаичности пожара в природной среде. Внутри контуров указана интенсивность и вероятность пожара (в данном примере, для простоты, они совпадают). Буферная зона демонстрирует постепенное изменение интенсивности пожара на границе растительных зон

В напочвенном покрове лишайники наиболее склоны к возгоранию; мхи, особенно рода сфагнум, загораются в условиях длительной «засухи» [Бобровский, 2010; Дымов, 2020; Kuzmina et al., 2022]. По приспособленности к пожарам растительность делится на пирогенно-зависимые виды, толерантные и нетолерантные. Наиболее частые приспособления к пожарам древесных видов-пирофитов (pyrophyte) – серотиновые (serotiny) шишки, которые раскрываются при воздействии температуры (60-80 °С); у кустарников и кустарничков – интенсификация вегетативного размножения; у трав – семена, реагирующие на температуру около 100 °С как на сигнал к прорастанию [Thomas, 1991; Doerr, Satin, 2016; Гераськина, 2021; Gaboriau et al., 2022]. Пожароопасные виды (fire-prone) более широкое понятие – включает все растительные виды, которые легко возгораются. Еще более широкое понятие, объединяющее виды животных, с некоторой толерантностью к пожарам (например, насекомых) – виды-пирофилы (pyrophyle). Без пожаров многие вымирают, т. к. их конкурентное преимущество исчезает.

Многие пожары способны уничтожить подстилку лишь частично. Степень сгорания верхней части подстилки – OL-OF, так как ее верхние слои обычно наиболее сухие. Прогорание подстилки имеет пятнистый характер на территории гари и обусловлено типом и влажностью топлива [Дымов, 2018, 2020].

Ожидание пирогенных событий в определенные промежутки времени, с одной стороны, упрощает прогноз и политику управления в глобальном отношении, однако пожар может возникнуть непредсказуемо и распространиться с большой скоростью и вне сезона [Rothermel, 1991; Carrega, 1991; Brenner, 1991; Gaboriau et al., 2022].

1.1.2. Влияние природных факторов на постпирогенную эрозию

Постпирогенную почвенную эрозию удобно разделить на три этапа: отрыв, транспорт и осаждение частиц [Wildland Fire..., 2005; Scott et al., 2009; Moody, Martin, 2009]. Постпирогенная эрозия обусловлена внешними факторами и параметрами пожара [Scott et al., 2009].

После пирогенного события транспорту продуктов пожара и минеральной части почв способствуют водная, ветровая и гравитационная эрозия [Moody, Martin, 2009; Scott et al., 2009]. Их соотношение определяется характером эродируемых частиц и внешними воздействиями. Скорость эрозии увеличивается, когда сгорает напочвенный покров и корни, удерживающие почву на склонах элементов рельефа [Scott et al., 2009]. Пожары могут спровоцировать масштабные оползневые процессы и вызвать эффект «пьяного леса». Оползневые процессы также может усилить таяние снега после зимнего сезона на недавних гарях [Scott et al., 2009].

Почвенная эрозия не является обязательным атрибутом пожаров. Смыв верхних минеральных почвенных горизонтов сопровождается сильными и катастрофическими пожарами [Simard, 1991; Rhotermel, 1991; Gavin et al., 2003; Scott et al., 2009; Gaboriau et al., 2022]. Критическая температура устойчивого низового пожара, при которой возрастает шанс обнажения почвы и нарушается агрегационная целостность частиц в верхних 50 мм около 200-300 °C [Scott et al., 2009; Бобровский, 2010]. Сценарии воздействия пожаров на скорость эрозии [Wildland Fires..., 2005; Scott et al., 2009; Moody, Martin, 2009; Doerr et al., 2009; Dunkerley et al., 2009; Дымов, 2020]:

1. Низовой пожар слабой или средней силы затрагивает верхний слой подстилки (OL, фрагментарно OF повреждается примерно на 2 см). Эрозия почвы незначительная или отсутствует и приурочена преимущественно к склонам [Wildland Fire..., 2005];

2. Верховой пожар не может распространяться без низового пожара, поскольку температура, необходимая для поддержания горения крон не будет поддерживаться [Raison et al., 1986; Valette et al., 1994; Wildland Fires..., 2005; Залесов, 2011; Ходаков, Жарикова, 2011], поэтому его воздействие на эрозию почвы наибольшее. Дополнительным фактором, ускоряющим эрозию, выступают свежие воронки вавалов;

3. Пожар любой силы в лишайниковом сообществе или сильный пожар при моховом напочвенном покрове вызывает удаление подстилки до ОН [Чебыкина и др., 2022]. Обычно такой пожар вызывает «пятнистость» территории гари [Дымов, 2020];

4. Удаление верхнего минерального горизонта пример экстремальных условий для почв – нарушения их нормального функционирования в экосистеме. Сила пожара зависит от типа, мощности и влажности подстилки, а также от выраженности рельефа [Scott et al., 2009; Moody, Martin, 2009; Doerr et al., 2009; Dunkerley et al., 2009]. Интенсивно протекает пожар при экспозиции песчаных почв – подзолов, подбуров, псаммоземов. В случае распространения суглинистых почв – глееземов, подзолистых и буроземов, он наблюдается на крутых склонах;

5. Удаление почвы до плотной породы – пример условий особой экстремальности для экосистемы после пожара. Эрозия в этом случае может сопровождаться изменением ландшафта, заполнением мест аккумуляции материалом и обвалом склонов.

Рисунок 2 демонстрирует скорость эрозии после большого пирогенного события, охватывающего разные растительные сообщества. Пусть сильное пирогенное событие началось в сосняке лишайниковом на юго-западе схемы. Столкнувшись с более влажной подстилкой сосняка зеленомошного, пожар стал терять свою интенсивность, что выразилось в мозаичном характере эрозии. Столкнувшись с оврагом (имевшим гидроморфное днище) пожар, смог, благодаря ветру, преодолеть его, но стал еще менее интенсивным. Болото же в центре схемы оказалось «иммунным» к эрозии, поскольку влажный торф опалился только сверху по краям болота.



Рисунок 2. Модель мозаичности территории после пожара по скоростям эрозии (участок тот же, что и на рисунке 1). Внутри контуров указана относительная скорость эрозии. Буферная зона описывает постепенное изменение скорости эрозии [Wildland Fire..., 2005; Scott et al., 2009; Moody, Martin, 2009; Doerr et al., 2009; Dunkerley et al., 2009; Дымов, 2020]

Рисунок 3 показывает, как один и тот же элемент рельефа разного размера может способствовать мозаичности эрозии территории. На рисунке показано расстояние между кронами деревьев на противоположных сторонах оврага – с изменением расстояния в n раз вероятность распространения пожара на другой склон будет меняться.

Сможет пожар преодолеть расстояние (l) или нет, будет зависеть от следующих параметров:

1. Силы и направления ветра. Ветер может переносить горящие ветки и листву на противоположный склон элемента рельефа и усиливать эффект огненного шторма [Nobel, 1991; Viegas, Neto, 1991];
2. Интенсивности пожара, которая будет определять количество горящих материалов, переносимых ветром, которые влияют на вероятность образования нового очага пожара на противоположном склоне [Pafford et al., 1991];
3. Растительности территории, почвенного покрова, их влажности и типа. Почвенный покров на противоположном склоне определяет вероятность возникновения нового очага низового пожара. Если загорелись только кроны, то без низового пожара верховой вскоре утихнет [Viney, Cathpole, 1991; Ryan, Frandsen, 1991; Cathpole, et al., 1991; Brown, Sieg, 1996].

Интенсивность водного и ветрового переноса частиц почвы на склонах депрессий значительно превышает скорость эрозии на выположенном участке [Moody, Martin, 2009].

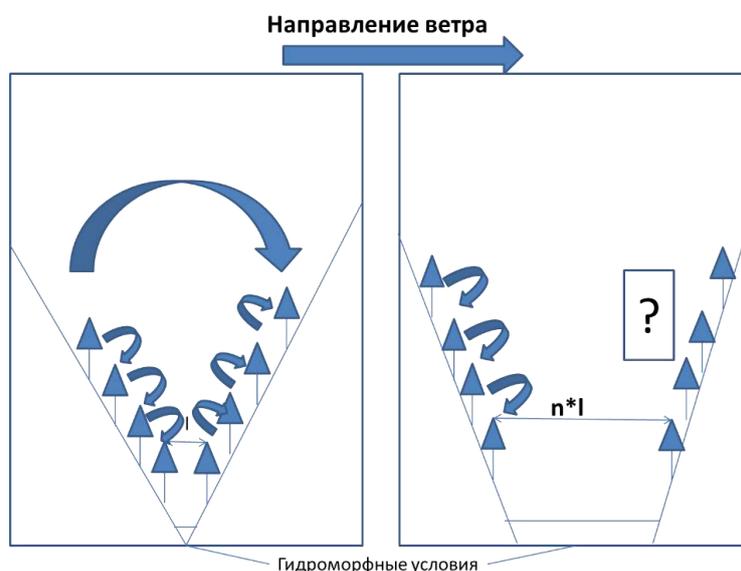


Рисунок 3. Иллюстрация вероятностного характера распространения пожара через элементы рельефа (вопрос на правой схеме) Большая стрелка на левой схеме показывает переход фронта пожара на противоположный склон депрессии.

J.A. Moody, D.A. Martin (2009) также показали, что скорость водной эрозии суглинистого материала, после достижения критической силы отрыва частиц силами водной эрозии, может быть выше, чем песчаного, за счет перемещения целого пласта материала. Масштабный оползень может привести к послепожарным селям на крутых склонах. Лабораторные опыты показали, что мелкие частицы (глина) более способны к переносу, чем

грубые, но имеют большие критические скорости отрыва [Scott et al., 2009]. Сеть каналов и ручьев, а также их положение на склонах определяют масштабы эрозии продуктов пожара. Попадание мутного осадка в реки через сеть притоков может вызвать ухудшение качества воды, уменьшить количество кислорода в водоемах и отравить продуктами пожара водные организмы [Dunkerley et al., 2009; Wohlghmuth, 2009].

Если ветровая эрозия может переносить частицы на большие расстояния на месте обнажения песчаного почвенного горизонта, по механизму сальтации, то скорость и расстояние водной эрозии зависит от наличия мест аккумуляции материала. Рельеф, где единственные неровности пристволовые понижения и повышения не будет иметь высоких скоростей водной эрозии. Суглинистый и глинистый материал подвержен ветровой эрозии только после высыхания.

Наличие растительности на склонах, даже обгоревшей, но с живой корневой системой, также существенно препятствует переносу материала, задерживая его смыв [Moody, Martin, 2009; Dunkerley et al., 2009; Wolghemuth et al., 2009]. Исследователи отмечают большую роль шероховатости поверхности, создаваемой растительностью, в сопротивлении почвенной эрозии [Robichaud, 2009; Beyers, 2009]. Слой хвои, опавший с деревьев на первый год после пожара, значительно замедляет эрозию и носит название «естественное мульчирование» [Robichaud, 2009; Bautista et al., 2009; MacDonald, Larsen, 2009]. Подсчитано, что с восстановлением растительного покрова объем эрозии с каждым годом падает на порядок величины (например, 7,0 т/га – 0,7 т/га) [Robichaud, 2009; Beyers, 2009], и на 3-4-ый год становится незначительным.

Вывалы деревьев ускоряют эрозионные процессы. Вывал древесных пород может произойти через некоторое время после пирогенного события или во время его [Peterson et al., 1991]. На эрозию почвы влияет площадь воронки и объем мелкозема на комле дерева. Вывалы оказывают огромное влияние на лесные системы – они ведут к высокой степени турбированности лесных почв [Васенев, Таргульян, 1995], способствуют раздуву минерального материала с комля, а также перераспределению и погребению продуктов пожара [Lertzman et al., 2002; Лойко и др., 2022].

Температура горения может рассматриваться как фактор послепожарной эрозии. Тонкие размерные фракции, удерживаются между собой цементирующими веществами (органическими и неорганическими) и физическими силами. При температуре 300-400 °С органические вещества, связывающие почвенные частицы, могут разрушаться, способствуя их отрыву. В случае сильных пожаров, с температурой на поверхности почвы 600-700 °С происходит наоборот, спекание тонких частиц в значительно более грубые, что замедляет

эрозионные процессы. Этот процесс сопровождается нарушением исходной структуры агрегатов, затруднением прохождения по почвенным порам воды и воздуха [Ubeda, Outeiro, 2009; Бобровский, 2010].

Так как углистый материал играет особую роль в изменении физических и химических свойств гарей, мы подробнее остановимся на его свойствах и характере миграции [Scott et al., 2009; Abney, Behre, 2018]. Совокупность всех углистых частиц будем называть концентрацией антракомассы, и определять в процентах по весу или в ppm (миллионных долях) [Carcaillet, Thinon, 1996]. Разделим углистые частицы на две размерные фракции: макроуголь и микроуголь [Carcaillet, Thinon, 1996; Scott, 2009; Новенко и др., 2021]. Деление угля на предложенные группы в литературе условно – обычно размеры микро- и макроугля принимаются за ≤ 65 и ≥ 125 мкм соответственно. Промежуточные фракции могут относиться как к макро- так и к микроуглям в зависимости от целей исследования. На практике к макроуглям обычно относят фракцию $\geq 0,25$ и $\geq 0,5$ мм [Carcaillet, Thinon, 1996], т. е. визуально видимую фракцию, которую можно отделить механическим просеиванием. Мы рассмотрим следующую классификацию:

1. Макроуголь – отдельные углистые частицы в пределах более 0,5 мм. Макроугли часто встречаются в пирогенных горизонтах с содержанием углистых частиц более 1-5% (глава 4 работы) и таких пирогенных морфонах, как заполненные углем вывалы. Визуально определяются как отдельные частицы [Carcaillet, Thinon, 1996; Бобровский, 2010, Лойко и др., 2022].

2. Микроуголь – отдельные углистые частицы менее 0,5 мм. Микроугли, активно переносятся огненным штормом и ветром – частицы менее 65 мкм могут быть найдены за тысячи километров от места пожара [Simoneit, 2002; Scott, 2009; Новенко и др., 2021]. Углистые частицы также обладают высокой плавучестью и могут аккумулироваться в соседних болотах, попадать в реки и моря в приморских зонах. Визуально могут диагностироваться как серый цвет в почвенных горизонтах;

При активизации почвенной эрозии происходит активное перераспределение углистых частиц в рельефе. Еще во время пожара частицы угля переносятся огненным штормом, причем в зависимости от силы шторма возможен перенос как микро- так и макрочастиц частиц и даже зольных элементов [Certini, 2005; Scott, 2009]. Отдельные углистые частицы переносятся с массой эродированной почвы (массовый перенос) [Cedra, 2009]. Интенсивная почвенная эрозия ведет к ускоренной миграции углистых частиц вниз по склону, с дальнейшим их отложением у подножия повышений или попаданием в водотоки [Scott, 2009].

Углистые частицы перемещаются в локальные понижения в пределах территории гари (русла ручьев, западины, воронки и т.д.). С течением времени они измельчаются и окатываются вследствие физическо-химического (изменение влажности, температуры и механические турбации), биологического разрушения и турбаций от вывалов, перемещаясь не только субгоризонтально, но и субвертикально в почвенный профиль [Бобровский, 2010; Дымов, 2020; Лойко и др., 2022].

Вывалы, способны перераспределять углистые частицы как относительно равномерно по почвенному профилю, так и создавать морфоны особой формы, провернутой и не провернутой, в зависимости от характера и глубины корневой системы, породы дерева и гранулометрического состава почв [Lertzman et al., 2002; Бобровский, 2010; Дымов, 2020; Лойко и др., 2022]. На основе метода определения радиоуглеродного возраста разработан способ определения среднего интервала педотурбаций для однородных лесных массивов, где главным фактором, перемещающим уголь, являются вывалы [Gavin, 2003]. Метод построен на распределении Вейбулла.

Для определения параметра среднего интервала турбаций (СИТ) следует сначала вычислить часть территории, не испытывающей турбации за время t (лет) – $A(t)$ [Gavin, 2003].

$$A(t) = \exp[-(t/b)^c]$$

b – параметр затухания экспоненты;

c – коэффициент формы распределения (1 – отрицательная экспонента; >1 – резко убывающая функция).

Далее можно переходить к расчету СИТ турбаций:

$$\text{СИТ} = b \cdot \Gamma^{1/c+1}$$

Γ – гамма распределение.

Скорость СИТ зависит от состава и здоровья древесных пород. В рассматриваемой работе средний СИТ составил 920 лет [Gavin, 2003]. Угли в подстилке на глубине до 10 см имели максимальный возраст 2000 кал. л. н.; угли из минерального профиля с глубины около 30 см – от сотен лет до 12000 кал. л. н., что говорит о значительном влиянии вывалов на перераспределение и сохранение угля [Gavin, 2003]. Другими исследователями также отмечена роль подгоризонта ОН подстилки и верхних минеральных горизонтов как барьера в вертикальном перемещении углей [Scott et al., 2009; Бобровский, 2010; Дымов, 2018, 2020].

Фракция антракомассы ≥ 5 мм самая малоподвижная, поэтому наличие углей такого размера, вместе с другими фракциями, связывают с локальными пожарами, прошедшими на расстоянии в пределах километра. Обычно углистые частицы распределяются по размерному

градиенту от территории гари – чем дальше от гари, тем меньше частицы [Scott, 2009; Moody, Martin, 2009].

Прослеживается изменение интенсивности постпирогенных эрозионных процессов в течение голоцена. На севере ЕТР А.А. Гольева (2008), на основании анализа угля при микробиоморфном анализе погребенных пирогенных прослоев, показала значительную роль пожаров в запуске наиболее интенсивных эрозионных процессов в начале голоцена (9330±180 кал. л. н. (ИГ РАН 1748) по сравнению с другими его периодами.

Антропогенная деятельность влияет на пожары и постпирогенную эрозию через изменение уже рассмотренных в подглавах 1.1 и 1.2 факторов. В глобальном плане – через изменение климата [Masrur et al., 2018; Walsh et al., 2020; Zobitz et al., 2021]; в региональном и локальном плане через с/х деятельность [Engle, Stritzke, 1995], через изменение рельефа (Duru, 1995) и через пожарный менеджмент [Richardson et al., 1994].

1.2. Постпирогенная динамика свойств почв и растительности в северных экосистемах

В научной среде с течением времени происходила смена подходов к оценке влияния пожаров на почвенные условия. До 1960-1970 преобладали подходы, ограниченные изучением единичных факторов и параметров изменения свойств почв в результате пожара [Ahlgren, 1959; Арефьева, Колесников, 1964], но они не могли объяснить комплексное функционирование постпирогенных почв. Поэтому подходы сменились на изучение факторов почвообразования после пирогенного события в их временном и пространственном взаимодействии [Simard, 1991; Wildland Fire..., 2005; Certini, 2005; Ubeda, Outeiro, 2009; Raison et al., 2009; Бобровский, 2010; Дымов, 2018; Carcallet et al., 2022; Kuzmina et al., 2022]. Пожары влияют на все элементы биогеоценоза, включая: рельеф, почвы и организмы, т.е. биокосную, косную и живую его части [Вернадский, 1978; Бобровский, 2010; Чевычелов, Шахматова, 2018; Дымов, 2018, 2020; Walker et al., 2021; Горбач и др., 2021; Чебыкина и др., 2022].

Рельеф может управлять пожаром и/или вызываться им. Он может выступать как ограничитель интенсивности, устойчивости и силы пожара, или сформирован процессами эрозии. Изменения рельефа зависят от силы пирогенного события [Scott et al., 2009; Moody, Martin, 2009].

Растительность адаптируется к пожарам в зависимости от интервалов между ними и принимает соответствующий облик, уменьшая или увеличивая долю видов-пирофитов. Она

служит топливом для следующего пирогенного события [Бобровский, 2010; Shabaga et al., 2022].

Почвенные организмы реагируют на пирогенную активность очень резко – большинство микроорганизмов, умирают при температурах до 100 °С. Наиболее важные параметры, влияющие на их способность пережить пожар и сохранить видовое разнообразие: температура горения, устойчивость пожара и исходная влажность почвы и топлива [Марфенина, 2008; Mataix-Solera, 2009; Бобровский, 2010; Горбунова, 2022]. Большинство микроорганизмов придерживаются стратегии быстрого заселения гарей [Mataix Solera et al., 2009; Горбунова, 2022].

Все перечисленные выше параметры можно собрать в одну иллюстрацию цикла пирогенного события, от его драйверов, до последствий воздействия (рисунок 4). Схема построена при обобщении данных многих исследователей [Certini, 2005; Andrew, 2009; Moody, Martin, 2009; Cedra, Robichaud, 2009; Ubeda, Outeiro, 2009; Mataix-Solera et al., 2009; Scott et al., 2009; Doerr et al., 2009; Raison et al., 2009; Бобровский, 2010; Дымов, 2018, 2020].

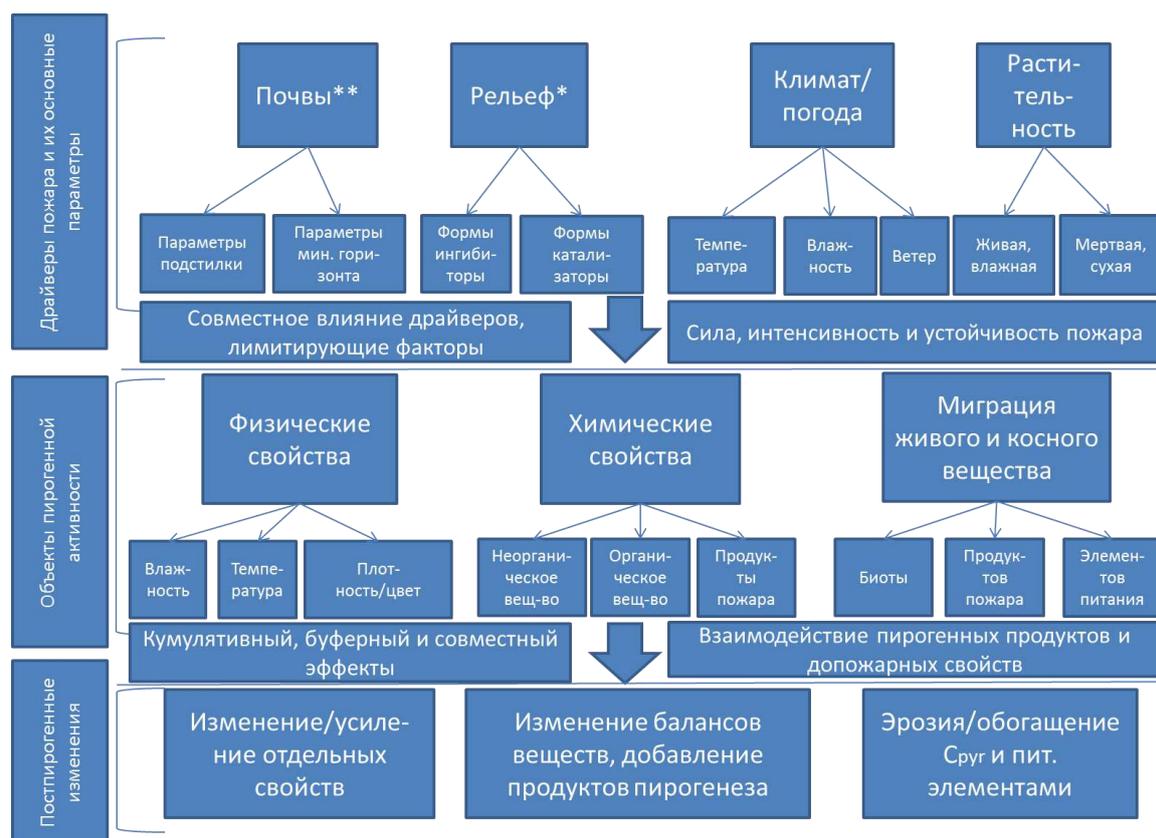


Рисунок 4. Графическая модель воздействия пожара на свойства почв. Каждый драйвер влияет на все объекты воздействия прямо или косвенно, также как и каждое свойство или объект пирогенной активности на сумму постпирогенных изменений

*Под ингибиторными формами рельефа понимаются естественные препятствия на пути пожара; под катализаторными – переводящие низовой пожар в верховой;

**Среди параметров почв можно также выделить ММП для северотаежных и тундровых пожаров. ММП могут быть рассмотрены как геологические породы или как почвообразующие, в данной схеме это не существенно

Схема, представленная нами на рисунке 4, иллюстрирует общие представления современных исследователей о пирогенезе и постпирогенной динамике как комплексе явлений и является общей для различных экосистем на разных континентах, с изменения роли каждого из представленных на рисунке блоков-драйверов. Связи между драйверами, объектами и изменениями нелинейные, разнонаправленные, характеризуются разной интенсивностью и обладают кумулятивным эффектом. Явление пожара слишком сложно для всестороннего охвата и усложняется тем, что исследователь часто видит только результат пирогенного события («черный ящик»). Поэтому для определения некоторых существенных свойств пожара проводят лабораторные или натурные опыты в масштабе локального горения. Проанализировав отечественные и зарубежные источники, мы выделили основные функции, характеризующие зависимость основных свойств пожара от его драйверов и друг от друга, в основе которых лежит «треугольник пожара» – сила, интенсивность и устойчивость [Maezumi et al., 2021].

Общие параметры среды заданы ее температурой (T_0 , °C), скоростью и направлением ветра на 10 м (U_{10} , м/с) и относительной влажностью (R_0 , %). Упомянем, что на погодные явления влияет атмосферное давление – p (мм рт. ст.). «Нулевые» параметры оказывают определяющее влияние на параметры пожара.

S (f , H , v , I , d , w , U , l , T) – где сила пожара (S , % мощности прогорания постилки) зависит, в основном, от топлива (f , коэффициент типа топлива) и энергии сгорания (H , Дж/г) – последние тесно связаны с и влажностью (v) в экосистеме тонкого и древесного топлива. На H влияет интенсивность пожарного фронта (I , кВт/(м*с)). Продолжительность пожара (d , час) прямо влияет на глубину прогорания. Внешние факторы определяются скоростью и направлением ветра (w , м/с), и температурой (T , K), потоком теплого воздуха – вортекса (U , м/с) и неоднородностью рельефа (l , м), которые влияют на возможность верхового пожара

$I = H*W*R$ – интенсивность по Дж. М. Байраму (1959), где R – скорость распространения пожара, а W и H – вес и горючесть топлива. I имеет «скрытые» параметры (w , f , v , T) и зависит от скорости и направления ветра (w , м/с), поскольку скорость ветра входит в параметр скорости распространения пожара (R , м/с). Влажность экосистемы и топлива (f_v , %), влияют на вес и горючесть ЛГМ (W и H). Температуры горения (T , °C), определяют скорость и степень переработки топлива, т. е. движение пожарного фронта и возможность догорания ЛГМ позади пожарного фронта.

D (f , i , h , v , w , U , l , T) или D (S , I) – где продолжительность пожара зависит от соотношения силы и интенсивности. Интенсивность определяет скорость распространения пожара и распределение его энергии по площади гари. В зависимости от экосистемы этой

энергии может быть достаточно, чтобы уничтожить все топливо за единицу времени и тогда продолжительность пожара будет лимитирована этим временем. Например, $D = t (S \rightarrow 100\%)$, однако в большинстве случаев ЛГМ уничтожаются пожаром не полностью. Степень уничтожения ЛГМ в большинстве случаев регулируется ветром (беглые пожары) и влажностью (обугливание).

Проанализировав эти зависимости, можно прийти к выводу, что сила пожара обоснована широким комплексом как внешних, так и внутренних факторов. Интенсивность пожара (по Байраму) в большей мере определяется свойствами самой экосистемы и ветра. Устойчивость пожара является самой комплексной характеристикой, поскольку зависит и от силы, и от интенсивности – от внешних и внутренних факторов.

Далее мы подробнее остановимся на объектах воздействия пирогаеза и их динамике – физико-химических и биологических свойствах почв на горях и горельниках.

1.2.1. Физические свойства постпирогенных почв

Большинство процессов, вызываемых пожаром, носят физико-химическую природу, поэтому деление на чисто физические и химические свойства условно, но применено нами в формате обзора.

Изменение физических свойств почв горяей связано с воздействием высоких температур на органогенные горизонты и верхнюю минеральную часть почвы (далее ВМЧ). Остановимся на вызванных пожарами изменениях в температурном и водном режимах, окраске и агрегированности почв.

1.2.1.1. Изменение показателей температуры почв на горях

Пожары меняют температуру почв прямо и непродолжительно – в процессе горения, и косвенно и продолжительно – изменением альбедо поверхности [Wildland Fire..., 2005; Certini, 2005; Ubeda, Outeiro, 2009; Дымов, 2020].

Температурное воздействие во время пожара можно рассматривать как часть интенсивности пожара по Дж. М. Байраму (1959) [Ubeda, Outeiro, 2009; Дымов, 2020]. Выделяют пять стадий горения, возникающих при разной температуре и зависящих от свойств топлива, причем часть из них идет на территории гари одновременно: предгорение или высушивание топлива; непосредственно возгорание; горение с открытым пламенем; тление или беспламенное горение и накаливание, т. е. каление угля или минерального

материала [Wildland Fire..., 2005]. Далее рассмотрены устойчивые пожары, в которых горение длится более 30 мин.

Низкотемпературные пожары – преимущественно низовые слабой силы и интенсивности, приводят к испарению влаги и легкому обугливанию, т. е. – стадиям осушения, возгорания и тления. Температура на уровне ВМЧ под мощной подстилкой 100-200°C. Среднетемпературные пожары – преимущественно низовые или смешанные средней силы и интенсивности, приводят к образованию большого пула углей и могут запустить эрозионные процессы. Горение идет как с открытым пламенем, так и с тлением – температура у верхнего края пламени может достигать до 1400 °С, на уровне почвы 200-300 °С. Высокотемпературные пожары могут приводить к спеканию минеральных и органических соединений почвы, улетучиванию больших количеств С, N и P, и переходу железа в форму оксидов в ходе накаливания [Certini, 2005]. Изменения в минеральном составе ВМЧ почв после пожаров и миграция органических веществ вниз по профилю может вызвать увеличение их плотности, вследствие спекания и цементации частиц мигрировавшей органикой при температуре может на уровне почвы >300, в среднем 400-600 °С [Certini, 2005; Дымов, 2018, 2020]. Температура на уровне почвы зависит от мощности и типа подстилки, в случае лишайниковой маломощной подстилки температура открытого горения и на уровне почвы будут близки.

Интенсивность прямого нагревания ВМЧ быстро теряется с глубиной и распространяется в пределах от 0 до 5-10 см (10-15% энергии идет на нагревание почв, тогда как остальное рассеивается в окружающую среду) [Raison et al., 1986; Valette et al., 1994; Wildland Fire..., 2005; Ubeda, Outeiro, 2009]. Наибольшую температуру испытывают первые два сантиметра. Уже на глубине пяти сантиметров температура редко повышается более, чем на 10 °С, а на глубине 7-10 см изменение естественных температур составляет 1-2 °С даже при сильных пожарах [Raison et al., 1986; Valette et al., 1994; Wildland Fire..., 2005; Ubeda, Outeiro, 2009; Бобровский, 2010]. Механизмы переноса тепла в почву в процессе горения разнообразны: радиацией, т. е. электромагнитными волнами, без физического контакта; конвекцией, т. е. раскаленными потоками воздуха; кондукцией, т. е. через вещество без его перемещения; перемещением горящих масс и процессами испарения/конденсации [Wildland Fire..., 2005]. Ведущую роль в нагревании почв играет последняя группа процессов. Температуры, при которой почвенные свойства необратимо меняются, получили название предельных температур этих свойств [Wildland Fire..., 2005].

В отношении живых организмов целесообразно рассматривать не только пиковые значения температур, но и продолжительные средние [Бобровский, 2010]. Повышенная

влажность почвы совместно с относительно небольшими температурами может привести к смерти множества микроорганизмов и корней [Mataix-Solera et al., 2009; Raison et al., 2009]. Продолжительная температура в 60 °С может стать причиной гибели корней деревьев при повышенной влажности, а кратковременная в 100 °С не всегда приводит к их отмиранию в сухой почве [Бобровский, 2010].

Было определено, что в среднем послепожарная температура почв гарей, обусловленная косвенным воздействием пожара, повышается на 4-6 °С вследствие изменения альbedo поверхности, до восстановления подстилки и растительности [Ubeda, Outeiro, 2009; Дымов, 2020; Shabaga, 2022]. Изменение температуры связано с параметрами окраски поверхности почвы на гарях, а также влажностью почвы [Mataix-Solera et al., 2009; Дымов 2020; Shabaga, 2022].

1.2.1.2. Изменение параметров водоотталкивающей способности почв после пожара

Охарактеризовать степень «водоотталкивания» почвенных агрегатов можно с точки зрения ее силы, которая определяет величину краевого угла смачивания и гидрофобные свойства, и устойчивости, которая определяет способность гидрофобных участков почвы сопротивляться продолжительному воздействию влажности, т.е. скорости промачивания [Doerr et al., 2009]. Было установлено, что при постоянной высокой влажности гидрофобный эффект, связанный с продуктами пожара, пропадает быстрее [Doerr et al., 2009]. Высокой влажностью в северных экосистемах можно считать >30% влаги по объемному весу – граница, при которой пожары резко уменьшают скорость распространения [Viney, Cathpole, 1991; Дымов, 2020].

Рассматривать изменения постпирогенной влажности обязательно нужно с оглядкой на ее естественный допожарный уровень. Отмечалось, что во многих случаях достоверного изменения в водоотталкивающих свойствах почв гарей, по сравнению с фоновыми экосистемами не было [Doerr et al., 2009]. Изменения в водном режиме ведут как к заболачиванию после пожара, так и к разрушению или передислокации водоотталкивающих продуктов пожара вглубь почвы с формированием гидрофобных прослоев [Doerr et al., 2009; Дымов 2018, 2020]. Косвенно на поведение влажности влияет смерть корневой системы деревьев, влияние этого параметра на увеличение или уменьшение влажности нелинейно и зависит от водного режима конкретной территории [Wldland Fire..., 2005; Dunkerley et al., 2009].

Изменения влажности в почвах гарей после пожаров определяются, гидрофобными продуктами, золой и смертью деревьев [Cedra, Robichaud, 2009; Doerr et al., 2009]. Зола влияет на влажность сразу после пожара. Так как она представляет собой минеральный остаток после полного пиролиза, то забирает часть влаги после первого ее поступления, создавая на короткий промежуток времени гидрофильные условия на поверхности почвы [Doerr et al., 2009]. Описанный выше эффект исчезает после первого выпадения осадков, и главную роль начинают играть гидрофобные свойства продуктов пожара. Углистые частицы, проникают в почвенные поры «запечатывая» их. Потоки воды «скатываются» по поверхности углистых частиц, что интенсифицирует процессы эрозии в несколько раз [Moody, Martin, 2009]. В случае если углистые частицы мигрировали или оказались погребены вследствие эрозии на несколько сантиметров вниз почвенного профиля, гидрофобные свойства проявляются на этой глубине как временный водоупор [Doerr et al., 2009].

Doerr et al. (2009) определил температуры горения растительного материала, ключевые для изменения влажности почв при устойчивых пожарах: 175-200 °C приводят к возрастанию водоотталкивающих свойств почвы; 270-300 или 400-450 °C, в зависимости от типа и размера топлива, приводят к постепенному появлению гидрофильных свойств вследствие превалирования золы после полного сгорания материала [Jones, 1993; Jones, 1994; Pyne et al., 1996; Guo, Bustin, 1998; Certini, 2005; Doerr et al., 2009].

Количество топлива и его тип определяют превалирующие продукты после пожара и их размер. Например, такой тип топлива как лишайники, оставляет после пожара преимущественно золу; древесные типы топлива редко подвержены полному сгоранию (влажная древесина, гнилые толстые стволы, мхи и др.) [Бобровский, 2010; Ходаков, Жарикова, 2011].

Таким образом, водоотталкивающие свойства на гарях характеризуются большой степенью мозаичности и могут быть обусловлены не только характером горения, но и водным режимом территории [Doerr et al., 2009].

1.2.1.3. Изменения окраски профиля почв после пожара

Наиболее часто пожары придают почве оттенки охристого, бело-розоватого и серого цвета [Бобровский, 2010; Дымов, 2020; Лойко и др., 2022]. Изменение окраски почв напрямую связано с устойчивостью и температурой пожаров, поскольку они определяют образование окрашивающих почву углистых частиц и измененных минералов [Wildland Fires..., 2005]. Гранулометрический состав почвы, а также объем и положение в пространстве топлива

определяют скорости и глубину латеральной и вертикальной миграции углистых частиц, т.е. распределение углей по поверхности и профилю почвы, что выражается в ее прокраске оттенками серого и углисто-черного.

Пожар слабой интенсивности может вызвать бурую окраску не до конца обугленного мха и древесного опада, слегка изменив цветность некоторых участков вверху почвенного профиля, что особенно заметно при пожарах на оторфованных территориях или торфяниках [Зайдельман, 2011].

Средняя температура пожара ведет к образованию темного угля, прокрашивающего поверхность и первый минеральный горизонт почвы в разные оттенки серого цвета, более темного, чем в случае потечности органического вещества [Bird et al., 2015; Maezumi et al., 2021; Li Gang et al., 2022; Лойко и др., 2022]. Продукты пожара в виде углей зачастую можно разделить просеиванием на фракции, но иногда их размеры настолько малы, что они плотно абсорбируются на поверхности минеральных частиц и отделяются только центрифугированием. Средняя и высокая температура пожара также ведет к образованию золы [Certini, 2005; Scott, 2009; Дымов, 2018, 2020] определяя светло-серые и серые тона на поверхности почвы и в верхней части первого минерального горизонта. Чистая зола после полного пиролиза представлена в виде белого остатка – температура ее образования в пределах 270-400 °C в зависимости от типа топлива [Certini, 2005; Scott, 2009; Дымов, 2018, 2020].

В ВМЧ почвенного профиля пожары наиболее высокой температуры способны вызвать характерные покраснения (розоватый оттенок в горизонте E и насыщенный красный цвет в ВНФ), связанные с переходом железа в форму оксидов, т.е. при стадии прокаливания, когда температура близка к 1000°C [Водяницкий, 2008; Зайдельман, 2011; Certini, 2009; Лойко и др., 2022]. Такая температура может привести к переходу минералов, содержащих железо, в форму ферримангнетиков – магнетита и маггемита, которые обладают заметной магнитной восприимчивостью, которую сообщают почве [Водяницкий, 2008].

В случае интенсивной послепожарной эрозии светлый минеральный горизонт E может эродироваться – в этом случае может диагностироваться выход на поверхность более темного горизонта ВНФ, свойственный почвам северной тайги – подзолам и подбурам, что также изменяет типичную для территории окраску почв [Бобровский, 2011].

В случае развития процессов оглеения по причине постпирогенного заболачивания в почвенном профиле могут возникать сизые оттенки. При исследовании болот также отмечалось заметное увеличение плотности торфяных пирогенных горизонтов [Dymov et al., 2022 (a); Dymov et al., 2022 (b)].

1.2.2. Химические свойства постпирогенных почв

Изменения химических свойств почв гарей зависят от температуры горения, состава растительности и допожарных свойств почвы. Рассмотрено поведение двух важнейших драйверов роста растений – минеральных элементов питания и органических веществ.

Все химические вещества, а также их смеси по отношению к температурам начала их трансформации (предельные или критические температуры) условно можно разделить на следующие группы [Wildland Fires..., 2005]:

- относительно чувствительные (изменяющиеся при 450 °С) – минералы;
- среднечувствительные (изменяющиеся от 100 до 400 °С) – органические вещества, соединения серы и азотсодержащие неорганические соединения;
- чувствительные (изменяющиеся при температуре менее 100 °С), такие как живые ткани.

Пожар меняет почвенные химические свойства как напрямую, трансформируя органического вещества и спекая минералы в процессе температурного воздействия, так и косвенно, через продукты пожара [Certini, 2005; Raison et al., 2009; Ubeda, Outeiro, 2009; Бобровский, 2010; Дымов, 2018, 2020]. Пирогенные события могут изменить подвижность тяжелых металлов в почвах, что может привести к загрязнению экосистемы [Чебыкина и др., 2022].

1.2.2.1. Пирогенная трансформация и миграция химических элементов

После пожара на поверхности почвы остается много зольных и органогенных элементов и веществ; некоторые из них важны для питания растений, другие относятся к поллютантам [Краснощеков, 2011; Краснощеков, Чередникова, 2012; Низовцев, Дымов, 2015; Цибарт и др., 2016; Кошовский и др., 2017; Язрикова, Кошовский, 2017; Дымов и др., 2018].

Часть органогенных и макроэлементов мигрируют за пределы гари. Например, часть входящих в состав золы Са, Na и К и подверженных наибольшим температурным изменениям органогенных элементов – С, N и Р – переносятся с частицами дыма, улетучиваются под воздействием высоких температур и выносятся с массой эродированного вещества [Certini, 2005; Raison et al., 2009; Ubeda, Outeiro, 2009; Пискарева и др., 2019]. Увеличение содержания С в верхних минеральных горизонтах, а также изменение воднорастворимого С в период восстановления экосистемы после пожара относится к наиболее важным пирогенным свойствам гарей и горельников [Dymov et al., 2022].

Вывод элементов из биологического цикла в результате пожара происходит несколькими путями (рисунок 5). Пути вывода элементов: (1) механический – посредством ветровой и водной эрозии (перенос ветром и твердофазный), (2) преимущественно

химический, посредством выщелачивания во время и после пожара (переход в раствор), (3) выносом с верховодкой и грунтовыми водами (переход в раствор), (4) преимущественно физически – улетучиванием от температурного воздействия. Наконец, вещества могут остаться в экосистеме, но принять другую форму [Ubeda, Outeiro, 2009; Zobitz, 2021].



Рисунок 5. Вывод элементов из биологического цикла под прямым и косвенным влиянием пожара

Насыщенность зольными элементами Ca, K, Na, Si, Mg и др., может быть высокой даже после низкотемпературного пожара, что стимулирует восстановление микроорганизмов и растительности на территории молодой гари. Органогенные элементы, такие как C, N и P могут перейти в недоступную растениям форму или улетучиться, что сокращает их общий доступный растениям пул. Азот особенно уязвим – улетучивается при температуре около 200 °C; улетучивание же соединений фосфора происходит при наиболее сильных пожарах (требуется около 900 °C для фосфатов). Свойства углерода зависят от его формы – средняя температура интенсивного улетучивания начинается от 300 °C [Ubeda, Outeiro, 2009; Raison et al., 2009].

Низкотемпературные беглые пожары повышают почвенное плодородие в бедных элементами питания экосистемах, реализуя дефицитные элементы из тканей растительности и опада, что способствует быстрому восстановлению экосистемы. При смене допожарной растительной сукцессии возможно долговременное улучшение свойств почв [Ubeda, Outeiro, 2009; Пискарева и др., 2019]. В богатых элементами питания экосистемах низкотемпературные пожары могут не оказать значительного влияния на свойства почвы и даже создать переизбыток элементов питания, который ограничит полезное действие других элементов. Переход N в недоступную для растений форму, например, может возникать при переизбытке P, который более устойчив к горению. Примеры изменения доступности элементов для растений – переход железа в недоступную форму при высоких температурах,

переход $C_{орг}$ в PuC и образование побочных продуктов пожара (ПАУ, сажа, спекшиеся слои и конгломераты «лисьего мха» и др.), нередко токсичных, канцерогенных и склонных к накоплению [Ubeda, Outeiro, 2009].

Высокотемпературные устойчивые пожары всегда ведут к потере элементов в результате эрозии или/и огненного шторма, при этом в наибольшей степени страдают бедные элементами питания экосистемы [Wildland Fires..., 2005].

Количество питательных элементов в пирогенных почвах, образованных пожаром, зависит от параметров пирогенных событий, которые зависят от климатических и локальных параметров. Следовательно, количество питательных элементов в пирогенных почвах, в экосистемах с частыми пожарами, зависит от климатических и локальных факторов [Wildland Fire..., 2005; Ubeda, Outeiro, 2009; Kuzmina et al., 2022], т.е. роль пожара в экосистеме определяется условиями-драйверами.

1.2.2.2. Основные химические показатели, изменяющиеся в почвах гарей

Будут рассмотрены такие химические показатели как рН, насыщенность основаниями, железо дитионитовой и оксалатной вытяжек (по Мера-Джексона ($F_{дйт}$) и Тамму ($Fe_{окс}$)) и их разность – слабоокристаллизованное железо.

Значения рН показывают условия среды протекания реакций в почве (Аринушкина, 1970; Теория и практика..., 2006). Большинство реакций, сопровождающихся формированием почвой «хорошей» структуры и увеличение доступности отдельных соединений для растений, т. е. увеличивающих почвенное плодородие, протекает в слабокислой и слабощелочной среде. Пирогенные события увеличивают значения почвенного рН, поскольку поступающая из мертвых растений зола подщелачивает почву [Старцев и др., 2017]. Следовательно, под влиянием пирогенных событий многие реакции меняют интенсивность и выраженность в почве, что в итоге отражается на почвенном плодородии.

Значения рН в почвах гарей растут за счет двух компонентов – карбонатов калия (поташ) и кальция (кальцит). В форму карбонатов и гидрокарбонатов также переходят другие элементы (Mg, Na и т.д.), но их доля в общем объеме золы, обуславливающей изменение рН – мала.

Поташ и кальцит обладают разной растворимостью. Поташ практически сразу растворяется (растворимость в воде 110,5 г/100мл при 20 °С), причем атом К может заместиться на Са при воздействии невысоких температур, что увеличит содержание кальцита [Canti, 2003; Александровский, 2007]. Кальцит, в свою очередь, плохо растворим (0,0014 г/100мл при 20 °С), поэтому может оказывать более продолжительное влияние на свойства

почв. Отдельные факторы повышают растворимость кальцита. Кальцит лучше растворим в кислой среде, обладает ретроградной растворимостью – лучше растворим при высоких температурах и давлении, т. е., например, при повторных пожарах, а также на повышение растворимости кальцита влияет размер и дисперсность его кристаллов, которые после горения имеют микроскопический размер [Canti, 2003; Каздым и др., 2003; Александровский, 2007]. Высокая растворимость карбоната кальция, обусловленная больше физико-химическими, чем химическими причинами, ведет к его интенсивному выщелачиванию и вымыванию [Canti, 2003; Каздым и др., 2003; Александровский, 2007]. Это объясняет, почему при обилии лесных пожаров рН многих северных экосистем все же остается кислым и слабокислым.

Для северных экосистем на севере ЕТР и СЗС показатель рН вырастает в среднем в интервале от 0,5 до 1,0 – 2,0 единиц для пожаров средней силы, например, изменение от 4,1 до 5,5 для сосняка лишайникового [Дымов, 2020]. Период пирогенно-обусловленного изменения рН различен в зависимости от параметров пожара, но на севере ЕТР рН обычно восстанавливается до исходных значений в интервале 4-6 лет [Бобровский, 2010; Дымов, 2018, 2020].

Увеличение зольных элементов в процессе горения отражается на показателе насыщенности основаниями. Насыщенность основаниями определяется отношением катионов оснований ко всему объему почвенной емкости поглощения [Аринушкина, 1970; Теория и практика..., 2006]. Насыщенность основаниями во многом определяет плодородие почв (и скорость его восстановления) на горях. В песчаных почвах севера ЕТР и СЗС, подзолах и подбурах, насыщенность основаниями на молодых горях может вырасти в 1,5 раза по сравнению с допожарным значением, в некоторых случаях в несколько раз (с 10 до 30 %) [Дымов, 2020], почвы при этом остаются ненасыщенными. Пожар обуславливает наличие Ca^{2+} и Mg^{2+} в обменных катионах в составе золы, что обуславливает большую часть насыщенности основаниями, причем в северных почвах ЕТР в основном увеличивается содержания Са, при слабо изменяющемся содержании Mg [Дымов, 2020]. Насыщенные в разной степени основаниями элювиальные и альфегумусовые горизонты, более благоприятны для корневого питания растительности, чем не испытывающие пирогенных событий песчаные бедные почвы [Canti, 2003; Каздым и др., 2003; Александровский, 2007; Бобровский, 2010; Дымов, 2018, 2020].

Минералы железа и алюминия чувствительны к пирогенному воздействию или послепожарному влиянию. Их трансформация сопряжена с высокими температурами пожара (>600 °С) и может сопровождаться миграцией железа и алюминия по профилю [Дымов, 2020]. Следовательно, трансформация определенных элементов начинается только при высоких

температурах горения. Повышенное содержание этих элементов, таким образом, может выступать прокси интенсивности пожара.

Исследователи отмечают возрастание как $Fe_{\text{дит}}$, так и $Fe_{\text{окс}}$ после пожара [Certini, 2005; Raison et al., 2009; Дымов, 2020]. На севере ЕТР, это увеличение достигает 2-х раз при среднетемпературных пожарах, например, с 0,02 до пожара до 0,11% после него в гор. Е и с 0,71 до 1,21% в гор. ВНФ, в сосняке-зеленомошниковом [Дымов, 2020]. При высокотемпературных пожарах содержание $Fe_{\text{дит}}$ в почвах гарей превышает ее содержания в фоновых почвах в 3-4 раза. Изменение в содержании $Fe_{\text{окс}}$ в тех же почвах изменяется с 0,06 до 0,12 % для сосняка лишайникового в гор. Е; с 0,28 до 0,86 % в сосняке зеленомошниковом в горизонте ВНФ [Дымов, 2020].

В ряде работ показано, что интенсивные пирогенные события могут вызывать увеличение содержания слабо окристаллизованного железа (определяется разницей $Fe_{\text{дит}} - Fe_{\text{окс}}$) и, в некоторых случаях окристаллизованного алюминия [Certini, 2005; Raison et al., 2009; Старцев и др., 2017; Дымов, 2020]. Изменение в формах железа и алюминия тесно связано с его валовым содержанием в почве на момент пожара, при его низком содержании и увеличение доли несиликатных форм железа будет незначительным.

В работах Дымова (2018, 2020), Бобровского, 2010, Certini (2005), Raison et al., (2009) и Ubeda, Outeiro, (2009) показано, что большинство химических свойств в результате пожара изменяются в верхней части профиля, охватывая первый, или первые два минеральных горизонта. Степень и глубину изменения свойств почв исследователи связывают с мощностью подстилки, почвенным типом, показателями влажности и водоотталкивающими свойствами почвы. Наиболее современным методом определения концентрации и запасов пирогенного углерода является метод бензолполикарбонновых кислот (БПКК), который заключается в выделении ароматических соединений жестким кислотным гидролизом [Дымов и др., 2021].

Таким образом, почвенные условия и баланс питательных элементов восстанавливаются значительно быстрее при слабых пожарах [Чевычелов, 1998; Doerr et al., 2009; Ubeda, Outeiro, 2009; Ferreira et al., 2009; Novak et al., 2012; Алейников и др., 2018].

1.2.2.3. Пирогенная трансформация органических веществ в почве

В этом разделе будет рассмотрена температурная трансформация органического вещества в PuC . Термин PuC , в широком смысле, объединяет все продукты пожара (золу, ПАУ и уголь) [Bird et al., 2015] и понимается как продукты пиролиза; в узком смысле пирогенным углеродом называют структурированные и дерадикализованные углистые

частицы – продукт высокотемпературного воздействия. Следовательно, трансформированные пожаром органические вещества могут быть грубо разделены на «чистый» пирогенный углерод и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) [Berghmans, Grieken, 2006; Дымов и др., 2014; Максимова и др., 2015; Низовцев, Дымов, 2015; Цибарт и др., 2016; Кошовский и др., 2017; Язрикова, Кошовский, 2017; Дымов и др., 2018; Пискарева и др., 2019; Северегина и др., 2020; Горбач и др., 2021; Hardy et al., 2022]. Наряду с устойчивыми соединениями, такими как арильные фрагменты, во время пожара могут формироваться и уязвимые к разложению в почве соединения: безводные сахаров и метокслированные фенолы [Dymov et al., 2022 (b)].

Пирогенный углерод – конечный продукт пиролиза, при котором ткани топлива (обычно дерева) трансформируются, т. е. после пиролиза идет полная деградация вещества, после которой остается только зола. В почвенном профиле пирогенный углерод входит в состав – угольков, одиночных, или собранных в прослой, примазок серого и черного цвета в верхних горизонтах и сажи [Бобровский, 2010]. Качественно, степень карбонизации отражает цвет и блеск углистых частиц, при низкой максимальной температуре карбонизации (далее МТК) можно наблюдать бурые тона, блеск отсутствует, при высокой МТК наблюдается угольно черный цвет и выраженный блеск углей. Качественное определение отражения на микроскопах активно применяется в промышленности. Количественно степень карбонизации можно проверить методами колебательной спектроскопии (инфракрасной, рамановской) с помощью лабораторного оборудования [Deldicque et al., 2016; Deldicque, Rouzaud, 2020]. Подробнее пирогенный углерод рассматривается в главе 2, посвященной информационной ценности продуктов пожара.

Понятия МТК и средней температуры пожара различны. МТК – наиболее высокая температура, которая воздействовала на углистую частицу за весь период ее от ее образования до настоящего момента. Средняя температура пожара сильно варьирует в зависимости от уровня ее определения и типа пожара и обычно оценивается как средняя температура на поверхности почвы за время прохождения пожарного фронта.

Образования угля, содержащего как органические остатки, так и графит, происходит при средней температуре пожара 350-400 °С (у почвы) при экспонировании в течение получаса (для сосны обыкновенной и сосны Банкса), исследования показали, что МТК при таком воздействии составляет около 750-780 °С. При этом воздействии клеточная структура ткани разрушается, но полной карбонизации, не происходит [Core, 1980; Jones, 1993; Pyne et al., 1996; Jones, 1994; Guo, Bustin, 1998; McParland et al., 2007]. Минимальная температура и время, необходимое для образования наиболее «чистого» угля сильно зависит от типа

древесины (лиственной или хвойной) и породы дерева. В процессе карбонизации «чистый» уголь, теряет 50% массы и увеличивает содержание углерода до 60% (подробнее в главе 2, в описании продуктов пожара) [Li Gang et al., 2022]. Полный пиролиз ведет также к улетучиванию $C_{орг}$, который входил в состав потерянной массы ткани растений, в виде CO_2 [Certini, 2005; Scott, 2009; Дымов, 2020].

Другая возможная причина полного пиролиза, – множество низкоинтенсивных пироженных событий за короткий временной интервал на одной территории – эффект «дожигания угля» [Certini, 2005; Scott et al., 2009; Bird et al., 2015]. Таким образом, на образование высокоуглеродистых углей влияет не только МТК, но и повторность температурного воздействия.

Пироженные ПАУ – органические вещества, изменившие свою форму и свойства под влиянием температуры. Они имеют ароматическую структуру, которая, при продолжении воздействия температур, дерадикализуется до образования графита. Для ПАУ характерны гидрофобные свойства. ПАУ образуются из лигниноподобных соединений и/или при тлении [Berghmans, Grieken, 2006; Дымов и др., 2014; Максимова и др., 2015; Низовцев, Дымов, 2015; Цибарт и др., 2016; Кошовский и др., 2017; Язрикова, Кошовский, 2017; Дымов и др., 2018].

Источники ПАУ разделяются на природные (петрогенные и биохимические), космогенные, пирогенные и антропогенные [Цибарт, Геннадиев, 2012; Геннадиев и др., 2016]. Вместе в почве могут находиться ПАУ разного генезиса, но одинакового состава, что затрудняет определение их источника [Цибарт, Геннадиев, 2012; Геннадиев и др., 2016]. Считается, что наибольшее количество ПАУ в природе имеет пироженное происхождение и образованно при неполном сгорании лигнина, смол и торфа [Цибарт, Геннадиев, 2012; Дымов и др., 2014]. Пример пироженных ПАУ: нафталин, фенантрен, ретен, флуорен, хризен, тетрафен, бенз(а)пирен [Цибарт и др. 2016]. В почвах торфяников может содержаться около 1000 нг/г ПАУ [Горбач и др., 2021]; в некоторых постпироженных сосняках-зеленомошных до 2000 нг/г, при этом фоновые значения в них могут варьировать от 50 до 200 нг/г [Дымов, 2020].

Некоторые природные системы, изначально обогащены ПАУ (например, торфяники, места вблизи нефтяных линз), или могут быть загрязнены человеком при добыче нефти и обслуживании техники; пожары только один из множества источников этих веществ, но во многих случаях – главный [Пиковский и др., 2014; Цибарт и др., 2016]. Подробнее о свойствах ПАУ написано в разделе 2.3.2.

ПАУ влияют на инфильтрационные свойства почв и здоровье организмов [Scott, 2009; Пиковский и др., 2014; Дымов, 2020]. Они, как и углистые частицы, ответственны за

увеличение водной эрозии с поверхности горельников [Cedra, Robichaud, 2009; Curran, Scott, 2009; Дымов, 2018, 2020], при этом продукты пожара зачастую попадают в близлежащие водоемы, вызывая их загрязнение. Многие из ПАУ являются канцерогенами и мутагенами, способными накапливаться в почве и организмах, например, бенз[а]пирен (Дымов, 2020).

Состав и количество ПАУ зависит от параметров пожара. Беглые пожары (рисунок 6) не ведут к их существенному образованию [Дымов и др., 2014; Цибарт и др., 2016; Язрикова, Кошовский, 2017; Дымов, 2018, 2020; Hardy at al., 2022]. Наибольший выход «тяжелых» (многоядерных) ПАУ характерен для продолжительного тления в условиях дефицита кислорода во время подземных пожаров. Накопление ПАУ происходит в торфяных горизонтах органометных почв на глубине 5-20 см и в глинистых и суглинистых почвах, при полном прогорании подстилки, на глубине нескольких сантиметров.

Наибольшее количество ПАУ, образующееся при горениях подстилки в еловых лесах связано с температурой 170 до 300 °С и постепенно снижается к 400 °С [Цибарт, Геннадиев, 2012; Bird et al., 2015; Низовцев, Дымов, 2015; Цибарт и др., 2016; Кошовский и др., 2017; Пискарева и др., 2019; Дымов и др., 2014]. Песчаные почвы не накапливают ПАУ в минеральном профиле по причине их миграции с верховодкой или в грунтовые воды [Цибарт, Геннадиев, 2012; Цибарт и др., 2016; Кошовский и др., 2017; Горбач и др., 2021].

По устойчивости ПАУ делятся на лабильные, семи-лабильные и устойчивые. Их деление мы подробнее мы обсудим во второй главе работы.

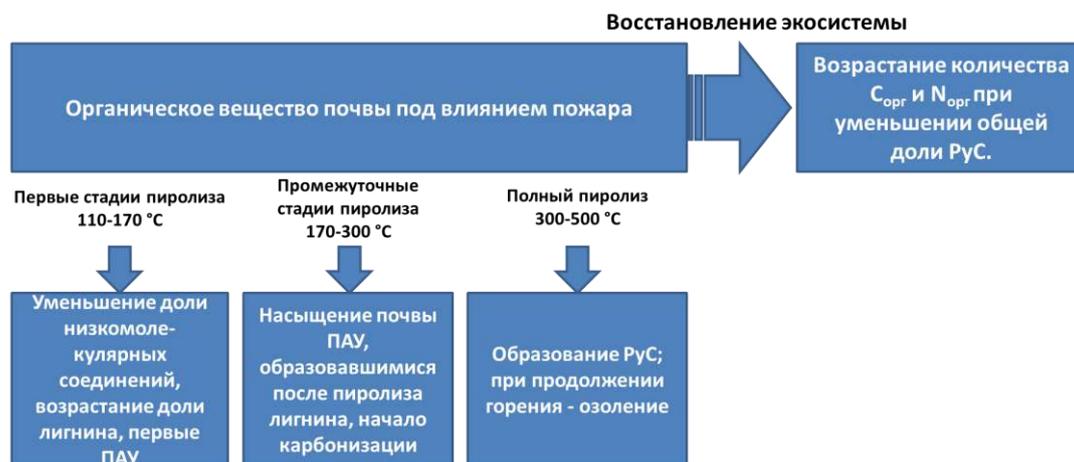


Рисунок 6. Трансформация почвенных органических веществ в зависимости от температуры горения. P_{УС} – пирогенный углерод, C_{орг}, N_{орг} – органический углерод и азот.

Выделяется четыре группы температурного воздействия пожара на органическое вещество в условиях продолжительного горения (1-2 часа) [Jones, 1993; Jones, 1994; Pyne et al., 1996; Guo, Bustin, 1998; Wildland Fire..., 2005; Cedra, Robichaud, 2009; Цибарт, Геннадиев, 2012; Геннадиев и др., 2015; Maezumi et al., 2022].

1. Обугливание (стадия проходит частично до пиролиза) – образует наименьшее количество ПАУ и Руч (температура около 100 °С);

2. Тление (первые стадии пиролиза) – начало образования лабильных ПАУ (температура 110-170 °С). Без доступа воздуха образуется максимальное количество ПАУ, поскольку отсутствие кислорода затрудняет полный пиролиз.;

3. Промежуточная стадия горения (последние стадии пиролиза) – общая доля и доля семи-лабильных ПАУ максимальна (эффект накопления), начало процесса графитизации;

4. Полный пиролиз – доля ПАУ снижается, остаются наиболее устойчивые формы, процессы графитизации продолжаются, начало образования золы (300-500 °С).

При продолжительных воздействиях температур выше стадии полного пиролиза (500-700 °С) происходит полное разрушение тканей растений, доля ПАУ снижается – озоление завершается.

1.2.2.4. Общие химические показатели минерализации и гумификации

Пожар значительно изменяет углеводородное состояние почв; как характер соединений, так и их количество [Геннадиев и др., 2015]. Косвенными показателями отношения процессов минерализации и гумификации постпирогенных почв является содержание С и N, а также $C_{орг}/N_{общ}$ [Wildlands Fire..., 2005; Raison et al., 2009; Дымов, 2020].

Содержание $C_{орг}$ в верхних минеральных горизонтах спустя 2-4 года после пожаров возрастает на 1.0-1.5% для $C_{орг}$ в подзолах под лишайниками в результате миграции органических веществ из подстилки [Дымов, 2020]. Вскоре после пожара интенсивно происходит процесс гумификации и содержание С может быть превышено на несколько десятых относительно допозарного уровня [Raison et al., 2009; Дымов, 2020]. Содержание азота может возрастать в результате послепожарного восстановления в органических горизонтах и, в меньшей степени, – в минеральных.

Значение $C_{орг}/N_{общ}$ часто рассматривается как следствие процессов гумификации и минерализации. Низкое количество $N_{общ}$, может быть обусловлено чисто физическими причинами – улетучиванием при горении [Certini, 2005; Ubeda, Outeiro, 2009]. Таким образом, нельзя оценивать отношение гумификация/минерализация сразу после пожара.

Низкой минерализации органического вещества соответствует широкое отношение $C_{орг}/N_{общ}$. На молодых горях может наблюдаться обратный эффект – сужение $C_{орг}/N_{общ}$, связанное с особенностями послепожарных сукцессий [Дымов, 2020]. Соответственно, слабые

пожары ведут к интенсификации процессов минерализации органического вещества. Этот эффект кратковременный и отражает быстрое восстановление растительности на гари.

1.2.3. Постпирогенные изменения биоты

Пожары воздействуют на экосистему неравномерно, поэтому на территории гари появляется мозаика поврежденных участков растительного покрова. Неповрежденные или слабоповрежденные участки гари являются, по сути, рефугиумами, которые способствуют ускоренному распространению растительности на ее территории [Thomas, 1991; Кутявин, 2018; Кутявин и др., 2020; Gaboriau et al., 2022].

Влияние пожаров уменьшает биомассу организмов. Устойчивость экосистемы к пожарам определяет степень ее деградации и скорость восстановления. Некоторые параметры устойчивости экосистемы: наличие банка семян в почве, наличие рефугиумов на гари и поблизости от ее границы, количество видов, способных к вегетативному размножению, общее разнообразие видов и количество пирофитов и пирофилов [Thomas, 1991; Beyers, 2009; Lloret, Zedler, 2009; Кутявин, 2018; Кутявин и др., 2020]. Многие из этих параметров определяются «коэволюцией» экосистемы и режима пожаров на территории [Thomas, 1991; Lloret, Zelder, 2009; Shabaga et al., 2022].

Пожары могут оказывать долговременное косвенное влияние на развитие биоты. Продукты пожаров могут содержать токсичные соединения, такие как ПАУ или отдельные элементы в зольных остатках (Fe, P, Ca и др.), чья концентрация выше оптимума [Certini, 2005; Низовцев, Дымов, 2015; Севергина и др., 2020; Горбач и др., 2021; Старцев и др., 2017]. В работе А.Ю. Горбуновой (2022) по влиянию пожаров на мезофауну показано, что после пожаров значительно снижается количество сапрофагов, в меньшей степени хищников и фитофагов. Длина пищевой цепи сапрофагов восстанавливается на 5-6 год после пожара, что обуславливается восстановлением пищевой базы вследствие миграции биоты с соседних территорий [Горбунова, 2022].

1.2.3.1. Постпирогенные изменения растительности

Пожар является необходимой фазой развития многих экосистем в разных географических районах, к примеру, сосняков России, некоторых прерий США, саванн Австралии, Африки и Средиземноморских кустарниковых сообществ [Raison et al., 1986; Peterson et al., 1991; Nobel, 1991; Tongway and Hodgkinson, 1992; Richardson et al., 1994;

Minnich et al., 1995; Ferrandes et al., 1996; Talon et al., 2005; Robichaud, 2009; Lloret, Zedler, 2009; Ferreira et al., 2009; Бобровский, 2010; Novak, Sadlo, 2012; Robin, Nelle, 2014].

Изменение растительности включает ее повреждение во время пожара и развитие нового послепожарного сообщества. Сценарии изменения растительности включают: ее частичное уничтожение, пирогенную автосукцессию (pyrogenic autosuccession) после ее полного уничтожения, закономерную смену растительных сукцессий (лес-пожар-поляна-лес-пожар) и условно необратимую смену растительной сукцессии после сильного пирогенного события (сосняк лишайниковый - ельник зеленомошник) [Tongway and Hodgkinson, 1992; Minnich and Bahre 1995; Clemente et al., 1996; Бобровский, 2010; Ходаков, Жарикова, 2011]. Степень пирогенной трансформации растительности зависит от параметров пожара, интервалов между пожарами, особенностей конкретной экосистемы, географического фактора (выраженного в климате и региональных особенностях) и антропогенного влияния (пожарный план и монопосадки) [Кутявин, 2018, Кутявин и др., 2020].

Долю сгоревшей растительности и микоризы (рисунок 7) отражает сила пожара (Wildland Fire..., 2005). Интенсивность горения и продолжительность горения топлива определяет выживание тонких корней и микоризы (Wildland Fire..., 2005). Например, летальная температура для тканей растений, незащищенных камбием, в сухих почвах 40 °С, во влажных 60 °С [Wildland Fires..., 2005; Mataix-Solera et al., 2009]. В тундровых и таежных экосистемах, например, ельниках в зоне ММП, даже слабые пожары могут привести к уничтожению или последующим болезням и дефектам древесного яруса.

Пожар в разной мере воздействует на напочвенный покров, кустарни(ч)ковый ярус, подрост и верхний ярус [Lloret, Zedler, 2009]. Древесные компоненты верхнего яруса в лесных пирофитных сообществах (pyrophilic biomes) обычно наиболее устойчивы к низовому пожару [Дымов, 2020], поскольку деревья имеют плотный камбий и некоторые из них способны выживать после значительных ожогов. Напочвенный покров в значительной мере обуславливает пятнистость пирогенного воздействия, так как в зависимости от его типа и влажности пожар распространяется неравномерно. Подрост и кустарни(ч)ки активно распространяются благодаря механизму вегетативного размножения и могут быстро восстановить свою биомассу [Alonso et al., 1992; Despain et al., 1996; Zedler, 2009; Vallejo et al., 2009], при этом их общий бонитет несколько снижается.

Возрастная стадия растительного покрова – молодняк, спелый и перестойный лес – значительно влияет на устойчивость леса к пожару. Возраст деревьев влияет на их способность выжить после ожогов, количество ЛГМ и, таким образом, общую пожароопасность территории [Ryan, Frandsen, 1991; Rhotermel, 1991].

Восстановление подстилки, даже на начальной стадии, играет ключевую роль для растительного сообщества [Чебыкина и др., 2021, 2022]. Большинство изменений физических свойств почв, ведущих к долговременным последствиям, связано с повреждением ВМЧ. Быстрое восстановление даже тонкого напочвенного покрова, или слой опада, способствуют сохранению температуры (изолирующий эффект), влажности и гранулометрического состава почв в оптимальном диапазоне значений [Viney, Cathpole, 1991; Cathpole, Cathpole, 1991; Богатырев и др., 2004; Bautista et al., 2009; Beyers, 2009; Robichaud, 2009; Wohlgenuth et al., 2009; Valejo et al., 2009; Каверин, 2022]. Но в некоторых случаях быстро восстановившаяся подстилка (>10 см) или мощный слой опада могут препятствовать прорастанию семян, что замедляет восстановление экосистемы и ведет к ее заболачиванию [Bautista et al., 2009; Дымов, 2018].

Пожар изменяет микроструктуру растительного покрова, повышая ее пространственную неоднородность. Например, уничтожение напочвенного покрова пожаром может способствовать прорастанию семян древесных растений и формированию участков леса среди луговой растительности [Ferrandis et al., 1996; Бобровский, 2010]. Пожар чаще проходит в сосновых лишайниковых и зеленомошных сообществах (сосна, главная древесная порода-пирофит (pyrophit) на севере ЕТР), вызывая образование полянок и прогалин. Согласно результатам исследования микробиоморфов в почвах луговая растительность, произрастающая после пожара, может иметь временный или постоянный характер развития [Гольева, 2008; Golyeva, 2016]. Таким образом, в зависимости от параметров пирогенного события и межпожарного интервала изменяется долговременная динамика растительного покрова – на поврежденной экосистеме восстанавливается либо исходный растительный покров, либо промежуточная стадия растительного сообщества, либо новый его тип [Alonso et al., 1992; Peterson et al., 1994; Kazanis, Arianoutsou, 1996; Daskalidou, Thanos, 1996; Sieg, Wright, 1996; Ojeda et al., 1996; Luis-Calabuig et al., 1996].

На севере ЕТР, в сосняках зеленомошных, интервал между пожарами составляет 40-50 лет, и изменение растительности включает стадию зарастания березой и осинкой после пожара [Бобровский, 2010; Ходаков, Жарикова, 2011; Дымов, 2020]; в сосняках лишайниковых – 10-15 лет. При сокращении межпожарного интервала возможно повышение скорости эрозии почвенного покрова, что ведет к нарушению оптимального баланса питательных веществ и, в итоге, полному уничтожению растительности и опустыниванию или деградации почв. При значительном превышении межпожарного интервала формируются «грязные леса», перестойные, затененные и мертвопокровные [Raison et al., 2009; Moody, Martin, 2009; Robichaud, 2009; Бобровский, 2010; Дымов и др., 2014; Shabaga, 2022]. Все межпожарные

интервалы представляют собой вероятностные усредненные интервальные величины и работают только при их проецировании на большие территории.



Рисунок 7. Сценарии изменения ярусов растительного покрова под воздействием слабых и сильных пожаров [по данным Мелехов, 1947; Tongway, Hodgkinson, 1992; Alonso et al., 1992; Despain et al., 1996].

Структура растительного сообщества ее видовое разнообразие определяет ее устойчивость. Видами растений, повсеместно связанными в своем развитии с пожарами на севере ЕТР, являются: сосна (*Pinus sylvestris*), иван-чай (*Chamaenérion angustifolium*), злаки и различные виды лишайников (*Cladina rangiferina*, *Cladina stellaris* и др.) [Бобровский, 2010; Дымов, 2020]. Распространены некоторые виды грибов – в основном в форме дрожжей, а также сморчки и строчки, часто встречающиеся на горях (Д.А. Никитин, персональное замечание). Воздействие пожаров ведет к разновозрастности или «ступенчатости» растительных сукцессий и определяет количество выжившего подроста [Кутявин, 2018].

ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ИНФОРМАЦИОННОЙ РОЛИ ПОСТПИРОГЕННЫХ ПОЧВ

Обзор информационной роли почв будет проходить по следующему плану:

1. Рассмотрение общих особенностей почвы, как пирогенного архива и ее информационной роли относительно записи пожаров на севере ЕТР [Таргульян, Александровский, 1976; Таргульян, Соколов, 1978; Александровский, 2008; Таргульян, 2008; Горячкин, 2010; Таргульян, 2019; Горячкин и др., 2019; Горячкин, 2022];

2. Обзор почвенной морфологии палеоархивов – отражение в морфологии почвенного профиля пирогенной динамики на севере ЕТР [Чевычелов, Шахматова, 2018; Bobrovsky et al., 2019; Лойко и др., 2022];

3. Общее описание продуктов пожара: золы, ПАУ и углей [Сычева, 1994; Гольева, 2008; Scott, 2009; Bird et al., 2015; Golyeva, 2016];

4. Представление продуктов пожара как объектов относительного и абсолютного датирования – их преимуществ и недостатков [Чичагова, 1985; Чичагова и др., 2008; Зазовская, 2016; Плихт и др., 2016; Deldique et al., 2016; Maezumi et al., 2021];

5. Примеры связи динамики экосистем и климата в голоцене с записью пирогенных событий в палеоархивах на севере ЕТР [Новенко, 2016; Новенко и др., 2014; Александровский, 2004; Александровский, Александровская, 2005, Александровский, 2008; Sejrup et al., 2016; Sjögren, 2021].

Описание информационной роли почв будет следовать следующей логике: основные понятия и концепции; рассмотрение пирогенной почвенной памяти на уровне почвенного профиля и на уровне продуктов пожара, которые используются для получения информации о его возрасте; распространение и роль пожаров в течение голоцена на севере ЕТР.

2.1. Особенности почвы как пирогенного палеоархива

А.А. Роде в 1947 году выделил различия между саморазвитием и эволюцией почв. Саморазвитие почв происходит в стабильных условиях среды без сильного воздействия внешних факторов. Эволюция почв происходит при активном участии внешних факторов. Если процессы, проходящие в почвенном профиле, протекают долго, в стабильных условиях среды, то они имеют постепенные границы и переходы в почвенных горизонтах, и поэтому трудно поддаются интерпретации. Процессы эволюции противоположны по скорости процессам саморазвития, поэтому гораздо проще поддаются определению – границы горизонтов и морфонов выражены. Наиболее слабые эволюционные изменения и наиболее

интенсивные процессы саморазвития занимают промежуточное положение по выраженности в почвенном профиле.

Следы саморазвития и эволюции почвы наслаиваются друг на друга в ее профиле, признаки некоторых особо интенсивных процессов остаются там «навсегда» [Роде, 1947; Александровский, 2008]. С развитием методов определения «абсолютного» и относительного возраста мы способны все более точно определять возраст и характер изменения почв [Чичагова, 1985; Сычева, 2008; Александровский, 2008; Зазовская, 2016; Zazovskaya et al., 2017]. Однако выделение морфологических признаков палеопроцессов все также остается и останется ключевым в практике почвоведения – без четкой теоретической базы наши технические достижения не могут обеспечить ясного понимания направлений почвообразования, вариантов развития экосистем, изменений интенсивности эрозии [Таргульян, Соколов, 1978; Таргульян, 2008; Таргульян, 2019; Горячкин и др., 2019; Горячкин, 2022]. Методология изучения почвы как пирогенного архива включает как морфологическое изучение почвенного профиля, так и определение «абсолютного» возраста пожаров [Gavin, 2003; Gavin et al., 2003; Wildland Fire..., 2005; Scott, 2009; Бобровский, 2010; Дымов, 2020; Горбач и др., 2021; Лойко и др., 2022 и др.].

Так как процессы саморазвития почв обусловлены стабильными условиями среды и почвы, развивающиеся под видами-пирофитами, формируются там, где межпожарный интервал стабилен на протяжении сотен и тысяч лет, то он может рассматриваться как процесс саморазвития. Следовательно, в пирогенных почвах, в которых пожар стал частью естественного функционирования процессы пирогенеза можно считать частью саморазвития (стабильными условиями), а не эволюции. Поэтому, на основании литературного материала и собственных исследований, мы предлагаем ввести термин «пирогенный паттерн». Пирогенный паттерн – это изменения среднего межпожарного интервала, обусловленные внешними и внутренними условиями данной экосистемы. Межпожарный интервал стабильно повторяется на протяжении длительного времени, измеряемого в поколениях вида растения-доминанта экосистемы, в определенной растительной ассоциации (сосняке зеленомошнике, сосняке лишайниковом и т. д.), в то время как пирогенный паттерн предполагает вероятностный характер пирогенного события (подробно описано в главе 5). В иностранной литературе есть аналог понятия межпожарный интервал – режим пожаров (fire regime), однако он в основном применяется при разработке пожарного менеджмента [Wildland Fire..., 2005; Bautista et al., 2009; Ferreira et al., 2009; Peter et al., 2009]. Термин «режим пожаров» предложено применять в отношении палеопирогенных событий. Данное деление

призвано подчеркнуть, что изменчивость пирогенного паттерна читается исследователем гораздо лучше, чем отдельные пирогенные события погребенных пирогенных слоев.

Соответственно, следы пирогенного паттерна должны слабо читаться в почвенном профиле и это справедливо для беглых низовых пожаров, которыми он представлен, в зоне распространения тяжелых почв (подробнее о типах пирогенного паттерна будет сказано в подразделе 5.4.3). Однако, т. к. продукты пожара накапливаются в почвенном профиле, множество пирогенных событий могут сформировать один горизонт аккумуляции продуктов неполного пиролиза, расположение которого определяется способностями к миграции углистого материала (глава 8), что часто наблюдается в зоне распространения песчаных почв.

С другой стороны, пожары нехарактерной силы, периодичности, в особых погодных условиях, могут быть отнесены к факторам, обуславливающим эволюцию почв [Scott, 2009; Бобровский, 2010; Дымов, 2020]. В течение почти 12000 лет, т.е. после глобальных изменений, связанных с окончанием ледникового периода, на территории севера ЕТР, проходили пожары. Большинство из них были частью пирогенного фона, но некоторые провоцировали послепожарную эрозию почвенного покрова [Чевычелов, Шахматова, 2018; Горбач и др., 2021; Лойко и др., 2022]. Послепожарная эрозия радикально изменяет условия почвообразования, поэтому не может быть отнесена к процессам саморазвития.

Типы записи палеоинформации и место почвы в них:

1. Книгоподобный тип записи характерен в основном для торфов и седиментов. Преимущества такого типа памяти в определенности распределения относительного и «абсолютного» возраста в стратиграфической колонке. Обычно, чем ближе слой к дневной поверхности, тем он моложе [Нейштадт, 1957; Елина, 1981; Горбач и др., 2021]. В слоях книгоподобной записи проще выделить датирующую фракцию для определения абсолютного возраста [Чичагова, 1985; Чичагова и др., 2008; Зазовская, 2016]. Большинство палеореконструкций климата, растительности, динамики пожаров и др. основано именно на этом типе палеоархива – он служит отражением региональных и глобальных процессов. Синлитогенные почвы (аллювиальные, вулканические и др.) могут рассматриваться как палеоархивы книгоподобного типа;

2. Палимпсестовый тип записи стал активно изучаться относительно недавно – в 60-70 гг. XX в. В.О. Таргульян и И.А. Соколов определили особенности почвы как архива природной среды, ввели понятие почвенной памяти, характерного возраста, и выделили их особенности [Васенев и Таргульян, 1995; Таргульян, Соколов, 1978; Таргульян, 2008; Таргульян, 2019]. Главная особенность почвенной памяти палимпсестового типа в том, что начиная с «0-момента», т. е. начала почвообразования, записи различных экзогенных и

эндогенных процессов накладываются друг на друга. Правильная их интерпретация может потребовать значительных усилий и особых методов, а также знаний о локальных условиях среды. «Стирающая эволюция» явление, свойственное палимпсестовому типу памяти – когда новый почвообразовательный процесс полностью стирает профиль записанной почвы или часть признаков предыдущих процессов почвообразования, может наблюдаться при постпирогенной эрозии [Таргульян, Александровский, 1976; Богатырев и др., 2004; Александровский, 2008]. Наличие стирающей эволюции говорит о резком разрушительном или трансформирующем воздействии на почвенный профиль. Палимпсестовый тип памяти отражает локальные процессы, специфичные для данной территории со значительной точностью.

3. Промежуточные типы записи формируются в условиях «ловушек» – депрессий в рельефе, где в течение длительного времени откладываются педоседименты. Отложение диагностических слоев или формирование морфонов, проходит по книжному типу и зависит от периодичности и выраженности наблюдаемого явления, но в последующем нарушается почвенными процессами, вывалами, тектоническими и просадочными движениями почвенных слоев и деятельностью почвенной мезофауны [Bobrovsky et al., 2019]. Палимпсестовый фактор менее выражен в профиле палеоархива в случае синпедолитогенного почвообразования, когда профиль палеопочвы не успел сформироваться полностью до погребения, запись информации может прерываться или даже менять логику записи возрастов – инвертироваться [Васенев, Таргульян, 1995; Abney, Berhe, 2018, Бобровский, 2010; Чевычелов, Шахматова, 2019; Bobrovsky et al., 2019; Carcalliet et al., 2022]. Причины нарушения записи в случае пирогенных палеоархивов севера ЕТР – послепожарная эрозия, перемещение горизонтов после первичного отложения, заполнение формы рельефа «немыми» отложениями и изменение формы самой депрессии, а также древние и современные вывалы [Чевычелов, Шахматова, 2018; Bobrovsky et al., 2019; Лойко и др., 2022].

Неразрывная связь между пирогенезом и эрозией отмечена многими исследователями [Дымов, 2008; Бобровский, 2010; Bobrovsky et al., 2019]. В почвах районов, подверженных периодическим пожарам, можно обнаружить в профиле запись несколько циклов эрозии и почвообразования [Чевычелов, 1997; Чевычелов, Шахматова, 2018]. Сложность в радиоуглеродном датировании пирогенных событий связана с выделением подходящего объекта датирования, достаточно устойчивого к разрушению в почве и легко экстрагируемого [Чичагова, 1985; Чичагова и др., 2008; Зазовская, 2016; Плихт и др., 2016], поэтому объектом датирования чаще всего выступает уголь [Gavin, 2003; Gavin et al., 2003; Scott, 2009; Бобровский, 2010; Bobrovsky et al., 2019; Лойко и др., 2022 и др.].

Для изучения пирогенных архивов используется комплекс методов и подходов для определения абсолютного возраста: радиоуглеродный, дендрохронологический [Мацковский, 2013; Matskovsky et al., 2016], палинологический [Елина, 1981] и археологический [Чичагова, 1985; Сычева, 2011, 2008; Александровский, 2008; Зазовская, 2016; Zazovskaya et al., 2017]. Каждый из методов имеет свои ограничения. Дендрохронологический метод применим в основном для датирования пожаров в пределах последних сотен и реже – последней тысячи лет (при наличии выживших деревьев соответствующего возраста), а в случае перекрестного датирования дендрохронологическую шкалу можно продлить на несколько тысяч лет [Мацковский, 2013; Matskovsky et al., 2016]. Палинологический метод требует аккуратной интерпретации и плохо подходит для локальных реконструкций – многие образцы на севере ЕТР, например, загрязнены пылью березы (*Betula* spp.). Сверка с археологическими данными требует нахождения стоянки или поселения поблизости от изучаемого объекта [Сычева, 1994]. Следы с/х деятельности часто сопровождают палеопирогенные архивы (например, следы подсечно-огневого земледелия) [Бобровский, 2010; Bobrovsky et al., 2019]. Многометровые слои в почве могут быть сложены из преобразованного деятельностью человека почвенного покрова, т. н. культурные слои. Археологические включения в почве приносят большую пользу при калибровке, уточнении и определении возраста этапов почвообразования [Самохина, 2017].

2.2. Морфология почвенных палеоархивов

Разделы 2.2.1-2.4.3, представленные в данной главе собраны на рисунке 8.

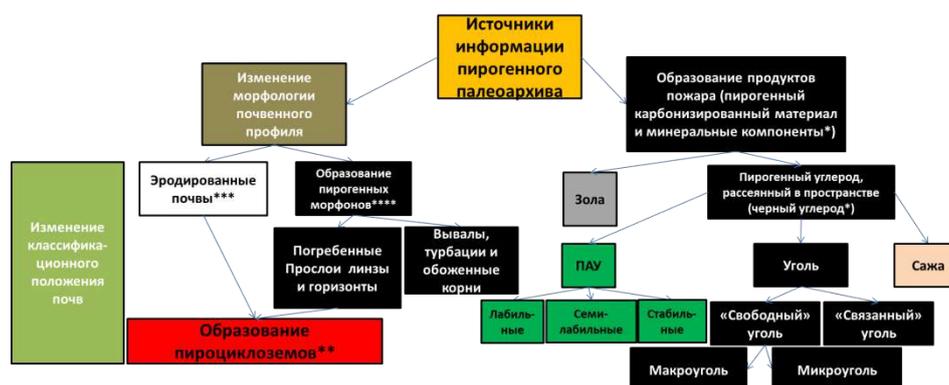


Рисунок 8. Схема основных информационно-значимых воздействий пожара на почвенный профиль (макроуровень) и объектов определения относительного и абсолютного возраста – продуктов пожара в почвенном профиле (микроуровень).

* - по М.И. Bird et al. (2015).

** - по А.П. Чевычелову и Е.Ю. Шахматовой (2018).

*** - по С.А. Сычевой (2008) – синпедолитогенное почвообразование

**** - по М.В. Бобровскому (2010).

2.2.1. Изменение классификационного положения почв после пожара

Изменение классификационного положения почв после пожара содержит информацию о пирогенном событии и его относительном возрасте; оно может быть обратимым, необратимым или частично обратимым. Обратимое изменение классификационного положения, возникшее сразу после пожара, как правило, не сохраняется в профиле древнего палеоархива; необратимое или частично обратимое сохраняется в профиле, как актуальных почв, так и палеоархивов. Исследователи отмечают следующие типы изменения почвенного покрова после пожаров:

1. Уменьшение подстилочных горизонтов, а также наличие углей в толще подстилочных горизонтов или между ними и ВМЧ [Gavin, 2003; Wildland Fire..., 2005; Lloret, Zelder, 2009; Бобровский, 2010; Краснощеков, 2011; Краснощеков, Чередникова, 2012]. Изменяется вид почв [КиДПР, 2004], диагностируется в течение 2-4 лет после пожара, обратимое изменение.

2. Заболачивание после пожаров на слабодренированных суглинистых и глинистых почвах – подзолистых, глееземах, а также почвах с близким уровнем грунтовых вод, ММП и горных пород; возможно, начало развития болота [Wildland Fire..., 2005; Бобровский, 2010; Robichaud, 2009; Дымов, 2020; Dymov et al., 2022 (a); Dymov et al., 2022 (b)]. Изменяется подтип и тип почвы [КиДПР, 2004] или дополнительный квалификатор [WRB, 2022]. Диагностируется в течение 1-2 лет после пожара, иногда до десятков лет – обратимое или частично обратимое изменение.

3. Опустынивание и деградация почвенного покрова – образование слаборазвитых почв типа псаммоземов и петроземов, а также появление условий почвенной экстремальности [Scott et al., 2009; Cedra, Robichaud, 2009; Горячкин и др., 2019; Горячкин, 2022; Дымов, 2020]. Может изменять все таксоны классификации до ствола включительно (первичного почвообразования) или основной квалификатор почв [КиДПР, 2004; WRB, 2022]. Диагностируется в течение 10-15 лет после пожара и более, может быть как частично обратимым, так и необратимым.

4. Изменение окраски горизонтов на серые тона связано с поступлением золы и преобразованием органического вещества температурой [Бобровский, 2010; Дымов, 2020]; красные оттенки обусловлены прокаливанием ВМЧ и последующем изменением минерального состава [Certini, 2005; Wildlands Fire..., 2005]. Изменение окраски горизонтов часто становится необратимым.

Каждый из описываемых признаков может стать постоянным вследствие устойчивого изменения направления почвообразования после пожара и сохраняться столетиями, а после

погребения – тысячелетиями [Таргульян, Александровский, 1976; Богатырев и др., 2004; Александровский, 2008]. С точки зрения информации наиболее ценны необратимые или частично обратимые изменения, сопровождающие наиболее сильные пожары. После погребения почв изменение направления почвообразования читается в палеоархиве по включениям, новообразованиям, признакам оглеения, ожелезнения, потекам органического вещества, по мощности горизонтов и другим факторам.

2.2.2. Эффект эродирования почв

В почвенных пирогенных палеоархивах может наблюдаться два типа записи ритмов пожар-послепожарная эрозия – аккумулятивно-ритмичный тип и аккумулятивно-синпедолитогенный тип [Сычева, 1994, 2008, 2011]. Аккумулятивно-ритмичный тип характеризуется следующей системой горизонтов: пирогенный прослой, полноразвитая погребенная почва и следующий пирогенный прослой. Аккумулятивно-синпедолитогенный тип записи характеризуется несколькими неполнопрофильными палеопочвами [Сычева, 1994, 2008, 2011]. Если в палеоархиве «не хватает» углистого прослоя или палеопочвы, присутствующих в соседнем – комплементарном – то это может быть связано с внешними факторами или неоднородностью прохождения древнего пожара [Сычева, 1994, 2008, 2011; Scott et al., 2009]. Следовательно, чтобы понять, какой тип записи превалирует, следует вскрыть несколько архивов, тогда мы сможем определить, какие почвы и слои присутствуют в одних разрезах и отсутствуют в других. Отсутствие углистых прослоев и почв несет информацию о неоднородности прохождения пожара и интенсивности постпирогенной эрозии [Сычева, 1994, 2008, 2011].

2.2.3. Образование пирогенных морфонов

Пирогенные морфоны можно разделить на две группы. Первая – линзы, прослой, пятна и скопления углистого материала. Вторая – протяженные пирогенные горизонты, визуально диагностируемые по цвету и физическим свойствам. Первая группа обусловлена ходами корней, вывалами и деятельностью почвенной мезофауны [Wildland Fire..., 2005; Gavin, 2003; Lloret, Zelder, 2009; Бобровский, 2010; Дымов, 2018, 2020; Bobrovsky et al., 2019; Лойко и др., 2022]. Вторая группа возникает, в основном, вследствие циклов послепожарной эрозии-осадконакопления [Wildland Fire..., 2005; Doerr et al., 2009; Abney, Berhe, 2018].

Морфоны первой группы несут ограниченную информацию о периоде пирогенеза, поскольку могут быть связаны с разными пожарами и нарушены ветровой или водной эрозией

[Doerr et al., 2009; Scott et al., 2009; Abney, Berhe, 2018; Carcalliet et al., 2022]. Уголь из морфонов первой группы, содержит информацию об абсолютном возрасте пожаров. Эта информация важна в получении общей информации о пирогенном палеоархиве.

Морфоны второй группы, образующие ясно различимые продолжительные слои, обладают рядом дополнительных свойств по отношению к первой группе:

1. Углистые прослойки часто образованы одним крупным пожаром или несколькими пожарами, которые близки друг к другу по времени [Лойко и др., 2022]. Это обусловлено тем, что сильный пожар, требуемый для образования такого типа морфона, сжигает подстилку и большую часть растительного покрова, так что новое пирогенное событие не может произойти пока запасы топлива не восстановятся [Wildland Fire..., 2005].

2. Углистые слои можно диагностировать в нескольких «ловушках» (воронках, оврагах и др.), так как они продолжительны в пространстве. Это может указать на масштабы и периметр пожара [Abney, Berhe, 2018];

3. Углистые слои обычно содержат разный по размеру пирогенный материал, что дает возможность исследовать его фракции и их латеральные и вертикальные градиенты [Bobrovsky et al., 2019; Лойко, 2022];

4. Пирогенные слои менее подвержены полному переотложению, особенно если они находятся в погребенном состоянии [Лойко и др., 2022; Бобровский, 2010; Bobrovsky et al., 2019];

5. Пирогенные слои отделяют друг от друга циклы почвообразования, таким образом, образуя пироциклоземы [Чевычелов, 1997, 1998; Чевычелов, Шахматова, 2018]. Пироциклозем содержит информацию о развитии почв в межпожарные этапы – изменении или сохранении классификационного положения почв во времени. Например, на территории ЕТР на легких почвах часто наблюдается повторение развития альфегумусовых или слаборазвитых почв после крупных пожаров в течение голоцена [Лойко и др., 2022].

Таким образом, если морфоны первой группы дают общее представление о пирогенной истории территории с момента первого вывала-морфонообразователя, то морфоны второй группы позволяют делать заключение об отдельных пирогенных периодах.

Пироциклоземы дают наиболее полное представление о роли пирогенеза в почвообразовании, его направлении, интенсивности и особенностях [Чевычелов, 1997, 1998; Чевычелов, Шахматова, 2018].

2.3. Описание продуктов пожаров в палеарктиках

При переходе от морфологии почвенного профиля к изучению собственно продуктов пожара мы обнаруживаем, прежде всего, их разнородность [Bird et al., 2015]. Наиболее разнородны минеральные и карбонизированные продукты горения [Certini, 2005; Wildland Fire..., 2005; Ubeda, Outeiro, 2009]. Минеральные продукты горения представлены золой; карбонизированные – ПАУ, углем и сажой [Bird et al., 2015].

Введем некоторые термины. Пирогенный углерод (PyC), рассматривается нами как зола, ПАУ, уголь и сажа; он определяется как продукт сгорания биомассы, т.е. как термохимически измененные (деградированные) растительные ткани [Bird et al., 2015]. Черный углерод может быть определен как синоним пирогенного углерода для рассеянных в окружающей среде карбонизированных материалов, в частном случае углей – твердых продуктов неполного пиролиза [Bird et al., 2015]. Сажа (копоть, нагар) – вторичный продукт пиролиза, конденсирующийся из газовой фазы. Сажу от свободных углистых частиц отличают малые размеры и сильная связь с минеральной фазой, от связанных углей – вторичная природа образования в ходе конденсации [Bird et al., 2015].

Как показано на рисунке 8, основные продукты пожара подразделяются на группы в зависимости от своего химического состава и структуры: зола состоит из неорганических компонентов; ПАУ отличаются от «чистого» угля сложным составом и неоднородной структурой и размерами. Внутреннее деление продуктов пожара производится по химическим свойствам, например, устойчивости у ПАУ [Hardy et al., 2022], размеру [Carcaillet, Thinon, 1996] и физическо-химическим свойствам [Wildland Fire..., 2005; Deldicque et al., 2016; Maezumi et al., 2021; Li Gang et al., 2022].

Анализ смесей продуктов пожара, таких как дым, затруднен из-за трудоемкой идентификации и экстракции. Их присутствие можно анализировать косвенно, через определение почвенных химических свойств [Certini, 2005; Ubedo, Outeiro, 2009; Raison et al., 2009].

Биоуголь (biochar) – продукт искусственного пиролиза – представляет собой карбонизированный остаток, подвергнутый пиролизу с заданными свойствами (температура, давление и др.). Биоуголь используется в целях сельского хозяйства как удобрение и подвержен биогенному разложению [Gerdelidani, Hosseini, 2018].

2.3.1. Зола

Определение золы, как продукта горения, вызывает споры среди исследователей [Forbes et al., 2006]. Мы определим золу как несгораемый минеральный остаток после полного пиролиза [Дымов, 2018, 2020].

Некоторые растения обладают особенностями, связанными с накоплением определенных зольных элементов – хвощи накапливают кремний, листва широколиственных пород – кальций, многие травянистые растения и злаки накапливают калий [Вернадский, 1978; Blank et al., 1996; Ubedo, Outeiro, 2009]. По этой причине, после полного пиролиза растений образуется зола определенного состава [Blank et al., 1996]. Анализируя состав золы, можно определить особенности накопления в растительности зольных элементов [Вернадский, 1978; Scott, 2009]. Основные зольные элементы часто представлены Са, К и Mg.

В горизонтах дневных почв зола диагностируется как частицы белого или серого цветов, или как неотделимая от минерального горизонта прослойка или языковатые морфоны в верхней части почвенного профиля [Бобровский, 2010]. Определение золы в палеоархивах остаётся спорным и сопряжено с трудностями, хотя в некоторых случаях прослойки золы сохраняются без изменений при погребении почвы [Bobrovsky et al., 2019]. Андерс и соавторы (1991) указывают, что химические и морфологические свойства золы отличаются в разные палеопериоды, однако местные колебания содержания элементов могут перекрывать их. Зола сложна для выделения и определения химических свойств конкретного типа растительности, также потому, что ее источником могут быть горючие ископаемые, например, нефть [Harvey et al., 2008].

Химический вклад золы значителен в верхних минеральных горизонтах актуальных гарей и выражается в увеличении рН и насыщенности основаниями, однако он сохраняется в пределах короткопериодной изменчивости почв (4-10, до 15 лет) в отсутствии погребения [Каздым и др., 2003; Canti, 2003; Александровский, 2007; Дымов, 2018, 2020]. Экосистемная роль золы, как источника минерального питания, выражается в ускоренном восстановлении почв после пожара [Wildland Fire..., 2005; Certini, 2005; Ubeda, Outeiro, 2009; Raison et al., 2009]. Есть данные о сохранении золы в некоторых торфяных горизонтах *Тrig* [Дымов и др., 2021].

Часть золы перемещается по воздуху, поднимаемая потоками горячего воздуха (вortexами) и огненного вихря – особой структуры воздушных потоков, зависящей от формы открытого пламени, силы и направления ветра [Ferguso, Hardy, 1994]. При этом зола может осаждаться на значительном расстоянии от места пожара [Mercer, Weber, 1994]. Учет такой

зола может быть полезен при расчете регионального баланса элементов [Вернадский, 1978; Глазовская, 2007; Raison et al., 2009].

2.3.2. ПАУ

ПАУ – органические вещества, испытавшие пироженное воздействие, вследствие чего они приобрели ароматическую структуру. Чем интенсивнее было термическое воздействие, тем меньше у ядер ПАУ алкильных радикалов и тем больше самих ядер (т. н. многоядерность) [Berghmans, Grieken, 2006; Дымов и др., 2014; Максимова и др., 2015; Bird et al., 2015; Низовцев, Дымов, 2015; Цибарт и др., 2016; Кошовский и др., 2017; Язрикова, Кошовский, 2017]. Наибольшее количество ПАУ в ходе пожара образуется при пиролизе лигнина [Sediment Records of..., 1997; Цибарт, Геннадиев, 2011; Геннадиев, Цибарт, 2013].

В почвах пироженные события оставляют после себя флуорены, пирены и нафталины, а в торфяниках тетрафены и нафталины [Цибарт, Геннадиев, 2012]. Различие между пироженными и другими ПАУ – петрогенными, антропогенными, вулканогенными – определяется по соотношению индивидуальных голоядерных и алкилированных веществ, например, содержание фенантрена и метилфенантрена среди всех ПАУ 0,5% для петрогенных и 1% для пирогенных почв [Цибарт, Геннадиев, 2012; Пиковский и др., 2014]. С течением времени пироженные ПАУ могут мигрировать из места образования или подвергнуться вторичному горению в ходе последующего пожара, что усложняет их интерпретацию.

Bird (2015) и Hardy (2022) с соавторами в своих работах показали, что в зависимости от пиков при проведении сканирующей калориметрии, выделяются разные группы ПАУ: лабильные – преобразованные пиролизом фенолы и сахара; семи-лабильные – ароматические соединения с количеством членов в кольцах <7 и стабильные – количество членов в кольцах >7 . Эти соединения всегда представлены в смеси, но в разных долях. Их разложение и преобразование начинается при нагревании от 300 °C и заканчивается приблизительно при 800 °C (при кратковременном воздействии) [Hardy et al., 2022]. Причина устойчивости трансформированных ароматических соединений к высокой температуре заключается в увеличении ковалентных связей между атомами углерода в полициклических соединениях.

Сумма лабильных и семи-лабильных ПАУ обычно не превышает 50-62%, остальные 38-50% представлены стабильными ПАУ (Bird et al., 2015). В условиях слабого лесного пожара содержание лабильных ПАУ (доля из всех остальных фракций) составляет меньше 5%, семи-лабильные ПАУ доминируют. В условиях пожара средней силы, при температуре 500 °C образуется до 10% лабильных ПАУ, до 40% семи-лабильных и до 50% лабильных. При

температуре >600 °С лабильная фракция доминирует. На основе этих соотношений можно определить примерные температуры пожаров.

Информационная ценность почвенной морфологии и продуктов пиролиза представлена на рисунке 9.

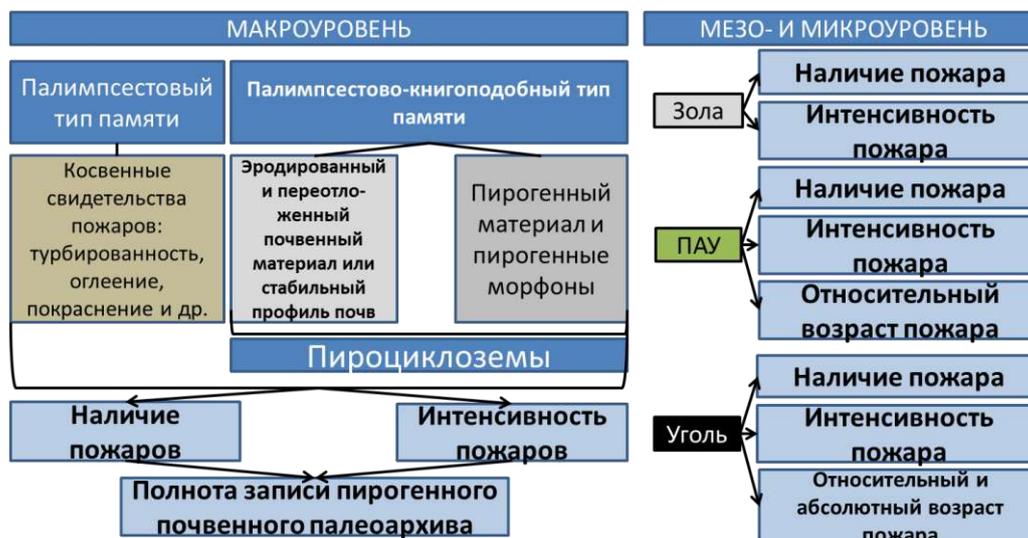


Рисунок 9. Информационная роль морфологии почвенного профиля и продуктов пожара. По работам: Scott, Jones, 1991; Lupia, 1995; Sediment Records of..., 1997; Lertzman et al., 2002; Каздым и др., 2003; Canti, 2003; Александровский, 2007; Scott, 2009; Killops, Massoud, 2009; Цибарт, Геннадиев, 2012; Bird et al., 2015; Геннадиев и др., 2015; Magne et al., 2019; Дымов, 2020.

ПАУ – наиболее токсичные из продуктов пожара, длительно сохраняющиеся и способные к накоплению в почве [Ravindra et al., 2006 Максимова и др., 2014; Пиковский и др., 2014; Цибарт и др., 2016; Кошовский и др., 2017; Язрикова, Кошовский, 2017; Горбач и др., 2021,]. Лабильные ПАУ могут разлагаться в течение десятка лет; семи-лабильные – десятилетий, а стабильные – тысячелетий, если находятся в агрессивной среде или на поверхности почвы; в погребенном состоянии способны сохраняться тысячи лет (Bird et al., 2015; Dymov et al., 2022 (a)).

2.3.3. Уголь и сажа

Уголь является следствием неполного пиролиза растительного или ископаемого органического материала. Структура угля меняется с температурой от «ячеистой» растительных клеток (до 300 °С), до моноструктуры «правильных ячеек» графита (более 700 °С) [Certini, 2005; Wildland Fire..., 2005; Bird et al., 2015; Li Gang et al., 2022].

Чем выше температура горения, тем больше уголь карбонизирован, т.е. содержит больше ароматических структур, четко ориентированных в пространстве, и меньше продуктов неполного горения [Bustin, Guo, 1999]. При полной карбонизации теряется около 20-50% массы древесины, а содержание углерода повышается на 47-60%, в зависимости от стадии

пиролиза [Li Gang et al., 2022]. В среднем, древесина состоит примерно на 70% из целлюлозы, наиболее уязвимой к горению и на 30% из лигнина, относительно к нему устойчивому. Сгорание целлюлозы начинается после вытеснения из растительного материала воды при достижении 100 °С – первого этапа температурного воздействия по отношению к растительным тканям. Второй этап – низкотемпературное горение, идет в интервале 110-270 °С и характеризуется горением целлюлозы с выделением смол и газов (которые могут конденсироваться в форме сажи). По достижении 300-350°С клетки древесины гомогенизируются, что говорит о третьем этапе горения, условно его можно назвать среднетемпературным [Core, 1980; Jones, 1993; Jones, 1994; Guo, Bustin, 1998; McParland et al., 2007]. При 400-500 °С на последнем этапе – высокотемпературном воздействии – начинает догорать лигнин и формироваться наибольшее количество угля в единицу времени [Pyne et al., 1996]. Последние продукты горения, не образующие углистых частиц, улетучиваются при долговременной температуре 430-500 °С [Pyne et al., 1996; Maezumi et al., 2022]. В зависимости от типа, размера и влажности топлива, периоды могут начинаться с разных температур – нами приведены средние значения для сосны обыкновенной. Размер углистых частиц определяется тремя факторами: температурой горения, продолжительностью горения и типом топлива [Li Gang et al., 2022]. Большинство температур более 700 °С достигаются в ходе активного горения, характеризующегося открытым пламенем или на стадии накаливания при открытом доступе кислорода и большом объеме и массе топлива [Wildlands Fire..., 2005].

Особенность сажи, как продукта пожара, в том, что она является вторичным продуктом, сконденсированным после улетучивания углерода; по свойствам сажа близка к связанному углю, но зачастую более плотно связана с минеральным веществом (нагар) [Scott, 2009; Bird et al., 2015].

Являясь остатком растений, уголь является биоморфом – частью некогда живого организма и может быть рассмотрен в рамках изучения новообразований и включений при морфогенетическом анализе почв [Гольева, 2008]. Определение микроскопических форм угля – один из частных анализов микробиоморфного комплекса почвы (МБК) [Гольева, 2008; Golyeva, 2016].

Влияние угля на почвенные свойства долгое время был недооценено, так как предполагалось, что весь уголь обладает инертными свойствами. Но с развитием новых методов стало ясно, что часть углей способна относительно быстро разлагаться в подходящей среде. Пирогенез – это необходимый этап круговорота углерода в биосфере [Scott, 2009; Bird et al., 2015; Gerdeliani, Hosseini, 2018; Deldique, Rouzard, 2020; Maezumi et al., 2021]. Разложение продуктов пиролиза повышает содержание доступных форм углерода в почве;

PyC может рассматриваться как часть почвенного органического вещества [Bird et al., 2015]. Погребенный PyC в почвенных палеоархивах надолго выводится из круговорота углерода, поскольку состоит из наиболее био-инертного, угля, образовавшегося при высоких температурах 800-900 °C (в частных случаях более 1000 °C) [Deldicque et al., 2016; Maezumi, 2021; Li Gang et al., 2022].

В.И. Вернадский (1978) определял процессы преобразования химических элементов в биосфере как «жизненный вихрь». «Жизненный вихрь» процесс неостановимой трансформации соединений, однако, по крайней мере, два частных продукта пожара – образованные при высоких температурах уголь и ПАУ – не трансформируются быстро наряду с другими органогенными веществами, а оказываются в позиции догоняющих. Это обуславливает их накопление, способность отражать параметры пожара и обуславливает важность определения их свойств как возможных загрязнителей окружающей среды, способных к накоплению.

2.4. Объекты относительного и абсолютного датирования в пирогенном палеоархиве: их преимущества и недостатки

Каждый из продуктов пожара обладает своими особенностями, связанными с его составом, размером и физико-химическими свойствами [Certini, 2005; Raison et al., 2009; Ubeda, Outeiro, 2009]. Наиболее часто в методах относительного и абсолютного датирования как объект исследования пирогенных почвенных палеоархивов применяется уголь [Зазовская, 2016; Zazovskaya et al., 2017; Dymov et al., 2022(b)], но возможна ситуация, когда большую информацию содержат другие продукты пожара [Scott, 2009].

2.4.1. Зола

Зола является самым неустойчивым по отношению к внешней среде пирогенным продуктом [Certini, 2005; Raison et al., 2009; Дымов, 2018, 2020]. По причине своего широкого распространения и особенностей состава, может нести в себе важную геохимическую информацию, как отмечал еще В.И. Вернадский (1978), Роде (1937) и М.А. Глазовская (2007).

Преимущества золы как источника информации в палеоархивах

1. Какое-то количество золы образуется даже в ходе самого слабого пожара – от веточек, злаков, OL подстилки и дожигания угля предыдущего пожара [Бобровский, 2010; Certini, 2005; Wildland Fire..., 2005].

2. В ряде почв прослойки золы распознаются визуально, благодаря своей связи с сажей, и связанными углистыми частицами [Бобровский, 2010; Дымов, 2018, 2020; Лойко и др., 2022]. В подзолах, подзолистых почвах, псаммоземах, аллювиальных песчаных почвах наличие золы особенно заметно [КиДПП, 2004; WRB, 2022].

3. Зола в чистых культурах растений отражает особенности их химического состава; в отдельные геологические эпохи (карбон, девон) зола отражает средний состав зольных элементов соответствующего временного периода [Вернадский, 1978; Scott, 2009, Глазовская, 2007].

Зола является крайне ненадежным источником информации о пожаре даже на молодых гарях, т.к. устойчивость золы зависит от таких локальных условий среды как: погода и микроклимат, наличие/отсутствие дренажа, скорость биологического круговорота и др. [Certini, 2005; Simoneit, 2002; Wildland Fire..., 2005].

Недостатки золы, как источника информации в палеоархивах

1. Зола разных растений перемешивается между собой еще на стадии огненного шторма [Wildland Fire..., 2005; Certini, 2005; Scott, 2009].

2. В условиях осадков для дневных почв и в случае поднятия грунтовых вод для палеоархивов информация, которую можно извлечь из золы стирается [Canti, 2003; Каздым и др., 2003; Александровский, 2007; Doerr et al., 2009; Scott et al., 2009; Raison et al., 2009; Abney, Verhe, 2018].

3. Корни растений и микроорганизмы активно поглощают зольные элементы [Certini, 2005; Raison et al., 2009; Mataix-Solera et al., 2009]; корни растений могут проникать вглубь почвенного палеоархива.

2.4.2. ПАУ

Устойчивость ПАУ к воздействию температур и биохимическому разложению неоднородна и зависит от температуры их образования, определяющей их состав [Цибарт, Геннадиев, 2012; Bird et al., 2015; Цибарт и др., 2016; Язрикова, Кошовский, 2017; Кошовский и др., 2017; Пискарева и др., 2019].

Преимущества ПАУ как источника информации в палеоархиве

1. Как и зола, ПАУ являются продуктом пожаров самой разной интенсивности, с температурой горения от 170 до 800 °С [Цибарт, Геннадиев, 2012; Bird et al., 2015; Цибарт и др., 2016; Язрикова, Кошовский, 2017; Кошовский и др., 2017; Пискарева и др., 2019].

2. По соотношению лабильных, семи-лабильных и стабильных ПАУ, можно определить относительную температуру пожара. Пожары с температурой горения 300-500 °С образуют максимум лабильных ПАУ (до 10%), больше 600 °С – максимум стабильных (менее 5%) [Bird et al., 2015].

3. Тяжелые вещества, например, лигнин, при горении трансформируются в тяжелые ПАУ. На основе этого факта можно разделять горение деревьев и трав. Есть несколько работ о продуцировании пожаром определенных ПАУ в разных типах растительности [Simoneit, 2002; Killops, Massoud, 2009; Цибарт, Геннадиев, 2012].

4. По изменению концентрации изотопа $\delta^{13}\text{C}$ в ПАУ можно определить тип фотосинтеза сгоревшей растительности (C_3 или C_4). При уменьшении концентрации ^{13}C на 7 ‰ диагностируются C_4 виды (т. н. толстянковые) [Bird et al., 2015].

По палеозаписям с наличием ПАУ можно отследить те пожары, которые не были широко распространены и интенсивны – локальные пирогенные события [Цибарт и др., 2016; Кошовский и др., 2017; Старцев и др., 2017; Язрикова, Кошовский, 2017; Дымов, 2020; Горбач и др., 2021]. Палеозапись с пирогенными ПАУ может зафиксировать сам факт пожара и помочь грубо определить растительность – C_3 или C_4 , древесная или травянистая.

Недостатки ПАУ как объекта получения информации

1. ПАУ могут быть обнаружены в палеоархивах только при условии быстрого погребения и последующей физической и химической изоляции, хотя они и более устойчивы, чем зола [Killops, Massoud, 1992; Bird et al., 2016; Горбач и др., 2021].

2. Чтобы оценить силу пожара с помощью ПАУ нужно знать их фоновые значения. Фоновые значения ПАУ древних ландшафтов будут носить вероятностный характер [Certini, 2005; Bird et al., 2015; Дымов, 2020].

3. Определение и расчет пирогенных ПАУ носит элемент пространственной неопределенности по причине пятнистого и очагового воздействия пожара на биом [Ходаков, Жарикова, 2011; Низовцев, Дымов, 2015; Bird et al., 2015].

4. Образование ПАУ зависит от типа топлива, поэтому они имеют локальные географические особенности, отличные для актуальных и древних пожаров [Bird et al., 2015; Scott., 2009].

5. ПАУ изменяются в случае прохождения нескольких пожаров – становится меньше лабильных соединений [Bird et al., 2015; Дымов, 2020].

6. Полный пиролиз не оставляет ПАУ [Wildland Fire..., 2005; Bird et al., 2015; Li Gang, 2022].

Хотя в среднем пирогенные ПАУ соотносятся с конкретным пожаром или пожарным периодом лучше, чем зола, они также подвержены переотложению, перемещению с водой и перемешиванию. ПАУ могут уверенно сообщить о наличии пожара или пожарного периода, дать представление о его относительном возрасте и об общем типе растительности.

2.4.3. Уголь

Как объект, для определения абсолютного возраста уголь, по сравнению с другими продуктами пожара характеризуется рядом преимуществ:

1. Легкая визуальная и лабораторная идентификация. Визуально уголь распознается в почвенном материале благодаря своему почти черному цвету с шелковистым блеском. В некоторых случаях отделение угля от вмещающей толщи может быть затруднено, особенно для торфяных, глинистых и темноцветных почв. В таком случае, распознавание угля возможно на ощупь, по остающимся серым следам на руках после сжатия или плотной структуре (в отличие от торфа), или с помощью методики отбеливания с 5-10% NaOCl в течение 24 часов [Горбач и др., 2021]. Описаны случаи нахождения в торфяниках ярко бурых минеральных прослоев 4-10 см («лисьего мха»), которые могут указывать на подземный пожар [Грачева, 2008; Зайдельман, 2011]. В морфологически оформленных неповрежденных углях, при увеличении под микроскопом можно найти анатомическую структуру сожженного фрагмента растения [Scott, 2009; Лойко и др., 2022].

2. Уголь обладает устойчивостью к изменению своей структуры биогенными, гидрологическими и, в определенной степени, механическими факторами [Scott, 2001; Certini, 2005; Scott, 2009; Wildland Fire..., 2005, Dymov et al., 2022(b)]. Устойчивость угля зависит от степени пиролиза растительных тканей [Hardy et al., 2022; Li Gang et al., 2022], т.е. от интенсивности температурного воздействия и длительности пожара. Так, уголь образованный до 300 °C неустойчив по отношению к биогенному и механическому воздействию и подвержен биогенному разложению в актуальной почве, теряя до 10% по массе в год; уголь, образованный при >500 °C сохраняется сотни лет до своего погребения и при погребении может сохраняться тысячи и миллионы лет [Li Gang et al., 2022]. Это ведет к тому, что в древних седиментах сохраняется только уголь, образованный при высокой температуре [Li Gang et al., 2022].

3. Возможность точнее определить границы абсолютного возраста угля (среднее $\pm \sigma$), по сравнению с органическим веществом связано с отсутствием эффекта обновления, свойственным последнему [Scott, 2009; Плихт и др., 2016; Чичагова, 1985; Чичагова и др.,

2008; Zazovskaya et al., 2017; Сычева, 2008]. Углистые частицы не требуют дополнительного выделения датирующей фракции (из состава гумуса) и легко подготавливаются к датированию [Плихт и др., 2016; Лойко и др., 2022].

4. Угли отличает сравнительная легкость отбора и морфологической интерпретации специалистом (антракологический анализ). Залегание углей в пирогенных палеоархивах либо приурочено к морфонам вывалов (первый тип), либо субгоризонтальное (второй тип), либо рассеянное [Сычева, 2008; Бобровский, 2010; Дымов, 2020; Scott, 2009; Лойко и др., 2022].

5. Современные методы позволяют получить калиброванную дату по одному крупному угольку [Bronk, Ramsey, 2009; Зазовская, 2016]. Однако радиоуглеродный метод является вероятностным, а пирогенный морфон может содержать углистый материал от несколько пожаров [Bronk, Ramsey, 2009; Reimer et al., 2013; Hua et al., 2013], поэтому, чтобы быть уверенными в результате, исследователи обычно сравнивают несколько дат, полученных из углистых частиц одного пирогенного морфона/горизонта – такой подход позволяет сузить неопределенность метода. Неопределенность, связанная с возрастом деревьев получила название «ошибки встроенного возраста» – она удревает даты пожаров в среднем на возраст дерева (от 50 до 200 и более лет) [Gavin et al., 2003; Bobrovsky et al., 2019; Лойко и др., 2022]. Минимизировать ошибку «встроенного возраста» можно статистическими методами [Дмитриев, 2009].

6. Возможность проверить данные возраста одного угля из отобранного образца данными комплементарного палеоархива [Gavin, 2003; Зазовская, 2016; Плихт и др., 2016]. Значительные пирогенные события представлены в палеоархивах (воронках, оврагах и др.) в разной степени комплементарно. Степень комплементарности зависит в основном от соотношения элювиальных и аккумулятивных систем (вмещающих «ловушек») разного порядка на площади гари – чем более стабильно их положение во времени, тем лучше сопоставимость записей разных разрезов [Moody, Martin, 2009; Scott, 2009].

7. Выборка образцов датирования в пирогенных палеоархивах обычно настолько велика, что определяется только внешними факторами, такими как финансирование и цель исследований [Scott, 2009; Simoneit, 2002; Bobrovsky et al., 2019; Куприянов и др., 2020; Лойко и др., 2022].

8. Датирование углей разных размерных фракций позволяет разделять региональные и локальные палеопожары [Carcaillet, Thimon, 1996; Clark et al., 1998; Sediment Records of..., 1997; Куприянов и др., 2020]. Географическая привязка пожара по его продуктам в палеоархивах основана на тех же принципах, что и в хронорядах современных пожаров (глава 1) и производится, главным образом, после анализа размерных фракций углей. Частицы угля

<125 мкм, если они не связаны физико-химическими силами с минеральной частью почвы, указывают на возможность регионального пожара; угли >125 мкм, могут указывать на локальный пожар или на интенсивную послепожарную эрозию; смесь микро- и макроуглей указывает на прохождение локального пожара; [The ecology of smoke particulates..., 1973; Sediment Records of..., 1997; Scott, 2009]. Распределение углистых частиц ветром после пожара имеет определенные закономерности, в зависимости от типа растительности, скорости ветра и внутренних параметров пожара, таких, как высота и температура пламени, что позволяет предсказать географическую область их выпадения [The ecology of smoke particulates..., 1973].

9. Анализ сгоревшей растительности в ходе антракологического анализа дает возможность проверять и составлять палеоклиматические реконструкции растительности [Вихров, 1959; Сычева, 1994, Мацковский, 2013; Golyeva, 2016; Семяк и др., 2018; Куприянов и др., 2020; Новенко и др., 2021, Лойко и др., 2022]. При сохранении морфологии углей антракологические атласы и руководства по определению микроморфологических свойств древесины помогают оценить ботанический состав сгоревшей растительности [Вихров, 1959; Scott, Jones, 1991; Lupia, 1995; Clark et al., 1998; Touflan et al., 2010; Golyeva, 2016]. Исследование сгоревших растений позволяет, по широкому спектру морфологических и анатомических данных, сделать выводы не только об органах и особых идентификаторах растений, но также получить информацию об их росте и условиях произрастания [Scott, 2000(b); Scott, 2001; Лойко и др., 2022].

10. Возможно определение максимальной температуры пожара по физическим параметрам угля. При инфракрасной спектроскопии только при высокотемпературном горении (500-600 °С и выше) спектры углей разных видов растительности начинают «сходиться» что говорит о полной деградации тканей [Maezumi et al., 2022]. Температурное воздействие можно оценить по отражательной способности углей – некоторые исследователи отмечают, что она увеличивается с ростом температуры [Scott, Jones, 1991; McParland et al., 2007]. Изменение коэффициента отражения с повышением температуры горения важное физическое свойство, обусловленное уменьшением несгоревшего остатка продуктов пожара в углистых частицах определяемое пока только для хвойных пород [Jones et al., 1991; Scott, Jones 1991; Guo, Bustin, 1998; Bustin, Guo 1999; Scott, Glasspool 2007; McParland et al., 2007]. Рамановская микроспектрометрия – современный метод определения температуры пожаров, основанный на обработке специфических для угля спектров с пиками D и G. По высоте этих пиков производится расчет максимальной температуры карбонизации углистых частиц [Deldicque et al., 2016; Deldicque, Rouzaud, 2020]. Подробный разбор метода в главе 3.

11. Точное определение ошибок метода по базам других палеоархивов [Зазовская, 2016; Куприянов и др., 2020; Matskovsky et al., 2016].

Хотя преимущества угля как объекта датирования сравнительно весомы, он имеет ряд существенных недостатков

1. В отдельных случаях полевое определение угля затруднено. Это касается влажной сфагнутой подстилки или торфяного горизонта, глубин торфяных залежей и почв с высоким содержанием роговой обманки. Отделение угля от почвы возможно только методами просеивания, отбеливания, разделения по плотности в сверхплотной жидкости и центрифугирования [Carcalliet, Thinon, 1996; Golyeva, 2016; Куприянов и др., 2020; Горбач и др., 2021].

2. Уголь и обгоревший материал имеют разные свойства, но не имеют четкой границы между собой. Проблемная область относится к границе тления/низкотемпературного горения (до 300 °С) и часто встречается у обгоревшего растительного материала после беглых пожаров. Обгоревший материал подвержен разложению, его температура не может быть определена методами отражения и микроспектрометрии [Scott, Jones, 1991; McParland et al., 2007; Deldicque et al., 2016; Deldicque, Rouzaud, 2020]. При этом его внешний вид может быть таким же или почти таким же, как у «чистого» угля.

3. Концентрация антракомассы (например, в мг/кг почвы) может быть разным в органогенных и минеральных почвах, при равенстве по объему. Данная проблема схожа с проблемой весовой влажности для органогенных и минеральных почв и заключается в разной плотности органогенных и минеральных горизонтов [Аринушкина, 1970; Теория и практика..., 2006]. В таком случае сравнение минеральных и органогенных горизонтов должно производиться либо относительно объема (г/л), занимаемого антракомассой (в этом случае образец нельзя переуплотнять), либо по значениям концентрации антракомассы, собранной с определенной площади (г/м²), с глубиной, принятой за константу.

4. Смесь углей разных пожаров затрудняет выделение интересующего нас пирогенного события из почвенного архива. Если пожар недостаточно силен, и почва защищена растительностью, то погребения не будет – почва останется дневной (рисунок 10). Одна дата, повторяющаяся во всем проанализированном углистом материале (с учетом «встроенного возраста») говорит об одном крупном пирогенном событии. Несколько дат говорят нам о том, что древняя почва пережила несколько пожаров, скорее всего мелких, и один крупный (также возможно, что горел разновозрастный растительный материал). В экосистемах с маломощной подстилкой множество слабых пожаров также могут привести к образованию пирогенного горизонта [Gavin, 2003; Gavin et al., 2003].

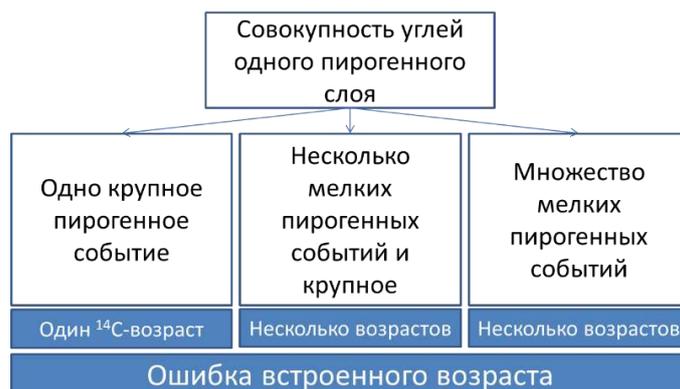


Рисунок 10. Структура периода пирогенной активности. Все варианты искажены возможным эффектом встроенного возраста [Gavin et al., 2003]

5. Собственно ошибка «встроенного возраста» (inbuilt age), которая затрудняет интерпретацию данных [Gavin et al., 2003; Bobrovsky et al., 2019].

6. Уголь активно перемещается в процессе эрозии после пожара. После погребения он может быть переотложен – например, со склонов – и попасть в реки и океан [Gavin, 2003; Doerr et al., 2009; Scott et al., 2009; Abney, Verhe, 2018; Bobrovsky et al., 2019; Bird et al., 2015].

7. Сложности и ограничения метода радиоуглеродного датирования связаны с особенностями калибровочных кривых, которые описывают разные периоды с неодинаковой точностью, а также с резервуарным эффектом и содержанием изотопов углерода в атмосфере, воде и почве на момент пожара, которые искажают результаты [Плихт и др., 2016; Чичагова, 1985; Чичагова и др., 2008; Zazovskaya et al., 2017].

8. Многие методы определения абсолютного возраста дорогие, требуют правильной подготовки образцов и оборудования [Зазовская, 2016; Zazovskaya et al., 2017].

Большинство данных о свойствах палеопожаров можно получить при анализе углей, но изучение других продуктов пожаров может существенно дополнить палеореконструкцию; в случае отсутствия углистых частиц – стать единственным свидетельством пожара [Finklestein et al., 2005].

2.5. Связь динамики экосистем и климата в голоцене с записью пирогенных событий в палеоархивах

Периоды голоцена (11700 кал. л. н. – до наших дней) характеризовались в разной степени неоднородным климатом [Sjögren, 2021]. На протяжении голоцена растительный покров севера ЕТР претерпевал значительные изменения, от доминирования арктических тундр, до распространения широколиственных пород [Александровский, 2004; Александровский, Александровская, 2005; Новенко, 2016]. Изменения в древесном ярусе растительности, в средних температурах и в количестве ежегодных осадков сильно влияли на

динамику пожаров в региональном масштабе [Drobyshev et al., 2016; Куприянов и др., 2020; Горбач и др., 2021].

На режим температуры и влажности в течение голоцена могли повлиять такие факторы как орбитальные (изменение траектории или положения Земли на ее орбите), таяние ледников, морские течения и вулканизм [Sejrup et al., 2016]. В целом, регион ЕТР и соседней Фенноскандии, не совпадает по температурным трендам с глобальными закономерностями [Александровский, 2004; Александровский, Александровская, 2005; Александровский, 2008; Новенко и др., 2014; Новенко, 2016; Sejrup et al., 2016].

Условно в голоцене иногда выделяют климатический оптимум (9500-6500 кал. л. н.), транзитный период (6500-3000 кал. л. н.) и холодный позднеголоценовый период (3000 кал. л. н. - наше время) [Sjögren, 2021].

Голоцен делится на следующие периоды по возрасту (кал. л. н.): пребореальный, бореальный, атлантический, суббореальный, субатлантический (современный) (таблица 2) [Герасимов, Марков, 1939; Нейштадт, 1957; Хотинский, 1977; Александровский, 2004; Александровский, Александровская, 2005; Александровский, 2008]. В литературных источниках нет согласия относительно климатических условий и видов растительности на протяжении периодов голоцена, что связано с постоянным развитием методов реконструкции и выбором их основы, интерпретации анализируемых данных, а также масштабами исследований. Параметры природной изменчивости, измеренные в разном масштабе, имеют разные средние значения, что подтверждается статистикой. Одной из главных причин несоответствий многочисленных реконструкций является их разный пространственный охват. Больше согласие среди исследователей наблюдается по изменению параметра средней температуры, чем чередованию плювиальных (влажных) и аридных периодов [Герасимов, Марков, 1939; Нейштадт, 1957; Хотинский, 1977; Александровский, 2004; Novenko et al., 2016; Dyakonov et al., 2017; Varhoumi et al., 2019; Новенко и др., 2021]. Локальная изменчивость климата, особенно для территории севера ЕТР и Фенноскандии, может быть противоположна региональным трендам [Sejrup et al., 2016; Sjögren, 2021]. При описании растительности периодов голоцена была предпринята попытка найти некоторую среднюю информацию по всем рассмотренным источникам, отдавая предпочтение наиболее современным [Александровский, 2004; Александровский, Александровская, 2005; Александровский, 2008; Новенко и др., 2014; Новенко, 2016; Sejrup et al., 2016; Новенко и др., 2021; Sjögren, 2021].

Таблица 2. Периоды голоцена и позднего плейстоцена, их возраст и относительные колебания климата. За точку отсчета взяты средние значения температуры и влажности на протяжении голоцена [Александровский, Александровская, 2005; Александровский и др., 2018; Sejrup et al., 2016; Sjögren, 2021].

Индекс	Период	Календарных л. н.	Относительные изменение температуры климата	Относительные изменения влажности климата
SA	Субантланти-ческий	2800-наши дни	прохладный	влажный
SB	Суббореал	5700-2800	теплый, с двумя похолоданиями	сухой
AT	Атлантический	8850-5700	теплый	периодически сухой
BO	Бореал	10500-8850	умеренно-теплый	сухой
PB	Пребореал	11640-10500	потепление относительно Дриаса	-
YD	Поздний Дриас	12900-11640	холодный	-
AL	Аллеред	14000-12900	первые потепления после ледникового периода	-

Климатические особенности разных регионов, по данным литературы, не всегда совпадали со стандартно выделяемыми периодами голоцена [Sejrup et al., 2016; Александровский и др., 2018; Sjögren, 2021]. На территории ЕТР в интервале 11700-10700 кал. л. н. маркировалось резкое увеличение содержания пыльцы древесных пород, преимущественно за счет увеличения доли сосны и березы; при этом участие трав и растений гляциальной флоры открытых местообитаний постепенно снижалась. В составе растительности после 10700 кал. л. н. сохранялись элементы перигляциальной флоры, наряду с изменениями пребореала. В спектрах отмечена пыльца карликовой березки (*Betula nana*), кохии распростертой (*Kochia prostrata*) и плаунка плаунковидного (*Selaginella selaginoides*) [Елина, 1981; Новенко и др., 2014; Новенко, 2016]. Согласно палинологическим данным по палеоархивам из центральных районов Восточно-Европейской равнины, обширные территории были покрыты сосново-березовыми редколесьями – лесистость достигала 30-40% [Елина, 1981; Новенко и др., 2014; Новенко, 2016]. Смена растительности в этот период вызвана повышением температуры и окончанием позднеплейстоценового оледенения [Климанов, 1996; Филимонова, Лаврова, 2005; Sejrup et al., 2016; Куприянов, Новенко, 2019]. Появляются первые записи пирогенной активности регионального и локального масштабов.

Единичные зерна пыльцы широколиственных пород наблюдаются в Восточно-Европейской равнине только после 10700-10500 кал. л. н., но на востоке ЕТР участие пыльцы широколиственных пород и лещины в спектрах отложений раннего голоцена было незначительным [Елина, 1981; Филимонова, Климанов, 2005; Новенко и др., 2014; Филимонова, Лаврова, 2015; Новенко, 2016]. Встречаемость записей пирогенной активности растет.

В период 10100-7900 л. н. средние годовые температуры были то ниже то выше современных значений – изменялись от -1 до +2 °С по сравнению с современными показателями без определенной выраженной тенденции [Ащепкова, Семиколенных, 2014]. На севере ЕТР в течение этого периода сохранялась высокая доля хвойных пород [Елина, 1981; Филимонова и Климанов, 2005; Новенко и др., 2014; Новенко, 2016], что способствовало умеренной пирогенной активности [Горбач и др., 2021].

Палинологические данные позволяют сделать вывод, что в среднем голоцене, в интервале 7900-5700 кал. л. н., в Центральной и Восточной Европе существовала единая зона широколиственных лесов, образованных дубом с участием вяза и липы. Температурный максимум в это время подтверждают исследования зарубежных ученых, выполненных для Фенноскандии [Sejrup et al., 2016]. Высокая доля хвойных пород для севера ЕТР, однако, не исключается в литературе. Палеорекострукции регионального масштаба имеют мало свидетельств периодов пирогенной активности [Бобровский, 2010; Drobyshev et al., 2016; Александровский и др., 2018; Bobrovsky et al., 2019; Куприянов и др., 2020; Горбач и др., 2021].

5700-4000 кал. л.н. в пыльцевых диаграммах доминирует ель (*Picea abies*) (верхний максимум ели); доля широколиственных пород в лесных формациях высока. Существенные изменения растительности выявлены в интервале 4000-3000 кал. л. н. и связаны с сокращением доли пыльцы ели и увеличением содержания широколиственных пород липы (*Tilia cordata*), дуба (*Quercus robur*), вяза (*Ulmus glabra*) и березы (*Betula pendula*). В течение последних двух тысячелетий еловые и елово-широколиственные формации в центре Европейской части России постепенно были замещены вторичными березово-сосновыми лесами в ходе человеческой деятельности [Алейников и др., 2018; Бобровский, 2010]. С XVII века отмечается возрастание роли человека в изменении растительного покрова в лесной зоне Восточно-Европейской равнины и на всем севере ЕТР [Попов, Пучнина, 2017; Алейников и др., 2018; Александровский и др., 2018; Дымов, 2018, 2020].

За последние две тысячи лет голоцена ЕТР также испытала два крупных температурных колебания, названные Средневековой аномалией, когда температуры были в среднем на 1,5-0,5 °С выше современных и Малым ледниковым периодом, когда температуры были в среднем на 1-2 °С ни. Они мало сказались на растительном покрове, т. к. их эффект нивелировался человеческим влиянием [Клименко, Климанов, 2003; Sejrup et al., 2016; Sjögren, 2021].

ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Районы работ и методы исследования можно разделить на четыре больших блока изучения: (1) информационной роли почв; (2) динамики почвенных свойств; (3) вертикальной миграции углистых частиц и (4) пирогенно-экстремальных почв.

На рисунке 11 приведена схема расположения четырех групп районов исследования на Севере России; в таблице 3 дана общая информация об объектах исследования.

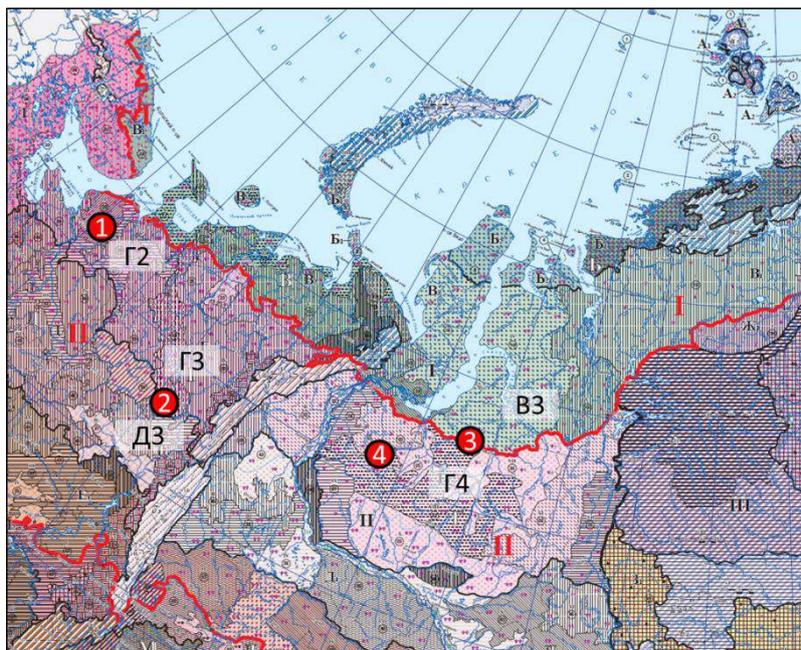


Рисунок 11. Районы исследования на карте почвенно-экологического районирования 1:8 млн. [Карта почвенно-экологического..., 2019]. 1 – подзона глееподзолистых почв глееземов и подзолов северной тайги; 2 – граница подзон глееподзолистых почв глееземов и подзолов северной тайги и подзолистых почв средней тайги; 3 – граница подзон тундровых глеевых почв и подбуров субарктической тундры и глееподзолистых почв глееземов и подзолов северной тайги (Западной Сибири); 4 - подзона глееподзолистых почв, глееземов и подзолов северной тайги (Западной Сибири).

Зона севера ЕТР:

1. Исследование информационной роли пирогенных почв, почвенного покрова хронорядов пожаров, послепожарных растительных сообществ, разработка типизации миграции углей в профиле почв и классификация условий пирогенной экстремальности;
2. Исследование почвенного покрова хронорядов пожаров, послепожарных растительных сообществ, а также разработка типизации миграции углей в профиле почв;

Зона севера Западной Сибири (СЗС):

3. Исследование послепожарных растительных сообществ, разработка типизации миграции углей в профиле почв и классификация условий пирогенной экстремальности;
4. Классификация условий пирогенной экстремальности

Представление о количестве объектов исследования дает таблица 3.

Таблица 3. Ключевые участки и общая характеристика объектов исследования. Некоторые разрезы использовались одновременно по нескольким направлениям исследований

Район исследований	Количество разрезов	Превалирующие почвенные типы	Возраст пирогенных палеоархивов кал. л. н. и хронорядов пожаров лет н.
Информационная роль почв (пирогенные палеоархивы)			
Северная тайга ЕТР	2 фоновых, 4 в палеоархивах	Подзолы, пасаммоземы	от 10260 до 60
Почвенный покров хронорядов пожаров			

Таблица 3. Продолжение

Район исследований	Количество разрезов	Преобладающие почвенные типы	Возраст пирогенных палеоархивов кал. л. н. и хронорядов пожаров лет н.
Северная тайга ЕТР	4 фоновых, 16 на гарях	Подзолы, подзолистые почвы	300, 81, 83, 18, 6, 4*
Средняя и северная тайга ЕТР	4 фоновых, 7 на гарях	Подзолы, подзолистые почвы, буроземы	171, 80, 120, 86, 15**
Разработка типизации миграции углистых частиц			
Северная тайга ЕТР	8	Псаммоземы, подзолы, подбуры, подзолистые почвы,	от 80 до 2лет *
Район исследований	Количество разрезов	Преобладающие почвенные типы	Возраст пирогенных палеоархивов кал. л. н. и хронорядов пожаров лет н.
Средняя и северная тайга ЕТР	8	Подзолистые почвы, буроземы, литоземы	от 169 до 10 лет **
Северная тайга и кустарничковая тундра СЗС	6	Подзолы, глееземы, криоземы	10-15 до 1 года ***
Разработка классификации пирогенно-экстремальных почв			
Северная тайга ЕТР	2 оптимальных 3 пирогенно-экстремальных	Петроземы, элювоземы, псаммоземы	15 лет*
Северная тайга СЗС	7 оптимальных, 12 пирогенно-экстремальных	Псаммоземы, подзолы, стратифицированные седименты	от 30 до 10 лет***

* – по геоботанической карте Пинежского и Кулойского лесничеств, 1977 (приложение А1-3); по карте Пинежского заповедника [Сабуров, 1988; Попов, Пучнина, 2017].

** – по карте пожаров, наложенной на спутниковый снимок, А.А. Алейников, персональные замечания, 2018

*** – по состоянию растительных сукцессий

После каждого описания района будет следовать группа методов, которые нами применялись. В подзоне северной тайги ЕТР наибольшее внимание было уделено пирогенным палеоархивам; в подзоне средней тайги ЕТР – хронорядам пирогенных почв; в подзоне северной тайги и кустарничковой тундры СЗС – типизации миграции углистых частиц; в подзоне северной тайги СЗС – классификации условий почвенной пирогенной экстремальности.

3.1. Районы изучения в подзоне северной тайги Европейской территории России

Районы исследований ЕТР помещены на карту, чтобы лучше показать границы заповедников и название рек; участки исследований СЗС помещены на спутниковый снимок, чтобы подчеркнуть неоднородность рельефа. Участок исследований северной тайги ЕТР изображен на рисунке 12.



Участки исследований

- ▲ хронорядов пирогенных почв и миграции углистых частиц
- ⬠ хронорядов пирогенных почв, миграции углистых частиц и экстремального почвообразования
- ★ информационной роли пожаров

Рисунок 12. Исследование хронорядов пирогенных почв на террасе р. Кулой. Работы проводились в августе-сентябре 2018-2020 гг. (каждый год). Легенда сохраняется для других районов исследований

3.1.1. Географическое положение и климатические параметры

Исследуемая территория относилась к Пинежскому району Архангельской области. Согласно физико-географическому районированию территория исследований располагалась в юго-восточной части Беломорско-Кулойского плато и прилегающих террасах реки Кулой. Вся территория исследования находилась в районе 64° с. ш., 42-43 в. д. Одна часть работ проводилась на территории Пинежского заповедника и его окрестностей, другая часть на территории Пинежского и Кулойского лесничеств, все участки относились к подзоне северной тайги. Площадь заповедника составляет 51522 га. Особое влияние на часть территории исследования оказывал аazonальный фактор, представленным сульфатным карстом [Структура и динамика..., 2000; Почвы заповедников..., 2013; Попов, Пучнина, 2017; URL: <http://www.zapovednik-pinega.ru/>]. Район исследований палеопожаров располагался в 110 км к востоку от г. Архангельска поблизости от Пинежского заповедника на междуречье Кулоя и Пинеги и занимал площадь около 500 м^2 . Территория относится к Пинежскому лесничеству.

Исследования почв хронорядов пожаров и пирогенно-экстремальных почв проводились в заповеднике и охватывали террасы и водораздел р. Сотка, пересекающей северную часть заповедника с запада на восток (избы Мирониха и Глухое и кордон Филипповское). Хроноряды средневозрастных пожаров были обследованы в центральной части заповедника, начиная от избы Сычево по ходу просеки в кварталах 37 и 39, а также примерно в трех километрах к северу от оз. Железное. Исследование наиболее современных пожаров проходило на территориях лесничеств Кулойского на террасе р. Кулой, в 5 км южнее деревни Кулой и в лесничестве Пинежском в 2.5 км к северо-западу от поселка Пинега.

Вся территория заповедника и его окрестностей относится к субарктическому климату. В районе заповедника характерны низкие температурные показатели и высокая относительная влажность воздуха. Среднегодовая температура обычно минусовая – $-0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Колебания

температур в осенний, зимний и весенний период могут быть значительными и выражаются в частых оттепелях и заморозках.

Лето обычно короткое и пасмурное. Продолжительность безморозного периода 85-95 дней. Средняя температура января – $-14,7^{\circ}\text{C}$, июля $+14,3^{\circ}\text{C}$ среднегодовое количество осадков 570 мм, равномерно распределенных по сезонам, сумма активных температур 1305°C , продолжительность периода с устойчивым снежным покровом около 181 дня со средней глубиной снежного покрова 85 см. [Структура и динамика..., 2000; Попов, Пучнина, 2017; URL: <http://www.zapovednik-pinega.ru/>].

3.1.2. Геологические и геоморфологические особенности региона

Особенностью юго-востока Беломоро-Кулойского плато является наличие поверхностных карстовых форм рельефа [Смирнова, Геннадиев, 2011]. Территория заповедника расположена в пределах западного крыла Мезенской синеклизы Русской плиты. Геологический фундамент на территории заповедника включает гипсы и ангидриты соткинской свиты нижней перми возрастом около 290-280 млн. лет, мощностью более 80 м, перекрытыми верхнепермскими красноцветными песчаниками и известняками возрастом около 260-250 млн. лет. В пермский период сформировался общий план территории. За период неогена (около 23 млн. л. н.) образовалось Беломоро-Кулойское структурно-денудационное плато и образовалась современная речная сеть. Чехол пород, перекрывающих гипсы и ангидриты, оказался размыт, что послужило причиной первой активизации карстовых процессов (гипсовый или сульфатный карст), которые заложили наиболее крупные его формы – лога и пещеры [Горячкин, Шаврина, 1997; Структура и динамика..., 2000; Malkov et al., 2001; Спиридонова, 2007; URL: <http://www.zapovednik-pinega.ru/>; URL: <http://oopt.info/>]. Карстовые процессы были заторможены валдайскими оледенениями, и активизировались в межледниковья под влиянием талых вод. Максимумы валдайских оледенений пришлись на 90 и 20 тыс. л. н. В раннем голоцене (11,7-9 тыс. л. н.) начинается современный карстовый процесс – самый активный за всю историю территории благодаря сочетанию высокой температуры и влажности [Горячкин, Шаврина, 1997; Структура и динамика..., 2000; Malkov et al., 2001; Спиридонова, 2007; URL: <http://www.zapovednik-pinega.ru/>; URL: <http://oopt.info/>]. Ледниковые отложения представлены Валдайской мореной, состоящей из красновато- или коричневатобурых суглинков или имеющей супесчаный состав, богатой валунами кристаллических и метаморфических пород и линзами песчано-гравийного материала [Горячкин, Шаврина, 1997; Структура и динамика...,

2000; Горячкин, 2010]. Территория Пинежского заповедника и его окрестностей делится на три района: возвышенное холмистое структурно-денудационное плато, плоскую заболоченную водораздельную равнину и карстовую равнину (таблица 4). В районе исследования информационной роли почв рельеф ледниково-карстовый (бассейн Кулоя).

Таблица 4. Параметры геоморфологического разделения района исследования [Горячкин, Шаврина, 1997; URL: <http://www.zapovednik-pinega.ru/>; URL: <http://oopt.info/>; Спиридонова, 2007; Горячкин, 2010].

Геоморфологические выделы	Тип рельефа	Превышения, метров над ур.м. (врезы, м)	Среднее количество карстовых форм на км ²
Высокие поверхности пластово-денудационных равнин	Эрозионно-денудационный тип; Эрозионные ложбины от $n \cdot 10^1$ до $n \cdot 10^2$ м, в зависимости от степени расчлененности рельефа	145-173 (20->100)	Еденичные воронки
Геоморфологические выделы	Тип рельефа	Превышения, метров над ур.м. (врезы, м)	Среднее количество карстовых форм на км ²
Карстовая равнина (области трещиноватости карстового массива)	Ледниково-карстовый тип; плоско-волнистый; местами холмистый $n \cdot 10^1$ м	70-100 (2-20)	от 400 до > 1500, воронки и котловины
Плоская заболоченная водораздельная равнина (моренная равнина)	Ледниковый тип; плоско-волнистый; мелкохолмистый эрозионные ложбины, $n \cdot 10^{-1}$ м	50-70 (1-10)	Нет

3.1.3. Растительный покров

Благодаря разнообразным рельефно-ландшафтным условиям растительность Пинежского заповедника и его окрестностей обладает большим разнообразием и включает некоторые краснокнижные виды, тяготеющие к выходам гипса (венерин башмачок (*Cypripedium calceolus*); калипсо луковичная (*Calypso bulbosa*)). Встречаются арктические, арктоальпийские и гипоарктические виды [Структура и динамика..., 2000; Попов, Пучнина, 2017; URL: <http://www.zapovednik-pinega.ru/>; URL: <http://oopt.info/>]. Растительность районов исследования представлена в таблице 5).

Таблица 5. Описание растительности Пинежского заповедника [Структура и динамика..., 2000; Попов, Пучнина, 2017; <http://www.zapovednik-pinega.ru/>; <http://oopt.info/>]. Приложение А. 2-3 – карты лесничеств.

Район исследований	Преобладающий тип растительности (%)	Преобладающие ассоциации (% от типа растительности)	Виды-доминанты древесной растительности
Территория Пинежского заповедника	Леса (87); болота (10); луга, кустарники и тундроподобные сообщества (3)	Ельник кустарничково-зеленомошниковый (73); сосняки зеленомошниковые и лишайниковые (16); лиственничные леса (11)	<i>Picea obovata</i> <i>Betula sp.</i> <i>Pinus sylvestris</i> <i>Picea abies</i>

Таблица 5. Продолжение

Район исследований	Преобладающий тип растительности (%)	Преобладающие ассоциации (% от типа растительности)	Виды-доминанты древесной растительности
Территория Пинежского лесничества	Болота (10-15); леса (85-90)	Сосняки лишайниковые и зеленомошниковые (30); ельники-зеленомошники (65); лиственные виды вторичных сукцессий (5)	То же
Территория Кулойского лесничества	Болота (50); леса (50)	Сосняки лишайниковые и зеленомошниковые(25); ельники-зеленомошники (25)	

3.1.4. Почвенный покров

Современный почвенный покров начал формироваться в начале голоцена – около 12-10 тыс. кал. л. н. [Горячкин, Шаврина, 1997; URL: <http://www.zapovednik-pinega.ru/>; URL: <http://oopt.info/>; Горячкин, 2010]. Наибольшую связь почвенный покров имеет с геоморфологическим делением района исследований (таблица 6).

Таблица 6. Почвенный покров района исследований северной тайги ЕТР [Горячкин, Шаврина, 1997; Спиридонова, 2007; Горячкин и др., 2007; Горячкин, 2010; Семиколенных и др., 2015; URL: <http://www.zapovednik-pinega.ru/>; <http://oopt.info/>].

Район исследований	Породы	Основные почвы*
Возвышенное холмистое структурно-денудационное плато	Ледниковые моренные отложения, красноцветные суглинки; гипсы и ангидриты	подзолистые, подзолы, подбуры, псаммоземы, перегнойно-карбонатные, неполноразвитые сульфореңдзины,.
Карстовая равнина	Песчаные флювиогляциальные и древнеаллювиальные отложения, подстилаемые гипсами и ангидритами	Подзолы, псаммоземы, серии погребенных подзолов и псаммоземов
Плоская заболоченная водораздельная равнина	Ледниковая двучленная суглинистая и супесчаная морена	Подзолистые, торфяно-подзолистые, подзолы

* - почвенные подтипы, широко представленные в результатах работы

М.А. Смирновой и А.Н. Геннадиевым (2011), на основе микрокатенарного подхода, описана сложная структура двух основных типов карстовых воронок: (1) обтекаемых 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 в центре воронки, по сравнению с почвами межвороночных пространств. Чем воронка больше, тем менее выражена дифференциация почвенного профиля на ее склонах.

3.2. Методы изучения информационной роли почв

Методы изучения включают полевые и лабораторные. Лабораторные методы включают абсолютное датирование и антракологический анализ.

3.2.1. Полевые методы

Объектами исследования были пирогенные палеоархивы голоценового возраста.

1. Геоморфологический метод – изучение строения карстовых воронок просадочного происхождения как форм рельефа: глубина, диаметр и крутизна склонов.

2. Почвенно-морфологический метод – описание почв по классификациям СССР и России [Munsell Standart Soil ..., 2009; КиДПР, 2004; Полевой определитель почв..., 2008], а также WRB [WRB, 2022]. Приложение А.4 включает корреляцию горизонтов почв по КП СССР, 1977 и КиДПР, 2004.

3. Сравнительно-почвенно-географический метод заключался в сравнении почвенных архивов карстовых воронок между собой, с палеокарстовыми воронками, а также с литературными источниками [Чевычелов, 1997, 1998; Чевычелов, Шахматова, 2018; Куприянов, Новенко, 2019; Новенко и др., 2021].

4. Методы отбора образцов – погоризонтно и через 10 см; углистые частицы хорошей сохранности упаковывались в пластиковые боксы (приложение А.5.1.).

3.2.2. Лабораторные и теоретические методы

1. Методы радиоуглеродного датирования углей и почв. Отбирались угли более 0,5 мм. Использовалась АВА (acid-base-acid) технология подготовки образцов. Графитизация и прессовка мишеней проведена в лаборатории «Радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» ИГ РАН с помощью автоматической системы AGE 3. Измерения ¹⁴C активности выполнены в Центре прикладных изотопных исследований университета Джорджии (Атенс, США) [Чичагова, 1985; Чичагова и др., 2008; Зазовская, 2016; Zazovskaya et al., 2017; Плихт и др., 2016; Bobrovsky, 2019; Лойко и др., 2022]. Калибровка радиоуглеродных дат проводилась в программе OxCal v4.3.2 на основе калибровочной кривой IntCal 13 [Bronk Ramsey, 2009; Reimer et al., 2013; Hua et al., 2013; Зазовская, 2016; Zazovskaya et al., 2017; URL: <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html>].

2. Метод реконструкции максимальных температур карбонизации (далее МТК). Для углистых частиц, образовавшихся в ходе современных пожаров, была определена МТК с использованием рамановской спектроскопии (рисунок 13). Использовался конфокальный микроспектрометр Renishaw inVia Reflex с микроскопом Leica Microsystems, программное

обеспечение от Wire™. Бралась частица угля >1 мм под x50 увеличением. Параметры прибора: лазер длиной волны 532 нм (50м Вт); область записи 900-2000 см⁻¹; мощность лазера (0,5-1% (0,2мВт)); время экспозиции 30-180 с; повторности от одной до трех. Рассчитывалось отношение высоты пиков D и G (H_D/H_G) [Deldicque et al., 2016; Dupin et al., 2019; Deldicque, Rouzaud, 2020; Mauquoy et al., 2020; Theurer et al., 2021].

Формулы расчета МТК:

$T (^{\circ}\text{C}) = 18662.70x^4 - 30544.48x^3 + 9418.174x^2 + 6723.801x - 2538.408$ для горения в течение одного часа;

$T (^{\circ}\text{C}) = 17173.76x^4 - 12070.17x^3 - 25628.07x^2 + 30429.69x - 7984.018$ для горения в течение 6-12 часов (Deldicque et al., 2016; Deldicque, Rouzaud, 2020).

Интервал температур, определяемый рамановским «термометром» 500-1200 °С. Ошибка метода для *Pinus sylvestris* в интервале 700-900 °С составляет ± 20 °С; в интервалах 500-700 и 900-1200 °С она составляет ± 40 °С [Deldicque et al., 2016; Deldicque, Rouzaud, 2020].

Температура (°С) карбонизации древесины сосны обыкновенной и соотношение высоты пиков D и G (H_D/H_G) в рамановском спектре

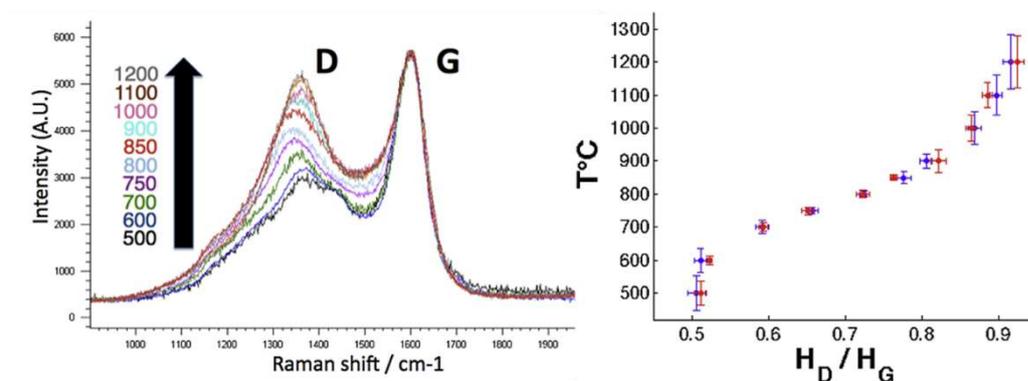


Рисунок 13. Пример реконструкции максимальных температур карбонизации по пикам D и G [рисунок из Deldicque et al., 2016].

2. Дендрохронологические методы (выполнено В.В. Мацковским). Основным объектом метода выступили деревья сосны спелого и перестойного возраста со шрамами от пожаров. Отбор проводился в соответствии с основными принципами дендрохронологии [Мацковский, 2013]: закон лимитирующих рост факторов (пожары); принцип отбора самых старых и поврежденных пожарами деревьев; принцип чувствительности (ширина годичных колец после пожаров); принципы перекрестной датировки, повторности и униформизма. Местоположение деревьев фиксировалось с помощью GPS. Образцы отбирались буром Пресслера в местах повреждений от пожаров, спилы мертвых деревьев производились бензопилой. Анализ образцов проводился в дендрохронологической лаборатории ИГ РАН.

Образцы были отшлифованы, годовые кольца посчитаны, их ширина определена с помощью установки LINTAB (точность 0,01 мм). Перекрестная датировка образцов осуществлялась в программе TSAP-Win [Matskovsky et al., 2016; Мацковский, 2013].

3. Антракологические методы. Эта группа методов включала расчет концентрации антракомассы и определение пород сгоревшей древесины по углям. Расчет концентрации антракомассы проводился по фракциям >5; 5-2; 2-1; 1-0.5 мм методом сухого просеивания. Было проверено, что для песчаных почв ошибкой при выборе сухого или мокрого просеивания можно пренебречь (приложение А.6) [Carcaillet, Thinson, 1996; Куприянов, Новенко, 2019; Куприянов и др., 2020].

Формула для расчета концентрации антракомассы [Carcaillet, Thinson, 1996]:

$$C_a = \left(\frac{\sum_{i=1}^n m_{y_i}}{m_p} \right) * 100$$

C_a – концентрация антракомассы выраженная в процентах, %;

m_{y_i} – масса углистых частиц всех размерных фракций, г;

m_p – масса воздушно-сухой навески почвенного образца, г.

Соответственно можно рассчитать и долю каждой размерной фракции в составе антракомассы:

$$m_{y_1} (\%) = (m_{y_1} / \sum m_{y_i}) * 100$$

Концентрация антракомассы была выражена в трех единицах: % от веса почвы, ‰ абсолютного содержания в почве и в мг/кг. Определение пород сгоревшей древесины по углям было проведено А.А. Гольевой. Большинство пород определено на световом микроскопе, особенности морфологического строения углей определены на электронном микроскопе [Вихров, 1959; Гольева, 2008; Golyeva, 2016; Семяк и др., 2018].

Набор методов изучения информационной роли почв собран в приложении А.9

4. Сравнение полученных данных с палеоклиматическими реконструкциями [Климанов, 1996; Клименко, Климанов, 2003; Филимонова, Климанов, 2005; Филимонова, Лаврова, 2005; Александровский, Александровская, 2005; Drobyshev et al., 2016; Sejrup et al., 2016; Александровский и др., 2018; Куприянов, Новенко, 2019; Куприянов и др., 2020; Горбач и др., 2021; Sjögren, 2021]. Результаты применения методов описаны в главе 4.

3.3. Районы изучения в подзоне средней тайги Европейской территории России

На рисунке 14 представлена вторая группа участков исследования.



Рисунок 14. Участки исследования в средней тайге ЕТР. Якшинский охраняемый участок заповедника относится к средней тайге б) Уральский охраняемый участок заповедника относится к средней тайге, с влиянием предгорий Урала: прямоугольник – кордон Шежим-Печорский; треугольник – участок на правом берегу р. Печора; ромб – изба Строганная доска. Работы проводились в июле 2019.

3.3.1. Географическое положение и климатические параметры

Участок исследования современных хронорядов пожаров находился в Печоро-Ильчском заповеднике на юго-востоке Республики Коми (между 61° и 62° с.ш., 56-59° в. д.), в Троицко-Печорском в подзоне средней тайги и горной (средней) тайги (приложение А. 7а, б). Площадь заповедника составляет 721332 га. Районы исследования на данном участке находились вверх по течению Печоры от поселка Якша и в его окрестностях, охватывая, таким образом, как Якшинский (рисунок 14а), так и Уральский горный (рисунок 14б) охраняемые участки заповедника [Почвы и почвенный покров..., 2013; URL: <https://www.pechora-reserve.ru/>]. Был исследован почвенный покров у поселка Якша, посещены участки у изб и кордонов с запада на восток по р. Печоре: кордон Шежим-Печорский, изба Ёлма и изба Строганная доска.

Климат заповедника умеренно-континентальный, формируется под влиянием западного переноса воздушных масс и частого вторжения холодного арктического воздуха с севера вдоль горных хребтов [Почвы и почвенный покров..., 2013]. Средняя температура января – -18.2°C, июля – +16.8°C, количество осадков 675 мм/год, сумма активных температур 1600°C на момент 2019 г. [Семиколенных и др., 2013]. Средняя продолжительность безморозного периода от 80-83 дней до 50. Распределение температур и влажности по территории заповедника очень контрастно – так, среднегодовая температура воздуха в равнинной части заповедника составляет -0,8 °C, а в горной -4,0 °C. Период среднесуточных температур выше 10 °C на равнинном участке составляет 80-85 дней, а в горном 47-80. Общая годовая сумма осадков на равнинном участке колеблется в пределах 500-800 мм, а в горном до 1000 мм, до 40% от которых составляет снег. Продолжительность снежного периода на равнинных участках составляет 203 дня, а в горах 252 дня. Глубина промерзания почвы от 30

до 70 см. Высота снежного покрова в равнинном районе от 90 см в сосновых борах, до 120 см в темнохвойной тайге, в предгорном до 200 см [Почвы и почвенный покров..., 2013].

По данным почвенной карты в приложении А.7. [Почвы и почвенный покров..., 2013] район относится к северной тайге, что мы считаем устаревшей информацией.

3.3.2. Геологические и геоморфологические особенности региона

Согласно карте районирования заповедник делится на низинный, предгорный и горный [Почвы и почвенный покров... 2013] участки – работы проводились в низинном и предгорном районах (таблица 7). Основные охваченные исследованием типы ландшафтов включали равнинно-таежные и предгорно-таежные [Почвы и почвенный покров..., 2013]. Геология низинных территорий сформирована мощным слоем четвертичных отложений, с частичным сохранением древних форм рельефа. Фундамент Печорской равнины лежит на верхнепермских породах, возрастом около 250 млн. лет, и ледниковых отложениях Московской морены, возрастом около 130-140 тыс. лет [Атлас почв..., 2010; Почвы и почвенный покров..., 2013].

Фундаментом предгорной части могут быть как разнообразные породы палеозойского возраста (около 450-500 млн. л. н.), перекрытые толщей моренных, флювиогляциальных и озерно-ледниковых отложений, так и нижнесилурийские серые углисто-известковые сланцы и известняки. Днепровская морена имеет возраст около 500 тыс. лет [Атлас почв..., 2010; Почвы и почвенный покров... 2013].

Таблица 7. Описание геоморфологических выделов районов исследования Печоро-Илычского заповедника [Атлас почв..., 2010; Почвы и почвенный покров... 2013; Алейников и др., 2018].

Геоморфологические выделы	Тип рельефа	Превышения, метров над ур.м.
Низинный	Водно-ледниковый; пологоволнистый	95-150 (до 200)
Предгорный	Специфический увалистый рельеф; чередование увалов и парм	200-250 (до 350)

3.3.3. Растительный покров

Печоро-Илычский заповедник, характеризуется богатством сочетаний растительности по причине своей геоморфологической неоднородности. В заповеднике можно встретить несколько растительных выделов (таблица 8).

Таблица 8. Растительность Печоро-Ильчского заповедника [Семиколенных, Добрынин, 2010; Атлас почв..., 2010; Почвы и почвенный покров..., 2013; Бовкунов и др., 2010; Алейников и др., 2018].

Район исследований	Преобладающий тип растительности (%)	Преобладающие ассоциации	Виды-доминанты древесной растительности
Низинный	Леса (86); болота, луга (14);	Район сосновых лесов и болот; сосняки лишайниковые и зеленомошные, ельники зеленомошники	<i>Pinus sylvestris</i> <i>Picea obovata</i>
Предгорный		Район темнохвойных лесов и болот; пихтарники папоротниковые и разнотравные	<i>Picea obovata</i> <i>Pinus sibirica</i> <i>Abies sibirica</i>

Более подробные данные по растительному покрову исследованных участков северной и средней тайги ЕТР собраны в приложении А.8.

3.3.4. Почвенный покров

Почвенный покров изучаемых зон представлен в основном двумя стволами – постлитогенного и синлитогенного почвообразования. Почвенные отделы включали текстурно-дифференцируемый, структурно-метаморфический, и альфегумусовый (таблица 9).

Таблица 9. Почвенный покров Печоро-Ильчского заповедника [КиДПР, 2004; Полевой определитель..., 2008; Атлас почв..., 2010; Почвы и почвенный покров..., 2013; Диагностика почв: учебное пособие, 2022].

Район исследований	Породы	Основные почвы
Низинный	Песчаный аллювий и пролювий без крупных включений гальки или щебня	Подзолы, аллювиальные почвы
Предгорный	Четвертичные отложения элювий и делювий магматических, метаморфических и плотных осадочных пород, пылеватые суглинки	Подзолистые, торфяно-подзолистые, глее-подзолистые, буроземы, литоземы

Почвенный покров района характеризуется размытым чередованием почв в пространстве – сменой вариаций и ташетов и обусловлен различием в типах элювиальных, переходных и аккумулятивных ландшафтов [Почвы и почвенный покров..., 2013].

3.4. Методы исследования хронорядов пожаров

3.4.1. Полевые методы

1. Знакомство с картами пожаров и их возрастом в районе исследования; определение вероятности пожара по смене растительного покрова (А1-3; Алейников и Семиколенных, персональные сообщения).

2. Почвенно-морфологический метод – описание почв по классификациям почв России и WRB [Munsell Standart Soil Color..., 2009; Полевой определитель почв, 2008; приложения А. 4; В. 1-3] с акцентом на мощность подстилки, наличие в ней обгоревших растений, детрита и угольков, следы золы в минеральных горизонтах, возможность и эффекты послепожарной эрозии. Отмечались сочетания в разной степени поврежденного почвенного покрова на площади гари в зависимости от типа подстилки и рельефа [Ходаков и Жарикова 2011].

3. Сравнительно-почвенно-географический метод заключался в сравнении особенностей пирогенных хронорядов между подзонами ЕТР и СЗС и в пределах одного района на разных типах почв (например, на подзолах и подзолистых почвах) [Бобровский, 2010; Дымов, 2020]. По такому же методу сравнивалась растительность гарей.

4. Метод отбора образцов – погоризонтный.

3.4.2. Лабораторные и теоретические методы

Для оценки влияния пожаров на почвенный покров был применен комплекс химических и физических методов. Динамика свойств почв оценивалась по изменениям следующих параметров: $pH_{\text{солевой}}$ и $pH_{\text{водный}}$ с определением электродом, $Al_{\text{окс}}$ и $Fe_{\text{окс}}$ (по вытяжке Тамма) и $Fe_{\text{диг}}$ (по вытяжке Мера-Джексона) с фотометрическим окончанием на электроспектрофотометре КФК-3-01 "ЗОНЗ", потери при прокаливании (далее ППП) в муфельной печи ПМ-8 при 600 °С, гигроскопической влаги в сушильном шкафу (Binder ED 53), гидролитической кислотности по Каппену, насыщенности поглощающего комплекса обменными основаниями по Каппену-Гильковицу, магнитной восприимчивости полевым прибором Карраметр КТ-6, содержания углерода и азота методом сухого сжигания на анализаторе Elementar Vario Isotope [Аринушкина 1970; Теория и практика..., 2006; Воробьева 1998; Плихт и др., 2016; Зазовская, 2016; Zazovskaya et al., 2017]. Цветность почв определялась по Манселу в воздушно-сухих образцах в условиях лаборатории [Munsell Standard Soil Color..., 2009] (приложение А.10).

По Залесову (2011) Классификация лесных пожаров – характеристика лесных пожаров в зависимости от сгорающих материалов по объекту горения и характеру их распространения. Различают три основных вида лесных пожаров: низовые (95-97% от общего количества), верховые (1-5%) и почвенные (примерно 1%).

При описании и исследовании гарей и их отдельных участков основу брались классификации пожаров Мелехова (1947) и Курбатского (1970), например, принцип деления на очаги и ярусный подход (приложения А. 5. 2.), но с некоторыми модификациями, связанными с акцентом исследования на трансформацию почвенного покрова.

Теоретические методы также включали наблюдение за процессами восстановления растительного и почвенного покровов после воздействия пожаров разной температуры и силы. Применялись простые графические модели, построенные на основе собственных наблюдений и анализа литературы [Бобровский, 2010; Дымов, 2018,2020; Чевычелов, Шахматова, 2018; Bobrovsky et al., 2019; Kuzmina et al., 2022; Лойко и др., 2022].

Под моделью, в данном отношении, понимается опосредованное аналитическое описание объекта. Использовались в основном логико-семантические – с терминами и таксономией почвоведения – и причинно-следственные модели [Основы математического моделирования..., 2019]. Все представленные модели можно усовершенствовать, добавив к ним численные параметры. Улучшение моделей планируется в процессе дальнейших исследований. Результаты методов определения хронологии пожаров описаны в главах 5,6 и 8.

3.5. Районы исследования в подзонах северной тайги и кустарниковой тундры севера Западной Сибири

Третий район исследований отмечен на рисунке 15. Участки исследований находились в северной тайге и кустарниковой тундре СЗС – Ямало-Ненецкий автономный округ.

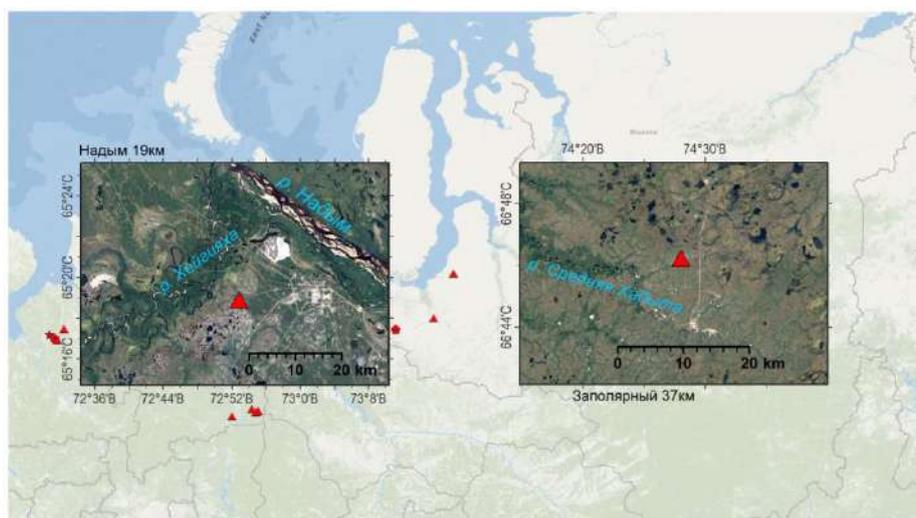


Рисунок 15. Участки исследований в северной тайге и кустарниковой тундре СЗС. Работы проводились к юго-востоку от г. Надым и к северо-западу от г. Новый Уренгой в августе-сентябре 2019-2020 гг.

3.5.1. Географическое положение и климатические параметры

Район исследований расположен на севере Западной Сибири (ЯНО Надымский район, Тюменская область) в пределах северной границы распространения северной тайги (рисунок. 15) (65° с. д. и $72-73^{\circ}$ в. д.), в краевой части III озерно-аллювиальной террасы р. Надым, на междуречье Хейгияха – Левая Хетта. Средняя температура января – $-23,0^{\circ}\text{C}$, июля $+13,5^{\circ}\text{C}$,

количество осадков варьирует от 450 до 650 мм в год, сумма активных температур <800 °С [Матышак, 2009]. Глубина ММП в августе-сентябре около 1.0-1.5 м и больше.

Также было заложено несколько разрезов в тундровой зоне того же района, около г. Новый Уренгой (66° с.д. и 74° в.д.) и пгт Заполярный в кустарниковой тундре. Средняя температура января – $-26,6^{\circ}\text{C}$ июля – $+10,5^{\circ}\text{C}$. Количество осадков около 519 мм/год (рисунок 14б). Глубина ММП в августе-сентябре от 1.0 м до 0.4-0.2 м).

3.5.2. Геологические и геоморфологические особенности региона

Геологическая основа региона представлена песками позднеплейстоценового возраста (около 12 тыс. л. н.) и, иногда суглинистыми погребенными почвами криокомплексов. В районе Нового Уренгоя больше представлены суглинистые отложения. Современные процессы в районах исследования связаны с накоплением торфов (около 10500 тыс. л. н.) и динамикой ММП [Матышак, 2009]. Распространение ММП имеет островной и прерывистый характер. Наибольшее влияние на рельеф оказало Тазовское оледенение (началось около 190 тыс. л. н.). В рельефе – как северной тайги, так и кустарниковой тундры наблюдаются палеокриогенные элементы, например, полигональность [Почвы заповедников..., 2012].

Рельеф в районах исследования плоско-волнистый, в подзоне северной тайги больше расчленен на мезо- и микроуровне (до 2-3 м между формами на плоскобугристом торфянике), чем в подзоне кустарниковой тундры – менее 1 м в тундровых сообществах [Матышак, 2009]. В каждом из районов встречаются единичные формы мезорельефа до 6-9 м, представленные буграми пучения.

3.5.3. Растительный покров

Район северной тайги характеризуется березово-лиственничными и березо-сосновыми кустарничковыми редколесьями, морошко-багульниковыми торфяниками и кустарнико-осокво-моховыми болотами [Москаленко, 1999, 2012]. Доля плоскобугристых торфяников доходит до 50-70%, они находятся в стадии распространения [Москаленко, 1999, 2012]. Исследования проводились в сосняке лишайниковом с незначительной примесью березы. *Cladina stellaris* и *Cladina rangiferina*, доминировали в напочвенном покрове.

Район кустарниковой тундры характеризуется кустарниковыми и кустарничковыми сообществами на северной границе района исследования. Лес отсутствовал, встречались некоторые собрания кедров и сосен, часто на вершине бугров пучения. В кустарниковых сообществах доминирует ива (*Salix* spp.) и береза (гибрид *Betula pendula* и *Betula nana*). В

кустарничковых сообществах доминирует голубика (*Vaccinium uliginosum*), карликовая березка, водяника (*Empetrum nigrum* т.н. вороника или шикша), черника (*Vaccinium myrtillus*). Напочвенный покров представлен лишайниками (*Cladina stellaris (alpestris)* и *Cladina rangiferina*) [Москаленко, 1999, 2012]. Растительность участков исследования испытывает антропогенный пресс в виде прокладки газовых труб, разливов топлива и механических повреждений напочвенного покрова вездеходами.

3.5.4. Почвенный покров

Почвообразующие породы в северной тайге СЗС были представлены аллювиальными отложениями террас р. Надым и золовыми отложениями. В зоне распространения плоскобугристых торфяников – органической толщей. Почвы представлены подзолами, торфяно-подзолами, светлоземами, подбурами и торфяными почвами.

Развитие почв в подзоне кустарниковой тундры было ограничено залеганием ММП, поверх которых диагностировались суглинистые и глинистые горизонты. Кроме ледниковых отложений, также можно встретить древние и современные аллювиальные отложения (Почвы заповедников..., 2012). Почвы представлены криоземами, глееземами и торфяно-глееземами [Почвы заповедников..., 2012].

3.6. Методы типизации путей миграции углистых частиц

3.6.1. Полевые методы

1. Знакомство с картами пожаров и их возрастом в районе исследования (Сабуров, 1988; Карты Кулойского и Пинежского лесничеств, 1997; Алейников, персональные замечания). Знание возраста пожара необходимо для определения стадий вертикальной миграции углистых частиц.

2. Почвенно-морфологический метод. Выделение пирогенных морфонов первой группы и рассеянных в минеральной матрице углистых частиц;

3. Оценка морфологического состояния углей – степень потери анатомической структуры, окатанность, мягкость, и др. [Goluyeva, 2016; Семеняк и др., 2018]. Зависимость морфологического состояния от влажности и возраста методом почвенных хронорядов;

4. Сравнительно-почвенно-географический метод. Сравнение скоростей миграции углистых частиц в легких и тяжелых почвах, в почвах с близким залеганием ММП, и с обильными морфонами от вывалов [Васенев, Таргульян, 1995; Bobrovsky et al., 2019; Лойко и др., 2022].

5. Методы отбора образцов – как погоризонтно, так и через каждые 10 см в зависимости от количества и расположения углистых частиц.

3.6.2. Лабораторные и теоретические методы

1. Оценка морфологического состояния углей под лупой и световым микроскопом – выделение морфологических особенностей, связанных с участком обследования.

2. Оценка концентрации антракомассы как подстилочных, так и минеральных горизонтов. Метод просеивания аналогичен тому, который использовался в палеоархивах. Были применены методы формального моделирования, аналогичные примененным для моделирования постпирогенного развития растительности и почв. Совокупность методов представлена в приложении А.10.

3. Выделение концептуальных схем вертикальной миграции углистых частиц.

3.7. Район исследования в подзоне северной тайги севера Западной Сибири

Четвертый участок исследований отмечен на рисунке 16.

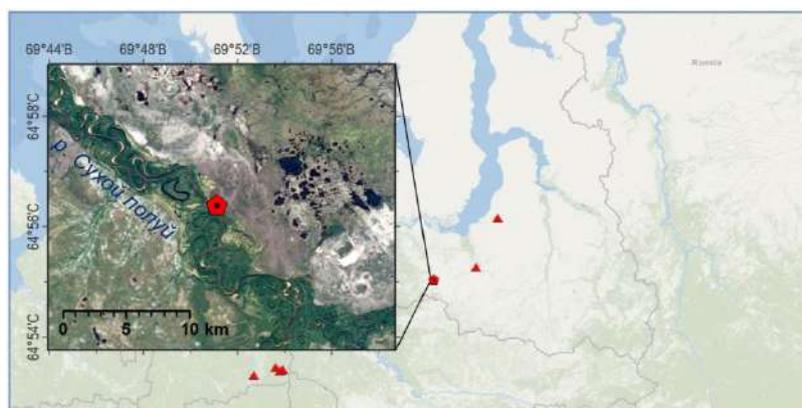


Рисунок 16. Участок исследований в зоне северной тайги СЗС. Работы велись в июне-августе 2018 г.

3.7.1. Географическое положение и климатические параметры

Район исследования находился в ЯНАО (Приуральский район) на севере Западносибирской равнины в бассейне р. Сухой Полуй. Территория относится к зоне северной тайги. Климат резко-континентальный: средняя годовая температура $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$; января $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, июня $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сумма активных температур около $800\text{-}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков 500 мм/год , высота снежного покрова около 70 см . Мерзлота островная – выражена только на отдельных торфяниках [Эволюция почв..., 2015].

3.7.2. Геологические и геоморфологические особенности региона

Рельеф территории сформирован в результате трансгрессий, озерообразования и влияния последнего оледенения – зырянского (закончилось около 11700 л. н.). Большое значение имеют песчаные отложения эолового, аллювиального и флювиального характера. Песчаные отложения подстилаются моренными пылеватыми суглинками [Эволюция почв..., 2015]. Повышения обычно менее 200 м н. ур. м. [Эволюция почв..., 2015].

3.7.3. Растительный покров

Растительный покров представлен в равном соотношении лесами и болотами. В лесах доминируют хвойные породы: сосна (*Pinus sylvestris*), ель (*Picea abies*), лиственница (*Larix sibirica*), встречается кедр (*Pinus sibirica*) [Москаленко, 2009, 2012; Эволюция почв..., 2015].

Напочвенный покров представлен зеленомошником, сфагнумом и лишайниковыми ассоциациями.

3.7.4. Почвенный покров

Породы представлены песчаными аллювиальными, эоловыми и флювиогляциальными отложениями, а также суглинистыми пылеватыми отложениями. Для района типичны подзолы иллювиально-железистые, а также торфяные и оглееные подтипы подзолов и подбуров [Эволюция почв..., 2015]. В нашем районе исследований доминировали в основном псаммоземы и подзолы.

3.8. Методы разработки классификации пирогенно-экстремальных почв

3.8.1. Полевые методы

Полевые методы применяются для определения класса и степени пирогенной экстремальности современных почв, которая на горях часто представлена дискретно, в виде отдельных очагов. Полевые и лабораторные методы применяются для определения вероятности пирогенной экстремальности палеопочв (динамическая экстремальность).

1. Определение возраста гари производилось по письменным, спутниковым и другим источникам или сравнительным методом. Позволяет оценить скорость восстановления почвенного и растительного покрова;

2. Почвенно-морфологический метод включал сравнение с фоном, выделение подтипов, видов, разрядов и разновидностей постпирогенных почв, а также классификаторов WRB [КиДПР, 2004; Почвенный определитель..., 2008; WRB, 2022];

3. Сравнительно-почвенно-географический метод. Сравнение условий пирогенной экстремальности разных природных зон: ее выраженности, пространственной неоднородности и динамики.

3.8.2. Лабораторные и теоретические методы

Анализ концентрации антракомассы для определения пространственной неоднородности и динамики условий пирогенной экстремальности. Данные об участках исследования путей миграции углистых частиц и пирогенной экстремальности собраны в приложении А. 9. Результаты исследования пирогенно-экстремальных почв представлены в главе 8. Аспекты всех методов исследования собраны в приложении А.11.

ГЛАВА 4. ИНФОРМАЦИОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ ПИРОГЕННЫХ ПАЛЕОАРХИВОВ СЕВЕРА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Чтобы наша работа отображала естественные связи между объектами исследования, мы подчинили ее следующему плану (рисунок 17).

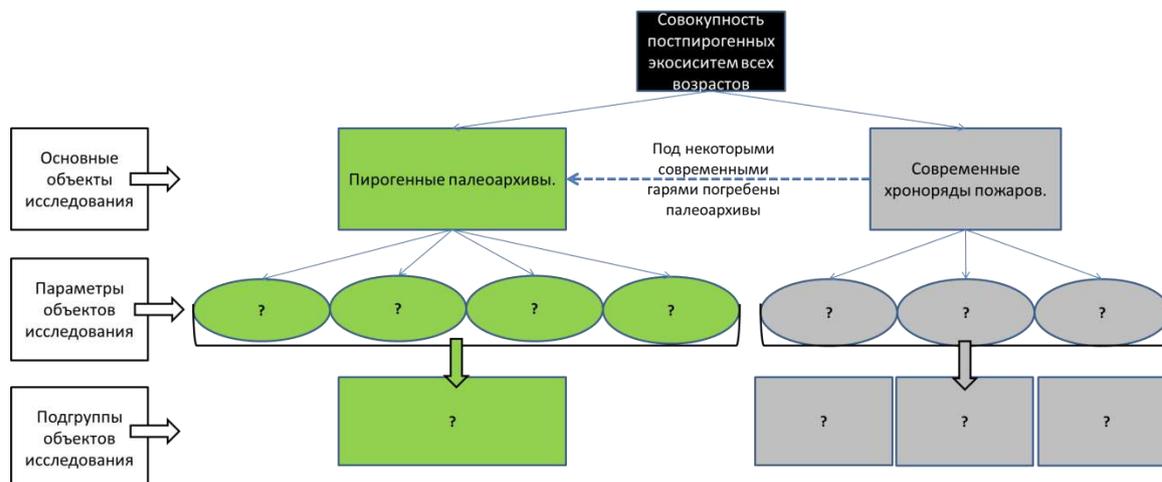


Рисунок 17. Задачи исследования. Вопросы иллюстрируют ход научного поиска.

Последовательно двигаясь в своем исследовании, мы будем закрывать пробелы в представленной схеме, раскрывая пирогенную историю региона. Глава составлена по следующему плану:

1. Общие особенности исследованных палеоархивов;
2. Результаты радиоуглеродного датирования;
3. Результаты анализа углистых частиц;
4. Сравнение палеореконструкций динамики пожаров и климата голоцена.

4.1. Общие особенности палеоархивов карстовых районов северной тайги Европейской территории России, влияющие на подходы к их расшифровке

Анализ района исследований был проведен в главе 3, разделе 3.1, сейчас мы коснемся только особенностей, выбранных нами палеоархивов:

1. Территория находится в зоне влияния карстовых процессов [Cryosols..., 2005]. Карстовые воронки определяются как трансаккумулятивные системы, по причине сброса материала в понор [Глазовская, 2000; Глазовская, 2002; Сычева, 2008] и содержат историю развития почв за весь период своего развития (моложе 12000 лет и старше 12000 лет, в случае палеокарстовых воронок). Форма и глубина воронки динамичны. Точность записи пожаров воронок карстового происхождения зависит от чувствительности трансаккумулятивной системы к пирогенному событию, от возраста самой воронки и от степени ее просадки (динамики воронки).

2. По данным Ю.И. Николаева (1987), В.Н. Малкова, Е.В. Шавриной (1989), Л.В. Пучниной, С.В. Горячкина (2010) и А.А. Семиколенных с соавторами (2015) эпоха интенсивных карстовых процессов наступила в начале голоцена – конце плейстоцена. Можно выделить два периода карстогенеза на территории Беломоро-Кулойского плато: 12-9 тыс. л. н. с формированием наиболее выраженных карстовых форм, таких как лога, и 9 тыс. л. н. – по н. в., который отличается формированием воронок.

3. Запись многих ритмов пожар-послепожарная эрозия шло по принципу синлитогенного почвообразования – по аккумулятивно-синпедолитогенному типу (Сычева, 2008). Мы связываем это с тем, что в отдельные, насыщенные пожарами периоды, процесс седиментогенеза протекал быстрее процессов почвообразования по причине интенсивной послепожарной эрозии – в почвенном профиле это проявлялось в виде слабо разделенного на горизонты слоистого материала (сдвоенные и строенные почвы). Аккумулятивно-ритмичная запись, была характерна для самой современной, и самой древней почвы, в меньшей степени для почвы атлантического периода.

4.2. Результаты радиоуглеродного датирования угля пирогенных почвенных палеоархивов бассейна Кулоя и Беломоро-Кулойского плато

Углистые частицы являются основным объектом исследования пирогенных палеоархивов, что подробно рассмотрено в главе 2.

4.2.1. Радиоуглеродный возраст, морфология и состав стабильных изотопов углерода и азота в трех пирогенных палеоархивах ледниково-карстовых ландшафтов бассейна Кулоя

Приведены обозначения воронок (таблица 10), описание дано в приложении Б.1.

Таблица 10. Морфология пирогенных палеоархивов и фоновых почв

Индекс	В тексте	Мощность палеоархива, см
Пирогенные палеоархивы		
Pin 01-18	Разрез/воронка 1	250
Pin 02-18	Разрез/воронка 2	110
Pin 03-18	Разрез/воронка 3	130
Pin 01-20	Разрез/воронка 4	150
Фоновые почвы		
Pin 02-19	Разрез 5	180
Pin 04-19	Разрез 6	120

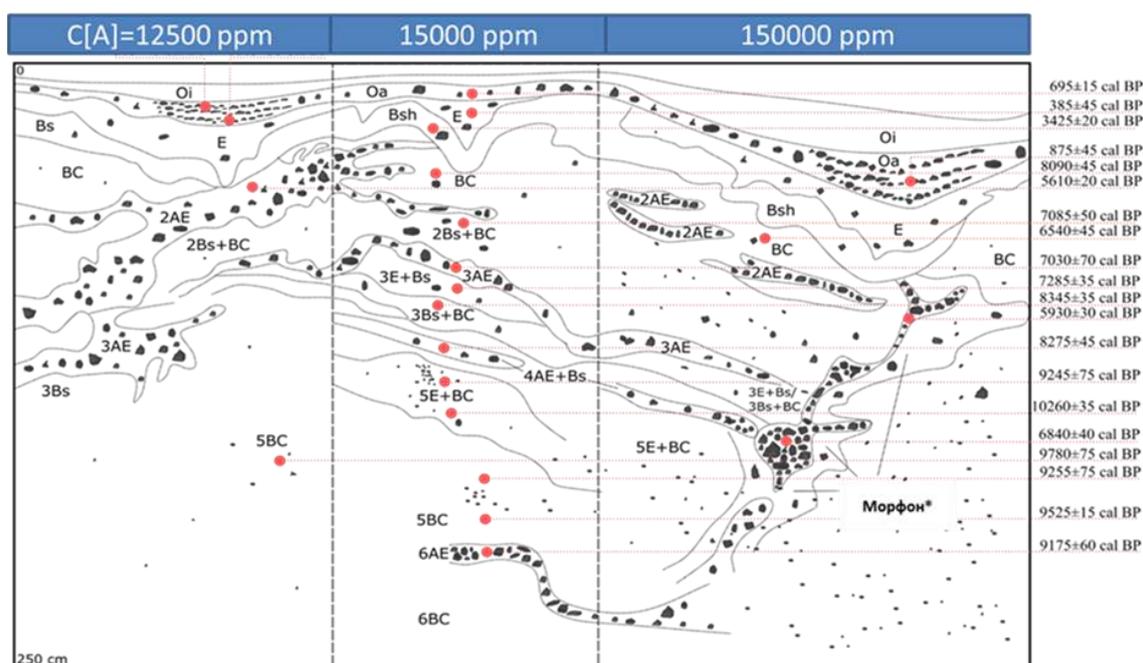
Профили почв палеоархивов были представлены подзолами иллювиально-железистыми и псаммоземами, повторяющимися на всем протяжении разрезов (рисунок 18а) [Полевой определитель..., 2008]. Насчитывалось до V-VI связанных серий «пожар-

постпирогенное почвообразование». Максимальный радиоуглеродный возраст углей из самых нижних горизонтов составил $10260 \pm 35 - 9780 \pm 75$ кал. л. н. (разрез 1), а углистый материал самых молодых из погребенных пирогенных слоев имел возраст $120 \pm 75 - 80 \pm 65$ кал. л. н.

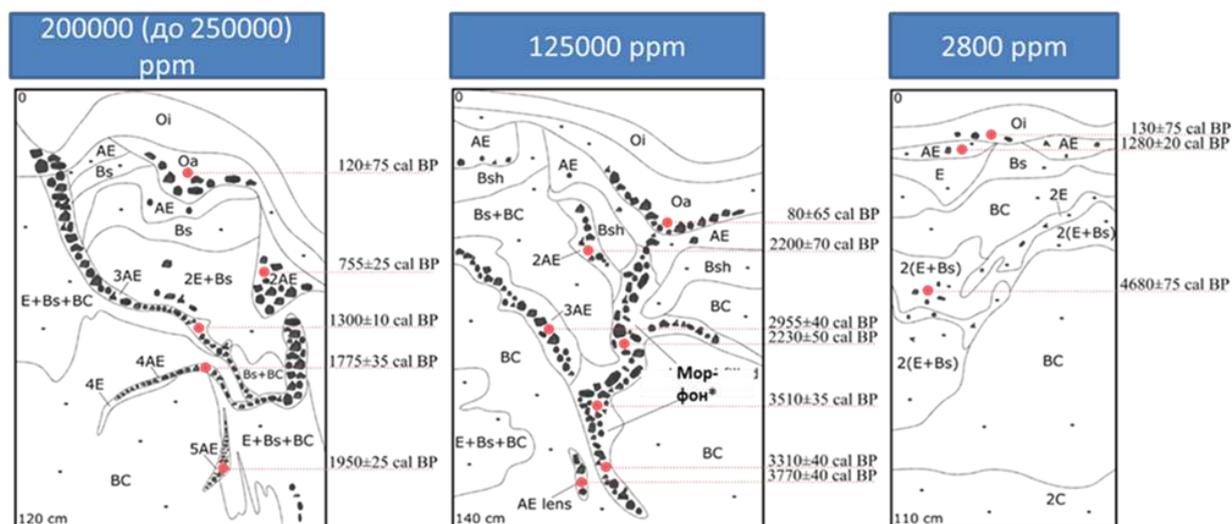


Рисунок 18. Основные результаты радиоуглеродного датирования пирогенного материала карстовых воронок в районе северной тайги ЕТР, в бассейне Кулоя. а) стенки разреза 1 (Pin 01-18); б) разрезы 2 и 3 (Pin 02-18 и Pin 03-18).

Разрезы 2 и 3 на рисунке 18б заложены в воронках просадочного происхождения, и их наиболее древние пирогенные слои имели максимальный абсолютный возраст 1950 ± 30 кал. л. н. в разрезе 2 и 3770 ± 40 кал. л. н. в разрезе 3. Различный максимальный возраст нижних пирогенных горизонтов указывает на разновозрастность пирогенных архивов бассейна Кулоя. По устному сообщению сотрудников Пинежского заповедника (Л. В. Пучниной), воронки, наиболее выраженные в рельефе, в которых как раз и были заложены разрезы 2 и 3, часто имеют молодой возраст. Динамика их просадки по-прежнему интенсивна, что отражается на почвенном профиле и пирогенной записи. Таким образом, относительно молодой возраст периодов пирогенной активности в выраженных в рельефе воронках связан со временем их образования. Расположение и возраст пирогенных горизонтов и морфонов отражены на схемах (рисунок 19). Результаты радиоуглеродного датирования углистых частиц и органического вещества почв приведены в таблице 11.



Разрез 1, разные стенки и области воронки:
Периферия (А) Стенка (Б) Центр воронки (С)



Разрез 2. Центр воронки
Разрез 3. Центр воронки
Разрез 4 (повышение)

Рисунок 19. Возраст углистого материала некоторых почвенных пирогенных палеоархивов (полный массив датировок представлен в таблице 11). Горизонты названы по стандарту WRB: Oi-OL; Oa-OH; Bs-BHF; Bsh-BHF; AE-OH+E.

Таблица 11. Результаты ^{14}C датирования и содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ и $\text{N}_{\text{общ}}$ в углистом материале

Воронка	Горизонт	Глубина, см	Лабораторный код	Материал	$\text{C}_{\text{орг}}$ %	$\text{N}_{\text{общ}}$ %	^{14}C возраст (1 σ)	Калиброванный возраст (2 σ , 95,2 %)	Калиброванный возраст (среднее $\pm\sigma$)
pin01-18 B	Oa (PirI)	4-8	7007	Уголь	58.86	0.34	770 \pm 20	727-674	696 \pm 15

Таблица 11. Продолжение

Воронка	Горизонт	Глубина, см	Лабораторный код	Материал	C _{орг} %	N _{общ} %	¹⁴ C возраст (1σ)	Калиброванный возраст (2σ, 95,2 %)	Калиброванный возраст (среднее±σ)
pin01-18 B	Оа	4-8	7193	Почва	2.70	0.15	130±20	271-186 (33.8%) 150-58 (46.4%) 43-11 (15.2%)	138±80
pin01-18 B	Е	8-15	7008	Уголь	62.43	0.46	330±20	463-347 (76.0%) 341-310 (19.4%)	386±44
pin01-18 B	Е	8-15	7194	Почва	0.36	0.08	Мало ОБ		
pin01-18 B	ВНФ	8-16	7009	Уголь	66.56	0.49	3210±20	3462-3380	3423±22
pin01-18 B	ВНФ	8-16	7195	Почва	0.75	0.06	F ¹⁴ C= 1.0359±0.0 0234	(-1)-(-9) cal BP [1951- 1959 кал. н.э.]	(-5)±0 кал. BP [1955±0 кал. н.э.]
pin01-18 B	BC (Pir III?)	18-30	7010	Уголь	51.79	0.26	7265±25	8162-8016	8089±45
pin01-18 B	BC	18-30	7196	Почва	0.28	0.09	Мало ОБ		
pin01-18 B	2E (Pir II)	30-50	6533	Уголь	63.56	0.30	4870±20	5645-5586	5608±18
pin01-18 B	2E	30-50	7197	Почва	0.56	0.06	3920±20	4424-4291	4357±43
pin01-18 B	2BF+BC	50-70	7011	Уголь	67.55	0.33	6190±25	7168-7005	7084±48
pin01-18 B	2BF+BC	50-70	7198	Почва	0.21	0.08	6155±25	7160-6975	7069±56
pin01-18 B	3E	70-75	6529	Уголь	62.39	0.16	6125±25	7157-7039 (34.8%) 7033-6938 (60.6%)	7029±69
pin01-18 B	3E	70-75	7199	Почва	1.12	0.07	5390±20	6279-6181 (93.1%) 6139-6129 (02.3%)	6224±39

Таблица 11. Продолжение

Во- ронка	Гори- зонт	Глу- бина, см	Лабо- рагор- ный код	Мате- риал	C _{орг} %	N _{общ} %	¹⁴ C возраст (1σ)	Калиб- рованный возраст (2σ, 95,2 %)	Калибро- ванный возраст (среднее±σ)
pin01- 18 B	3 E + BF (Pir III)	75-90	7012	Уголь	56.54	0.32	6350±25	7412-7391 (1.9%) 7368-7361 (0.6%) 7328-7245 (88.8%) 7210-7178 (4.0%)	7284±36
pin01- 18 B	3 E + BF (Pir II?)	75-90	7200	Почва	0.26	0.04	5400±20	6279-6185	6232±31
pin01- 18 B	3 BF+ BC	90-105	7013	Уголь	63.65	0.35	7510±25	8390-8302 (90.3%) 8243-8215 (5.1%)	8343±37
pin01- 18 B	3 BF + BC	90-105	7201	Почва	0.15	0.06	Мало OB	-	-
pin01- 18 B	4 E + BF	105-120	7014	Уголь	67.73	0.33	7460±25	8350-8197	8276±46
pin01- 18 B	4 E + BF	105-120	7202	Почва	0.18	0.03	Мало OB	-	-
pin01- 18 B	5 E + BC (Pir IV)	120-140	7015	Уголь	55.87	0.4	8260±30	9400-9349 (10.7%) 9322-9128 (84.7%)	9243±75
pin01- 18 B	5 E + BC	120-140	7203	Почва	0.24	0.09	7805±25	8630-8543	8581±25
pin01- 18 B	5 E + BC (Pir V)	140-160	7167	Уголь	53.15	0.31	9115±30	10378- 10317 (7.9%) 10300- 10215 (87.5%)	10261±35
pin01- 18 B	5 E + BC	140-160	7204	Почва	0.16	0.06	Мало OB	-	-
pin01- 18 B	5 BC	180-200	7016	Уголь	66.44	0.29	8265±30	9402-9346 (14.2%) 9325-9131 (81.2%)	9253±75
pin01- 18 B	5 BC	180-200	7205	Почва	0.15	0.04	Мало OB	-	-
pin01- 18 B	5 BC	200-240	7017	Уголь	60.35	0.4	8550±30	9548-9493	9525±15
pin01- 18 B	5 BC	200-240	7206	Почва	0.22	0.08	Мало OB	-	-

Таблица 11. Продолжение

Во- ронка	Гори- зонт	Глу- бина, см	Лабо- рагор- ный код	Мате- риал	C _{орг} , %	N _{общ} , %	¹⁴ C возраст (1σ)	Калиб- рованный возраст (2σ, 95,2 %)	Калибро- ванный возраст (среднее±σ)
pin01- 18 B	6 E	240-250	6532	Уголь	58.97	0.30	8210±25	9276-9082 (91.4%) 9053-9033 (4.0%)	9174±60
pin01- 18 B	6 E (Pir IV?)	240-250	7207	Почва	1.24	0.10	7570±30	8416-8346	8384±20
pin01- 18 B	6 BC	250-260	7018	Уголь	-	-	Мало графита	-	-
pin01- 18 B	6 BC	250-260	7208	Почва	0.15	0.05	Мало OB	-	-
pin01- 18 A	Oa3 (Pir I?)	24-28	6933	Уголь	59.86	0.31	975±20	934-899 (48.6%) 869-821 (36.9%) 816-798 (10.0%)	877±45
pin01- 18 A	BC (Pir II?)	54-64	6531	Уголь	23.63	0.12	5740±25	6634-6467	6540±45
pin01- 18 A	E трещина	70-110	6534	Уголь	68.24	0.51	5165±25	5990-5962 (14.6%) 5952-5896 (80.8%)	5928±30
pin01- 18 A	E трещина (Pir II?)	170-190	6537	Уголь	48.56	0.42	6000±25	6910-6775 (92.5%) 6766-6750 (2.9%)	6838±40
pin01- 18 C	Oa1	4-5	6930	Уголь	59.66	0.44	325±20	460-347 (76.0%) 338-308 (19.4%)	385±45
pin01- 18 C	Oa3 (Pir I?)	9-10	6931	Уголь	70.66	0.53	1115±25	1068-961	1017±35
pin01- 18 C	3 BF	63-68	6932	Уголь	-	-	Мало графита	-	-
pin01- 18 C	5 BC	155-180	7006	Уголь	64.87	0.34	8770±30	9907-9659 (94.7%) 9642-9634 (0.7%)	9778±75
pin02- 18	Oa (Pir I)	18-20	7168	Уголь	74.95	0.60	80±20	257-222 (24.8%) 139-31 (70.6%)	120±75
pin02- 18	2 E (Pir II)	38-40	6528	Уголь	68.21	0.27	850±20	793-704	756±25

Таблица 11. Продолжение

Воронка	Горизонт	Глубина, см	Лабораторный код	Материал	$C_{орг}$, %	$N_{общ}$, %	^{14}C возраст (1 σ)	Калиброванный возраст (2 σ , 95,2 %)	Калиброванный возраст (среднее $\pm\sigma$ отклонение)
pin02-18	3 E (Pir III)	78-85	6535	Уголь	47.29	0.46	1380 \pm 20	1326-1280	1298 \pm 10
pin02-18	4 E (Pir III?)	100-102	6536	Уголь	48.24	0.22	1840 \pm 20	1825-1712	1774 \pm 35
pin02-18	5 E (Pir IV?)	111-113	6530	Уголь	51.41	0.53	2000 \pm 20	1994-1897	1949 \pm 25
pin03-18	Oa (Pir I)	8-10	6934	Уголь	60.88	0.60	45 \pm 20	252-230 (11.5%) 133-116 (7.7%) 72-34 (76.2%)	82 \pm 65
pin03-18	2 E (Pir II)	30-33	7169	Уголь	69.37	0.31	2160 \pm 20	2304-2239 (43.5%) 2181-2107 (49.8%) 2081-2067 (2.1%)	2199 \pm 70
pin03-18	3 E (Pir III?)	60-65	7170	Уголь	63.65	0.31	2850 \pm 20	3056-3052 (0.5%) 3036-2878 (94.9%)	2957 \pm 40
pin03-18	E трещина (Pir II?)	50-60	7171	Уголь	63.09	0.36	2215 \pm 25	2315-2152	2229 \pm 50
pin03-18	E трещина (Pir III)	75-85	7172	Уголь	67.89	0.25	3280 \pm 25	3567-3452	3510 \pm 35
pin03-18	E трещина (Pir III)	105-115	7173	Уголь	63.41	0.33	3105 \pm 25	3380-3245	3312 \pm 40
pin03-18	E линза (Pir IV)	120-130	6935	Уголь	73.45	0.16	3500 \pm 25	3842-3697	3771 \pm 40
pin01-20	E pir (Pir I)	8-12	8664	Уголь	-	-	2005 \pm 20	1995-1885	1944 \pm 33
pin01-20	BHF pir (Pir II)	38-42	8665	Уголь	-	-	3650 \pm 20	3999-3895	3975 \pm 53
pin01-20	BHF pir (Pir III)	78-82	8666	Уголь	-	-	3840 \pm 25	4309-4150	4250 \pm 66
pin01-20	BHF pir (Pir IV)	138-142	8667	Уголь	-	-	4495 \pm 25	5294-5045	5164 \pm 77

BP (before present) - до настоящего времени.

Все три палеоархива характеризуются чередованием погребенных подзолов и псаммоземов (Albic Podzol (Arenic, Pyric); Arenosols (Arenic, Pyric)) и их репликацией на протяжении всего голоцена. Встречающиеся сдвоенные почвы могут быть отнесены либо к

неполнопрофильным деградированным подзолам либо к слаборазвитым почвам. В разрезе 1 выделено, по меньшей мере, пять почвенно-пирогенных серий; в разрезе 2 – по меньшей мере, четыре и в разрезе 3 – по меньшей мере, три серии пирогенных и почвенных горизонтов.

Определение пирогенных слоев затруднялось перераспределением угля по профилю (предположительно, уже после отложения) не только субгоризонтально, но и по вертикально ориентированным трещинам и клиньям, связанным с режимом просадки воронок. Дешифрирование морфонов, обусловленных просадкой, облегчала однонаправленность перемещения материала – к центру воронки, к предполагаемому понору. Вывалы, динамика воронок и неравномерность эрозионных процессов после пожаров сформировали многочисленные многосоставные морфоны – «полиморфоны» [Лойко и др., 2022].

Три описанных разреза имели собственные и комплементарные периоды пирогенной активности, которые дополняли друг друга. Построены модели «возраст-глубина» («age-depth» models) без учета случаев инвертированного залегания материала (три случая в разрезе 1) (рисунок 20). Приуроченность дат разным периодам голоцена подчеркивала дополняющий характер архивов: разрез 1 хорошо описывает бореальный (10000-9000 кал. л. н.) и атлантический (8000-7000 кал. л. н.) периоды, то есть ранний и начало среднего голоцена; разрез 3 – суббореальный (4000-3000 кал. л.н.) период в среднем голоцене; разрез 2 – субатлантический (2000 кал. л. н. – наши дни) период в позднем голоцене. Наличие древних пирогенных слоев относительно близко к дневной поверхности разреза 1 (55 см, 7000 кал. л. н.) указывает на долгий период стабильности карстовой воронки. Можно предположить, что после 7 тыс. л. н. воронка замедлила свою активность и выполаживалась, заполняясь почвенным и пирогенным материалом. В разрезах 2 и 3 пирогенные горизонты имеют возраст около 1900 и 4000 кал. л. н. на существенных глубинах 110 и 140 см, что свидетельствует о том, что воронки еще не прошли период своей просадочной активности. Из этого предположения следует, что разрез 2 – самый молодой палеоархив среди трех представленных не только по записанным периодам пирогенной активности, но и по времени образования. Глубина воронки с разрезом 2 в пять раз превышает глубину воронки 1 (5 м против 1 м) и в 1,7 раз диаметр (25 м против 15 м). Кроме возраста на глубину и диаметр воронки влияют: скорость растворения карстующейся породы, положение воронки в рельефе, материал заполнения (гранулометрический и минералогический состав, наличие водоупорных слоев) и водный режим территории [Спиридонова, 2007; Горячкин, 2010; Ащепкова, Семиколенных, 2014; Смирнова, 2015; Семиколенных и др., 2015; Туюкина и др., 2017]. Скоростью карстового растворения и положением в рельефе мы объясняем тот факт, что

воронки 1 и 3 обнаруживают морфологическое сходство: глубина воронки 3 – 0,5 м; диаметр – 10 м.

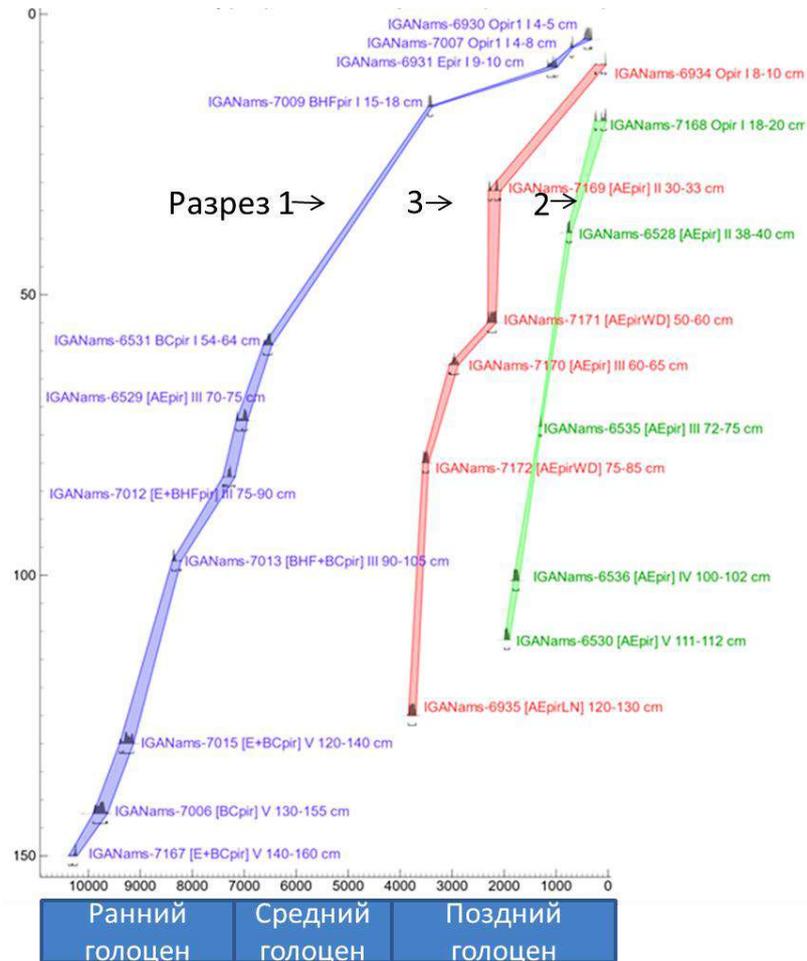


Рисунок 20. Модель возраст-глубина (OxCal, P Sequence). Самые древние записи периодов пирогенной активности соответственно 10260 ± 40 кал. л.н.; 3770 ± 40 и 1950 ± 30 кал. л. н. [(OxCal v4.3.2 Bronk Ramsey (2017); r:5 IntCal 13 atmospheric curve [Reimer et al., 2013]).

Хотя палеоархивы дополняют друг друга, пирогенные события между 6000 и 4000 кал. л. н. оказались наименее представленными. Далее, на примере палеокарстовых воронок Беломоро-Кулойского плато, будет показано, что в данный промежуток времени пожары происходили регулярно. Если палеоархив не отражает определенного периода пирогенной активности, то это может быть связано с локальными факторами, а также особенностями палимпсестовой и книгоподобно-палимпсестовой регистрации пирогенных событий. Следовательно, неполнота записи в нашем случае может быть обусловлена локальным отсутствием крупных пожаров в указанный период около конкретного палеоархива, неравномерным накоплением растительной биомассы (горючего), почвенного и осадочного материала, изменением водного режима территории.

Стабильные изотопы C и N. Варьирование отношения стабильных изотопов углерода и азота в ОВ почвы и антракомассе исследованных палеоархивов было незначительным

(таблица 12). Для ОВ почв в палеоархиве отношение стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) составило $-25,9 \pm 0,6\text{‰}$, азота ($\delta^{15}\text{N}$) – $-3,4 \pm 2,4\text{‰}$. Для антракомассы, $\delta^{13}\text{C} = -26,3 \pm 1,0\text{‰}$ и $\delta^{15}\text{N} = -0,6 \pm 0,9\text{‰}$. Диапазоны $\delta^{13}\text{C}$ (ср. значение ± 1 std. отклонение) для почв и углей перекрывались, однако для почв диапазон был более узким. Скорее всего, это связано с тем, что почва (без антракомассы) по мере ее долгосрочного функционирования в гумидном климате относительно равномерно пропитывается тонкодисперсными продуктами распада органического вещества, а также с особенностями фракционирования при минерализации и образовании специфического ОВ почв. В целом значения $\delta^{13}\text{C}$ свидетельствуют об относительно монотонном характере растительности в устойчиво дренированном карстовом ландшафте без ее существенных смен на протяжении практически всего голоцена, что согласуется с данными по таксономической идентификации углей, большая часть которых принадлежала *Pinus sylvestris* (см. раздел 4.3.1. ниже). В наибольшей степени материал углей и ОВ почв (без антракомассы) различался по соотношению стабильных изотопов азота $\delta^{15}\text{N}$. Возможно более высокие значения $\delta^{15}\text{N}$ в углях (утяжеление изотопного состава) связаны с фракционированием при высокотемпературном воздействии, тогда как материал почвенных горизонтов (без учета антракомассы) впоследствии пропитывался непирогенными продуктами разложения растительности со значениями $\delta^{15}\text{N}$ характерными для бореального леса с *P. sylvestris*, *P. abies*, *V. myrtillus*, *V. vitis-idaea* и др. В углях и почвенном материале глубоких горизонтов среднего и раннего голоцена наблюдалась слабая тенденция к утяжелению изотопного состава углерода по сравнению с современными горизонтами. Для изотопного состава азота (в почвенном материале) наблюдалась обратная тенденция. Вероятно, эти тренды можно объяснить поступлением свежего органического вещества от современной биоты, его накоплением в почве, а также сорбцией на внешних поверхностях углистых частиц, а не радикальной сменой растительных формаций. Утяжеление изотопного состава углерода также происходит при разложении органического вещества.

Таблица 12. Отношение стабильных изотопов углерода и азота в ОВ почвы и антракомассе пирогенных почвенных палеоархивов бассейна Кулоя.

Воронка	Горизонт	Глубина, см	Лабораторный код	$\Delta^{13}\text{C}$, ‰	$\Delta^{15}\text{N}$, ‰
pin01-18 B	Оа антракомасса	4-8	7007	-28.49	-0.70
pin01-18 B	Оа	4-8	7193	-27.03	-1.38
pin01-18 B	Е антракомасса	8-15	7008	-27.59	0.79
pin01-18 B	Е	8-15	7194	-26.77	-5.90
pin01-18 B	ВНФ антракомасса	8-16	7009	-26.59	-1.28
pin01-18 B	ВНФ	8-16	7195	-26.02	0.80

Таблица 12. Продолжение

Воронка	Горизонт	Глубина, см	Лаборатор- ный код	$\Delta^{13}\text{C}$, ‰	$\Delta^{15}\text{N}$, ‰
pin01-18 B	BC антракомасса	18-30	7010	-25.31	0.74
pin01-18 B	BC	18-30	7196	-25.06	-5.12
pin01-18 B	2E	30-50	7197	-25.78	-1.17
pin01-18 B	2BF+BC антракомасса	50-70	7011	-25.58	-0.9
pin01-18 B	2BF+BC	50-70	7198	-25.30	-0.64
pin01-18 B	3E	70-75	7199	-25.34	-2.99
pin01-18 B	3 E + BF антракомасса	75-90	7012	-26.29	-1.88
pin01-18 B	3 E + BF	75-90	7200	-25.72	-1.95
pin01-18 B	3 BF+ BC антракомасса	90-105	7013	-26.89	-0.87
pin01-18 B	3 BF + BC	90-105	7201	-25.55	-6.46
pin01-18 B	4 E + BF антракомасса	105-120	7014	-26.00	-0.37
pin01-18 B	4 E + BF	105-120	7202	-25.96	na
pin01-18 B	5 E + BC антракомасса	120-140	7015	-25.04	-0.57
pin01-18 B	5 E + BC	120-140	7203	-26.32	-6.87
pin01-18 B	5 E + BC антракомасса	140-160	7167	-25.47	-0.24
pin01-18 B	5 E + BC	140-160	7204	-25.64	-2.43
pin01-18 B	5 BC антракомасса	180-200	7016	-25.35	-0.12
pin01-18 B	5 BC	180-200	7205	-25.59	na
pin01-18 B	5 BC антракомасса	200-240	7017	-26.88	-2.3
pin01-18 B	5 BC	200-240	7206	-25.96	-4.73
pin01-18 B	6 E	240-250	7207	-26.68	-4.71

4.2.2. Радиоуглеродный возраст и морфология пирогенного палеоархива на плоской заболоченной водораздельной равнине Беломоро-Кулойского плато (Пинежский заповедник)

Было проведено датирование пирогенных горизонтов погребенных почв в днище крупной формы рельефа – депрессии глубиной 5-6 м (приложение Б1), являющейся стабильной палеокарстовой воронкой (север Пинежского заповедника, окрестности оз. Глухого) (рисунок 21). Описания почв и названия почвенных горизонтов палеоархива приведены в приложении Б.2. Временной охват палеоархива составил 5174-160 кал. л. н. (по медиане). Палеоархив характеризуется чередованием четырех профилей подзолов (Albic Podzol (Arenic, Pyric)).

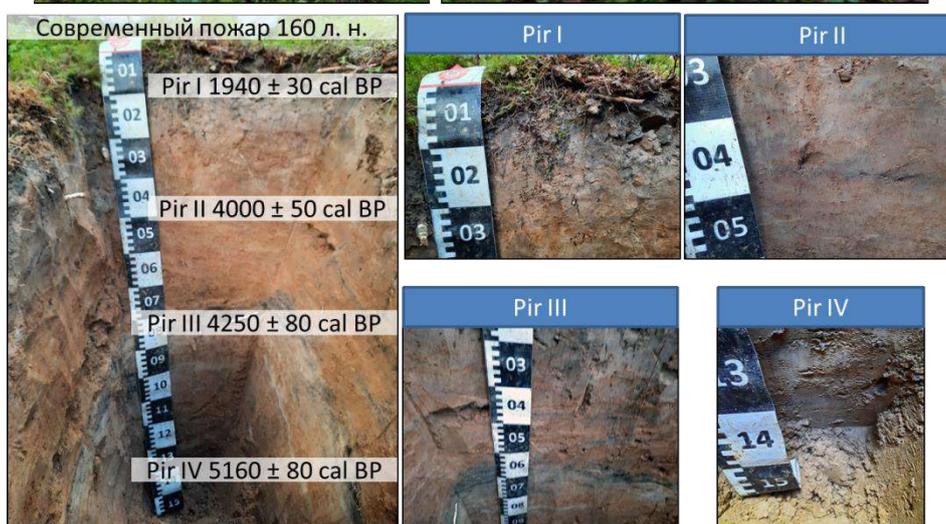


Рисунок 21. Общий вид (сверху) и почвенный разрез (снизу) в окрестностях оз. Глухого. Представлен калиброванный радиоуглеродный возраст. На левом рисунке – передняя стенка, на правом – пирогенные слои.

В межпожарные этапы в депрессии формировались полноценные почвенные профили. Горизонтальное чередование слоев и наличие периодов стабильного (полнопрофильного) почвообразования указывают на два факта. Во-первых, представленный палеоархив стабилен в ландшафте и не испытывает современных изменений, связанных с перемещением почвенного материала в понор. Во-вторых, постпирогенная эрозия была не такая интенсивная как в карстовых воронках просадочного происхождения. Последний факт может быть связан со стабильными условиями на участке расположения архива, высокой влажностью экосистемы и супесчаным гранулометрическим составом почв (в отличие от песчаного в воронках).

Представленный разрез 4 дополняет промежуток в периодах пирогенной активности (4000-6000 кал. л. н.) разрезов 1 и 3. Наблюдалась репликация подзолов в почвенном профиле,

как и в молодых карстовых воронках (разрезы 1, 2 и 3), что говорит о сходстве в направлении почвообразования. По возрасту пирогенных слоев представленный профиль занимает место между разрезом 1 и разрезом 3 и относится к суббореалу. Из различий в динамике палеоархивов (скорости заполнения, перемещения материала в попор и др.) следует возможность их разной способности к записи палеоинформации. Морфология углистых частиц – их значительное повреждение и размер менее 0,5 мм – указывали на влажные условия до их погребения [Gavin et al., 2003; Bird et al., 2015; Scott et al., 2009; Abney, Berhe, 2018].

4.3. Морфология и концентрация углистых частиц в пирогенных почвенных палеоархивах севера Европейской территории России

Углистые частицы были исследованы методами антракологического анализа, был произведен расчет концентрации антракомассы.

4.3.1. Антракологический анализ

В рамках антракологического анализа проведена ботаническая идентификация углистых частиц, погребенных в подзолах и псаммоземах карстовых воронок бассейна Кулоя (таблица 13). На протяжении всего периода пирогенной активности региона в составе пород присутствовала или даже доминировала сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), а в кустарниковом ярусе встречался можжевельник (*Juniperus* spp.). Некоторые образцы имели характерный блеск, что является признаком вторичного горения. Образцы с признаками вторичного горения имели меньшую размерность. Поскольку при относительно большой выборке (n=172) подавляющая доля древесных углей принадлежала сосне, то можно с высокой вероятностью утверждать, что на протяжении большей части голоцена в хорошо дренированном ледниково-карстовом ландшафте района исследований чаще всего произрастали именно сосновые леса. Учитывая крупный размер отдельных углей (более 2 см), древесный ярус полностью восстанавливался. Литературный обзор (глава 1, раздел 1.2.3.1) описывает приуроченность сосны к периодам пирогенной активности, что в том числе объясняет монотонный режим пожаров, записанный в палеоархиве.

Видовая монодоминантность растительности в пребореале скорее всего обуславливается локальными особенностями территории (бедные песчаные почвы). В последующие периоды голоцена свойства сосны: склонность к пирогенным автосукцессиям и толерантность к пожарам, обусловили на территории исследования циклы сосна-пожар-сосна.

В настоящий момент наблюдается распространение на территории исследования елей, но сосна в древесном ярусе превалирует. По принципу аналогии можно сделать вывод, что динамика пирогенных событий в ближайшее время не изменится – от одного до четырех крупных пожаров за 400 лет, или по одному крупному пожару в столетие.

Таблица 13. Ботаническая идентификация углистых частиц, погребенных в подзолах и псаммоземах карстовых воронок бассейна Кулоя (выполнено А.А. Гольевой).

Горизонт	Глубина, см	Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>)	Угли хвойных пород, подвергшиеся вторичному горению	Можжевельник (<i>Juniperus spp.</i>)	Кора	Корни
Pin01-18A	0-8	3				
Pin01-18C	4-5	3		1		
Pin01-18B	4-8	6		4		
Pin01-18C	6-7	6				
Pin01-18A	8-16	5				
Pin01-18C	9-10		2		1	
Pin01-18A	16-22	6				
Pin01-18B	18-30	3				
Pin01-18A	22-24	3				
Pin01-18A	28-50	3				
Pin01-18C	30-33	4				
Pin01-18C	33-41		2			1
Pin01-18C	41-63	3				
Pin01-18A	50-54	3	2			
Pin01-18A	64-80	3				
Pin01-18B	70-75	4				
Pin01-18C	71-90	1				1
Pin01-18A	110-120	6				
Pin01-18C	110-130	2	3			
Pin01-18A	135-150	2	1			
Pin01-18A	170-190	1				
Pin01-18A	190-200	7				
Pin01-18A	210-230	5				
Pin01-18B	240-250	6				
Pin02-18	18-20	5				
Pin02-18	38-40	10				
Pin02-18	72-75	8				
Pin02-18	111-112	8		2		
Pin03-18	8-10	6				
Pin03-18	30-33	9		1		
Pin03-18	60-65	5				
Pin03-18	75-85	5				
Pin03-18	105-115	1		3		
Pin03-18	120-130	6				

4.3.2. Концентрация антракомассы пирогенных почвенных палеоархивов

После расчета концентрации антракомассы на периферии и в центре карстовых воронок, а также на повышениях между воронками, было установлено, что ее содержание в пирогенных морфонах в центре воронок наибольшее – 174000 ppm (максимум 200000 ppm) (рисунок 22-а). Концентрация антракомассы на склонах воронки на порядок меньше, и

составляет 13500 ppm (рисунок 22-а). Концентрация антракомассы в почвах на повышениях между воронками низкая – от 100 до 2000 ppm, в морфонах вывалов – около 3000 ppm (рисунок 22а). У почв повышений и в минеральной части почв палеоархива наблюдалось резкое уменьшение размеров углистых частиц с глубиной, увеличивались окатанность и делимость на пластинки по структуре древесины. В пирогенных горизонтах содержались угли >5 мм хорошей сохранности, первой и второй стадии разрушения (подробнее про стадии разрушения угля в главе 7) на глубине до 180 см, тогда как в разрезах между воронками на глубине 50-60 см не было углей более 1 мм и они прошли через существенную механическую деградацию. Углистые частицы мигрировали по профилю в периоды дневного положения почв в связи с вывалами, просадками карстовых воронок, измельчением вследствие механической и биогенной деградации, сезонных циклов иссушения-увлажнения и промерзания-оттаивания. После погребения все эти процессы уменьшили свое влияние.

Разница в концентрации антракомассы между элементами воронки связана с трансаккумулятивными, элювиальными и переходными позициями и их роли в перемещении материала [Глазовская, 2002]. Существенное увеличение концентрации антракомассы к центру воронок с динамичными просадками не зависит от района исследований, тогда как накопление антракомассы в депрессиях без просадок тоже наблюдается, но менее выражено, и для него не характерны клинья и линзы [Сычева 2008; Смирнова, 2015].

Фракция антракомассы >2 мм встречается в горизонтах O, между горизонтами O и E почв как повышений, так и депрессий, а также в пирогенных морфонах от вывалов, трещинах, прослоях, корневицах и мощных пирогенных горизонтах. Фракция 2-1 мм встречается в верхних органогенных горизонтах и морфонах, кроме того доминирует в дневных и погребенных горизонтах E. Фракция 1-0,5 мм рассеяна среди минерального материала всех горизонтов и доминирует в горизонтах B(H)F (Bs, Bhs), BC и C. Максимумы концентрации антракомассы в разрезе 1 приурочены к пирогенным слоям 6,8, 5,6 и 0,85 тыс. кал. л. н., т.е. к атлантическому, суббореальному и субатлантическому периодам. В разрезе 2 – к 1,5 тыс. кал. л. н., т. е. к субатлантическому периоду. В разрезе 3 – к 3,5 тыс. кал. л. н., т. е. к суббореалу.

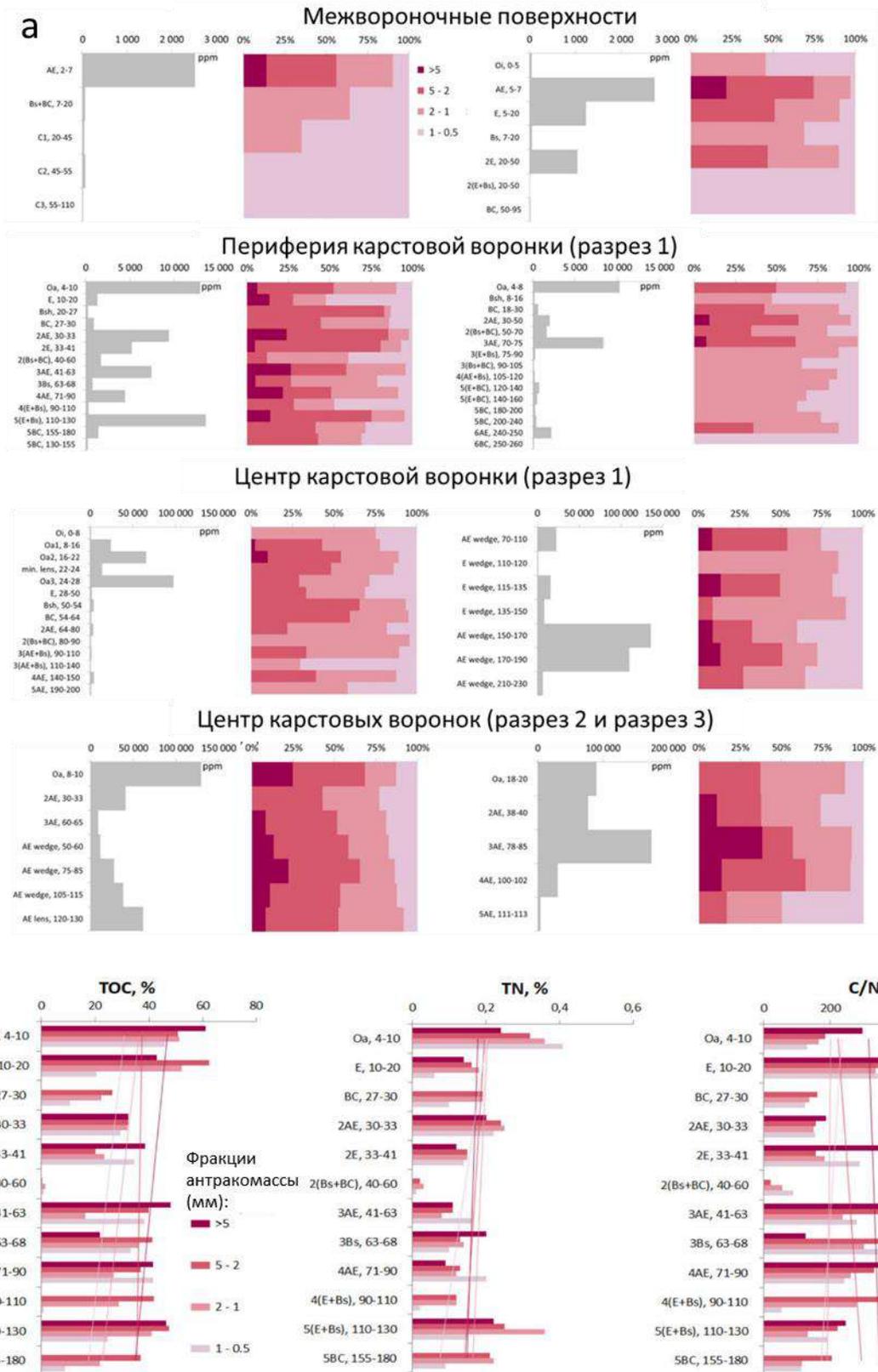


Рисунок 22: а – линейчатые гистограммы распределения углистых частиц по профилю почв карстовых воронок и межвороночных поверхностей, цветом показаны размерные фракции антракомассы (>5, 5–2, 2–1, 1–0,5 мм); б – распределение содержания органического углерода (ТОС), общего азота (ТН) и С/Н в различных фракциях углистых частиц с глубиной.

Содержание С и N в антракомассе. Фракции антракомассы содержали разное количество С и N, которое уменьшалось вместе с размером углей. Наиболее крупные и хорошо сохранившиеся углистые частицы, отобранные для радиоуглеродного датирования вручную (8-24 мм), содержали $60,68 \pm 9,63\%$ (среднее ± 1 ст. отклонение) органического углерода и $0,36 \pm 0,12\%$ общего азота, C/N – 390-460. В углистых частицах >5 мм (рисунок 22-б) концентрация С составляла – $41,51 \pm 11,58\%$; 5-2 мм – $36,41 \pm 15,81\%$; 2-1 мм – $29,42 \pm 14,4\%$; 1-0,5 мм – $24,08 \pm 5,69\%$. Содержание N в тех же фракциях было более постоянным: $0,17 \pm 0,06\%$; $0,17 \pm 0,08\%$; $0,18 \pm 0,10\%$; $0,14 \pm 0,11\%$, соответственно. В материале погребенных почв без учета пирогенных углистых горизонтов и морфонов в среднем содержалось $0,42 \pm 0,37\%$ С и $0,07 \pm 0,02\%$ N, C/N – 7 ± 5 (таблица 11). Пирогенные горизонты накопили значительное количество углистых частиц, в которых концентрация углерода в 57-140 раз выше, чем в материале остальных горизонтов погребенных почв, а азота – в 1,6-5 раз. Следовательно, пирогенные (углистые) горизонты в погребенных почвах являются основными аккумуляторами и консерваторами С и N, участие которых в биологическом круговороте существенно замедленно.

4.4. Результаты сравнения хронологии пожаров и морфологии палеопочв с климатическими реконструкциями голоцена в северной тайге Европейской территории России

4.4.1. Динамика пожаров в течение голоцена

Для всех датированных углистых частиц ($n=68$) было построено распределение суммарной плотности вероятности в пределах интервалов калиброванного радиоуглеродного возраста (2σ , вероятность 95,4%) (рисунок 23). Данное распределение отражает хронологию фаз активного накопления углистых частиц в почвах ледниково-карстовых ландшафтов бассейна Кулоя и Беломоро-Кулойского плато (в рамках изученных ключевых участков).

Мы сопоставили полученную хронологию с данными палеоклиматических реконструкций (рисунки 24 и 25). Появление пожаров в ответ на повышение температуры и смену растительного сообщества относится к концу пребореала [Александровский, Александровская, 2005; Филимонова, Лаврова, 2015] и связано, по всей вероятности, с постепенной сменой тундровых степей с перигляциальной флорой на хвойные и смешанные леса с бореальной флорой.

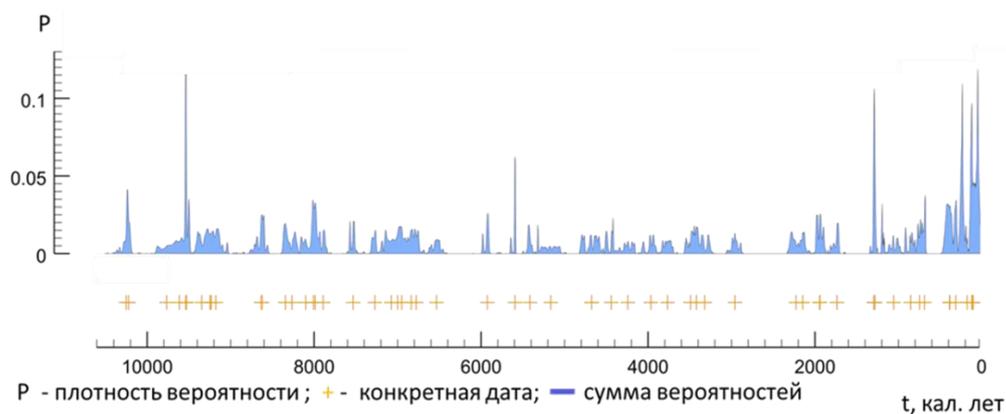


Рисунок 23. Хронология фаз активного накопления углистых частиц в почвах ледниково-карстовых ландшафтов: распределение суммарной плотности вероятности в пределах интервалов калиброванного радиоуглеродного возраста (2σ , вероятность 95,4%) для всех углистых частиц ($n=68$).

По данным палинологических реконструкций колебания температуры за период голоцена в среднем не превышали ± 2 °С. Колебания осадков, даже в самые динамичные этапы раннего голоцена пребореальный и бореальный, находились в пределах 400-600 мм/год.

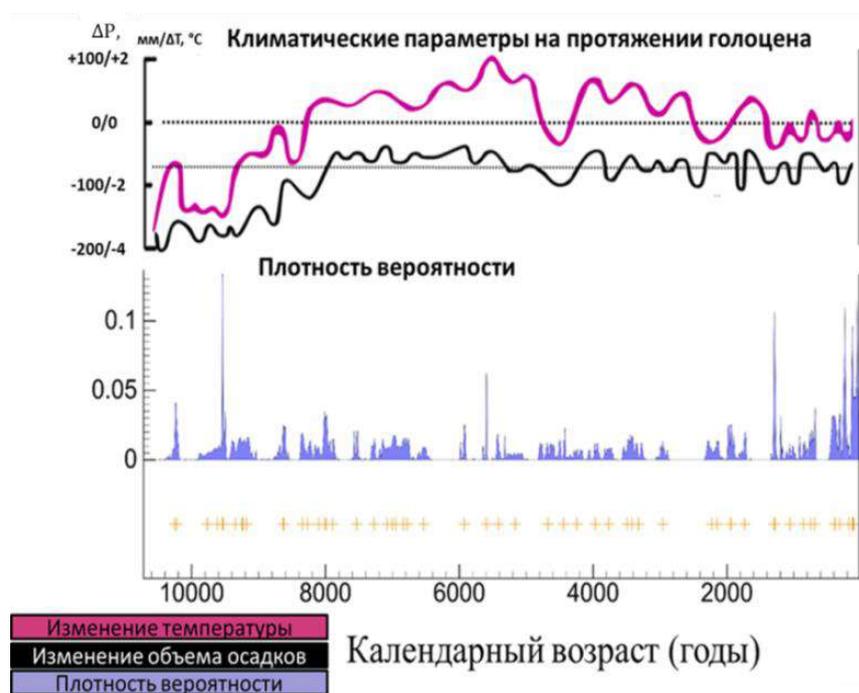


Рисунок 24. Связь почвенной записи пирогенных событий с параметрами климата голоцена (по Л.В. Филимоновой и В.А. Климанову (2005) и Л.В. Филимоновой и Н.Б. Лавровой (2015) данные по исследованиям оз. Онежское). Шаг деления на хронологической шкале через 200 лет.

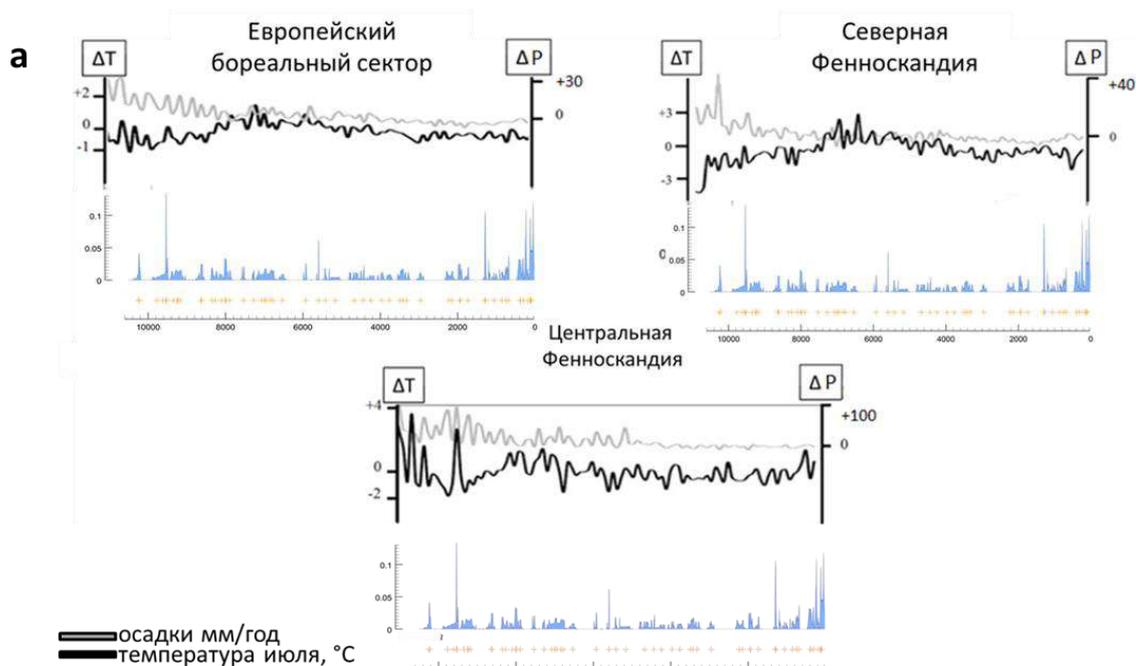
Крестики – медианы калиброванных интервалов радиоуглеродного возраста (2σ , вероятность 95,4%);
 ΔT – температура июля (± 2 °С за деление);
 ΔP – режим осадков (± 100 мм/год за деление).

На рисунке 25-а приведена динамика климатических данных для Европейского бореального сектора в целом, а также Северной и Центральной Фенноскандии [Molinari et al., 2018]. Климатические параметры не имели строгой связи с записью пирогенных событий в

изученных пирогенно-почвенных архивах за исключением корреляции с повышением температуры в раннем голоцене (особенно 9600-9400 кал. л. н.) в Центральной Фенноскандии. Этот период сопровождался повышением пирогенной активности на севере Европы [Marlon et al., 2013], которую связывают с существенной перестройкой климата и растительности в послеледниковье. Обнаруженную тенденцию к увеличению пирогенной активности и сокращению длительности межпожарных интервалов в последнее тысячелетие мы связываем с локальными антропогенными причинами – ближайшее к объектам исследования поселение Пинега существует, начиная с первой половины XII в. Таким образом, человеческий фактор стал оказывать существенное влияние на режим пожаров в последние 1000 лет.

То, что на основе представленных данных не удалось найти явных зависимостей между региональными климатическими параметрами и периодами пирогенной активности на протяжении большей части голоцена, говорит о важности локальных факторов в динамике пожаров, при условной стабильности климата. Сочетание хорошего дренажа и пирофитных пород деревьев может объяснять выявленную цикличность пожаров практически на протяжении всего голоцена.

Скорость накопления углистых частиц в пирогенных палеоархивах является индикатором количества сгоревшей биомассы, которая, в свою очередь, отражает интенсивность пирогенного периода. Удобной формой учета запасов угля, является т. н. «z-scores». Значение скорости накопления угля ($\text{см}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) сравнивается со средним за весь голоцен (условный 0), по всему массиву данных, где -1 – меньше среднего; +1 – больше среднего [Marlon et al., 2013; Morlani et al., 2018; Morlani et al., 2020] (рисунок 25-б).



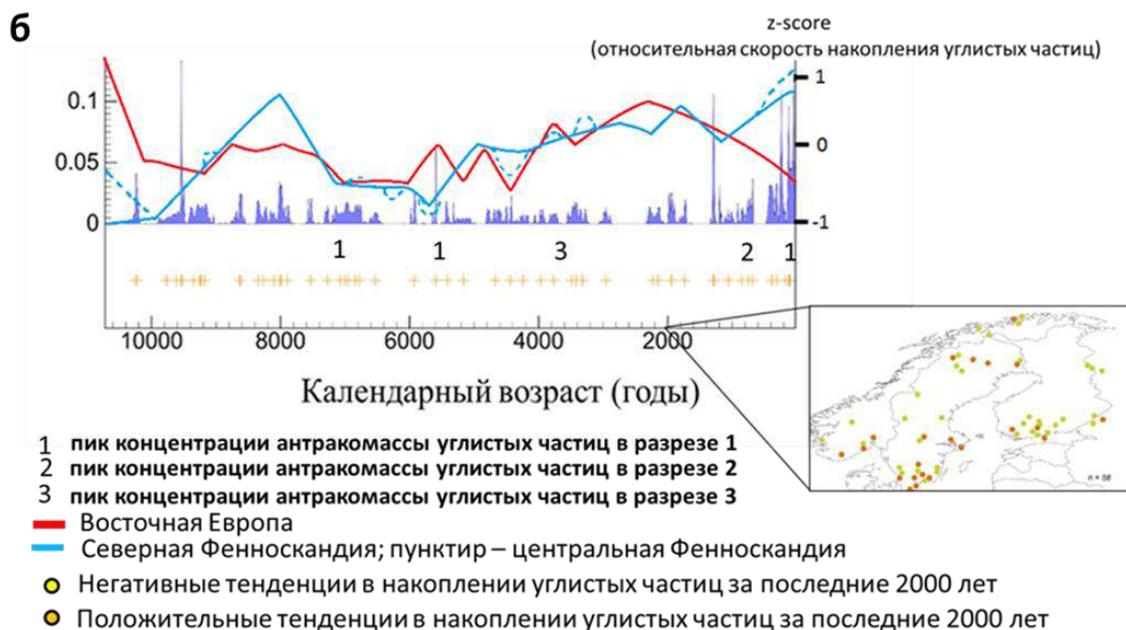


Рисунок 25. Сравнение почвенной записи пирогенных событий с разными палеоклиматическими данными:
a – с изменениями температуры июля (черная линия, ΔT) и среднего годового количества осадков (серая линия, ΔP) на протяжении голоцена по палинологическим данным [Mauri et al., 2015; Molinari et al., 2018]. Значения на осях ординат для количества осадков и температуры представлены в виде отклонений от 0, за который принята средняя температура (ΔT) и влажность (ΔP) за период 4000-200 кал. л. н.
б – с данными по скорости накопления углистых частиц в осадочных архивах в Восточной Европе и Фенноскандии [Marlon et al., 2013; Molinari et al., 2018, 2020].

По графику скоростей накопления углистых частиц видно, что региональные тренды Восточной Европы, Фенноскандии и наших объектов различаются. Скорости накопления углистых частиц в палеореконструкциях других авторов показывают максимумы на 11,0; 7,8 и 2,4 тыс. кал. л. н. В изученных пирогенно-почвенных архивах наибольшие запасы углистых частиц приурочены к 6,8; 5,6 и 0,875 тыс. кал. л. н. (от 100000 до 150000 ppm) (рисунки 19 и 22). Последние 1000-и лет пирогенная активность в ледниково-карстовых ландшафтов бассейна Кулоя и Фенноскандии становятся интенсивнее, что, как сказано выше, может быть связано с антропогенной активностью. Уменьшение скорости накопления углистых частиц в Восточной Европе мы связываем с возросшим контролем над распространением пожаров – другая форма антропогенной активности, подавление пожаров. Таким образом, можно восстановить следующие основные события голоцена, связанные с периодами пирогенной активности:

1. В пребореальное время (11640-10500 кал. л. н.), когда климат был влажным и умеренно прохладным относительно всего голоцена, территория покрылась березово-елово-сосновыми лесами, пришедшими на смену перигляциальной флоре. В этот период началась голоценовая история пожаров на севере ЕТР [Елина, 1981; Sjögren, 2021].

2. В бореальный период (10500-8850 кал. л. н.) климат стал более сухим, что увеличило долю сосновых лесов и вероятность пожаров [Елина, 1981].

3. В атлантический период (8850-5700 кал. л. н.) по данным Климанова, увеличение увлажнения сопровождалось повышением температур. В лесах присутствовали дуб и вяз, происходило активное болотообразование [Зубович и др., 1988; Sejrup et al., 2016]. Однако в дренированном ледниково-карстовом районе исследований увеличение доли лиственных пород могло не происходить – лиственные породы не диагностируются по данным антракологического анализа.

4. В суббореальный период (5700-2800 кал. л. н.) еловые и елово-сосновые лесные ассоциации с примесью широколиственных пород постепенно трансформировались в сосновые ассоциации с примесью ели и березы, вероятно, из-за сухого и холодного климата [Елина, 1981; Sjögren, 2021]. В течение этого времени пожары продолжались.

5. В ранние этапы субатлантического периода наблюдались некоторые колебания климата – он стал более теплым и влажным по сравнению с суббореальным. Начиная с этого момента, влияние человека приобретает системный характер; разделить природные и антропогенные факторы динамики пожаров этого периода по характеру палеоархивов не представляется возможным.

После проведенных исследований мы предлагаем следующую гипотезу: в течение голоцена территория бассейна Кулоя и Беломоро-Кулойского плато испытывала те же климатические колебания, что и вся лесная зона Восточно-Европейской равнины [Еловичева, 1985; Зубович и др., 1988], но древесная растительность в ледниково-карстовых ландшафтах района исследований менялась мало. Особенности рассматриваемой территории – карстующиеся породы, обуславливающие хороший дренаж и типы почв, представленные подзолами и псаммоземами, реплицирующимися на протяжении всего голоцена, обуславливали однородность растительного покрова (прежде всего древесного). Однородность растительного покрова, представленного хвойными породами – в основном сосной – повлияла на динамику пожаров, передав периодам пирогенной активности свойства однородности и даже монотонности. Полученные нами данные несколько отличаются от реконструкций пожаров по архивам книжного типа для ЕТР и СЗС, которые указывают на повышение пирогенной активности в оптимуме голоцена [Горбач и др., 2021; Startsev et al., 2022 (b), Думов et al., 2022(b)]. Возможными объяснениями отсутствия выраженного пика в атлантический период в нашей реконструкции 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. Часть углистых частиц могла быть утрачена в связи с эффектом «дожигания» при прохождении нескольких пожаров.

4.4.2. Связь частоты пожаров в голоцене с многовековыми климатическими ритмами

Данные по периодам пирогенной активности были проверены на возможную связь с климатическими циклами, за основу взяты составленные для территории ЕТР многовековые ритмы А.В. Шнитникова и обобщения С.А. Сычевой. Рассмотрение больших ритмов – 40000 и 100000-летних, не оправдано при исследовании голоценовой истории пожаров. Ниже представлена структура двухтысячелетнего ритма, изученная на основе радиоуглеродного датирования циклитов – чередования разных фаций аллювия и почв [Сычева, 2011] (рисунок 26).

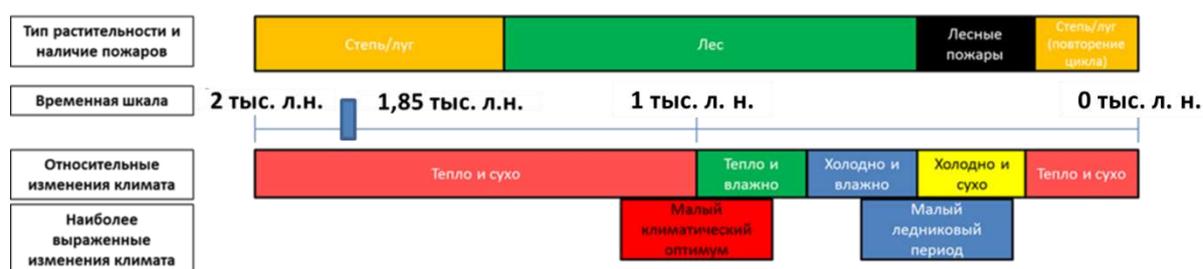


Рисунок 26. Структура двухтысячелетних (1850-летних) циклов по А.В. Шнитникову (1957, 1973) и С.А. Сычевой (2011).

В центре цикла наступает малый климатический оптимум, который затем сменяется малым ледниковым периодом. Пирогенные циклы характерны для начала и конца двухтысячелетнего цикла и сопряжены с сухими периодами климата, т. е. больше зависят от влажности, чем от температуры (рисунок 27).

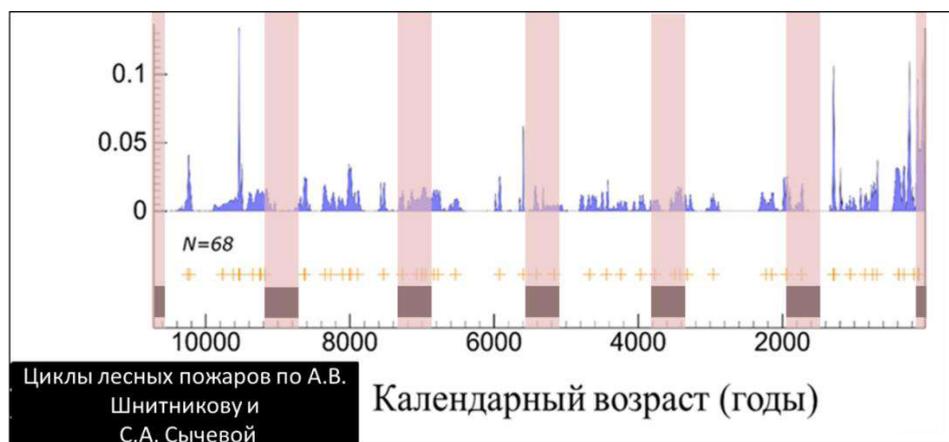


Рисунок 27. Сравнение периодов пирогенной активности в 2000-летних ритмах (1850-летних) по С.А. Сычевой и В.А. Шнитникову и хронологии фаз активного накопления углистых частиц в почвах (по нашим данным).

Ошибка встроенного возраста при датировании углистых частиц, может отклонять медианы пирогенных событий на 100-200 лет по делениям хроно-оси. При наложении ритмов пирогенной активности из схемы С.А. Сычевой и А.В. Шнитникова на график плотности вероятности пирогенных событий можно заметить совпадения в периодах пирогенной активности (в бореале и раннем субатлантике), но в целом, следования каким-либо определенным циклам в режиме пожаров не прослеживается.

Нами выдвинута следующая гипотеза: на тех территориях, где растительность способствует частой и однородной динамике пожаров и склонна к автосукцессиям после пирогенных нарушений, циклы пожар-послепожарная эрозия больше связаны с локальными условиями, чем с региональными климатическими параметрами в течение голоцена. На территории распространения песчаных почв в бассейне Кулоя мы выделяем непрерывный, монотонный ритм частоты пожаров на протяжении всего голоцена, поддерживаемый пирогенными автосукцессиями сосняка зеленомошника и/или сосняка лишайникового. Средний интервал между крупными пожарами составлял 100-150 лет; за 400 лет в большинстве случаев проходило от 1 до 3-4 крупных пожаров. Перерыв между крупными пожарами составил не более 650 лет за весь рассматриваемый период (относится к субатлантику). По дендрохронологическим данным, полученным методом бурения и спилов (рисунок 28, работа выполнена В.В. Мацковским), в современный период, с начала XX в., слабые пожары случались каждые 10-15 лет с перерывом между 1910-1930 гг. Гипотеза подтверждается данными исследования современных пожаров (см. главу 5).

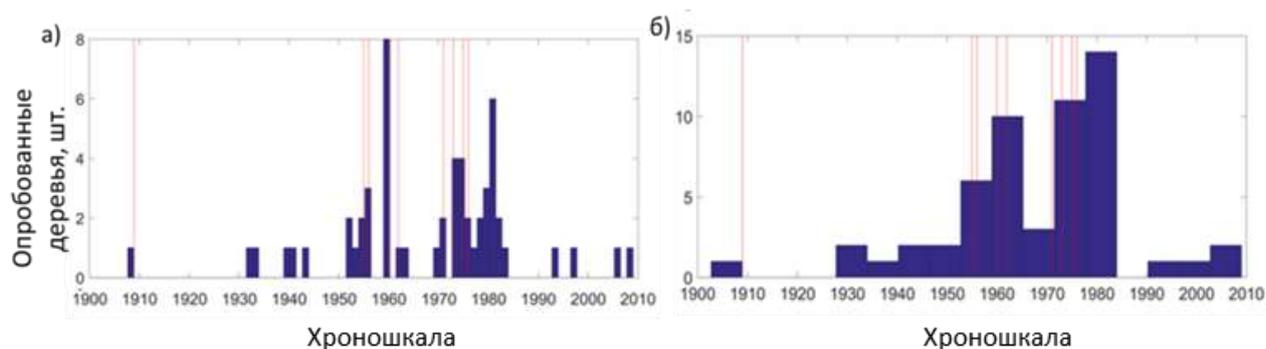


Рисунок 28. Данные дендрохронологического анализа территории распространения почвенных пирогенных палеоархивов (бассейн Кулоя) за XX в. сгруппированные по одному году (а) и пяти годам (б). Красная линия показывает гари, обнаруженные при отборе образцов из деревьев сегментарным способом, синие гистограммы – керновым.

Есть несколько положений, которые косвенно подтверждают такое заключение для бассейна Кулоя и Беломоро-Кулойского плато в северной тайге ЕТР:

1. Голоцен, после периода пребореала для района исследований, был относительно однороден по климатическим показателям – кривые температуры и влажности колебались в пределах ± 2 °C и 400-600 мм/год.

2. Территория исследований хорошо дренирована, потому что сложена песками, подстилаемыми сульфатным карстом с понорами. Это означает, что даже в периоды повышенной влажности напочвенный покров мог оставаться сухим и вероятность пожаров сохранялась.

3. Территория исследований достаточно бедна в химическом отношении, что ограничивает развитие лиственных пород, которые горят значительно реже. Наиболее приспособлены к таким условиям сосны.

4. Сосны являются пиروفитами, склонными к автосукцессиям после пожара. У сосны имеются специальные механизмы распространения и выживания после пожаров, которые она приобрела за длительное время коэволюции с ними.

Смена напочвенного покрова, которая могла тормозить наступление периодов пирогенной активности и обуславливать длительные перерывы между пожарами (до 650 лет), может быть связана с оторфованностью подстилки. Оторфованность подстилки могла быть вызвана пролювиальными периодами, динамикой карста с изменением водного режима, заболачиванием после пожара и деятельностью человека. Эта гипотеза, если она окажется верна, может быть расширена как во временном, так и в пространственном отношении на участки с дренированными бедными почвами и пирогенными автосукцессиями хвойной растительности. Для современных почв пирогенный паттерн будет зависеть от направления изменений климата и человеческой деятельности по предупреждению или провоцированию пожаров.

Заключение

Хотя в своем исследовании мы разделяем хроноряды современных пожаров и пирогенные палеоархивы природной среды, важно понимать, что история пожаров – это непрерывный процесс: пирогенные почвенные архивы оканчиваются почвами современных хронорядов пожаров, которые со временем также станут достоянием палеоархива. Докажем непрерывность пирогенного процесса на основе логического рассмотрения понятий «пирогенный почвенный палеоархив» и «современные хроноряды пожаров». От общего положения, что все почвы являются архивами палимпсестового или смешанного типа (рисунок 29а), мы перейдем непосредственно к объектам нашего исследования, и обнаружим, что они частично пересекаются (рисунок 29б), т. е. каждый пирогенный палеоархив отражает также современную динамику пожаров своей территории. Тем не менее, палеоархивом может выступать не каждый почвенный профиль. Несмотря на логическую совместимость (пересечение) наших объектов исследования, они изучаются как одинаковыми (морфологический метод), так и разными методами (набор физико-химических методов). Этот

факт подталкивает нас к их отдельному исследованию и, соответственно, отдельному представлению результатов, для этого мы искусственно вводим отношение противоречия – есть (рассматривается) наличие палеоархива, или нет (не рассматривается) (рисунок 29в). На самом деле мы имеем дело с тремя классами объектов исследования, пирогенными палеоархивами, современными постпирогенными почвами и объектами, которые сочетают в себе оба этих объекта (рисунок 29г), т. е. имеем отношения противоположности. В своей работе мы рассматриваем, в основном, два крайних случая (постпирогенные современные почвы и пирогенные почвенные палеоархивы), которые затем подвергнутся синтезу в главе 8.

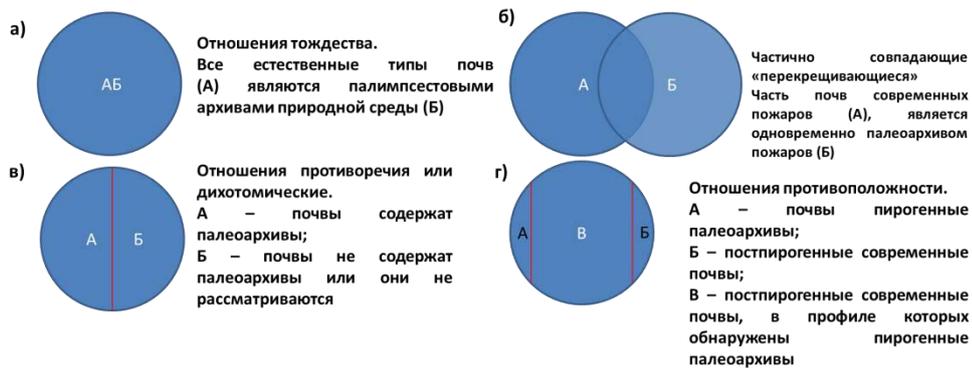


Рисунок 29. Естественные и искусственные связи изучаемых понятий.

Далее мы перейдем к хронорядам современных пожаров, подразумевая предел их возраста в интервале 0-300 (макс. 500) лет – верхняя граница возраста зависит от экосистемы. Схема исследования пирогенной истории региона приняла следующий вид (рисунок 30).

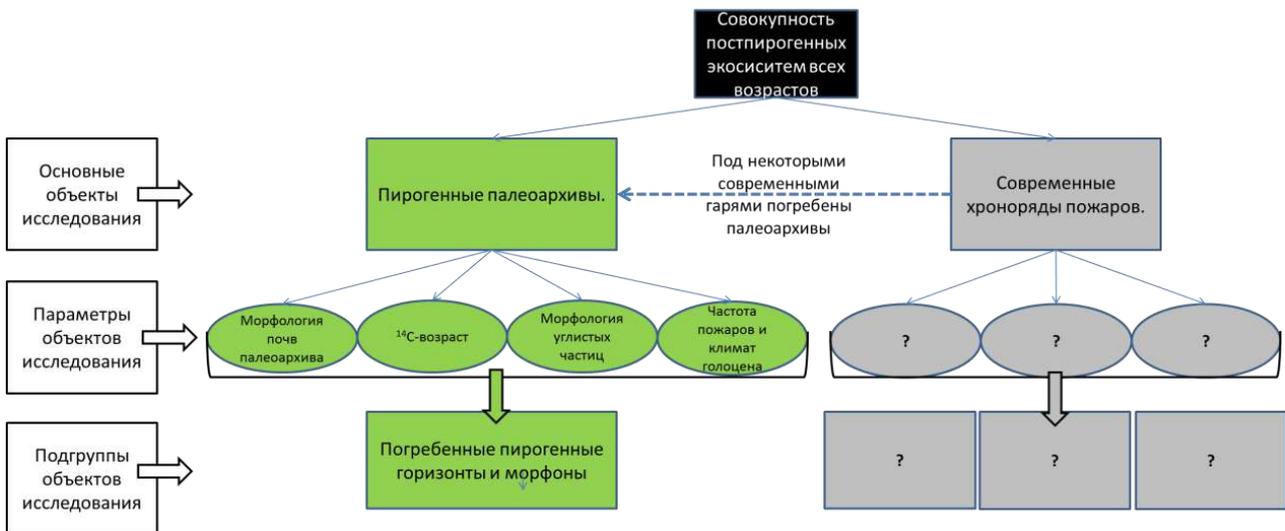


Рисунок 30. Схема пирогенной истории региона после исследования пирогенных палеоархивов.

ГЛАВА 5. ПОСТПИРОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ МОРФОЛОГИИ ПОЧВ И РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Согласно лесной пирологии участки, пройденные пожарами и сохранившие в большей мере древесную растительность, способную к восстановлению, будем называть горельниками; сильно поврежденные участки будем называть гарями.

Глава составлена по следующему плану:

1. Морфологические свойства постпирогенных экосистем северной тайги ЕТР.
2. Морфологические свойства постпирогенных экосистем средней тайги ЕТР.
3. Морфологические свойства постпирогенных экосистем кустарниковой тундры СЗС.
3. Типизация морфологических свойств постпирогенных экосистем.

5.1. Морфологические свойства постпирогенных экосистем северной тайги Европейской территории России Горельник 2017 г.

Зональный подход к описанию пожаров

Предлагается делить гари и горельники либо на три зоны по интенсивности лесных пожаров и трансформациям почвы и растительности: зону множественных очагов или очага, периферии и границы; либо на одну зону, в которой интенсивность пожара меняется незначительно. Каждая из этих зон может повторяться на территории гари, образуя пятнистый рисунок повреждений. Любая гарь или горельник либо переходит в экосистемы: в фоновые, по отношению к допожарным почвам и растительности, или соседствующие, отличающиеся от нее; либо прерывается естественным или искусственным препятствием (река, пожарный ров и др.). Достоверно определить, является ли окружающая экосистема для гари фоновой, не всегда возможно (например, в случае сильных масштабных пожаров), как и установить, трансформирована ли соседствующая экосистема, в свою очередь, пожарами. Соответственно, мы предлагаем называть окружающую экосистему условным фоном и помнить, что сравнение ее с допожарной обстановкой гари может быть не совсем корректно. Все зоны предлагается рассматривать относительно конкретной гари, а не в абсолютном выражении, поскольку распространение и параметры каждого пожара имеют слишком большое количество факторов, как внешних, так и внутренних (к тому же, динамичных в процессе горения), которые невозможно учесть при сравнении. Относительная средняя сила пожара, реконструированная по повреждению почвы и растительности, соответствует зоне периферии гари; относительная сила ниже средней – зоне границы; относительная сила выше средней – зоне очага (далее просто: низкая, средняя сила и интенсивность, и сильный пожар).

Гари или горельники с двумя или тремя зонами, выраженными на мезоуровне (20-30 м²), мы предлагаем называть неоднородными – это наиболее частый случай на объектах исследования. Гари или горельники с одной зоной интенсивности мы предлагаем называть однородными. Гари или горельники с несколькими, в разной степени изолированными, очагами – очаговыми, как и гари с зоной множественных очагов пожара (обусловленных, например, рельефом), ограниченных на одном участке и окруженных зоной периферии и границы. Последняя группа объединяет гари после пожаров с огненным штормом и/или на неоднородной по распределению ЛГМ территории, обычно они наиболее интенсивны. Интенсивность и сила очагового и неоднородного лесного пожара нарастает по градиенту от границы к зоне очагов, интенсивность однородного пожара условно постоянна по всей территории.

Пространственное распределение зон, основные особенности

Зоны границ пожаров наиболее неровные и способны проникать далеко в соседние экосистемы «языками» или «клиньями» в зависимости от расположения и характера ЛГМ. Периферия пожара является переходной зоной, где пожар имеет среднее относительное значение интенсивности, что находит отражение в большей силе послепожарной эрозии и в большем количестве поврежденной растительности, по сравнению с границей. Зона периферии является переходной зоной между границей и очагом гари, поэтому имеет сглаженные границы и наиболее трудна в определении. Очаги пожара могут быть представлены одним очагом или быть множественными, но сосредоточенными в одной области в сотни квадратных метров (неоднородный и очаговый пожар/гарь (горельник)). Могут охватывать несколько локаций, разделенных зонами периферии и границы (очаговый пожар/гарь (горельник)). Реальные границы гарей даны в приложении А1.

Результаты работы

Небольшой горельник, около 300 м², находится на террасе р. Кулой, в 500 м от дороги (Кулойское лесничество); рельеф представлен приствольными повышениями, перепады высот в пределах 0,5 м. Причина горения, предположительно, антропогенная. Вмешательство человека в развитие пожара заключалось в очистке леса от сгоревших остатков и в организации противопожарного рва. Горельник имел мало различий между зонами границы и периферии – ограничение распространения пожара рвом не позволило зоне границы заходить «языками» в соседнюю экосистему. Пожар 2017 г. имел относительно однородную зону очага, выделяющуюся на территории гари приблизительно в ее геометрическом центре (рисунок 31). Горельник 2017 г. относится к неоднородным, т.к. все основные зоны пожара морфологически проявились.



Рисунок 31. Схема распространения пожара 2017 г. Черная линия – пожарный ров. Желтым цветом показана граница пожара в пределах рва; оранжевым показана зона периферии – пунктир отражает сложность в выделении зоны; красным – зона очага. Здесь и далее белые кружки показывают заложённые разрезы

Условный фон

Верхний ярус фона представлен сосново-березовым (*Pinus sylvestris* и *Betula pendula*) зеленомошниковым (*Bryidae* sp.) и лишайниковым (*Cladonia rangiferina*) лесом с доминированием мхов. Возраст древостоя находится в интервале молодой-спелый. Обильный кустарничковый ярус представлен вереском (*Calluna* sp.) и брусникой (*Vaccinium vitis-idaea*) с доминированием вереска.

Мы применяем в названии почв родовой классификатор «постпирогенный», который только планируется в новом издании «Классификации и диагностике почв России», если в почвах ясно видны следы пирогенной трансформации и продуктов пожара, для того, чтобы подчеркнуть важность морфологической трансформации почв пожарами. В данном случае условный фон сам обладает богатым пирогенным паттерном.

Почвенный покров представлен подзолами типичными постпирогенными поверхностно-подзолистыми супесчано-песчаными со слабо развитым профилем на аллювии, иногда встречаются оподзоленные подбуры постпирогенные тех же видов и разрядов (рисунок 32).

Классификаторы почв по WRB даны в приложении В после названия по КиДПР 2004 г. (в формате КиДПР/WRB). Слой назван E p_{ir} II в сравнении с пирогенным слоем контрольной гари 2017 г. – E p_{ir} I, так как слой E p_{ir} II старше по относительному возрасту, т. е. римская цифра показывает относительный возраст пирогенных слоев.

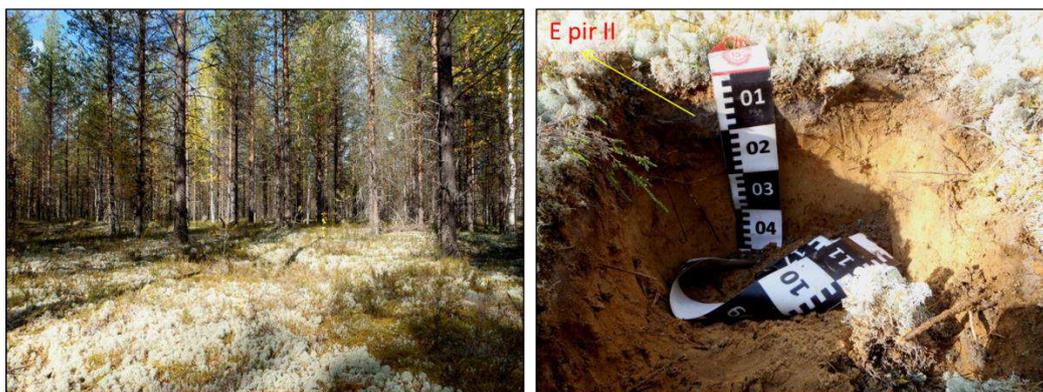


Рисунок 32. Общий вид и почва условного фона Горельника 2017 г. Отмечен пирогенный слой E pir II, образованный продуктами прошлых пожаров. Описание профиля в приложении В.1.1.

Граница и периферия горельника

Древесный ярус горельника сложен сосной и березой (*Pinus sylvestris* и *Betula pendula*) в соотношении около 60 к 40%. Оставшийся напочвенный покров после пожара представлен зелеными мхами. До 80% лишайникового покрова уничтожено. Переход между границей гари и периферией постепенный, по доле уничтоженной растительности. В травяно-кустарничковом ярусе брусника (*Vaccinium vitis-idaea*) и злаки. Степень восстановления в следующем году (2020) оказалась незначительной. Появился единичный подрост сосны (*Pinus sylvestris*). По морфологии почвенного профиля территория отличается широким разнообразием горизонтов ВF: типичный, оруденелый, с ярко-красной окраской (BF red), с новообразованиями, с пропиткой железа и плотный, до скрипа. Почвы представлены подзолами (оруденелыми) постпирогенными ненасыщенными поверхностно-подзолистыми супесчано-песчаными со среднеразвитым профилем на аллювии и подзолами иллювиально-железистыми постпирогенными ненасыщенными поверхностно-подзолистыми песчаными на аллювиальных отложениях (рисунок 33).



Рисунок 33. Сверху зона границы Горельника, снизу зона периферии; слева общий вид, справа почвы. Отмечен пирогенный горизонт, образованный продуктами пожара 2017 г. и горизонт ВNF red. Описание профиля в приложении В.1.1.

Зона очага горельника

В растительном покрове увеличилась доля поврежденной сосны до 70-80% – опалины до высоты 120-150 см. Подстилка полностью уничтожена. В травяно-кустарничковом ярусе восстановились злаки. В почве – многочисленные морфоны вывалов. Почвы сильно турбированные и представлены подзолами (оруденелыми) постпирогенными поверхностно-турбированными ненасыщенными поверхностно-оглееными поверхностно- и мелкоподзолистыми супесчано-песчаными на аллювиальных отложениях (рисунок 34).



Рисунок 34. Общий вид и почва зоны очага пожара на горельнике 2017 г. На рисунке показан пирогенный слой, оставленный пожаром 2017 г. Различим морфон вывала (в виде языка). Описание профиля в приложении В.1.1.

Заключение по морфологическому описанию горельника 2017 г.

На основании морфологического описания гари был сделан вывод, что пожар 2017 г. был неоднородным по интенсивности и силе, с постепенным переходом степени интенсивности между зонами. Дожарная растительность была пирогенно-уязвимой, с доминированием сосен и лишайников. Пожар имел низовой тип, слабую абсолютную силу, возрастающую до средней по направлению к центру гари. Подстилка выжжена очагами – от 50 до 70-80%; смертность среди деревьев, судя по обугленным остовам – около 10%. Почвы утратили подстилку, подверглись турбациям от вывалов, местами диагностируются псаммоземы.

Условия пирогенной экстремальности, описанные в главе 8 (наиболее поврежденные участки почв гари, уязвимые к различным типам эрозии), на территории горельника выражены в зоне очага пожара, и проявляются в медленном восстановлении нарушенной подстилки после обширного повреждения нижнего яруса экосистемы, т. н. «возрастная экстремальность» [Горячкин и соавт., 2019, 2022]. Часть почвенного покрова имеет черты условий параэкстремальности, когда ≤ 2 см подстилки ОН или подгоризонт ОН/Е сохранился, остальные почвы оптимальны. Ближе к центру гари в почвенном профиле возрастает доля включений угля (по массе) и заполненных углем морфонов, связанных с вывалами деревьев. Почвы слабо- и среднетрансформированные пожаром.

Гарь 2015 г.

Небольшая гарь, около 200 м², произошла на выровненном участке карстовой равнины на северо-западе Пинежского лесничества. Перепады высот в пределах десятков сантиметров. Причина возгорания – антропогенная. Пожар был оперативно потушен, что объясняет его малые размеры (рисунок 35). Вся древесная растительность выгорела.



Рисунок 35. Схема пожара 2015 г. Пунктиром показан периметр тушения пожара.

Условный фон

Растительность условного фона в древесном ярусе представлена монокультурой сосны (*Pinus sylvestris*); в травяно-кустарничковом ярусе черникой (*Vaccinium myrtillus*) и брусникой (*Vaccinium vitis-idaea*), с доминированием черники, а также злаками; в моховом ярусе – зелеными мхами (*Bryidae* sp.). Почвы представлены подзолами иллювиально-железистыми постпирогенными мелкоподзолистыми супесчано-песчаными на моренных и аллювиальных отложениях (рисунок 36).



Рисунок 36. Общий вид и почва условного фона к гарь 2015 г. Отмечен пирогенный горизонт E pir II образованный продуктами прошлых пожаров. Описание профилей в приложении В. 1.2.

В почве фона найден пирогенный слой, который может говорить о наличии у территории общего пирогенного паттерна.

Зона очага

После прохождения пожара растительность сменилась на разнотравье под подростом искусственно посаженной осины; никаких следов допожарной растительности (валежа, веток и др.) кроме углей не осталось, по причине санитарных мероприятий. Частый подрост осины (*Populus tremula*) прерывался единичными особями подроста сосны (*Pinus sylvestris*) в промежутках между кронами – проросшей, по всей видимости, из почвенного банка семян. В травяно-кустарничковом ярусе участились злаки и вереск (*Calluna* sp.). Почвы на гари – псаммоземамы постпирогенные мелкоподзолистые песчаные на аллювиальных отложениях (рисунок 37).

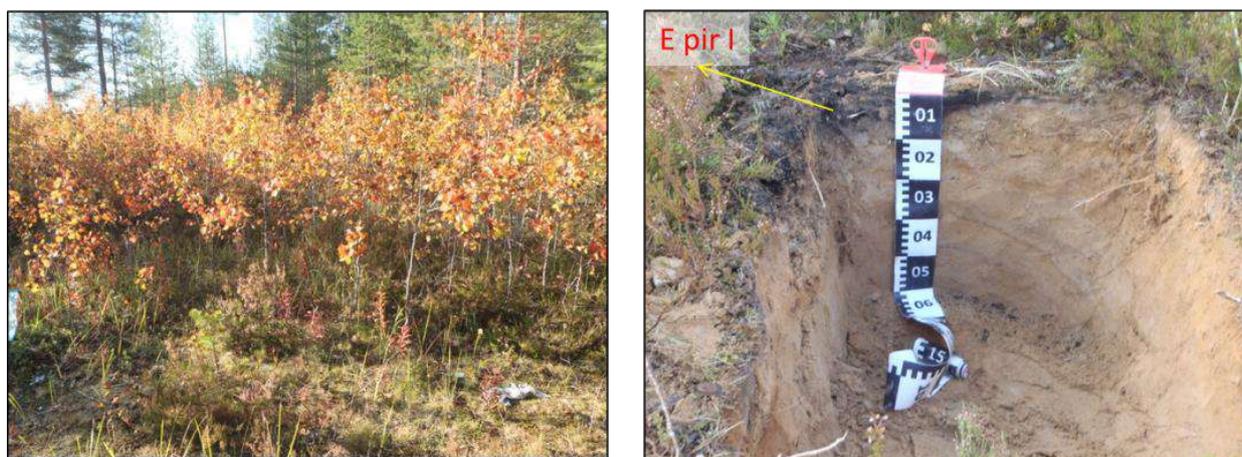


Рисунок 37. Общий вид и почва в зоне очага пожара на гари 2015 г. Отмечен пирогенный горизонт E pir I оставленный пожаром 2015 г. Описание профилей в приложении В. 1.2.

Заключение по морфологическому описанию гари 2015 г.

Гарь 2015 г. вызвана пожаром однородным по силе и интенсивности, смешанного типа, на участке с пирогенно-уязвимой растительностью с доминированием сосен и лишайников. Однородность в силе и интенсивности связана с оперативным тушением пожара. Почвы сменились с подзолов на псаммоземы и подверглись эрозии, что подразумевает условия почвенной экстремальности – возрастной экстремальность и факторной, связанной с бедностью субстрата. Однако оперативная посадка осины на поврежденном участке, пологоволнистый характер рельефа без выраженных уклонов и окружение гари лесом, уменьшили воздействие ветровой эрозии, обусловили быстрое восстановление экосистемы до условий почвенной параэкстремальности – верхняя часть почвы оказалась защищена войлоком, опадом и вереском. Почвы сильно- и среднетрансформированные пожаром

Гарь и горельники 2004 г.

Обширная гарь с участками горельников 2004 г. – площадью более 1,0-1,5 га занимает карстово-ледниковый ландшафт на северо-западе заповедника. Причина возгорания, предположительно, непотушенный костер рабочих [Попов, Пучнина, 2017]. Приблизительная схема распространения пожара 2004 г. представлена на схеме (рисунок 38).

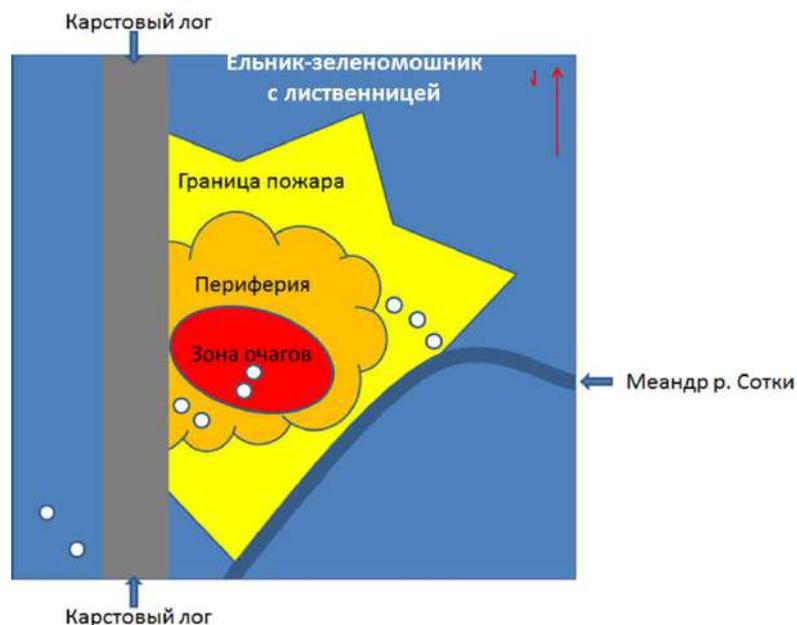


Рисунок 38. Схема распространения пожара 2004 года. С юго-запада его распространение было ограничено карстовым логом. С востока пожар был ограничен р. Сотка.

Территория распространения пожара имеет неоднородный рельеф: лога и воронки, а также примыкает к реке – распространение пожара было резко ограничено с нескольких сторон. Пожар 2004 г. имел: постепенно затухающие границы на севере (горельник) и границы, обрывающиеся у реки на востоке (гарь); периферию, резко ограниченную глубоким карстовым логом с запада и постепенно переходящую в зону границы к востоку; множественные, но сосредоточенные в одной области, очаги пожаров, примерно в центре своего периметра.

Условный фон

Древесная растительность условного фона представлена спелой и перестойной елью (*Picea obovata*), сосной (*Pinus sylvestris*) и лиственницей (*Larix sibirica*), с абсолютным доминированием ели. В кустарничковом ярусе представлена черника (*Vaccinium myrtillus*). В моховом ярусе распространены зеленые мхи (*Bryidae* sp.).

Почвы представлены (торфяно)-подзолами иллювиально-железистыми мелкоторфянистыми гипновыми песчано-супесчаными со среднеразвитым профилем на моренных отложениях и подзолистой почвой поверхностно-турбированной поверхностно-

оглеенной поверхностно-элювиальной легкосуглинистой со среднеразвитым профилем на моренных отложениях (рисунок 39).

Фоновые почвы для гари 2004 г. содержали следы палеопожаров – на глубине 80-100 см обнаружен погребенный пирогенный горизонт (рисунок 38 – увеличенная вставка).



Рисунок 39. Слева направо: общий вид – стрелки указывают расположение разрезов; почвы повышений; почвы депрессий. Увеличен фрагмент погребенного пирогенного горизонта в почве депрессии. Описание профилей в приложении В. 1.3.

Граница горельников 2004 г.

Карстовые формы имели частоту встречаемости до 500 штук на км² (определено по карте заповедника). Перепады высот между депрессиями и повышениями рельефа составляли до 3-5 м; днища депрессий были заболоченными, что и могло способствовать затуханию пожара. Влажные условия мы связываем с близким залеганием моренных отложений от дневной поверхности. В древесном ярусе спелая и перестойная ель (*Picea obovata*) и сосна (*Pinus sylvestris*), с включениями березы (*Betula pubescens*) и лиственницы (*Larix sibirica*) – ель доминирует. Кустарничковый ярус угнетен. В напочвенном моховом покрове в днищах воронок преобладает сфагнум (*Sphagnum* sp.), на повышениях – политрихум (*Polytrichum* sp.). Сфагнум сырой – при несильном сжатии сочится вода. Почвы представлены подзолами иллювиально-гумусово-железистыми постпирогенными мелкоторфянистыми сфагновыми песчано-супесчаными на моренных отложениях в депрессиях и подбурами оподзоленными иллювиально-железистыми постпирогенными неглубокоподзолистыми супесчано-песчаными на моренных отложениях на повышениях (рисунок 40).



Рисунок 40. Сверху общий вид снизу почвы границы пожара на гари 2004 г. Отмечены пирогенный горизонт гари 2004 г. - E/BF pir I и погребенный пирогенный горизонт, сложенный продуктами предыдущих пожаров – BF/BC pir II

Найдены слои палеопирогенного материала в почвах воронок. Пожар имел низовой тип, слабую интенсивность и силу. Нижний ярус выгорал небольшими пятнами, подстилка при этом обуглилась, но сохранилась; 100% древостоя пережило пожар. Морфология почвенного покрова и направление почвообразования в низинах и повышениях не изменились после пожара. Данный участок гари был однородным по силе пожара, подстилка имела пирогенно-устойчивый характер (была оторфованной). Почвы слаботрансформированные.

Периферия гари 2004 г.

По встречаемости карстовых форм рельеф классифицируется как расчлененная денудационная карстовая равнина, перепады высот до 6-7 м. Распространение пожара, прервано глубоким логом. Тип пожара смешанный, что подтверждается высокой смертностью допожарной древесной растительности и напочвенного покрова, пожар интенсивный и сильный – как минимум 80-95% растительности было уничтожено. Допожарная растительность гари, возможно, несколько отличалась от условного фона, по причине естественной пространственной неоднородности и водного режима. В древесном ярусе преобладал обильный подрост березы (*Betula pubescens*) и осины (*Populus tremula*) с доминированием березы. В кустарниковом ярусе встречаются кусты малины (*Rubus idaeus*). Травяно-кустарничковый ярус: черника (*Vaccinium myrtillus*), иван-чай (*Chamerion anstifolium*) и злаки.

В моховом ярусе кроме зеленых мхов появился политрихум (*Polytrichum* sp.). Почвы представлены подзолами иллювиально-железистыми постпирогенными ненасыщенными поверхностно-подзолистыми песчано-супесчаными на сульфатных карстующихся породах в депрессиях и на повышениях и подбурами оподзоленными постпирогенными

ненасыщенными слабовыщелоченными песчано-супесчаными на сульфатных карстующихся породах на повышениях (рисунок 41).



Рисунок 41. Почвы зоны периферии гари 2004 г. Слева общий вид; сверху почвы повышений, снизу – депрессий. Углистые включения в погребенном горизонте показаны крупным планом.

Превалирование мелких углистых частиц в общей антракомассе в верхних горизонтах косвенно свидетельствует о высокой температуре и устойчивости пожара на его периферии, т.е. о большой степени сгорания древесины. Наличие палеоугля на глубине около 100 см, как на территории гари, так и на фоновых участках говорит о прохождении масштабных пожаров на территории гари в прошлом. Зона периферии была неоднородна по степени

повреждения почвенного покрова пожаром на повышениях и в воронках просадочного происхождения.

Зона очагов гари 2004 г.

Очаги пожара выделены по полному уничтожению допожарной растительности и, кроме того, распространению пирогенно-экстремальных условий почвообразования. Разрезы расположены на расчлененной денудационной равнине, примыкают к зоне периферии. Растительность гари была представлена густым, местами непроходимым, молодняком осины (*Populus tremula*) и березы (*Betula pubescens*) кустарничками черники (*Vaccinium Myrtillus*) и злаками. Почвы представлены (торфяно)-подзолистой поверхностно-турбированной постпирогенной поверхностно-оглееной мелкоторфянистой злаково-гипновой супесчанно-легкосуглинистой почвой на сульфатных карстующихся породах в депрессиях и подбуром иллювиально-железистым постпирогенным карбонатным песчано-супесчаным со слаборазвитым профилем на сульфатных карстующихся породах на повышениях, а также гипсопетроземом на склонах карстовых форм рельефа (рисунок 42).



Рисунок 42. Слева направо: общий вид зоны очагов пожара на гари 2004 г и шрамы от пожаров на останце дерева; почвы повышений; почвы депрессий. Красной стрелкой показано расположение разрезов на местности.

В почвах наблюдаются значительные повреждения профиля с потерей генетических горизонтов. Тип пожара смешанный, интенсивный, сильный – до полного уничтожения допожарной растительности (95-100% летальности). Очаги гари приурочены к повышениям. Почвы повышений эродированы в карстовые воронки (очаговый характер повреждений). Местами экспонирована плотная порода. Почвы сильно- и необратимо трансформированные.

Заключение по морфологическому описанию гари 2004 г.

Карстовый рельеф оказал разнонаправленное влияние на пожар: с одной стороны он ограничил его распространение, с другой – ускорил послепожарную эрозию в зонах периферии и очагов пожара, что замедлило восстановление почвенного покрова и растительности. На территории гари наблюдались следующие изменения в почвенном покрове:

1. переходы подзола в подбур – потеря О и Е горизонтов;
2. переходы подзола в псаммозем, гипсопетрозем и пелозем при наиболее выраженной эрозии на склонах воронок;
3. подзолистой почвы в торфяно-подзолистую, вследствие нарастания гор. Т после пожара;
4. подзолистой в подзолисто-глеевую почвы, вследствие образования ELg, BELg и BTg;
5. образование турбированных подтипов, изменение родов и видов почв по степени оподзоливания, элювиирования, оглеения и наличие признаков пирогенеза (морфоны и пирогенные горизонты), изменение разрядов почв по мощности профиля.

По итогам морфологического описания почв и растительности сделан вывод, что гарь и горельники 2004 г. вызвана неоднородным по интенсивности и силе пожаром – очаги

сконцентрированы примерно в центре гари и приурочены к повышениям. Пожар был низинного и смешанного типов в разных зонах. Последствия пожара для почв в зоне очагов и периферии гари – необратимые, так как экспонирована бедная плотная порода (гипсы и ангидриты). Условия пирогенной экстремальности, на территории гари выражены в зонах очагов и в зоне периферии и тесно связаны с выходами гипса и резкими перепадами высот карстового рельефа (возрастная экстремальность, факторная лито- и топо-экстремальность). Местами наблюдается полный снос почвенного материала с плотной породы, что соответствует понятию ортоэкстремальных почв. Параэкстремальные почвы сосредоточены на склонах депрессий.

Пожары 2017 г., 2015 г. и 2004 г. значительно трансформировали песчаные почвы и на настоящий момент (2019 г.), изменения не закончились: продолжается слепожарная эрозия, образование морфонов от вывалов поврежденных уязвимых деревьев, ускоренное образование органогенных горизонтов, латеральная и вертикальная миграция углистых частиц и восстановление растительного покрова нижних ярусов. По данным об интервалах между пожарами (дендрохронология, приведенная в главе 4) можно заключить, что сосняки лишайниковые, к которым близка растительность гарей 2015 и 2017 гг., перманентно находятся на этапе восстановления после пирогенной трансформации (имеют богатый пирогенный паттерн). Из этого следует, что пожары часть естественного функционирования бедных песчаных почв с промывным водным режимом под сосняками на наших участках исследования, что подтверждает выводы, сделанные в главе 4 – о постоянной частоте пожаров на протяжении всего голоцена в пирогенных палеоархивах, сформированных бедными песчаными почвами.

Гарь 1990 г.

Гарь 1990 г. расположена к западу от центра заповедника. Размер гари около 100 м². Источник пожара – удар молнии в пожарную вышку. Пожар охватил холм, на котором стояла пожарная вышка и его окрестности – уничтожил всю растительность. Холм, возможно, искусственного происхождения, но уже имеет сформированный почвенный профиль подзола. Предполагаемая схема пожара гари 1990 г. (рисунок 43).



Рисунок 43. Схема гари 1990 и 1937 гг. Показаны разрезы на гарях как 1990 г., так и 1937 г. Черный пунктир отмечает границы холма.

Пожар остановил свое распространение на заболоченных участках у подножия холма, а также после тушения человеком. Граница с гарью 1937 г. диагностировалась по карте пожаров Пинежского заповедника (приложение А.1) и старым шрамам от пожара на отдельных деревьях.

Очаг гари

Гарь 1990 г. носит следы восстановления исходной растительности – ельника зеленомошного под пологом березы (*Betula pubescens*). Наблюдаются спелые деревья березы с широкими межкроновыми промежутками, в которых растет молодняк ели до 2-3 м высотой (*Picea abies*). Кустарничковый покров слабо выражен, заметно восстановление брусники и черники (*Vaccinium vitis-idaea* и *Vaccinium myrtillus*). В травянистом ярусе встречаются злаки и иван-чай (*Chamaenerion* sp.). В напочвенном покрове зеленые мхи (*Bryidae* sp.) и редкие пятна лишайника кладонии оленьей (*Cladonia rangiferina*). Почвы представлены подзолами иллювиально-железистыми постпирогенными ненасыщенными мелкоподзолистыми песчано-супесчаными со слабо развитым профилем на искусственной песчаной насыпи (рисунок 44). При исследовании гарей на поздних стадиях восстановления особое внимание было уделено перераспределению углистого материала по профилю почв (в приложении В.1.4).



Рисунок 44. Слева общий вид – выделен останец пострадавшего в пожаре дерева; справа почвенный разрез на гари 1990 г. Отмечены включения углей. Описание профиля в приложении В. 1.4.

Вывод по морфологическому описанию гари 1990 г.

Пожар, вызвавший гарь 1990 г. был однородным по силе и интенсивности смешанного типа; допожарную растительность определить не удалось (угольки принадлежат сосне и ели). Растительность восстанавливается через стадию лиственных пород, в основном березы, а также ели. Почвы среднетрансформированные пирогенезом.

Горельник 1937 г.

Горельник 1937 года занимал суммарно около 1,5 га. Его границы отражены на карте повреждения растительного покрова Пинежского заповедника (приложение А.1). Деление горельника на зоны невозможно по причине его возраста – все следы пожара – шрамы от пожара на деревьях, углистые частицы и морфоны и др. – не могут служить достаточным основанием для выделения зон по силе и интенсивности пожара и свидетельствуют только о его прохождении по данной территории. Горельник 1937 г. не может рассматриваться как условный фон к гари 1990 г., так как почвы и водный режим этих гарей существенно различаются. Было заложено три разреза в разных растительных и почвенных условиях на территории горельника.

Полугидроморфные условия

Рельеф бугорковатый, с перепадами высот 1,5-2,5 метра. Поблизости располагалось болото около 50 м в диаметре, с открытым зеркалом воды. Растительность представлена спелыми и перестойными невысокими угнетенными елями (*Picea abies*) с примесью березы (*Betula pubescens*), не более 10-15% от всех деревьев. Береза угнетена высокой влажностью, поросла лишайником и грибами-трутовиками. Среди подроста наблюдались отдельные особи рябины (*Sorbus aucuparia*). В травяно-кустарничковом ярусе доминантом выступала брусника (*Vaccinium vitis-idaea*), встречались осоки и злаки, хвощ (*Equisetum sylvaticum*) на мезоповышениях. В напочвенном покрове преобладал зеленомошник (*Bryidae* sp.) и сфагнум (*Sphagnum* sp.) в понижениях. Локально встречался политрихум (*Polytrichaceae* sp.). Почвы представлены подзолистыми с микропрофилем подзола (двучленными по гранулометрическому составу) поверхностно-турбированными контактно-осветленными поверхностно-элювиальными супесчано-среднесуглинистыми почвами со слаборазвитым профилем на моренных отложениях (рисунок 45).



Рисунок 45. Слева общий вид и обгоревший комель ели на горельнике 1937 г.; справа почвенный профиль. Отмечены включения углей. Описание почвенных профилей в приложении В.1.5.

Последствия пирогенной трансформации в почвенном профиле не читаются, продукты пожара в виде обособленных углистых частиц – единичны, поэтому в названии почвы род «постпирогенный» не отмечен.

Переходные между полугидроморфными и автоморфными условия

Рельеф бугорковатый, имеет легкий уклон 1-2° к югу, перепады высот около 2,0 метров. Место заложения разреза представляет собой полянку в лесу, около 20-30 м². Растительность представлена спелым еловым лесом (*Picea abies*) и еловым молодняком; отмечена небольшая доля (не более 5% по количеству) перестойной лиственницы (*Larix sibirica*) и спелой березы (*Betula pubescens*). Почвы представлены торфяно-подзолисто-глеевыми с микропрофилем подзола ненасыщенными мелкоторфянистыми гипновыми

поверхностно-оглеенными неглубокоэлювиальными супесчано-легкосуглинистыми со среднеразвитым профилем на моренных отложениях (рисунок 46).



Рисунок 45. Слева общий вид, справа почвенный профиль горельника 1937 г. Отмечено распределение углей по профилю

Основное количество продуктов пожара найдено между горизонтом Т и EL почвы, что может говорить о том, что пожар 1937 г. уничтожил значительную часть подстилки.

Автоморфные условия

Рельеф пологоволнистый, перепады высот не более 0,5 м. Растительность представлена сомкнутым молодым и спелым ельником (*Picea abies*) высотой 2-3 м, с включением спелой и перестойной березы (*Betula pubescens*) до 30%. Кустарничковый ярус бедный – отдельные кустарнички брусники (*Vaccinium vitis-idaea*). Напочвенный покров представлен детритом из остатков березы, фрагментарно встречаются зеленые мхи (*Bryidae* sp.) и политрихум (*Polytrichum* sp.). Почвы представлены подзолами иллювиально-железистыми контактно-осветленными мелкоподзолистыми песчано-супесчаными со слаборазвитым профилем на моренных отложениях (рисунок 47).



Рисунок 47. Слева общий вид и шрамы от пожаров на останце дерева на горельнике 1937 г.; справа – почвенный профиль. Отмечено распределение углей по профилю.

Хотя нами отмечались углистые частицы в почве в переходных условиях на гари 1937 г., они встречались поодиночке и не образовывали протяженных морфонов, поэтому мы решили не называть почвы «постпирогенными».

Заключение по морфологическому описанию горельника 1937 г.

Принимая во внимания разницу в водном режиме, почвенных типах и напочвенном покрове на разных участках горельника 1937 г., мы сделали вывод, что пожар был неоднородным по силе и интенсивности, местами низового, местами смешанного типа, имел очаговый характер. Он проходил как через пирогенно-уязвимую сосново-лишайниковую экосистему, так и через более пирогенно-устойчивую растительность, представленную ельниками-зеленомошниками. Почвы суглинистого и суглинисто-супесчаного гранулометрического состава (подзолистые почвы) на территории гари, трансформировались пожаром меньше, чем песчаного (подзолы). В общем, почвы гари 1937 г. трансформированы пожаром незначительно – наблюдаются отдельные пирогенные морфоны, прерывистые слабовыраженные пирогенные горизонты и закономерные перераспределения включений углистых частиц по почвенному профилю и элементам рельефа. На общее состояние углистых частиц и их количество в профиле почвы значительно влиял водный режим, который на данной территории заповедника в значительной степени управляется глубиной водоупора, представленного плотными моренными отложениями.

Горельник 1860 г.

Пожар 1860 г. проходил на севере заповедника. В настоящий момент здесь наблюдаются близкие к гидроморфным и полугидроморфные условия водного режима. Пожар имел площадь 2-2,5 га (приложение А.1). Рельеф среднерасчлененный, с палеоворонками до 4-5 м. В двух рассмотренных профилях, оказавшихся пирогенными палеоархивами, выделены современные почвы, трансформированные пожаром 1860 г.

Условия, близкие к гидроморфным

Растительный покров представлен разреженным перестойным угнетенным еловым лесом (*Picea abies*) с долей спелой и перестойной лиственницы (*Larix sibirica*) до 30%. Травяно-кустарничковый ярус представлен брусникой (*Vaccinium vitis-idaea*) более 10-15 см в высоту, незначительным количеством черники (*Vaccinium myrtillus*) и осокой (*Carex* sp.). Моховой покров представлен зелеными мхами и пятнами сфагнома (*Bryidae* sp. и *Sphagnum* sp.). Почвы представлены подзолисто-глеевыми потечно-гумусовыми поверхностно-элювиальными супесчано-легкосуглинистыми со слабо развитым профилем на моренных отложениях, а также подзолами глеевыми и торфяно-подзолами глеевыми

поверхностно-оглееными мелкоподзолистыми песчаными со слабо развитым профилем на моренных отложениях. На глубине 40-60 см сочится вода и начинается щебнистый материал морены (рисунок 48).

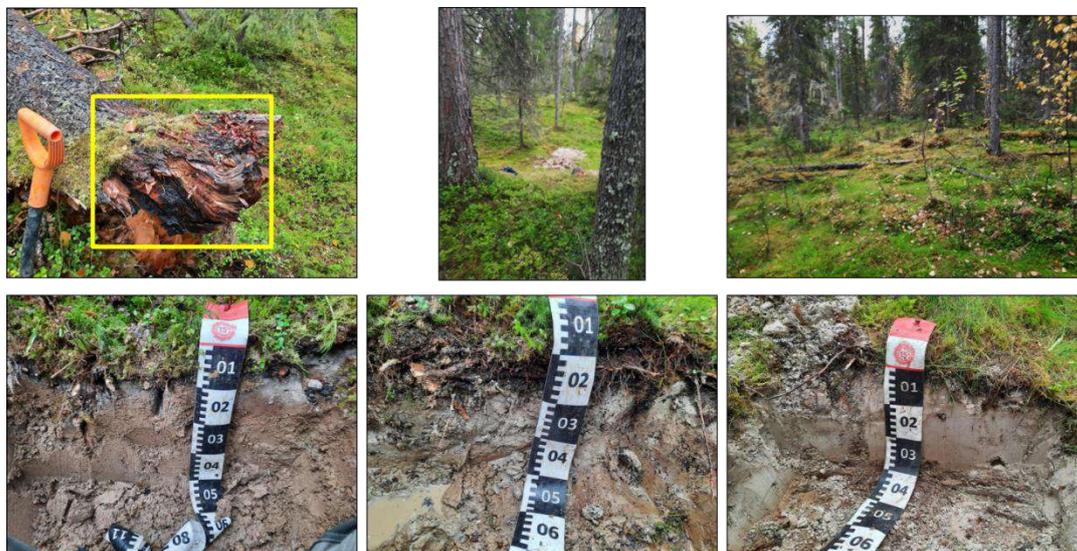


Рисунок 48. Сверху общий вид и следы от пожара; снизу почвы горельника 1860 г. Описания профилей почв в приложении В.1.6.

Угlistых частиц в подстилке не обнаружено, иногда встречалась прокраска горизонта Е или ЕL продуктами пожара.

Полугидроморфные условия

Растительный покров границы горельника 1860 г. полностью восстановился после пожара и не отличается от окружающего фона. В древесном ярусе доминирует спелая и перестойная ель (*Picea abies*) с единичными деревьями перестойной лиственницы (*Larix sibirica*) и молодым подростом березы (*Betula pubescens*) в 40-60 см. В кустарничковом ярусе можно встретить бруснику (*Vaccinium vitis-idaea*). В напочвенном покрове влажный, практически сырой мох (*Bryidae* sp. и *Sphagnum* sp.) и разнотравье, представленное злаками (*Gramineae* sp.), осоками и высокой геранью (*Geranium pratense*) (до 50 см). Наиболее старые ели имеют трещины, являющиеся следствием температурного воздействия либо в результате пожара, либо морозов (морозобойные трещины). Также найдена лиственница с подпалиной на нижней части ствола.

Почвы представлены серией погребенных подбуров иллювиально-гумусово-железистых постпирогенных ненасыщенных мелко торфянистых гипново-осоковых супесчаных на аллювии на повышениях и серией погребенных подзолов постпирогенных насыщенных мелко торфянистых зеленомошных мелкоосветленных песчано-супесчаных на моренных отложениях в депрессиях (рисунок 49 и 50).

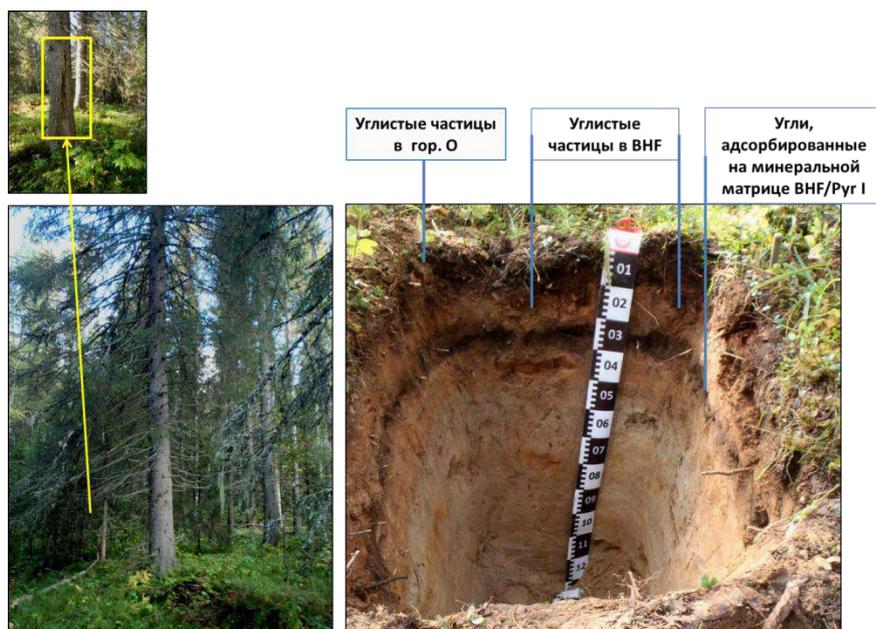


Рисунок 49. Слева общий вид и трещины на деревьях лиственницы на горельнике 1860 г.; справа почвенный профиль на повышении. Отмечено распределение углей по профилю.



Рисунок 50. Слева общий вид; справа почвенный профиль в депрессии. Отмечены углистые частицы, предположительно, горельника 1860 г.

Количество углистых частиц в минеральной части почвы было незначительно – менее 1000 ppm; в пирогенных морфонах – около 20000 ppm.

Заключение по морфологическому описанию горельника 1860 г.

Силу пожара и допожарную растительность определить невозможно кроме того факта, что в древесном ярусе участвовала лиственница. На горельнике 1860 г. в полугидроморфных условиях сохранилось гораздо больше пирогенных морфонов, представленных горизонтами и отдельными углистыми частицами в верхних горизонтах почвы, чем в более гидроморфных условиях. Предположительно, гидроморфный водный режим препятствует послепожарной эрозии и ухудшает сохранность углистых частиц. Актуальные почвы были

слаботрансформированные пирогаезом. На основании морфологии рассмотренных экосистем северной тайги было решено разделить их на группы по отношению к времени прохождения пожара, почвы разделить по степени пирогаенной трансформации (слабо-, средне- и сильнотрансформированные).

1. Молодые гари и горельники: 0 - 10(15) л. н. Верхняя граница (15 лет) задана для наиболее сильных по воздействию на почвы и растительность пожаров. Очаговость и пятнистость пожаров как степень пространственной неоднородности можно определить визуально, по количеству и типу поврежденной подстилки и древесной растительности. В молодых гаях в верхней части почвенного профиля диагностируются зола и угли, подстилка не восстановилась, распространены экстремальные условия почвообразования. Растительность часто представлена пирофитами или угнетена, имеет тенденцию к частичной или полной смене; встречаются свежие шрамы и обугленные стволы, разные ярусы могут быть повреждены в разной степени (и это хорошо диагностируется). Фракции антракомассы представлены крупными, хорошо сохранившимися углями и углями прямоугольной формы с хорошо читаемой структурой обычно более 0,1 см по одной из осей (о морфологии углистых частиц написано в главе 7). Сосняки лишайниковые могут постоянно находиться в стадии молодых гаяей. Подобный феномен может рассматриваться как пирогаенный паттерн, поскольку свойства этого типа почв неотделимы от их пирогаенной трансформации. Восстановление исходного почвенного покрова молодых гаяей зависит от степени повреждения подстилки и погодных условий после пожара – дожди, например, способны интенсифицировать процессы эрозии. Пирогаенный паттерн богатый.

2. Средневозрастные гари и горельники: от 10-15 до 50-100 л. н. Верхний предел (100 лет) характерен для еловых и лиственничных сообществ. По большинству структурно-морфологических свойств гаяей неотличимы от фона. Они могут содержать меньше свидетельств пожара, чем некоторые рассмотренные фоновые почвы, если пожары в них были слабыми. Трудно оценить степень пирогаенной пространственной неоднородности. Несколько средневозрастных пожаров могут «накладываться» друг на друга, и отделить следы одного от другого в поле часто невозможно. В средневозрастных гаяях и горельниках в почвенном профиле диагностируются морфоны вывалов, встречаются «размокшие» и окатанные угли; древесная растительность спелого возраста, могут наблюдаться застарелые шрамы от пожаров на выживших перестойных деревьях – свидетелях пожара. Сосняки-зеленомошники и еловые сообщества могут постоянно находиться в стадии средневозрастных гаяей, т.к. их интервал между пожарами от 50 до 100 лет. Пирогаенный паттерн бедный.

3. Старовозрастные гари и горельники: >50-100 л. н., верхний предел зависит от типа экосистемы. В старовозрастных гаях и горельниках в почвенном профиле можно наблюдать лишь наиболее устойчивые морфоны – глубокие вывалы, пирогенные прослои, а также изменение цвета горизонтов (прокаленность и прокраску органикой). Угли в подстилке уязвимы к механическому воздействию и легко мажутся. Продукты пожара лучше сохраняются на тех участках гари, где диагностируется относительно хороший дренаж, легкий гранулометрический состав и/или обилие депрессий. Древесная растительность в зрелой или перестойной стадии. Как и для средневозрастных пожаров может наблюдаться «наложение» пирогенных воздействий. Для старовозрастных гарей и горельников характерно наличие мягких углистых частиц неопределенной формы (подробнее в главе 7) и следы от пожаров на наиболее старых деревьях – елях, кедрах и лиственницах (для участков исследований). Старовозрастные гари отличаются от молодого палеопирогенного события отсутствием погребения пирогенного и почвенного материала. Слабому влиянию пирогенеза подвержены ельники сфагновые, лиственничники, участки, с близким водоупором и грунтовыми водами, а также лиственные леса.

Слабая степень трансформации почв подразумевает неполное прогорание подстилки. При этом морфология минеральной части профиля не меняется, но возможны включения угля между подстилкой и минеральным горизонтом и морфоны, оставленные прогоревшими корнями (изменения физико-химических свойств, характерные для степеней трансформации, указаны в главе 6 и собраны в главе 9). Такая степень трансформации характерна для зоны границы пожара. Средняя степень трансформации почв подразумевает неоднородное повреждение пожаром напочвенного покрова, местами до полного прогорания подстилки и частое наличие вывалов деревьев в виде морфонов (если деревья присутствовали). В минеральном почвенном профиле диагностируется поверхностная турбация, выраженная в морфонах вывалов, заполненных углем, углистых линзах и прослоях; диагностируемые морфоны должны относиться к конкретному изучаемому пожару. Такая степень трансформации характерна для зон периферии и очага. Сильная степень трансформации почв ведет к площадной потере всего органического и иногда части верхнего минерального горизонта. Со временем возможна полная деградация почвы (снос). Сильная степень трансформации часто встречается в зоне очага сильного пожара. Любая из степеней трансформации может быть встречена на однородной гари или горельнике.

5.2. Морфологические свойства постпирогенных экосистем средней тайги Европейской территории России

Кроме собственно территорий средней тайги встречались участки средней тайги с влиянием предгорий Урала (каменистость почвы, несколько более суровые климатические условия).

Горельник 2009 г.

Небольшой горельник 2009 г. – возраст определен на основе устных сообщений – имел площадь около 500 м². Он расположен на террасе р. Печора. Рельеф пологоволнистый. Горельник хорошо читается по подпалинам и шрамам от пожара на живом древостое сосны. Схема представлена на рисунке 51.



Рисунок 51. Схема горельника 2009 г. Пунктир означает сложность в диагностировании зоны периферии.

Особенностями горельника 2009 г. было то, что очаг пожара занимал большую площадь и имел однородную интенсивность, при этом зона периферии пожара не была выражена. Причина невыраженности зоны в резком увеличении влажности экосистемы по направлению к условному фону: переход сосняка-лишайникового во влажный ельник зеленомошник.

Условный фон

Участок расположен на террасе р. Печора, на аллювиальных песках на ровном участке в 500 м от горельника. Территория заболочена. Растительный покров представлен спелой елью и ее единичным молодняком (*Picea abies*). Межкрасное пространство около 2 м.

Травяно-кустарничковый ярус очень плотный; сложен багульником (*Ledum palustre*), брусникой (*Vaccinium vitis-idaea*) и единичными осоками (*Carex* sp.). Соотношение багульника к бруснике примерно 60/40. В напочвенном покрове доминируют зеленые мхи (*Bryidae* sp.) с проективным покрытием близким к 100%. Почвы представлены подзолами иллювиально-гумусово-железистыми постпирогенными поверхностно-оглееными

неглубокоподзолистыми песчаными со слабо развитым профилем на аллювиальных отложениях (рисунок 52). Разрез был ограничен грунтовыми водами.

Были найдены свидетельства прошлых пожаров в виде углей в подстилке и горизонте Е. По состоянию растительности (спелый еловый лес) неповрежденному ее характеру и распределению углистых частиц по профилю, мы предполагаем наличие на этой территории средневозрастной гари, после которой развились темнохвойные породы.



Рисунок 52. Слева общий вид, справа почвенный профиль условно-фоновых почв к горельнику 2009 г. Описание профилей в приложении В. 2. 1.

Очаг горельника

Разрез был заложен в центре лишайниковой поляны. Древесный ярус растительности представлен исключительно сосной (*Pinus sylvestris*), как спелой, так и молодой. На спелых соснах и останцах диагностируются следы нескольких пирогенных событий. Пожар уничтожил около 10% деревьев. Травяно-кустарничковый ярус представлен невысокой брусникой (*Vaccinium vitis-idaea*) и редкими злаками. Напочвенный покров представлен мощным слоем (>5 см) живого лишайника (*Cladonia rangiferina* и *C. alpestris*), занимающего более 80% яруса. Остальное пространство занимает детрит сосны и кустарничков. После пожара в напочвенном покрове восстановился только лишайник. Почвы представлены подзолами иллювиально-железистыми постпирогенными ненасыщенными поверхностно-подзолистыми песчано-супесчаными со слабо развитым профилем на аллювиальных отложениях (рисунок 53).

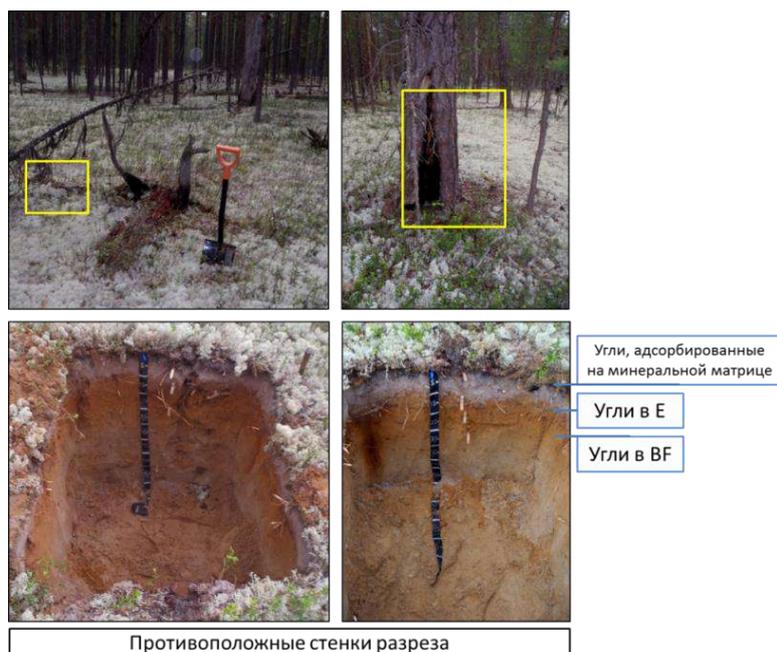


Рисунок 53. Сверху общий вид, снизу почвенный разрез. Желтым цветом выделены следы пожара на деревьях; указано распределение углей по профилю

Угли встречались в почвенном материале до гор. С, с резким уменьшением по количеству после горизонта Е; в основном, мелкие в виде тонких пластинок и округлые.

Заключение по морфологическому описанию горельника 2009 г.

Вызван неоднородным по силе и интенсивности слабым низовым пожаром, ограниченным более влажным напочвенным покровом ельника-зеленомошника. Почвы в очаге пожара слабо- и среднетрансформированные пирогенезом, в зоне границы – слаботрансформированные. В целом, почвы трансформированы незначительно, растительность восстановилась и/или пережила пожар. Условий почвенной экстремальности не наблюдается.

Горельник 1978 г.

Горельник 1978 г. имеет площадь около 300 м² на пойме и первой террасе р. Печора в 10-12 км к западу от стоянки Строганная доска. Причина возгорания – человеческая деятельность (устное сообщение). Особенностью горельника является близкое залегание горных пород – кристаллических сланцев и гранитов. Деятельный слой почвы на террасе р. Печоры находится в интервале 50 см; в районе высокой поймы, в 500 м от предполагаемого очага, деятельный слой почвы достигает минимальных значений 10-15 см, появляется уклон в 3-5° (рисунок 54). Границы пожаров указаны в приложении А.76.



Рисунок 54. Схема горельника 1978 г. Чёрная линия показывает р. Печору. Границы между очагом гари и условным фоном резкие. Белые кружки показывают расположение разрезов. Резкие границы территории горельника обусловлены изменением водного режима экосистемы.

Участок на террасе

Древесный ярус представлен спелыми елями (*Picea abies*) и пихтами (*Abies sibirica*) (с соотношением, примерно, 60/40), а также единичными перестойными кедрами (*Pinus sibirica*). Встречается подрост березы (*Betula pendula*). В кустарничково-травянистом ярусе доминирует черника (*Vaccinium myrtillus*) и осоки (*Carex* sp.); встречаются участки, богатые брусникой (*Vaccinium vitis-idaea*) и папоротниками (*Polypodiophyta* sp.). В моховом ярусе условного фона доминируют зеленые мхи (*Bryidae* sp.).

Участок на пойме

Пожар оставил подпалы и шрамы на стволах пихты и ели, но большинство деревьев пережило пожар. Подроста березняка несколько больше, чем на террасе, в травянистом ярусе появляется костяника (*Rubus saxatilis*) и герань (*Geranium* sp.). Большая часть почвенного покрова покрыта детритом. Почвы представлены литоземами грубогумусовыми постпирогенными перегнойно-торфяными легкосуглинистыми на элювии горных пород (рисунок 55).



Рисунок 55. Слева направо: общий вид; участок горельника 1978 г. на террасе и на пойме; масштаб – 15 см. Описание профилей в приложении В. 2. 2.

На террасе были обнаружены только отдельные угольки в верхнем горизонте, тогда как почвенный профиль участка на пойме был насыщен углистым материалом, что мы связываем с высокой скоростью биологического круговорота дерновых почв (биогенной деградацией угля).

Заключение по морфологическому описанию горельника 1978 г.

Был образован однородным низовым пожаром слабой силы и интенсивности в зоне пироженно-устойчивой растительности, представленной ельником-пихтарником разнотравным. Почвы слаботрансформированные пожаром. Низкотемпературное происхождение углей и высокая влажность обусловили быструю деградацию углистого материала.

Горельник 1950 г.

Разрез заложен на краю обрыва/обнажения, сложенного слоями гальки, высотой около 6 м на правом берегу р. Печора (Речной размыв, приложение А.7б). Территория имеет небольшой уклон (2-3°) по течению реки. Прослой пироженного материала – маленькие угли и угли, адсорбированные на минеральной матрице и растертые до состояния сажи, заключены между слоями гальки разного размера. Отложения перекрыты почвой, имеющей следы современного пожара, предположительно 70-летнего возраста. Оценить его размер не представляется возможным. Древесный ярус рассматриваемой гари сложен перестойной пихтой (*Abies sibirica*) и молодой и спелой елью (*Picea abies*) примерно в равном соотношении. Наблюдался валеж, который мы связываем с ветровалом. Травяно-кустарничковый ярус представлен брусникой (*Vaccinium vitis-idaea*) и плаунами (*Lycopodium* spp.). Напочвенный покров представлен зеленомошником (*Bryidae* sp.). Почвы – подзолы иллювиально-железистые постпироженные поверхностно-подзолистые супесчано-песчаные со слабо развитым профилем на аллювиальных галечных отложениях имеют песчаный гранулометрический состав и хорошо дренированы (рисунок 5б).

Данный случай является одним из примеров непрерывности записи пироженных событий в пироженном осадочном (аллювиальном) палеоархиве и почвенном актуальном профиле постпироженной почвы.



Рисунок 56. Слева общий вид горельника 1950 г.; справа колонка палимпсестовой и книгоподобной записи. Описание почвенного профиля в приложении В. 2. 3.

Заключение по морфологическому описанию горельника 1950 г.

Пирогенные события локального распространения отражаются в морфологии почвенного профиля, тогда регионального распространения сохраняются в пирогенных слоях книгоподобных архивов. В данном объекте встречаются оба типа записи. Следовательно, данный объект есть синтез региональной и локальной пирогенной обстановки.

Горельник 1934 г.

Исследуемый участок расположен в пологоволнистом, наклоненном к реке (2-3°) рельефе на 2-3 км севернее стоянки Шежим. Площадь пожара со всеми очагами около 15-20 км². Найдены обугленные остовы деревьев, предположительно современники пожара. Территорию гари не удалось разделить на зоны по интенсивности и силе пожара.

Условный фон

В древесном ярусе доминирует спелая и перестойная ель (*Picea abies*) с примесью спелой пихты (*Abies sibirica*) и перестойной березы (*Betula pendula*). Встречается подрост ели и пихты, высотой 1,5-2 м. В травяно-кустарничковом ярусе представлены кислица (*Oxalis acetosella*) (около 80%), герань (*Geranium* sp.), единичные папоротники (*Polypodiophyta* sp.) и злаки (*Gramineae* sp.). Моховой покров разрежен (проективное покрытие около 60 %) и представлен зелеными мхами (*Bryidae* sp.). Растительность на территории условного фона та же, что и на территории гари, отсутствуют обугленные остовы. Почвы представлены торфяно-подзолами иллювиально-железистыми ненасыщенными мелкоторфянистыми гипновыми мелкоподзолистыми супесчано-легкосуглинистыми со слабо развитым профилем на моренных отложениях

Территория горельника

Растительность на территории гари неотличима от фона. Почвы представлены элювиально-метаморфическими темнаязыковатыми постпирогенными поверхностно-элювиальными легко-среднесуглинистыми со слабо развитым профилем на моренных отложениях (рисунок 57).



Рисунок 57. Общий вид условного фона и участков горельника (сверху); профиль почв условного фона (слева снизу); горельника 1934 г (в центре снизу) и профиль с пирогенным морфоном (справа снизу, масштаб – 8 см). Обгоревший остов и пирогенный слой профиля отмечены желтой рамкой. Профиль ограничен породой.

Описания почвенных профилей в приложении В. 2. 4.

Подстилка на территории горельника насыщена крупными углями. Причина, по которой угли сосредоточены в основном в подстилке, связана с суглинистым характером горизонта ВМ, выступающим преградой на пути вертикальной миграции углей, а также в насыщенности почв влагой, т. е. закупоркой почвенных пор наряду с высокой плавучестью угля.

Заключение по морфологическому описанию горельника 1934 г.

Образован неоднородным пожаром неизвестной интенсивности и силы на участке с современной пирогенно-устойчивой растительностью – ельником-разнотравным. Предположительно, пожар был интенсивный и сильный – смешанного типа. Косвенно об этом говорят мертвые остовы деревьев, обилие углистых частиц в подстилке и пирогенные морфоны.

Гарь 1940 и горельник 1850 гг.

Горельник 1850 г. имеет площадь около 2 км², вытянут вдоль правого берега реки и находится на месте стоянки Струганная доска. Источник пожара, как и его интенсивность – неизвестны. Есть подпалины на старых вывалах кедров. На территории горельника был

повторный пожар не более 100 м² в 1940 г. Участок гари 1940 г. характеризовался плотным древостоем спелой пихты (*Abies sibirica*) и ели (*Picea abies*) с подростом березы (*Betula pendula*). С разнотравьем папоротников (*Polypodiophyta* sp.), осоками (*Carex* sp.) и геранью (*Geranium* sp.) в травяно-кустарничковом ярусе. Вероятно, растительность не пережила пожар. Остальная часть горельника 1850 г. характеризуется в древесном ярусе перестойными пихтами (*Abies sibirica*) с примесью спелой и перестойной ели (*Picea abies*) в древесном ярусе, а также одиночными перестойными кедром (*Pinus sibirica*). В травяно-кустарничковом ярусе преобладают осоки (*Carex* sp.), злаки и папоротники (*Polypodiophyta* sp.) (их относительная доля могла достигать 100%). Доля кустарничков брусники (*Vaccinium vitis-idaea*) была незначительна. В напочвенном покрове детрит осок, злаков и папоротников. Встречались вывалы кедров с обугленными частями на комле. Шрамы от пожаров на спелых и перестойных деревьях не обнаружены, что может говорить о смене растительности после пожара 1850 г. Почвы на участке гари 1940 г. представлены бурозёмами оподзоленными постпирогенными маломощными легко-среднесуглинистыми со среднеразвитым профилем на элювии горных пород (рисунок 58). Почвы горельника 1850 г. представлены подзолистоглеевыми потечно-гумусовыми ненасыщенными в верхней части профиля почвами поверхностно-оглееными поверхностно-элювиальными легко-среднесуглинистыми с мощным профилем на моренных отложениях и элювии горных пород (рисунок 58).



Рисунок 58. Слева направо: общий вид слева и профили почвы в русле ручья и на повышении. Красными кружочками показано расположение углей после пожара 1940 г.; синими – после пожара 1850 г. Описание почвенных профилей в приложении В. 2. 5

Углистые частицы гари 1850 г. мигрировали в ВМЧ профиля (нижняя часть ОН – верхняя часть EL) с течением времени, тогда как угли гари 1940 г. сохранились в основном в подстилке (толща OF). Присутствуют палеогугли в русле ручья (центральный рисунок, синий маркер).

Заключение по морфологическому описанию горельника 1850 и гари 1940 гг.

Серия пожаров 1850 и 1940 годов хорошо иллюстрирует временную динамику пожаров – наложение разновозрастных пирогенных событий. Параметры пожаров не могут быть оценены. Растительность на более масштабном горельнике 1850 г. не сменилась.

При обобщении информации о морфологических свойствах гарей средней тайги ЕТР, нами был сделан вывод о том, что они могут быть разделены на молодые

е, средневозрастные и старовозрастные на тех же основаниях, что и гари северной тайги ЕТР.

5.3. Горельники кустарниковой тундры севера Западной Сибири

Рассмотрена структура горельников на территории распространения легких и тяжелых почв кустарниковой тундры – подзолов и глееземов.

Горельник 2019 г.

Горельник, 2019 г. находится на территории экотона между северной тайгой и кустарниковой тундрой в районе г. Надым. Площадь гари – не более одного гектара. Рельеф пологоволнистый. Микрорельеф представлен приствольными повышениями. С глубины 60-80 см разрез затапливается. Верхний ярус растительности представлен молодыми и спелыми соснами (*Pinus sylvestris*) и молодняком березы (*Betula pubensces*). Травяно-кустарничковый ярус представлен злаками, карликовой березкой (*Betula nana*), черникой (*Vaccinium myrtillus*), голубикой (*Vaccinium uliginosum*), брусникой (*Vaccinium vitis-idaea*) и водяникой (*Empetrum nigrum*). Напочвенный покров представлен кладонией оленьей и альпийской (звездчатой) (*Cladina stellaris (alpestris)* и *C. rangiferina*), пятнами распространен плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi*). Древесный ярус пережил пожар. Напочвенный растительный покров обгорел пятнами. Почвы представлены подзолами иллювиально-железистыми постпирогенными глубоко- и сверхглубокоосветленными песчаными с глубокоразвитым профилем на аллювиальных отложениях (рисунок 59).

Углистые частицы распространены в верхней части профиля (ОН и ОН/Е), а также заполняют криогенные трещины. Наиболее вероятно, что уголь, заполняющий трещины произошел от древних пожаров, так как настоящий пожар не прожег подстилку. В горизонте Е диагностируется уголь, адсорбированный на минеральной матрице.



Рисунок 59. Почвы горельника 2019 г. Слева общий вид; снизу стенки разреза. Красные кружки отмечают области нахождения углистых частиц. Описание профиля дано в приложении В.3.1.

Заключение по морфологическому описанию горельника 2019 г.

Горельник 2019 г. вызван однородным пожаром слабой силы и интенсивности. Допожарная растительность пирогенно-уязвимая – сосняк лишайниковый; после пожара не изменилась. Напочвенный покров выгорел не полностью, почвы слаботрансформированные пирогенезом.

Горельник 2005 г.

Горельник 2005 г. находится в зоне экотона кустарниковой и кустарничковой тундры в районе п.г.т. Заполярный. Пожар распространился вдоль газовой трубы и сопровождался повреждением ММП и изменением водного режима в почвенном профиле. Растительный покров представлен кустарниками ивы и березки (*Salix* sp. и *Betula* sp.). Травяно-кустарничковый ярус иван-чаем (*Chamaenerion* sp.), пушицей (*Eriophorum* sp.) злаками и осоками (*Carex* sp.). Напочвенный покров детритом, дерновинами злаков и кладонией оленьей (*C. rangiferina*). Почвы представлены криоземами, торфяно-криоземами, криоземами метаморфическими и глееземами криотурбированными торфяно-осоковыми тяжелосуглинистыми и глинистыми (тиксотропными) со слаборазвитым профилем на ММП (рисунок 60).

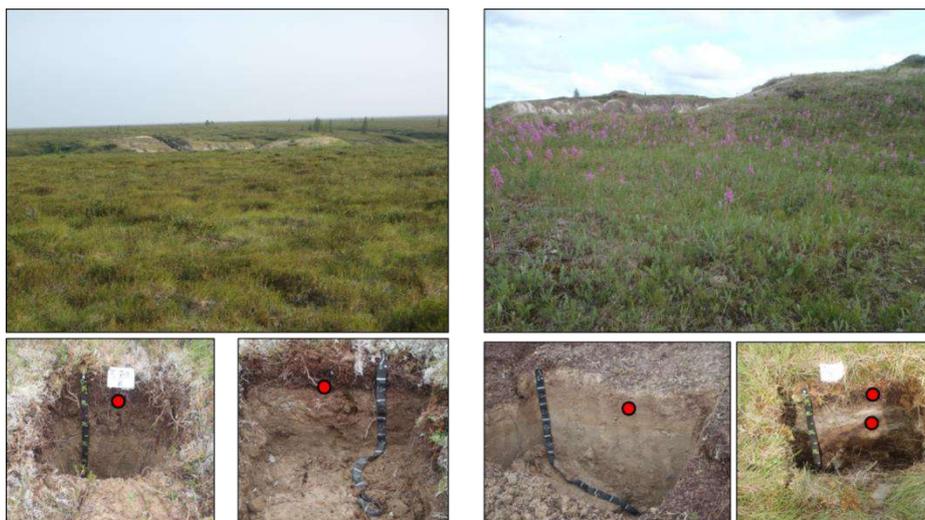


Рисунок 60. Сверху – общий вид; снизу – почвы разных участков гари 2005 г. Красными кружками показана область нахождения углистых частиц. Описание профилей дано в приложении В.3.2.

Под воздействием активизации криотурбаций, которые могли быть спровоцированы прокладкой трубы и последующим пожаром, углистые частицы оказались в глубине почвенного профиля. Все углистые частицы размокшие, мягкие, слабо отличаются от окружающего торфа. Автор понимает неоднозначность термина криотурбация – непонятно, насколько турбации почвенного профиля обусловлены именно действием ММП. Однако следует устоявшейся практике названий.

Заключение по морфологическому описанию горельника 2005 г.

Горельник на исследованном участке однороден по силе и интенсивности. Допожарный напочвенный покров был, по всей видимости, лишайниковым. Пожар вызвал изменения растительного покрова в сторону мезофильных трав и злаков на одном участке гари и в сторону гидрофильных осок и пушицы – на другом. Почвы среднетрансформированные пожаром в результате криотурбаций.

В связи со значительным повреждением экосистемы пожар оценивается может оцениваться как сильный, при этом в абсолютном выражении он был беглым и слабоинтенсивным.

5.4. Типизация морфологических свойств постпирогенных экосистем

5.4.1. Схемы распространения лесных пожаров

Структура гарей и горельников рассматривается нами на уровне мезомасштаба с фиксацией изменений в пределах 10-100 м². За основу реконструкции структуры гари берется нарушение почвы – важного носителя информации о функционировании и трансформации экосистемы, в том числе постпирогенной. Структура участка определяется интенсивностью пожара и делится на типы по степени нарушения напочвенного покрова вплоть до полного его уничтожения, а также степени нарушения минеральных горизонтов почв. Таким образом, структура гари или горельника отражает площадь, количество и особенности зон трансформации верхних горизонтов почв, а также паттерн распределения относительной силы конкретного пожара.

Представим основные сценарии изменения структуры (рисунок 61). Подразумевается идеальный случай – погода безветренная, ЛГМ меняется однородно. Было определено пять типов структуры гари или горельника. Наиболее типичный сценарий развития пожара характеризуется неоднородной силой и интенсивностью, убывающими от очага к границе. Такой пожар создает неоднородную структуру (А) и наблюдался нами в сосняках-зеленомошниках. Если распространение пожара резко подавлено влажностью экосистемы, окружающей гарь, или препятствием, то распределение силы и интенсивности может быть однородным. Такой пожар создает однородную структуру (Б) и возникает, например, при резком изменении влажности и/или типа ЛГМ при переходе от сухого повышения к болоту. Пожар, ограниченный пожарным рвом или естественным препятствием, но сохранивший неоднородность силы и интенсивности образует неоднородную структуру с обрезанной зоной границы (В). Пожар, ограниченный естественным рельефом или крупными объектами, но распространившийся за них, или сформировавший множество очагов интенсивного горения на повышениях рельефа, образует очаговую структуру (Г), где каждый очаг может иметь свои зоны периферии и границы (такой тип характерен для сильных пожаров). В некоторых случаях пожар, из-за резкого изменения в составе и влажности ЛГМ резко теряет силу и интенсивность, образуя структуру с невыраженной зоной периферии (Д). Данные схемы распространения носят общий характер для севера ЕТР и СЗС.

Зоны различной интенсивности, выделяются на мезоуровне, т. е. должны быть ≥ 20 м, переход между зонами должен читаться визуально. Если структура неоднородна (пятниста) на микроуровне, то следует прибегнуть к экстраполяции наибольшего типа повреждений. Если изменений на мезоуровне не диагностируется, то следует считать структуру однородной.

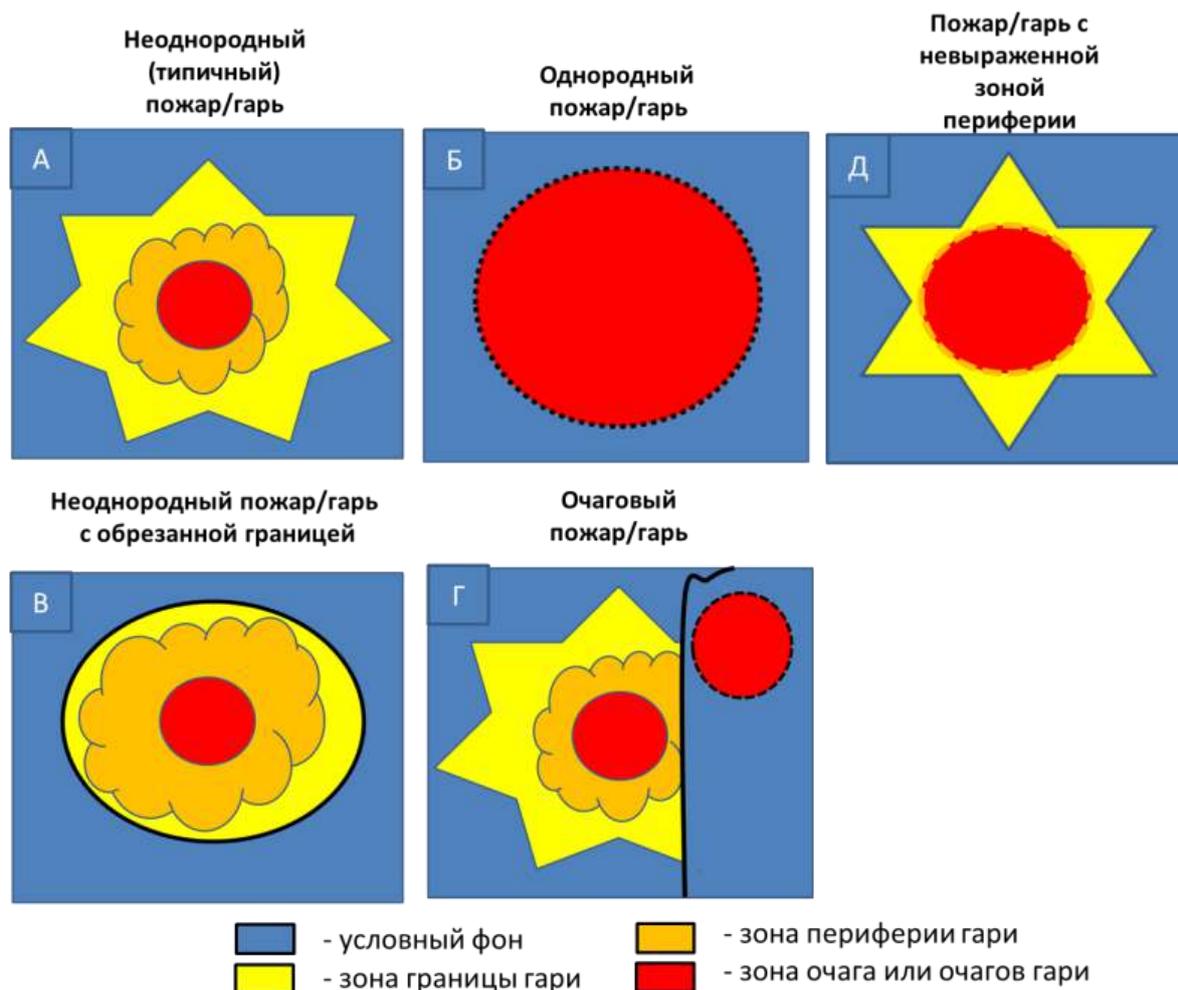
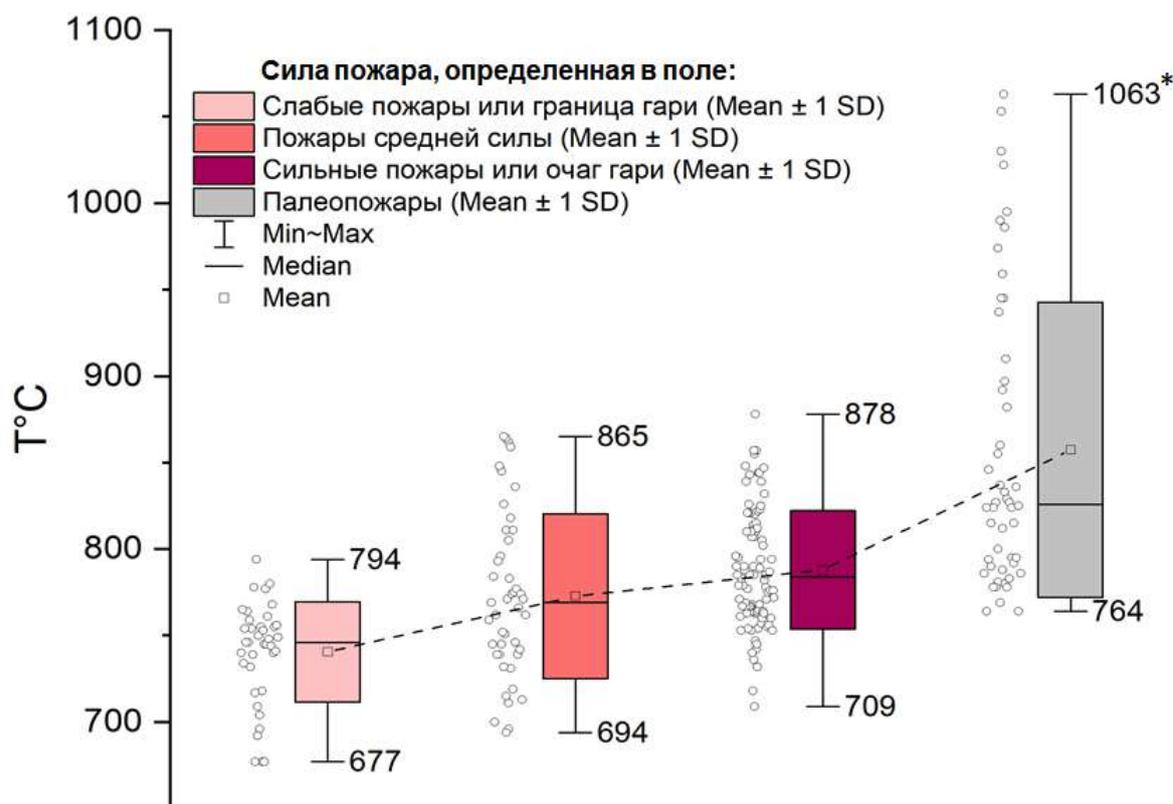


Рисунок 61. Схема распространения лесных пожаров и структуры гарей и горельников для участков исследования. Цвета на схеме отражают относительную силу пожара и степень пирогенной трансформации почв.

На схемах представлены элементарные структуры, пожар может состоять образовывать множество элементарных структур, разделенных зоной границы или фона. Для построения схем использовались работы Н. П. Курбатского (1970, 1978)

Мы сопоставили данные по пожарам разной силы и пожарам в разных структурных зонах гарей и горельников, основанные на полевых наблюдениях, с максимальной температурой карбонизации (МТК) углистых частиц, рассчитанной на основе данных рамановской спектроскопии для углей из разных структурных зон (очаг, граница). Слабые пожары и пожары на границе оставляли после себя угли с МТК 740 ± 29 °С и при этом характеризовались наименьшей вариабельностью значений (рисунок 62). Пожары средней силы оставляли после себя угли с МТК 773 ± 48 °С и характеризовались наибольшей вариабельностью из современных пожаров ($V = 6\%$), что также соответствует наибольшей пространственной неоднородности гарей или горельников, т. е. с участками как слабой, так и сильной пирогенной трансформации почв. Сильные пожары и пожары в очаге оставляли после себя угли с МТК 788 ± 33 °С и достоверно отличались от слабых пожаров (и пожаров на границе гари) по t-критерию при уровне значимости 0,01.



	Пожары слабой силы	Пожары средней силы	Сильные пожары	Палеопожары*
N=225	n=34	n=37	n=87	n=44
μ	740	773	788	857
S	29	48	34	85
S2	842	2260	1164	7282
V	4	6	4	10
max	794	865	878	1063
min	677	694	709	764

Рисунок 62. МТК пожаров разной силы, разных зон гарей и палеопожаров с данными описательной статистики.

* Для древних углей, образовавшихся в ходе палеопожаров, точный расчет МТК затруднителен. Значения приведены для иллюстрации их высокой вариабельности, которая может быть связана как с реальными температурными преобразованиями, так и с длительным выветриванием углей в почве.

Таким образом, расчетные МТК коррелируют с определенной в поле силой пожара и выделенными зонами структуры гарей, а распределение МТК углистых частиц подтверждает положение о пространственной неоднородности гарей по интенсивности температурного воздействия.

Углистые частицы из глубоких палеоархивов обладали наибольшей вариабельностью параметров рамановских спектров, прежде всего, отношения высот пиков D и G (H_D/H_G). Следовательно, и вариабельность расчетных МТК была высокая ($V = 10\%$). Были зафиксированы наиболее высокие значения отношения H_D/H_G в рамановском спектре, которые трансформировались в ряде случаев в температуры выше 1000 °C. Однако, выветривание углей при длительном нахождении в почве может оказывать влияние на параметры рамановского спектра, поэтому достоверный расчет МТК для углей из

голоценовых палеоархивов произвести сложно. С одной стороны, в почвах на длительных отрезках времени могут избирательно накапливаться высокотемпературные угли (на что указывает повышение отношения H_D/H_G в рамановском спектре), с другой стороны эти же угли испытывали наиболее продолжительное воздействие факторов деградации. Разделение вклада высокотемпературных преобразований и выветривания в наблюдаемые рамановские спектры древних углей – отдельная и сложная задача.

5.4.2. Типизация постпирогенных изменений почв

Рассмотренные в данном исследовании почвы относились к отделам альфегумусовых, текстурно-дифференцированных, структурно-метаморфических и глеевых почв. Здесь и далее конкретные числовые данные справедливы только для наших объектов. Брались плакорные почвы молодых гарей, без пирогенных морфонов в разрезе (по соображениям унификации результатов). Оценивались углистые частицы ≥ 0.5 см.

Альфегумусовые почвы

В профиле альфегумусовых почв следы пирогенного события встречаются в виде углистых частиц, расположенных как в самой подстилке, так и в прослойках между органогенными и минеральными горизонтами. В подзолах наибольшая концентрация антракомассы наблюдается между горизонтами О и Е; количество углистых частиц резко уменьшается в толще горизонта Е – более чем на порядок, например, от 2000 в ОН и ОН/Е до 150 ppm в Е. В подбурях наибольшая концентрация углистых частиц находится между горизонтами О и ВНФ и, иногда, между Е и ВНФ в оподзоленных подбурях. Концентрация углистых частиц между ОН и ВНФ сохраняется в районе 2000 ppm между горизонтами О и ВНФ, но вглубь горизонта ВНФ проникают единичные угольки (за исключением вывалов), составляющие $< 0,01$ % от массы почвы. Подзолистый горизонт при частых пожарах темнеет. Чем почва легче по гранулометрическому составу, тем быстрее происходит перераспределение продуктов пожара и тем глубже проникают отдельные углистые частицы.

Текстурно-дифференцированные и структурно-метаморфические почвы

Суглинистые и глинистые почвы отмечаются большей влажностью – углистые частицы с трудом проникают в профиль таких почв, в основном оставаясь между подстилкой и минеральной частью, редко обнаруживаясь ниже горизонта ЕL; исключением являются вывалы, корневинны и деятельность почвенной мезофауны – такие морфоны легко опознаваемы. Попав во влажную почву, углистые частицы быстро теряют морфологические очертания под влиянием влажности, что ускоряет их разрушение и затрудняет определение.

Наблюдаемая нами концентрация антракомассы в среднем составила менее 1000 ppm. В горизонтах ЕL наблюдались единичные угольки. Пирогенное воздействие, существенно изменяющее облик таких почв, возможно при длительном накоплении топлива и сухой погоде. Пожар может приводить к постпирогенной эрозии на склонах, интенсивным вывалам и накоплению ПАУ и продуктов пожара.

Глеевые почвы

Глеевые почвы кустарниковой тундры подвержены влиянию особого природного фактора – ММП. Вызываемые пожарами изменения в уровне ММП могут привести к криотурбациям, которые перемещают уголь и верхние органогенные горизонты по всему СТС. Наблюдаемая нами концентрация углистых частиц колебалась от 500 до 1000 ppm в горизонтах Т. Наблюдалось большое количество обгоревшего торфа и «лисьего мха», который мы не включили в общую антракомассу. Таяние ММП может также привести к заболачиванию. По причине постпирогенных криотурбаций, глеевые почвы с близким залеганием ММП характеризуются выраженной динамикой миграции углистых частиц, несмотря на свой тяжелый гранулометрический состав и влажность (рисунок 63).

Любой пожар вызывает изменение почвенного вида, так как воздействует на органогенные горизонты. Интенсивный пожар оказывает дополнительные долговременные последствия: заболачивание и почвенные турбации в случае «тяжелых» почв и интенсивную эрозию в случае «легких»; для почв, с близким залеганием ММП также активизируются криотурбации.

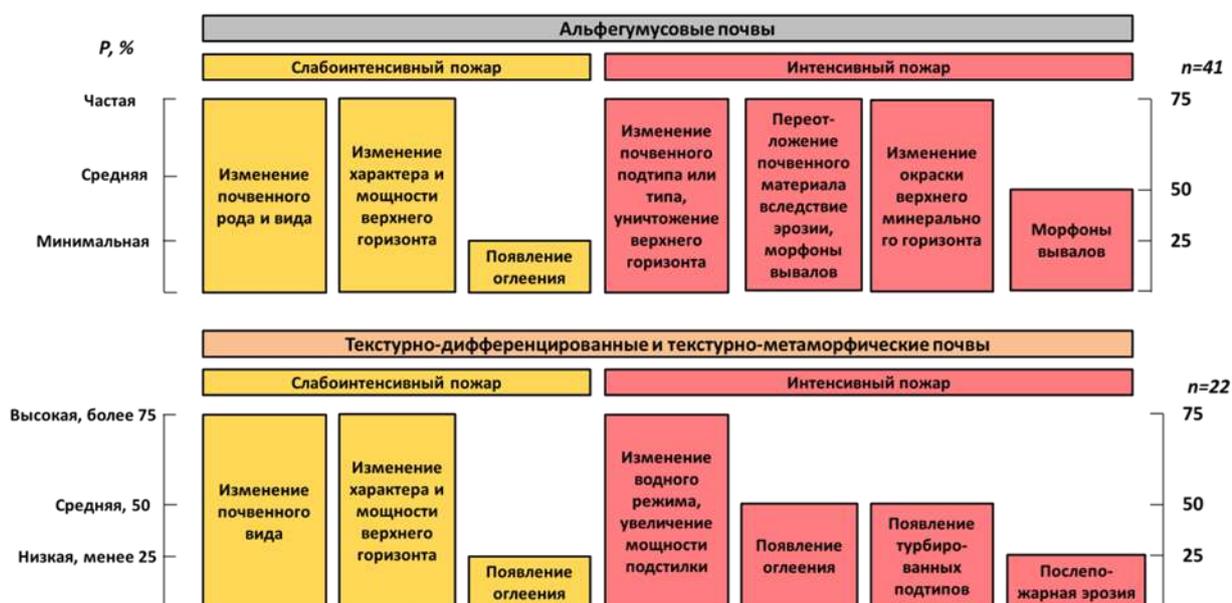




Рисунок 63. Модель относительной вероятности изменений морфологического облика почв или/и смены почвенного типа под влиянием пожара в районах исследования. Р – вероятность события в процентах; n – выборка изученных в рамках диссертации профилей. Использованы литературные источники [Wildland Fire..., 2005; David et al., 2009; Бобровский, 2010; Ходаков, Жарикова, 2011; Дымов, 2020].

5.4.3. Типизация постпирогенных изменений растительного покрова

Пожароопасность экосистемы в значительной мере зависит от влажности нижнего яруса растительности – нередко влажность подстилки служит естественным препятствием для пожара. Можно выделить некоторые критические значения влажности, отмеченные в литературе и отмечавшиеся на участках исследования (таблица 14). В таблице рассматривается относительная вероятность возгорания (точка, с которой начинается развитие пожара) и поддержания горения экосистемой с определенной влажностью. Для суглинистых почв рассматриваемые в таблице значения выше примерно на 5-10%. В зависимости от влажности экосистемы меняется и интервал между пожарами (рисунок 64).

Таблица 14. Критические для прохождения пожара значения влажности для песчаных почв [Cedra, Robichaud, 2009; Бобровский, 2010; Ходаков, Жарикова, 2011]

Объемная влажность/вероятность возгорания	Высокая вероятность возгорания и поддержания горения	Низкая вероятность возгорания; средняя вероятность поддержания горения	Очень низкая вероятность возгорания; низкая вероятность поддержания горения
Влажность, V, %	<15	15-30	>40

В зависимости от влажности экосистемы (имеется в виду естественная «устоявшаяся» экосистема) меняется и интервал между пожарами (рисунок 64). Межпожарный интервал можно разделить на короткий (10-15 л. соответствует молодым гарям), средний (около 15-50 л., соответствует средневозрастным гарям) и длинный (100-150 л., соответствует старовозрастным гарям). Такое разделение условно, точно также как и предложенное раннее разделение гарей и горельников на молодые, средневозрастные и старовозрастные. В природе почвы и растительность неразрывно связаны и влияют на межпожарный интервал. Мы предлагаем ввести более узкое понятие – «пирогенный паттерн». Пирогенный паттерн – это средний межпожарный интервал конкретной экосистемы в данных условиях среды (в масштабе $n \cdot 10^2$ м для исследованных сообществ). Каждая экосистема, подверженная пожарам,

имеет свой пирогенный паттерн. Пирогенные события, к примеру, могут быть связаны с достижением растительности климаксного возраста, или с параметрами подстилки, при этом, средний межпожарный интервал некоторых экосистем несопоставим (50-100 л. для сосняка лишайникового и 500-1000 л. для ельника-сфагнового) [Дымов, 2018; Startsev et al., 2022 (a)]. Поняти «паттерн» подчеркивает случайный характер пирогенного события, которое может наступить несколько раньше или позже прогнозируемого срока. Термин «режим пожаров» предложено применять в отношении палеопирогенных событий, для которых точное определение режима пожаров (пирогенный паттерн) часто невозможно, т. е. изменчивость пирогенного паттерна читается исследователем лучше, чем отдельные пирогенные события погребенных пирогенных слоев. Пирогенный паттерн искажают локальные комплексы условий, связанных с климатом, рельефом и характером почвообразующих пород. В случае большого количества пирогенных событий (одно в 10-20 лет, при антропогенной нагрузке) предлагается называть пирогенный паттерн богатым, в противном случае (менее одного в 100 лет) – бедным. С восстановлением растительности вероятность пирогенного события в условиях богатого пирогенного паттерна возрастает за год гораздо больше, чем в условиях бедного, что отражено в узких границах первого и связано с горючестью топлива. На рисунке 64 показано различие между средними межпожарными интервалами для северной и средней тайги, а также изменение режима пожара при антропогенной нагрузке

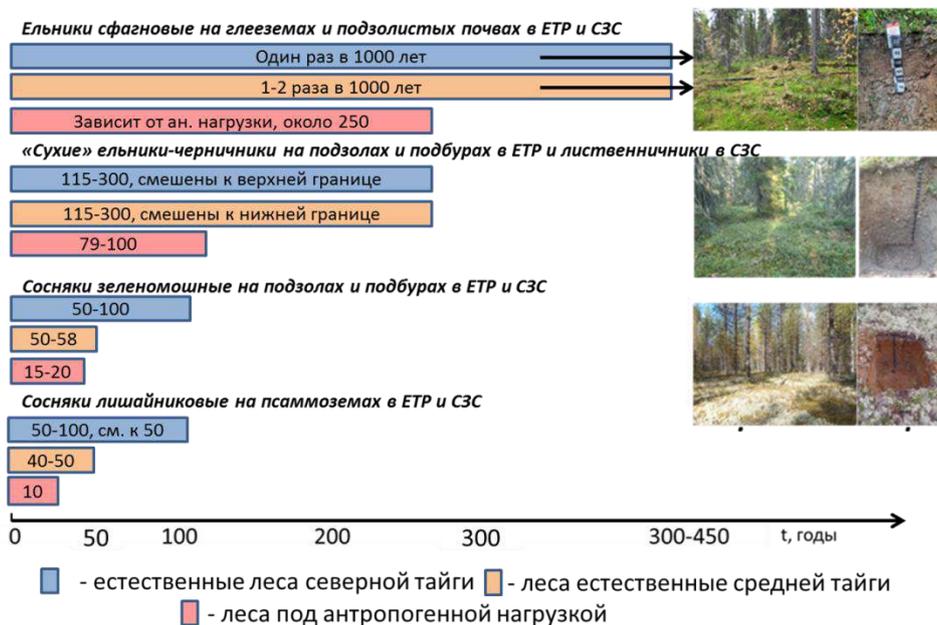


Рисунок 64. Средний межпожарный интервал и изменчивость пирогенного паттерна экосистем в подзонах средней и северной тайги. Используются материалы диссертации и литературные источники [Громцев, 2008; Бобровский, 2010; Алейников и др., 2018; Кутявин, 2018; 2020; Дымов, 2018, 2020, Харук, Пономарев, 2020, Dymov et al., 2022].

Например, для сфагновых сообществ – от 500 л. до неопределенного времени с возрастающей вероятностью подземного пожара [Громцев, 2008; Startsev et al., 2022; Dymov et al, 2022 (a)]; сосняка-зеленомошника – 50-100 л. [Громцев, 2008]; для сосняка беломошника на песчаных почвах средний межпожарный интервал 50-58 л. для территории Коми и 16-59 для Центральной Сибири [Кутявин, 2018; Dymov et al, 2022 (a)];; лиственничников в естественных условиях 250-300 л. [Харук, Пономарев, 2020]. От северной к средней тайге вероятность пожаров повышается; при антропогенной нагрузке многократно. Пожар может перекидываться с уязвимых почвенно-растительных систем на устойчивые, что часто приводит к уничтожению последних. Распространение пожара сильно зависит от рельефа и влажности территории [Громцев, 2008].

Пожар является естественным фактором регулирования количества топлива и смены сукцессий в лесах : "...гари до такой степени присущи тайге, что вся она по сути дела есть сплошная гарь в той или иной степени восстановления" [по Громцеву, 2008]. Примерно половина проходящих по территории СЗС пожаров не уничтожают полностью растительность и она способна к демутации [Харук, Пономарев, 2020].

Выделены некоторые закономерности постпирогенных трансформаций растительности. Слабые низовые пожары в сосняках лишайниковых обычно не приводят к смене древесного яруса. При этом пожар достаточной интенсивности может выступать как сила, меняющая всю растительную ассоциацию. Распространены пирогенные автосукцессии, что обуславливает частый межпожарный интервал и богатство пирогенного паттерна. Растительный покров на подзолах и подбурах в результате пожара может сменяться с хвойного на лиственный. Еловые сообщества погибают при сильных пожарах из-за склонности к горению кроны – лестничная структура приводит к тому, что пожар «взбирается» к верхушке дерева. Частыми видами, встречаемыми на гарях после сильного пожара, являются береза и осина. Заболачивание после пожара может увеличить межпожарный интервал и обеднить пирогенный паттерн. Нижний ярус в зоне распространения буроземов на участках исследования составляют разнотравье и папоротники во влажных условиях это приводит к тому, что пожары в таких экосистемах редки и медленно распространяются, а возраст пихты, ели и кедра может достигать 500 и более лет. После пожара на глееземах и криоземах развивается пиропитное разнотравье (иван-чай, злаки и др.). На оторфованных участках может не наблюдаться смены напочвенного покрова и появиться осоки и пушица, что связано с послепожарным заболачиванием (рисунок 65). Межпожарный интервал долгий, пирогенный паттерн бедный.

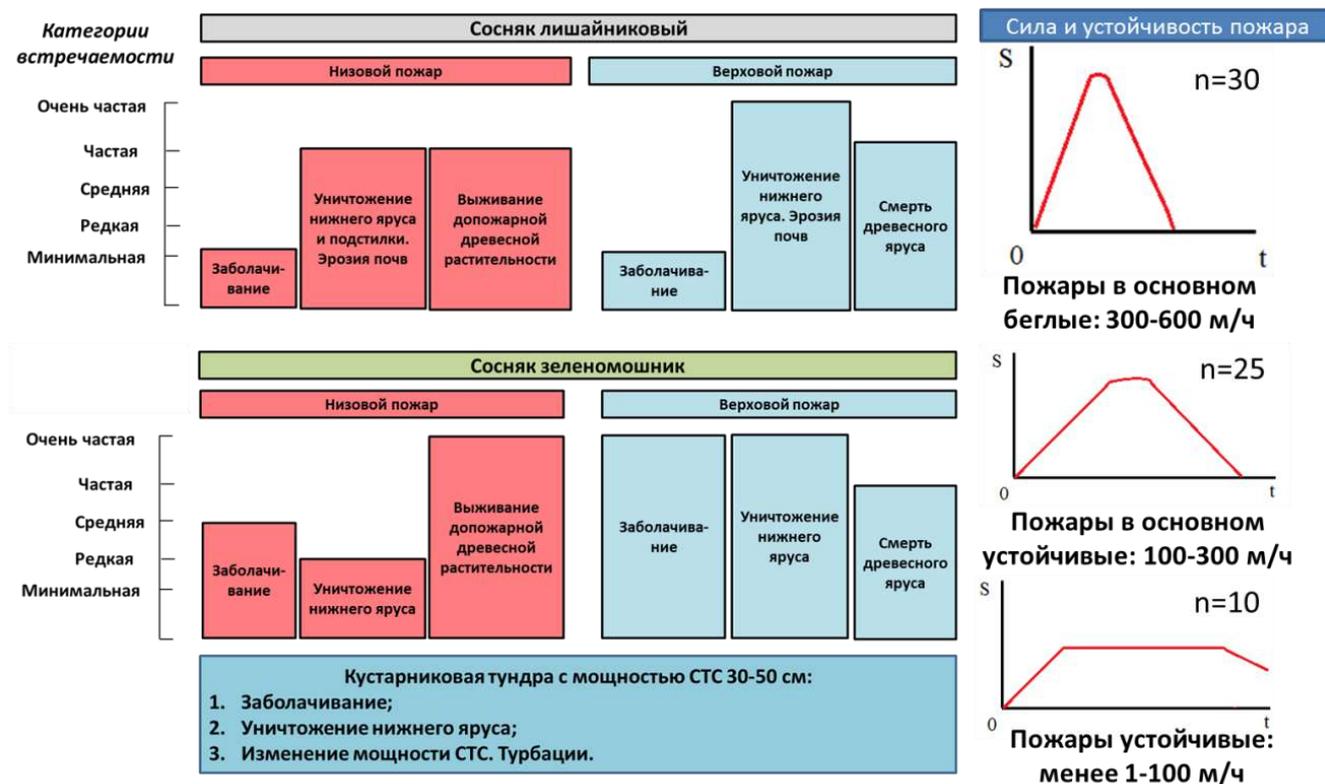


Рисунок 65. Частоты встречаемости изменения растительного и почвенного покровов под воздействием пожаров разного типа (n – исследованные в рамках работы сообщества). Для оценки параметров силы (S) и устойчивости (t) использовались литературные источники [Мелехов, 1948; Курбатский, 1970; 1978; Lloret, Zedler, 2009; Залесов, 2011; Алейников и др., 2018; Дымов, 2020].

Представленные схемы носят общий характер – они приложимы только к большим площадям. На локальном уровне каждый пожар обладает набором внешних и внутренних факторов, которые и определяют его воздействие, что и обуславливает вероятностный характер пирогенного паттерна. Территория одной гари в разных участках может оказаться под воздействием разных типов пожара, что закономерно ведет к тому, что степень повреждения и характер послепожарной растительности может быть контрастным даже для одной гари. Наиболее опасным и разрушительным пожаром является верховой пожар, перешедший в сильный и устойчивый – повоальный [Ходаков, Жарикова, 2011].

Сосняки лишайниковые на альфегумусовых почвах показали азональные сценарии развития в районах исследования северной и средней тайги ЕТР и СЗС. В большинстве случаев, подобное поведение относилось и к соснякам-зеленомошникам. Глеевые почвы тундровой зоны показали отличное от других типов поведение, что было связано с близостью ММП и тиксотропностью.

ГЛАВА 6. ПОСТПИРОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ

Мы выдвинули гипотезу, согласно которой химические свойства должны в некоторой степени отражать степень трансформации постпирогенных почв, т. е. нулевая гипотеза – химические свойства не зависят от степени трансформации, возраста и структуры гарей и горельников. Чтобы доказать обратное, мы разделили физико-химические свойства почв на свойства молодых, средневозрастных и старовозрастных пожаров. Общие данные о физико-химических свойствах почв можно посмотреть в приложении Г.1, Г.2 и Г.3. Мы отдельно рассматриваем органогенные (О), верхние минеральные (Е или ВНФ), срединные (ВНФ-ВС) и нижние минеральные горизонты (ВС-С), поскольку влияние пожара проявляет себя по-разному в зависимости от глубины и особенностей анализируемого горизонта. Глава составлена по следующему плану:

1. Физико-химические свойства постпирогенных почв после молодых пожаров.
2. Физико-химические свойства постпирогенных почв после средневозрастных пожаров.
3. Физико-химические свойства постпирогенных почв после старовозрастных пожаров.
4. Закономерности постпирогенных изменений физико-химических свойств почв.
5. Типизация физико-химических свойств постпирогенных почв.

6.1. Физико-химические свойства почв после молодых пожаров

Химические свойства представлены в виде таблиц. Также рассмотрен условный фон (приложение Г.4а). Цвет по Манселлу определяли для самого пирогенно-измененного разреза на рассматриваемом участке. Для удобства конкретным гарям и их частям присвоены условные обозначения (УО) (приложение Г4).

Далее будут рассмотрены свойства верхних минеральных горизонтов почв северной и средней тайги (приложение Г.4б.).

Самой большой вариабельностью по показателю свойств органогенных горизонтов характеризовалась граница пожара 2004 г., что мы связываем с неоднородностью рельефа (воронки просадочного происхождения), разной мощностью и составом подстилки. $r_{\text{водный}}$ доходил до 7,1, при 5,6-5,8 в центре гари, потери при прокаливании (далее ППП) между крайними значениями различаются на 81%. Пожар 2017 года оказал меньше влияния на свойства подстилочных горизонтов почв, чем пожар 2004 г. ППП изменились с 25,2 до 50,3%

на второй год пожара. рН относился к непостоянным свойствам – широко варьирующим на территории гари.

Горельник 2009 г. средней тайги рассмотрен в сравнении с условным фоном (приложение Г.4в). На территории средней тайги различия в химических свойствах верхних минеральных горизонтов, скорее всего, объясняются пространственной неоднородностью. По сравнению с условным фоном на границе пожара 2004 приблизительно на 1 вырос рН водной вытяжки и повысилось содержание железа, в том числе слабоокристаллизованного ($Fe_{\text{дит}}$ – $Fe_{\text{окс}}$ с 0,03 до 0,38). Значительно увеличилось содержание $C_{\text{орг}}$. Зона периферии пожара 2004 г. характеризуется заметно повышенными значениями дитионит-растворимого железа по сравнению с условным фоном. Заметно возрастание количества слабоокристаллизованного железа в очаге гари с 0,03% в почве фона до 0,58%. Ограниченное влияние слабых пожаров на почвы условного фона и гари 2009 г. средней тайги выражается в сходстве химических свойств горизонтов Е. Изменение свойств глубинных горизонтов почв гари 2009 г. (в частности, рН горизонтов ВС и С) связано, предположительно, с особенностями породы или влиянием грунтовых вод. Слабые пожары, таким образом, не оказывают сильного воздействия на почвенные свойства, даже при богатом пироге паттерне.

Отдельно рассмотрены свойства срединных горизонтов почв северной тайги (приложение Г.4г). Отмечено большое варьирование содержания несиликатного железа и $C_{\text{орг}}$, а также $N_{\text{общ}}$. Цвет горизонтов изменялся только в отдельных случаях, например, после пожара 2004 г., когда ВНФ-горизонт оказался на дневной поверхности и перемешался с пироге материалом и детритом. Видно сильное колебание значений рН на границе пожара 2004 г. (5,3-7,5 рН водный и 4,1-7,0 рН солевой), что мы связываем с пространственной неоднородностью. Выражено – на 0,59 % различались значения $Fe_{\text{дит}}$ и $Fe_{\text{окс}}$ при малом колебании Al. Зона периферии отмечается стабильными показателями рН, понижением содержания $C_{\text{орг}}$ и сужением значений C/N. Содержание дитионит-растворимого железа увеличилось в очаге пожара, что привело к увеличению слабоокристаллизованного железа до 0,79% по отношению к границе и периферии гари 2004 г. (0,57-0,59 %). Видно, что на горельнике 2017 г. увеличился рН водной вытяжки, повысилось содержание дитионит-растворимого железа и оксалат-растворимого алюминия, сузилось значение C/N. Не исключено, что некоторые из изменений почв в срединных горизонтах на гари 2017 г. унаследованы от породы.

Рассмотрены свойства глубинных горизонтов почв (приложение Г.4д). Свойства глубинных, близких к породе горизонтов пожара 2004 г. характеризовались пространственной неоднородностью по показателю актуальной кислотности (например, значения рН от 5,5 до

6,7) и дитионит- и оксалат-растворимого железа. Мы пришли к выводу, что современные пожары не оказывали видимого влияния на глубинные горизонты.

Можно отметить следующие общие закономерности совокупности физико-химических и морфологических свойств:

1) Органогенные горизонты почв после молодых пожаров обладали короткой (непостоянной), сохранностью пирогенных свойств, поскольку часто подвергались стирающей эволюции или меняли направление развития. Горизонт подстилки О мог менять мощность и состав и замещаться на горизонт Т. Свидетельством пожара, при отсутствии стирающей эволюции выступал обугленный и углистый материал, что выражалось в изменении окраски;

2) Свойства верхних минеральных горизонтов трансформируются в наибольшей степени, т.к. они в разной степени оголяются пожаром и выступают акцептором мигрирующих зольных и органических веществ, при этом характеризуясь условно-постоянной и постоянной сохранностью пирогенных свойств;

3) Чем глубже почвенный горизонт, тем более постоянные физико-химические свойства он имеет. Из этого следует, что, если пожар трансформировал глубокие минеральные слои, изменение свойств может стать перманентным.

6.2. Физико-химические свойства почв после средневозрастных пожаров

Нами было принято решение не определять оксалат- и дитионитрастворимое железо для почв после средневозрастных пожаров средней тайги, а определение обменных оснований провести в ограниченном объеме (приложение Г.5а).

Из-за пространственной неоднородности найти тенденции в изменении физико-химических свойств органогенных горизонтов средневозрастных гарей сложно. Заметно, что значительно меняются значения рН верхних горизонтов, ППП и содержание $C_{орг}$, что связано с разным типом подстилки и неоднородностью изучаемой территории.

Химические свойства первых минеральных горизонтов представлены в приложении Г.5б. Под воздействием пожаров заметно изменялся только цвет верхних минеральных горизонтов, что обусловлено продуктами пожара. рН водной вытяжки верхних минеральных горизонтов средневозрастных гарей не изменялся более чем на 0,9. Степень насыщенности основаниями более молодой гари 1990 г. оказалась в три раза больше, чем гари 1937 г. Общим для рассматриваемых горизонтов оказалось их бедность $N_{общ}$. Отмечается также бедность железом и алюминием горизонта Е гари 1990 г.

Свойства первых минеральных горизонтов почв средней тайги представлены в приложении Г.5в. Только цвет верхних горизонтов может выступать как надежный индикатор наличия средневозрастных пожаров на супесчаных и суглинистых почвах средней тайги. В целом постпирогенные почвы и условный фон различаются незначительно. Разрез 501978 представлен литоземом грубогумусовым и не имел минеральных горизонтов.

Свойства срединных горизонтов почв северной тайги представлены в приложении Г.5г. рН водной вытяжки срединных горизонтов увеличивается относительно верхнего горизонта. Резко увеличилась степень насыщенности основаниями на горельнике 1937 г., при практически неизменной насыщенности в почвах гари 1990 г. Данные о свойствах срединных горизонтов для средней тайги представлены в приложении Г.5д. В срединных горизонтах почв средней тайги значения определяемых свойств между почвами гарей и условного фона еще больше сужаются.

Свойства глубинных горизонтов меняются незначительно (приложение Г.5е и Г.5ж). Был сделан вывод, что свойства глубинных горизонтов почв северной и средней тайги не затрагивались современными пожарами.

Можно отметить следующие общие закономерности совокупности физико-химических и морфологических свойств почв:

1) С увеличением возраста пожара в почвах остаются только постоянные физико-химические свойства, например, содержание несиликатного, «аморфного» и окристаллизованного железа, а также насыщенность основаниями. На глубине почвенного профиля вариабельность всех свойств падает;

2) Проведение анализа физико-химических свойств почв после средневозрастных пожаров, менее продуктивно, чем для почв после молодых пожаров.

6.3. Физико-химические свойства почв после старовозрастных пожаров

Как старовозрастные на территории северной и средней тайги определены пожары возрастом более 100 лет. По химическим свойствам старовозрастные пожары отражают скорее вариабельность пород и растительности, чем пирогенные трансформации свойств почв (приложение Г.6а и Г.6б).

Изученные почвы северной тайги одновременно являлись пирогенными палеоархивами. Они были описаны в приложении Г.6г. Значение рН палеогоризонта разреза в воронке ($pH_{\text{водный}}=8,1$) обусловлено свойствами древних пожаров. Значение ППП высокое, что

связанно с влажными условиями. Свойства почв средней тайги описаны по горизонтам (приложение Г.бд).

6.4. Закономерности постпирогенных изменений физико-химических свойств почв

Физико-химические свойства почв будут проанализированы по профилю, между гарями и горельниками. При оценке пирогенного воздействия на почвенный и растительный покров разных гарей важным является понимание того, что начальные условия, т. е. обстановка до пожара, сильно различаются. Этот факт, неизбежно отражается на результирующем изменении химических свойств почв пожаром. Наибольшее влияние на содержание $C_{орг}$ и $N_{общ}$ в верхних горизонтах оказывает состав подстилки; на $Fe_{лит}$ – изначальное содержание железа; на pH и насыщенность основаниями – водный режим, гранулометрический состав почв и погода.

6.4.1. Постпирогенное распределение $C_{орг}$ и $N_{общ}$ по профилю почв

Общая таблица содержания $C_{орг}$ и $N_{общ}$ представлена в приложении Г. 2 – ниже будут рассмотрено их профильное распределение в сосняках зеленомошниковых и лишайниковых; в смешанных ельниках и лиственничниках зеленомошниковых и зрелых смешанных лиственничниках, ельниках и пихтарниках папоротниковых. Содержание углерода и азота по профилю условно-фоновых почв и постпирогенных почв заметно различается (рисунок 66А). Так, распределение в условном фоне $C_{орг}$ и $N_{общ}$ аккумулятивное, а в почвах молодых гарей иллювиальное, что связано с повреждением подстилки и миграцией продуктов пожара вниз по профилю. Подстилка восстанавливается в интервале 4-6 лет, при этом иллювиальный характер распределения сохраняется около 10 лет. На рисунке 66Б представлено профильное распределение отношения C/N для почв трех молодых гарей (2009, 2015, 2017) в сравнении с фоном к гари 2017 года (сосняк лишайниково-зеленомошниковый).

В фоновых сосняках лишайниковых содержание $C_{орг}$ в подстилке в среднем 10-12%; $N_{общ}$ 0,2-0,5%; в сосняках и ельниках-зеленомошниках 30-45% и 1,0-1,2% соответственно. В смешанном зеленомошниково-лишайниковом напочвенном покрове содержание $C_{орг}$ составляет около 25%, а $N_{общ}$ 0,5 % (условный фон на графике 66Б). В ходе пожара верхний горизонт сосняков лишайниковых часто выгорает. В ельниках и сосняках-зеленомошниках сразу после пожара наблюдается уменьшение $C_{орг}$ и $N_{общ}$, затем довольно резкое повышение до допожарного уровня (за 4 года), и, достаточно часто, его превышение. Конкретное время изменений зависит от силы пожара. Максимальная температура карбонизации (МТК)

углистых частиц в экосистемах с лишайниковой подстилкой по данным рамановской спектроскопии 740 ± 29 °С (до 794 °С) – классифицируется как слабый по интенсивности пожар (сила зависит от локальных условий); в сосняках зеленомошных 773 ± 48 °С (до 865 °С) – классифицируется как пожар средней интенсивности. В зависимости от локальных факторов: сухой погоды, ветровалов и т. д. в рассматриваемых экосистемах могут проходить сильно-интенсивные пожары с МТК 788 ± 34 °С (до 878 °С).

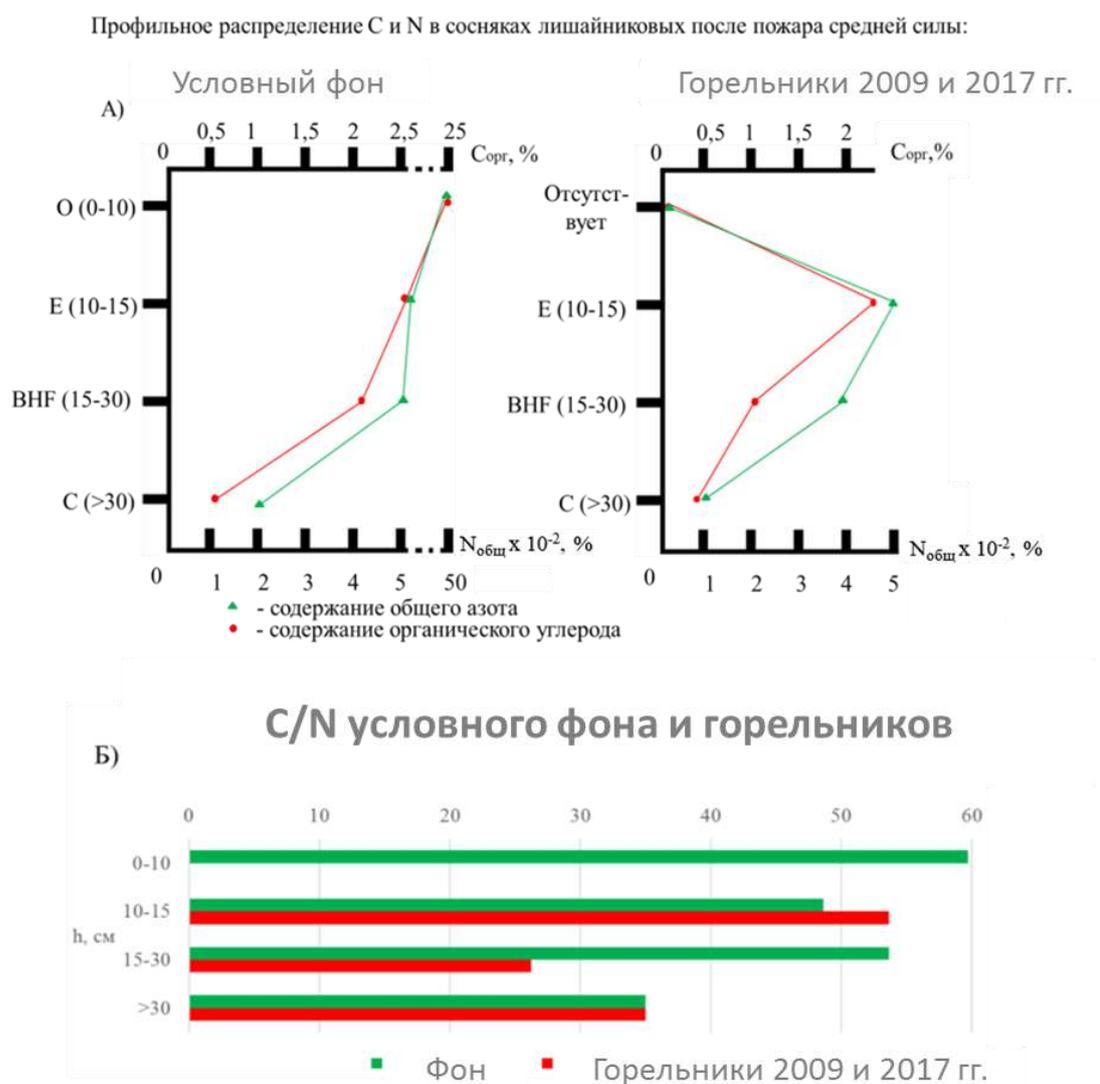
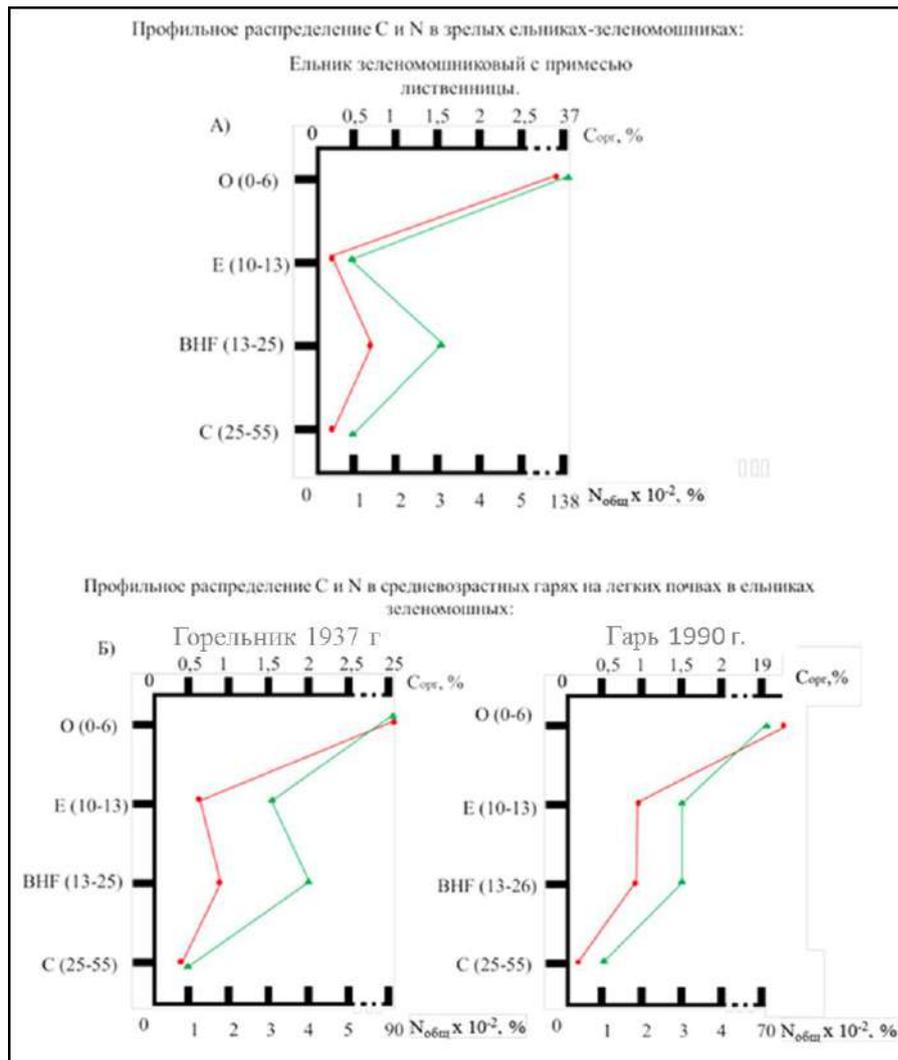


Рисунок 66. Усредненное распределение по профилю почв после молодых пожаров $C_{орг}$ и $N_{общ}$ (А), а также распределение C/N (Б).

Анализ почв после средневозрастных пожаров проводился отдельно для песчано-супесчаных и суглинистых почв, поскольку их допозарные параметры и ответ на пирогенное событие различаются. Постпирогенные почвы на легких породах анализировались на примере северной тайги, в качестве условно-фоновых почв выступали подзолы под ельниками-лиственничниками, а на тяжелых породах на примере средней тайги; в качестве условно-фоновых почв выступали подзолистые почвы под ельниками-пихтарниками (рисунки 67 и 68).

На рисунке 67Б показано, что в почвах возрастного горельника 1973 г. профильное распределение $C_{орг}$ и $N_{общ}$ иллювиальное. Содержание С и N повышается от горизонта Е (0,6% для $C_{орг}$ и 0,03% для $N_{общ}$) к горизонту ВНФ (0,8% для С и 0,04% для N), при этом на гари, вызванной сильным пожаром (1990 г.) содержание углерода и азота в горизонтах Е и ВНФ линейно (0,80 и 0,78% для $C_{орг}$ и 0,03 и 0,03% для $N_{общ}$). Этот эффект может быть связан с миграцией органического вещества вниз по профилю после пожара, как описано, например, в работах А.А. Дымова и соавторов. Экосистема на гари 1990 г. не полностью восстановила свои допожарные свойства, несмотря на то, что она является уже средневозрастной.

По рисунку 67В заметно, что C/N изменяется по профилю почв гари 1990 г. незначительно (особенно в горизонте Е и ВНФ), тогда как в зрелых ельниках и в почвах горельника 1937 г. C/N уменьшается с глубиной. Наиболее редки пожары на тяжелых почвах средней тайги (рисунок 68). Здесь профили почв имеют большой разброс мощностей профилей, связанный с разной глубиной залегания моренных отложений и плотных пород (от 0,5 м до более 1 м).



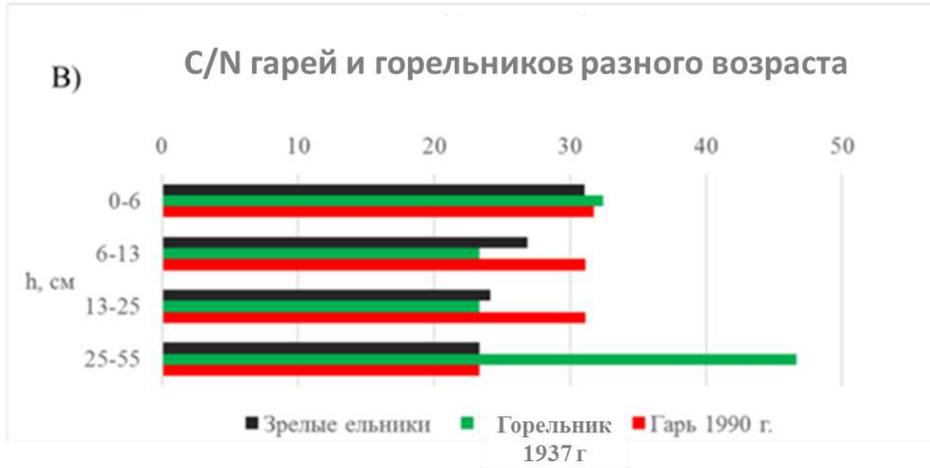


Рисунок 67. Усредненное распределение по профилю почв после средневозрастных пожаров $C_{орг}$ и $N_{общ}$ (А и Б), а также C/N (В).

Суглинистые почвы средней тайги под после старовозрастных пожаров содержали, в целом, больше $N_{общ}$ в верхних минеральных горизонтах (рисунок 68А, последний пожар около 500 л. н.), чем почвы северной тайги.

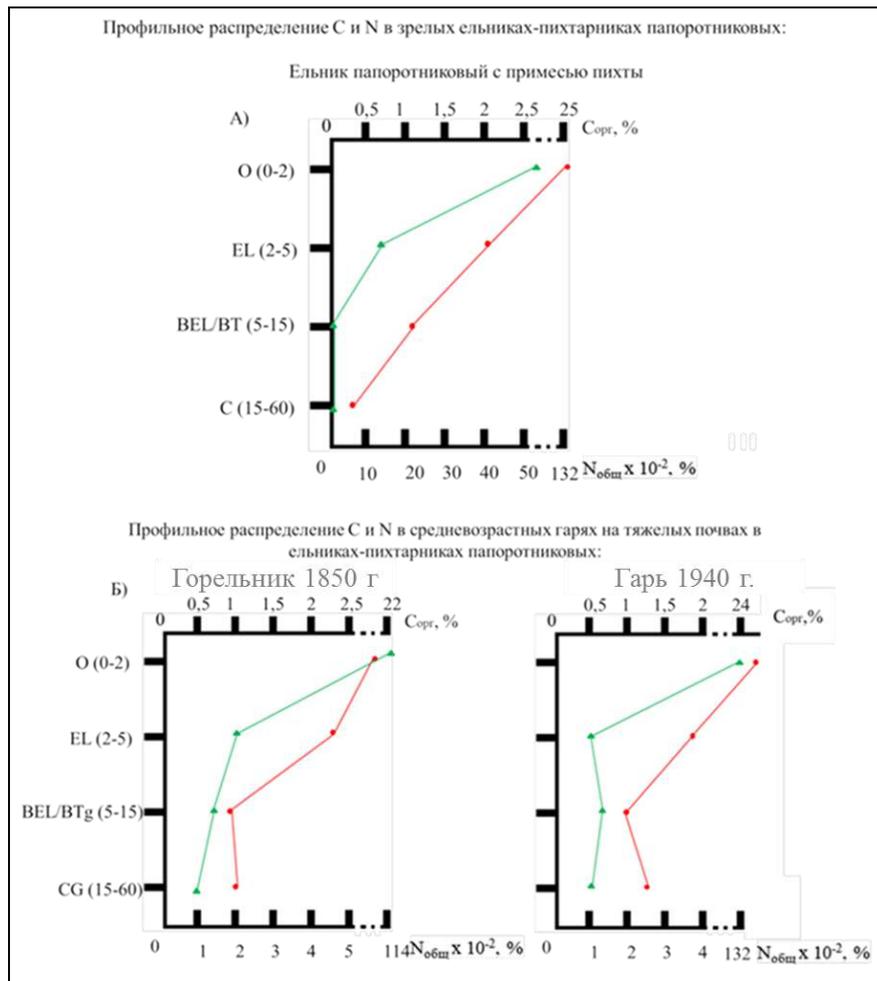




Рисунок 68. Усредненное распределение по профилю старовозрастных гарей $C_{орг}$ и $N_{общ}$ (А и Б), а также C/N (В)

Другой особенностью рассматриваемых почв является накопление $C_{орг}$. Характер распределения $C_{орг}$ и $N_{общ}$ линейно-отрицательный. Распределение C/N в тяжелых почвах средней тайги характеризуется постепенным снижением с глубиной (рисунок 6В).

На рисунке 69 показан разброс значений $C_{орг}$ в верхних минеральных горизонтах разновозрастных гарей ($n=5$ для каждой группы).

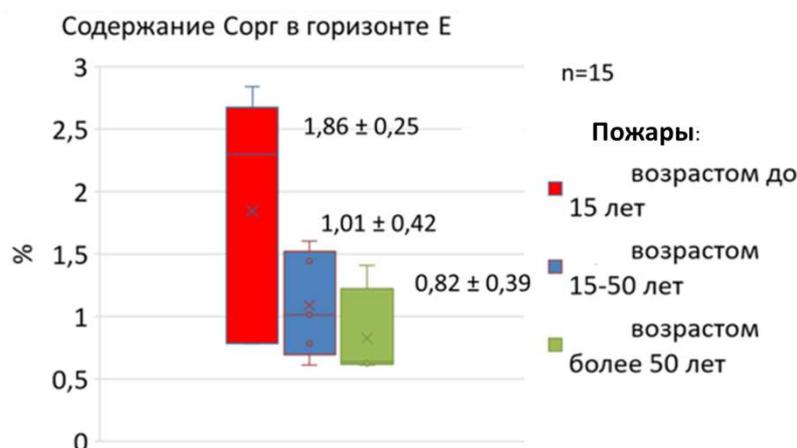


Рисунок 69. Иллюстрация долговременного влияния пожара на содержание $C_{орг}$

Для почв после молодых пожаров средней силы наблюдается повышение $C_{орг}$ в горизонте E, что связано с миграцией органического вещества при температурном воздействии – пирогенные события могут стимулировать миграцию органических веществ в верхние минеральные горизонты [Certini, 2005; Wildland Fire..., 2005; Raison et al., 2009]. Внутри выделенных групп колебания значений $C_{орг}$ весьма значительны – коэффициент вариации больше 30% во всех возрастных группах. Причина этого в том, что на содержание $C_{орг}$ влияет не только пожар, но и допожарные параметры: исходное содержание и формы $C_{орг}$; тип растительности, включая соотношение древесных и травянистых видов; гранулометрический состав верхних минеральных горизонтов и влажность экосистемы.

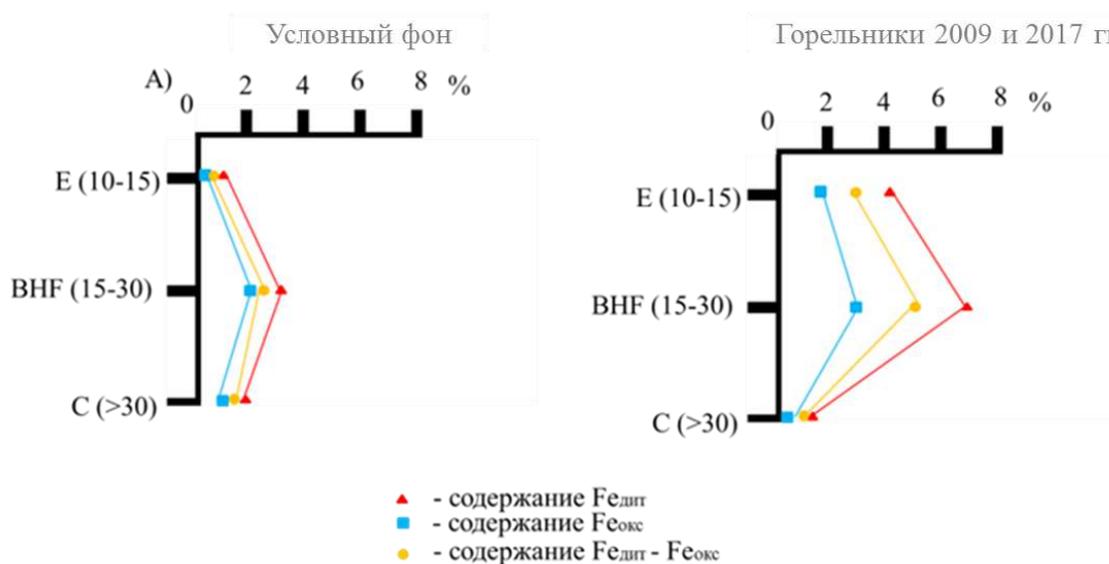
6.4.2. Постпирогенное распределение несиликатного, подвижного и слабоокристаллизованного железа по профилю почв

Общая таблица содержания $Fe_{\text{длт}}$ и $Fe_{\text{окс}}$ дана в приложении Г.3. Мы опишем распределение железа в сосняках лишайниковых после пожаров средней силы и в ельниках зеленомошниковых после сильного пожара (рисунок 69А, Б).

Слабоокристаллизованное железо оценивалось по разнице $Fe_{\text{длт}} - Fe_{\text{окс}}$. Все данные представлены в формате $n \cdot 10^{-1}$ (десятые). Нами были рассмотрены только песчаные и супесчаные почвы.

По рисунку 70 (А и Б) заметно, что в почвах гарей в верхних двух горизонтах содержание железа увеличивается от двух до четырех раз, например, $Fe_{\text{длт}}$ в горизонте ВНФ (с 0,30 до 0,75%). В горизонте Е постпирогенных почв возрастает содержание $Fe_{\text{окс}}$ (с 0,04 до 0,18%). Характер распределения железа в фоновых и постпирогенных почвах остается элювиально-иллювиальным. Рисунок 70Б демонстрирует, что в случае сильного пожара изменения в содержании несиликатного железа могут оставаться десятки лет (гарь 1990 г.).

Профильное распределение железа в сосняках лишайниковых после пожара средней силы:



Профильное распределение железа в ельниках-зеленомошниках:

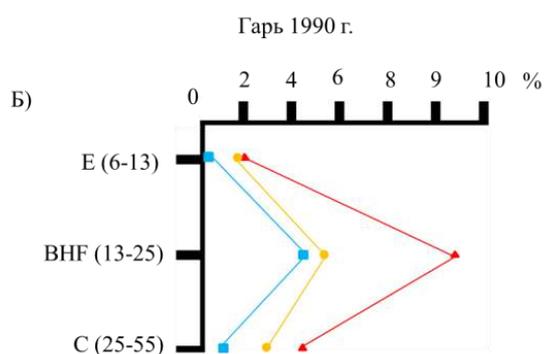


Рисунок 70. Усредненное распределение по профилю железа условного фона и молодых горельников (А), а также средневозрастной гари (Б) $Fe_{\text{дит}}$, $Fe_{\text{окс}}$ и $Fe_{\text{дит}} - Fe_{\text{окс}}$. Все данные представлены в формате $n \cdot 10^{-1}$ (десятые).

Вероятно, что повышение несиликатного железа в горизонте VNF связано с наиболее сильными пожарами, тогда как его повышение в горизонте Е (рисунок 71) может происходить и при слабых пожарах. Совокупность интенсивности и продолжительности пожара на данной территории важный параметр, определяющий период восстановления до допозарных значений различных форм железа. В некоторых случаях сила пожара способна изменить содержание несиликатных форм железа на десятилетия и столетия, если набор внешних факторов, способствует их сохранению.

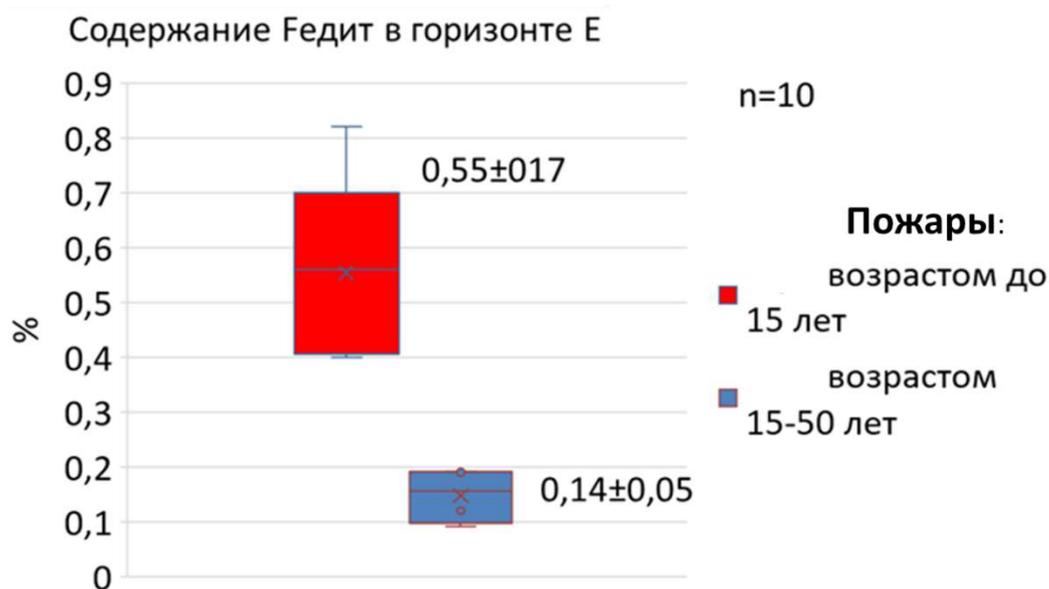


Рисунок 71. Иллюстрация долговременного влияния пожара на содержание $Fe_{\text{дит}}$ в случае пожаров средней и слабой силы

6.4.3. Связанные изменения некоторых химических свойств пирогенных почв

В своих исследованиях М.А. Глазовская (2007) и А.А. Роде (2008) упоминают, что большое количество органического вещества (оценено через $C_{\text{орг}}$) может связывать обменный

кальций ($Ca_{обм}$), тем самым повышая его содержание и препятствуя его выщелачиванию. Мы определили зависимость между этими параметрами для пожаров разного возраста и силы в горизонтах Е и ВНФ (рисунок 72А и Б).

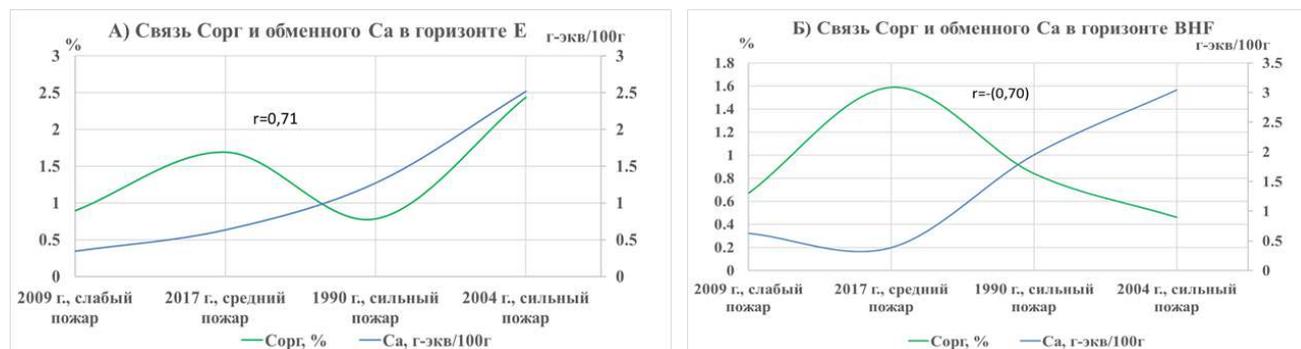


Рисунок 72. Связь $C_{орг}$ (%) и $Ca_{обм}$ (г-экв/100 г) в горизонте Е (А) и ВНФ (Б) почв молодых гарей на легких почвах.

По рисунку 72А видно, что $Ca_{обм}$ повышается совместно с $C_{орг}$ в горизонте Е (коэффициент корреляции $r=0.71$; коэффициент детерминации $R^2=51$). Возможно, что в паре $C_{орг}$ и $Ca_{обм}$ последний лимитирует скорость минерализации органического вещества (как отмечал А.А. Роде). При прохождении сильных пожаров эта зависимость растет, что связано, по нашему мнению, с большей потечностью и конденсацией органического вещества в верхних минеральных горизонтах, с одной стороны, и большим количеством зольного Са, переходящего в обменную форму, с другой. В горизонте ВНФ (рисунок 72Б) такой зависимости не обнаружено, что может быть связано с большей глубиной его залегания и плотностью, которая мешает проникновению органических соединений. Примечательно, что данная зависимость больше коррелировала с силой пожаров, чем с их возрастом и в случае сильных пожаров была долговременной.

Корреляция между гидролитической кислотностью и содержанием несиликатного и «аморфного» железа наблюдалась для горизонта Е (рисунок 73А), с коэффициентом, соответственно $r=0.98$; $R^2=96$ и $r=0.90$; $R^2=0.81$), но не наблюдалась в ВНФ (рисунок 72Б) ($r=0.43$). Вероятно, данная взаимосвязь обусловлена подщелачиванием среды после пожара с последующим окислением железа. Связь несиликатного железа с рН в верхних минеральных горизонтах обратная ($r=-0.87$), в срединных горизонтах связь отсутствует; связи рН с «аморфным» железом не обнаружено (рисунок 73 В и Г).

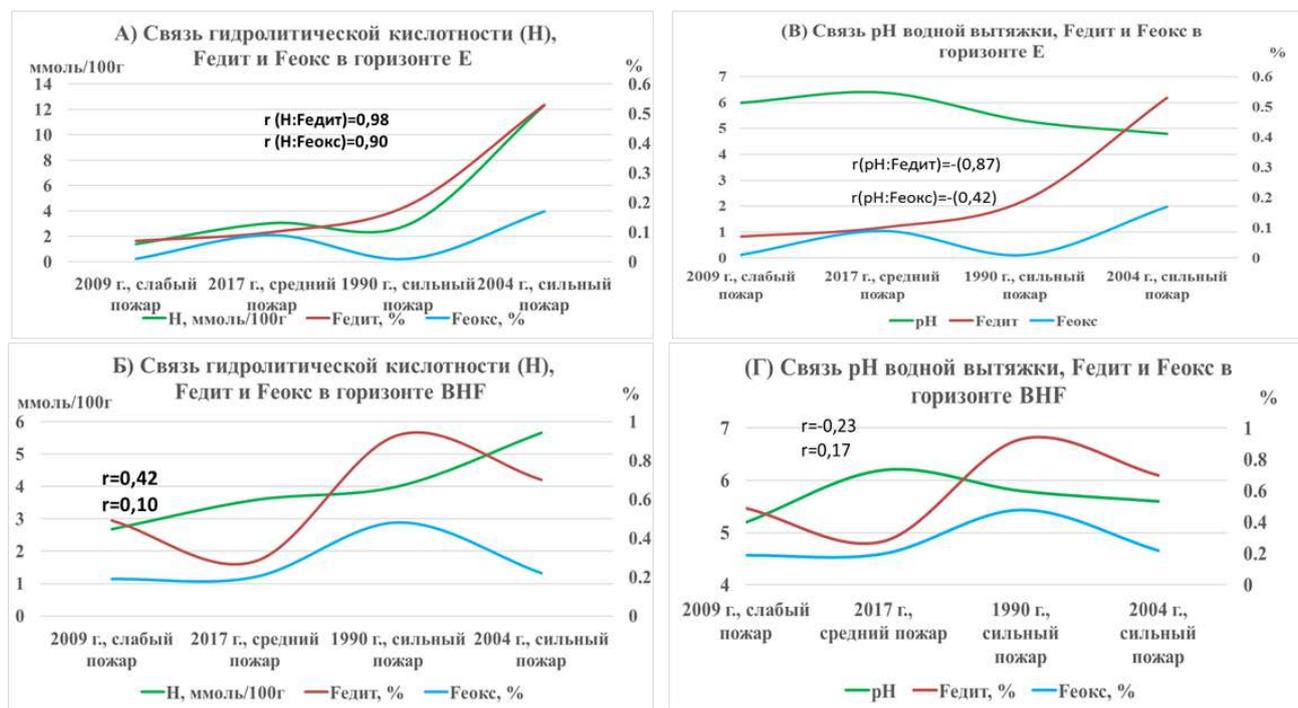


Рисунок 73. Связь форм железа с гидролитической кислотностью в горизонтах E и ВНF (А и Б) и актуальной кислотностью в горизонтах E и ВНF (В и Г).

Таким образом, пирогенез способствует быстрому связыванию подвижного железа в верхнем минеральном горизонте.

Была измерена насыщенность основаниями постпирогенных почв (таблица 15). С повышением возраста гари степень насыщенности основаниями верхнего горизонта постпирогенной почвы уменьшалась до фоновых значений. Мы связываем это с тем, что накопленная после пожара зола постепенно растворяется и с течением времени обменные основания из этой золы переходят в нижние горизонты или переходят в растения. Эффект насыщения верхних горизонтов золой наблюдался на протяжении не более 15 лет после пожара. Степень насыщенности основаниями в исследованных почвах в нижних горизонтах характеризуется ростом с глубиной, что обусловлено, предположительно, свойствами породы. Все исследованные почвы относятся к ненасыщенным основаниями по классификации К. К. Гедройца.

Физико-химические свойства верхнего минерального горизонта значительно трансформируются пожаром – некоторые изменения прослеживаются на протяжении десятков лет. Утяжеление гранулометрического состава и меньшая интенсивность физико-химических взаимодействий (как горения, так и миграции веществ) между верхним и срединным минеральными горизонтами выступает как граница между трансформированной и неизменной частью профиля почвы.

Таблица 15. Распределение степени насыщенности основаниями по профилям почв гарей (пожар средней силы) на песчаных и супесчаных почвах

$V=(S/(S+Hr))*100$	Средневозрастные гары			Молодые гары			
Горизонты	Гарь 1937г. переходные условия	Гарь 1937 г. автоморфные условия	Гарь 1990 г.	Гарь 2004 г. Периферия	Гарь 2009 г.	Гарь 2015 г.	Гарь 2017 г. Периферия
Е	9	11	15	22	18	22	24
ВНФ	47	55	9	42	21	23	13
ВС	9	НО	28	55	67	30	26

6.4.4. Пространственная неоднородность химических свойств постпирогенных почв

Для оценки пространственной неоднородности физико-химических свойств почв между структурными зонами гарей и горельников – границей, периферией и очагом, были выбраны пожары 2004 и 2017 гг. Для сравнения взяты подзолы на автоморфных позициях. Гарь 2004 г. пройдена сильным пожаром; Горельник 2017 г. – средним пожаром. Таким образом, мы можем проследить, насколько параметры пожара способны изменить свойства почв на примере горизонта Е. Соотношение C/N представлено в долях по вертикальной оси в форме: $n \cdot 10^2$ ($0,2 = 20$), $Fe_{\text{дит}}$ в % и pH в единицах по левой оси (рисунок 74 А и Б).



Рисунок 74. Пространственная неоднородность химических свойств по зонам пожара слабой-средней силы и интенсивности горельника 2017 г. (А) и сильного и интенсивного пожара гари 2004 г. (Б).

Анализируя рисунок 74 (А и Б), мы видим, что постпирогенные изменения гарей 2017 и 2004 гг. однонаправленны, однако сильный пожар 2004 г. вызвал гораздо большие по абсолютному значению изменения $Fe_{\text{дит}}$; pH в очаге пожара повысился приблизительно на единицу. Отношение C/N значительно сузилось к очагу пожара, вероятно, под влиянием значительного увеличения температуры минерального горизонта. Горельник 2017 г. (рисунок 74А) характеризуется незначительным изменением несиликатного железа по отношению к почве условного фона, тогда как гарь 2004 г. увеличением до четырех раз. Изменение pH горельника 2017 г. в два раза меньше, чем на гари 2004 г. (от 6,0 до 6,4). Таким образом, сила пожара значительно увеличивает абсолютные значения изменений и время их присутствия в

почвенном профиле, т. к. на момент исследований гари 2004 г. прошло уже 15 лет после пожара.

6.5. Типизация физико-химических свойств постпирогенных почв

Почвенные свойства на основании их сохранности и выраженности были разделены на группы. По сохранности в почве: постоянные, условно постоянные и непостоянные. По степени выраженности трансформированных пожарами свойств: выраженные, заметные и невыраженные (рисунок 75).

Докажем, что выбранные категории являются существенным признаком пирогенных воздействий. Пирогенная трансформация физико-химических свойств понимается нами как степень изменения почвенных параметров. Степень изменения почвенных параметров – это группа существенных факторов, которые определяют направление почвообразования, способствуют миграции или накоплению отдельных веществ и влияют на почвенное плодородие. Следовательно, пирогенная трансформация также может влиять на почвенное плодородие и баланс химических элементов, т. е. является существенным признаком пирогенных воздействий.



Рисунок 75. Алгоритм типизации трансформации физико-химических свойств почв относительно их сохранности и выраженности на основе морфологического анализа возраста гари [Wildland Fire..., 2005;

Certini, 2005; Raison et al., 2009; Ubeda, Outeiro, 2009; Ходаков, Жарикова, 2011; Дымов, 2020; Kuzmina et al., 2022].

Сохранность пироженных трансформаций в почвенном профиле отражает выраженность параметров пожара (силы, интенсивности и устойчивости) через призму внешних условий среды по принципу палимпсеста, т. е. с течением времени трансформации ослабевают. Сила, интенсивность и устойчивость пожара определяют влияние пирогенеза на территорию гари и горельника в зависимости от своей выраженности. Следовательно, сохранность пироженных изменений не только существенный признак пироженных воздействий, но и отражение степени пироженной трансформации.

Деление по сохранности присутствия пироженных свойств в почвах производится согласно схеме на рисунке 74 в следующих временных интервалах: сохраняющиеся до 15 л. – непостоянные (рН, $C_{\text{орг}}$, $N_{\text{общ}}$, $Fe_{\text{дит}}$, $Fe_{\text{окс}}$, V); 15-100 л. – условно-постоянные ($Fe_{\text{дит}}$, $Fe_{\text{окс}}$, V); сохраняющиеся >100 л. – постоянные ($Fe_{\text{дит}}$). Это подтверждает, что некоторые экосистемы, такие как сосняки лишайниковые, всегда находятся в состоянии пироженной трансформации – у них не восстанавливаются до естественных значений условно-постоянные, а иногда и непостоянные свойства. Деление на все группы по выраженности трансформированных пожарами свойств производится относительно изменения физико-химических свойств почв пожарами. Мы придерживались следующего эмпирического правила (для наших объектов) – изменение на сотые процентов относительно фона в сторону увеличения или уменьшения определялось как невыраженное; изменение на десятые и единицы процентов – как заметное; в разы – как выраженное (для рН на единицы) (таблица 16). Одно и то же свойство, определенное для органоминеральных горизонтов одного профиля (например, рН), может входить в разные группы сохранности и выраженности.

Таблица 16. Типизация трансформации физико-химических свойств гарей по сохранности и выраженности. Прочерк означает, что для данного горизонта анализ не проводился. Условные обозначения: орг. гор. – органоминеральные горизонты; мин. гор. – минеральные горизонты.

Старовозрастные гари ≥ 100 лет										
Параметры орг. гор.	рН водный	рН солевой	ППП %	$C_{\text{орг}}$ %	$N_{\text{общ}}$ %	C/N	Ц	-	-	-
Группы орг. гор.	неотличимы от фона									
Параметры мин.гор.	рН водный	рН солевой	$Fe_{\text{дит}}$ %	$Fe_{\text{окс}}$ %	$Al_{\text{окс}}$ %	$Fe_{\text{дит}}-Fe_{\text{окс}}$ %	$C_{\text{орг}}$ %	$N_{\text{общ}}$ %	C/N	Гран. с/Ц
Группы верхних мин. гор.	неотличимы от фона									постоянные/ невыраженные или заметные

Таблица 16. Продолжение

Средневозрастные гари ≤100 лет										
Параметры орг. гор.	pH водный	pH солевой	ППП %	C _{орг} %	N _{общ} %	C/N	Ц	-	-	-
Группы орг. гор.	Большая вариабельность и пространственная неоднородность									
Параметры мин. гор.	pH водный	pH солевой	Fe _{диг} %	Fe _{окс} % (Al _{окс} , % не опр.)	Федит-Feокс %	C _{орг} %	N _{общ} %	C/N	Ц	
Группы верхних мин. гор.	постоянные/ невыраженные		условно-постоянные при сильных пожарах и наличии железа в почвах/заметные и выраженные			следовое количество		постоянные/ заметные и выраженные		
Группы средних мин. гор.	пространственная неоднородность		мало данных			следовое количество		постоянные/ невыраженные		
Группы глубинных мин. гор.	постоянные невыраженные		мало данных			следовое количество		постоянные/ невыраженные		
Молодые гари ≤15 лет										
Параметры орг. гор.	pH водный	pH солевой	ППП %	C _{орг} %	N _{общ} %	C/N	Ц	-	-	-
Группы орг. гор.	непостоянные/ невыраженные		непостоянные/большая вариабельность				непостоянные/ выраженные или заметные	-	-	-
Параметры мин. гор.	pH водный	pH солевой	Fe _{диг} %	Fe _{окс} %	Al _{окс} %	Fe _{диг} -Fe _{окс} %	C _{орг} %	N _{общ} %	C/N	Ц
Группы верхних мин. гор.	непостоянные/ заметные и выраженные		условно-постоянные/ заметные и выраженные	большая вариабельность	условно-постоянные/ заметные и выраженные	непостоянные/ заметные/ большая вариабельность		постоянные/ выраженные		
Группы средних мин. гор.	условно-постоянные/ невыраженные или заметные		условно-постоянные/большое варьирование					постоянные/ невыраженные		
Группы глубинных мин. гор.	постоянные/ невыраженные		постоянные/невыраженные			постоянные/невыраженные				

Предположение о связи возраста гари и степени изменения физико-химических свойств подтвердилось. Наиболее удобными маркерами пирогенной трансформации почв являются, для молодых гарей, изменение цвета почвы, увеличение рН, $C_{\text{орг}}$, и уменьшение $N_{\text{общ}}$ в горизонте Е, а также увеличение несиликатного железа в горизонтах Е и ВНФ; для средневозрастных – увеличение несиликатного железа при сильных пожарах в горизонте Е и ВНФ и изменение цвета почвы в горизонте Е; для гарей любого возраста цвет почвы, выраженный в морфонах.

Выводы по типизации морфологических и физико-химических свойств гари

Четыре основных аналитических метода отражают относительный возраст современной гари или горельника: физико-химический анализ (лабораторный), геоботанический, почвенно-морфологический и анализ распределения углистых частиц по профилю (полевые). Химические параметры хорошо подходят для определения свойств почв молодых пожаров любой силы, но до 15 л. возрастом. Изменения растительности хорошо выражены на средневозрастных гарях (до 50-100 лет) после средних и сильных пожаров. Морфологический метод рассматривается нами как наиболее перспективный для определения относительного возраста сильных пожаров. Распределение углистых частиц по профилю почвы становится стабильным после восстановления подстилки на 4-6 год после пожара любой силы, т. к. процессы эрозии почвы замедляются. С течением времени углистые частицы, особенно после слабого пожара могут подвергаться биогенной и механической деградации и исчезать из профиля. В зависимости от условий этот метод хорошо отражает пирогенное воздействие до 100 л. в подстилке и до тысяч лет в минеральном профиле (на рисунке рассматривается нахождение углистых частиц в подстилке) (рисунок 76). Наиболее выраженным и продолжительным временем восстановления характеризуются морфологические изменения почвенного профиля после сильного пожара в совокупности с распределением углистых частиц по профилю почв.

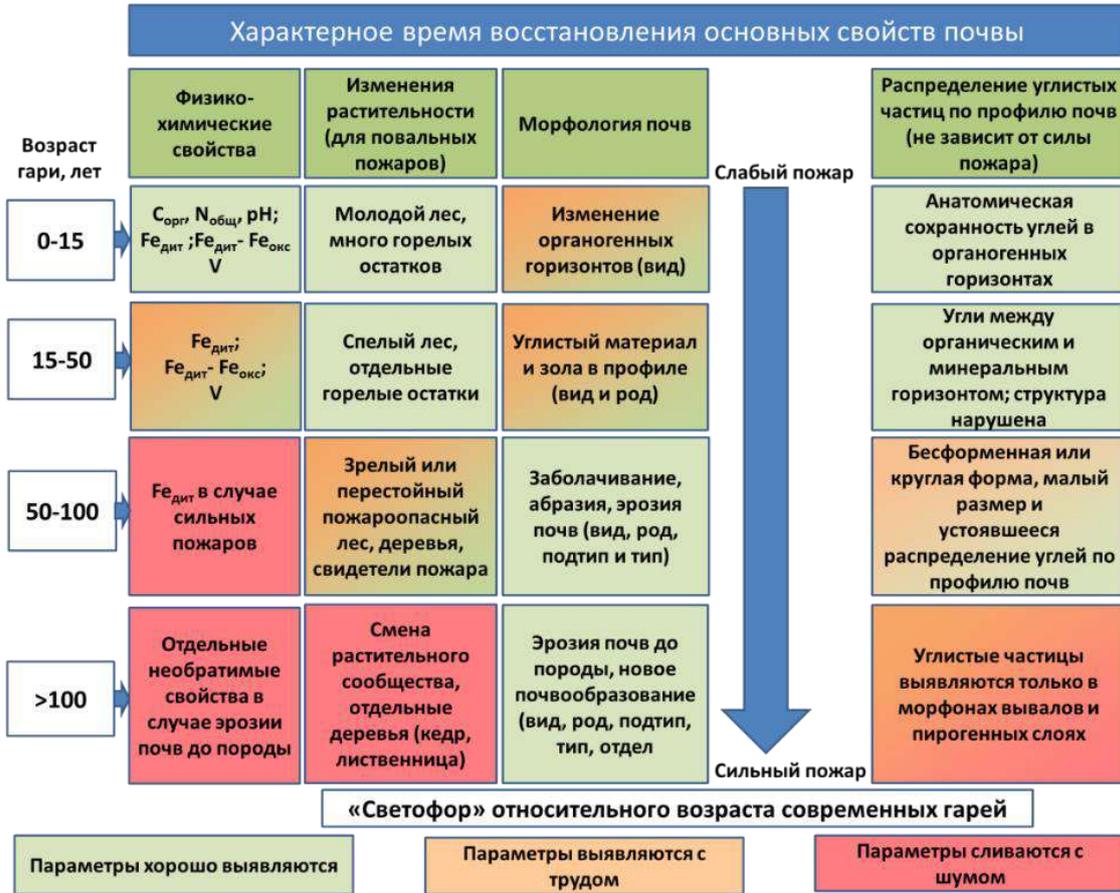


Рисунок 76. Экосистема, как зеркало пирогеनेза. Качественные категории относительного возраста 0-15 – молодые гары; 15-100 – средневозрастные гары; >100 старовозрастные гары.

Важные условия, препятствующие использованию параметров определения относительного возраста: естественная неоднородность химических свойств; полное уничтожение растительности пожаром; стирающая эволюция почв, при отсутствии информации о возрасте пожара; полное сгорание или дожигание углей до золы. Заполненная схема пирогенной истории представлена на рисунке 77.



Рисунок 77. Содержание и методы исследования пирогенной истории региона.

ГЛАВА 7. ТИПИЗАЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ УГЛИСТЫХ ЧАСТИЦ ПО ПРОФИЛЮ ПОЧВ

Пути вертикальной миграции углистых частиц по профилю почвы это частный случай постпирогенных морфологических изменений, происходящих на гари или горельнике, заслуживающий отдельного рассмотрения. Антракомасса, участвующая в вертикальной миграции, мала (в среднем от 100 до 2000 ppm в зависимости от экосистемы), но совокупное влияние процессов миграции углей для баланса PuC в северных почвах огромно, потому что погребенные угли, в зависимости от параметров пожара и условий залегания, разлагаются медленно – сотни и тысячи лет, при этом их поступление не прекращается. Экспонированные углистые частицы, которые остаются на подстилке или между подстилкой и минеральным горизонтом, подвержены влиянию относительного быстрого химического и биогенного разложения и в меньшей степени участвуют в долговременной консервации C . Наиболее уязвимы к разложению низкотемпературные угли (от 170 до 300 °C) с существенной долей легкоразлагаемого OB . В глинистых почвах, в зоне распространения ММП, процессы вертикальной миграции (криотурбации) играют большую роль в депонировании PuC . При криотурбациях погребенный PuC может сохраняться на больших отрезках времени вследствие постоянных низких температур и анаэробной среды у поверхности ММП.

На объемы миграции влияет площадь распространения огня, параметры и тип пожара (верховой, низовой), а также состав допожарной растительности и почвенной подстилки. Мы не будем рассматривать интенсивную послепожарную эрозию как фактор миграции углистых частиц, т. к. ее влияние на морфологию почв освещено в главе 4.

7.1. Концептуальные схемы путей миграции углистых частиц

На интенсивность вертикальной миграции углистых частиц по профилю и их разрушение влияют положительно следующие факторы:

1) Вывалы. Тип пожара и его сила определяет масштаб вывалов. После низовых пожаров немедленных вывалов может не последовать. В некоторых случаях поврежденные деревья не вываливаются, а надламываются после смерти, оставляя после себя сгоревшие останцы – в этом случае вертикальной миграции угля, связанной с вывалами, не отмечается, как и морфонов вывалов.

2) Процессы увлажнения-иссушения углистых частиц. Эти процессы могут вести к измельчению углистых частиц и растрескиванию почвы, что облегчает вертикальную миграцию. Чем меньше становятся углистые частицы, тем легче они проникают в подстилку и

далее – в минеральную часть почвы. Увлажнение-иссушение также способствует некоторому перемешиванию почвы и углистых частиц, по причине изменения их объема.

3) Процессы резкого изменения температуры и влияние криогенных процессов. Эти процессы особенно выражены во влажных условиях. Ведут к измельчению углистых частиц. Кроме того, частый переход температур через ноль способствует некоторому перемешиванию почв, по причине изменения объема влаги и дробления почвенных агрегатов. Криотурбации на территории лесотундры способны перемешивать целые горизонты вместе с углистыми частицами.

4) Почвенная мезофауна. Хотя этот фактор влияет на вертикальную миграцию углей, в северных широтах он выражен незначительно.

На интенсивность миграции углистых частиц по профилю отрицательно влияют такие факторы:

1) Стабильные условия климата и растительности. Углистые частицы значительно легче почвы, что делает вертикальную миграцию в идеальных условиях (без вывалов, увлажнения-иссушения, перепадов рельефа, значительного изменения температур и др.) невозможным.

2) Мощная и плотная подстилка. Подстилка, если она осталась после пожара, задерживает углистые частицы сопоставимые по размеру с ее пористой структурой. Особенно плотным слоем подстилки выступает ОН – основной акцептор вертикальной миграции углистых частиц.

3) Минеральные горизонты, чей гранулометрический состав тяжелее тонкого песка. В этом случае углистые частицы с трудом проникают в почвенный профиль, даже при воздействии факторов, способствующих вертикальной миграции. Любой водоупор в почвенном профиле оказывает тот же барьерный эффект (например, цементация железом).

4) Процессы насыщения почвы водой. Так как древесный уголь легче воды, он не может проникнуть в насыщенную влагой почву.

5) При низкотемпературном горении (в частности, тлении) углистые частицы могут разложиться быстрее, чем попадут в минеральный почвенный профиль. На разложении углистых частиц, в частности, построена целая отрасль применения биоугля как удобрения, что косвенно доказывает высокую скорость разложения низкотемпературного угля.

В таблице 17 показано, что подзолистые почвы имеют относительно большое содержание ила и пыли в горизонтах E и BEL. Это определяет барьерную роль этих горизонтов в миграции углистых частиц, особенно при высокой влажности, когда такие

горизонты набухают. Локальный максимум углистых частиц (концентрации антракомассы) формируется между подстилкой и минеральным горизонтом.

Мощные подзолы часто характеризуются однородным гранулометрическим составом по всему профилю почвы, что определяет равномерно-диффузное распределение в них угля, но только в случае, если углистые частицы сопоставимы размерами с крупным песком. Уголь такого размера может возникать при горении кустарничков и веточек. Миграцию облегчает полное уничтожение подстилки пожаром. Равномерно-диффузная миграция может быть ограничена близкими грунтовыми водами или пропиткой железом части горизонта, не диагностируемыми визуально.

В оподзоленных подбурах и маломощных подзолах горизонт ВНФ выступает как барьер на пути миграции углистых частиц, что обуславливает неравномерно-диффузное их распределение. При неравномерно-диффузном типе распределения углистых частиц возникает два локальных максимума – между ОН-Е и между Е-ВНФ. Существенным признаком неравномерно-диффузного типа являются различия в гранулометрическом составе почвы или ее сложении. Это означает, что даже если визуально различие горизонтов не заметно, второй максимум миграции может быть связан с цементацией железом, органическим веществом или влажностью нижнего горизонта.

Пути вертикальной миграции углистых частиц в глееземах криометаморфических определяются процессами пучения и турбаций. Турбационный тип также может применяться для описания миграции углистых частиц в почвах, нарушенных многочисленными вывалами (турбационные подтипы) с оглядкой на то, что вывалы деревьев образуют морфоны специфической формы.

Пути миграции углистых частиц определялись в почвах «среднего облика» на выровненных участках без резких повышений и понижений. Мы приводим таблицу среднего гранулометрического состава почв районов исследования (таблица 17).

Все типы миграции имеют аккумулятивный тип распределения в почвенном профиле, кроме турбационного, который может носить спорадический характер.

Таблица 17. Средний гранулометрический состав почв [по данным С.В. Горячкина (2010); А.А. Дымова (2022); Почвы и почвенный покров... (2013)].

Горизонт	Содержание фракций, % (размер частиц, мм)					
	1,0-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
Барьерная* – северная тайга ЕТР (подзолистая с микропрофилем подзола)						
<u>EL</u>	1	38	<u>42</u>	6	5	8
<u>BEL</u>	1	37	<u>37</u>	3	11	11
BT	1	27	47	5	6	14
BC	5	53	20	4	3	15
C	19	52	10	3	4	12
Барьерная* – средняя тайга ЕТР (подзолисто-глеевая)						
<u>EL</u>	12	11	<u>37</u>	6	12	<u>22</u>
<u>BELg</u>	6	55	7	2	7	<u>23</u>
BTg	5	21	33	8	9	24
BCg	4	7	43	9	11	26
C	3	33	19	6	11	28
Неравномерно-диффузная* и равномерно-диффузная* – северная тайга ЕТР (подзол иллювиально-железистый)						
<u>E</u>	13	<u>72</u>	8	4	3	0
<u>BF</u>	13	<u>62</u>	12	2	7	4
<u>BC</u>	14	<u>62</u>	6	3	2	13
<u>C</u>	11	<u>71</u>	5	3	3	7
Неравномерно-диффузная* и равномерно-диффузная* – средняя тайга ЕТР (подзол иллювиально-железистый)						
<u>E</u>	28	<u>67</u>	4	0	1	0
<u>BF</u>	16	<u>64</u>	7	3	3	7
<u>BC</u>	24	<u>59</u>	6	1	2	8
<u>C</u>	32	<u>51</u>	6	1	2	8
(Крио)турбационная* – кустарниковая тундра (глеезем криометаморфический)						
G	1	31	35	17	7	9
CRMg	1	30	34	8	10	17
Cg	0	30	30	8	8	24

*-пояснения в тексте. Важные для миграции углистых частиц горизонты и значения гранулометрического состава – подчеркнуты.

Выделено четыре модели путей вертикальной миграции углистых частиц: барьерная, неравномерно-диффузная, равномерно-диффузная и турбационная (рисунок 78).

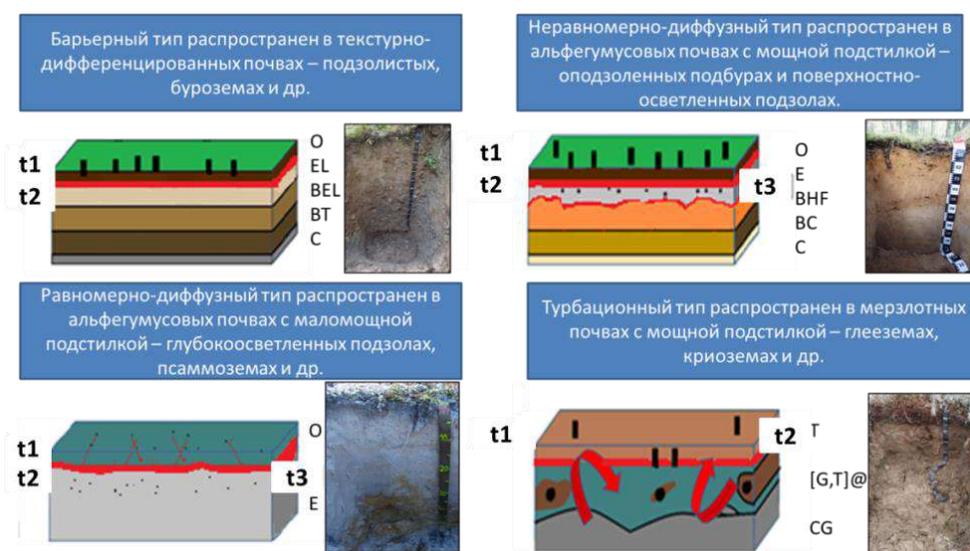
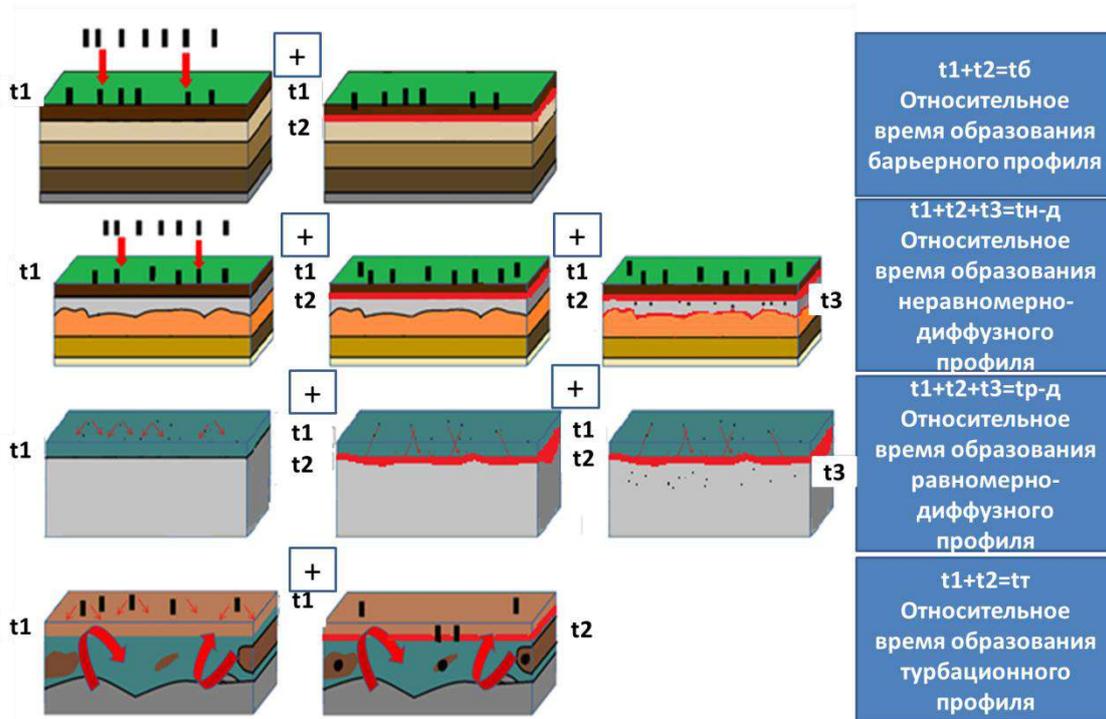


Рисунок 78. Схемы путей миграции углей в разных типах почв boreальных и субарктических областей России. Черные геометрические фигуры – угли. Обозначения “t1, t2, t3” характеризуют стадии проникновения угля в почвенный профиль.

На всех представленных схемах можно условно разделить миграцию углей на стадии (t), где возраст увеличивается в ряду $t_1 < t_2 < t_3$. Длительность стадий будет зависеть от условий среды, параметров растительности и почвы (рисунок 79).



Характерное время этапов:
 t_1 -завершение пожара, попадание углей на почву «0-момент»; $t_2 \approx n \cdot 10^1$ лет; $t_3 \approx n \cdot 10^2$ или $n \cdot 10^3$, в зависимости от гранулометрического состава и внешних условий.

Рисунок 79. Относительное время образования профилей вертикальной миграции углистых частиц для каждой модели. Красная линия – накопление углистых частиц в профиле. Сверху вниз: барьерный (t_6); неравномерно-диффузный ($t_{н-д}$); равномерно-диффузный ($t_{р-д}$) и (крио)турбационный (t_t).

Относительное время стадий вертикальной миграции углистых частиц: t_1 – попадание углей на почву, завершение пожара, начало миграции (0-момент); $t_2 \approx n \cdot 10^1$ лет (восстановление подстилки); $t_3 \approx n \cdot 10^2$ или $n \cdot 10^3$ лет (проникновение в минеральный профиль в зависимости от гранулометрического состава почвы и/или наличия органического или железистого цемента). Эмпирическим путем установлено, что:

- 1) $t_{барьерный} \approx t_{турбационный}$
- 2) $t_{неравномерно-диффузный} > t_{равномерно-диффузный}$
- 3) $t_{неравномерно-диффузный}$ и $t_{равномерно-диффузный} > t_{барьерный}$ и $t_{турбационный}$

Таким образом, полный (глубокий) профиль антракомассы при неравномерно-диффузном распределении углей образуется дольше всего. Причина этого в том, что барьеров на пути углистых частиц здесь два – это горизонт ОН и горизонт Е. Второй максимум накопления углистых частиц при неравномерно-диффузном типе миграции образуется между Е и ВНФ и содержит на порядок меньше углей, чем первый.

Существенным признаком любого из типов миграции является первый максимум углистых частиц – между подстилкой и минеральным горизонтом. Многочисленной практикой ученых разных областей доказано, что наиболее интенсивные процессы физико-химических и биогенных преобразований происходят на разделе сред (для почвы, например, это поверхность пор, агрегатов, включений [Козловский, 2003]). Верхние горизонты почвы, как граница между собственно почвой и атмосферой в экосистеме, испытывает наибольшие преобразовательные процессы. Верхние горизонты большинства почв представлены подстилкой. Из этого следуют что угли, находящиеся в подстилке, в зоне локального максимума, испытывают наибольшее разрушающее воздействие. Это объясняет, почему почвы лесных экосистем имеют, в общем, небольшое количество антракомассы – низкотемпературные угли разлагаются, а более устойчивые формы дожигаются и измельчаются на поверхности.

7.2. Стадии разрушения углистых частиц в почвах

В ходе изучения миграции углистых частиц было замечено, что частицы угля по-разному трансформируются в зависимости от возраста пожара, влажности и гранулометрического состава почв (рисунок 80).

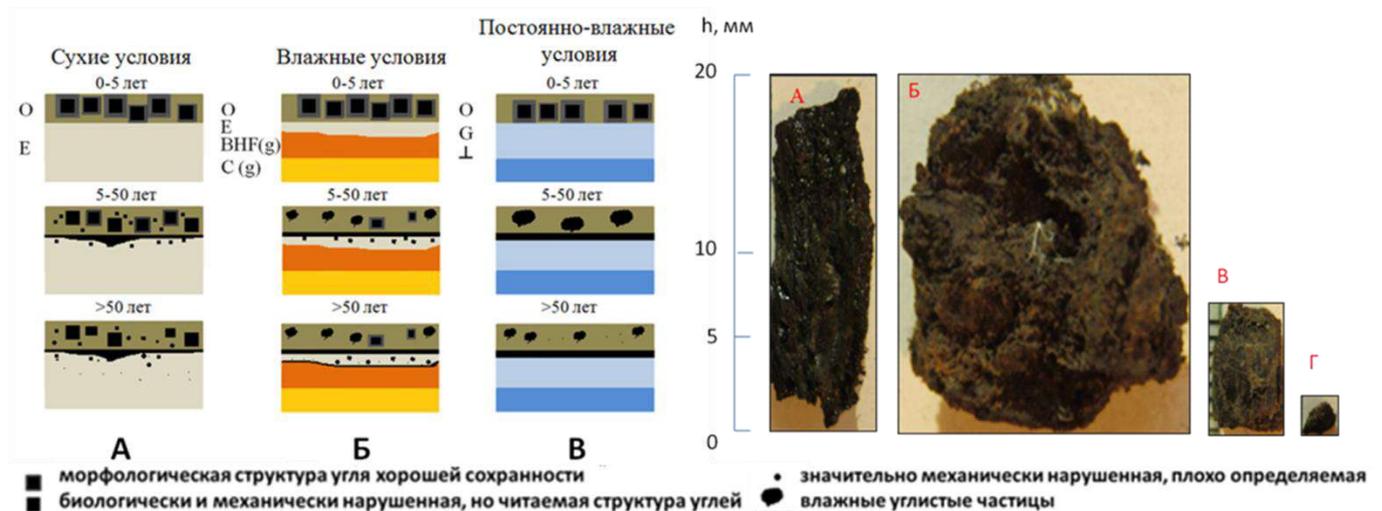


Рисунок 80. Влияние возраста пожара на морфологический облик и глубину проникновения углей. Черная линия показывает участки накопления углистых частиц. С использованием материалов М.В. Бобровского (2010).

Изображение справа:

А – пожар возрастом два года, сухие условия

Б – пожар возрастом 10 лет, влажные условия, криотурбации

В – пожар возрастом 59 лет, сухие условия

Г – пожар возрастом 80-100 лет, влажные условия

Оценивается только древесный уголь.

Повышенная влажность почвы ускоряет потерю углем первоначальной структуры до нескольких лет; гранулометрический состав почвы определяет размер и «окатанность» углистых частиц за десятки лет, если они попали в ВМЧ почв.

Нами предложено выделить три стадии разрушения углей в сухих условиях, на примере рисунка 80 и группу углей, трансформированную во влажных условиях:

1. Квадратом показана морфологическая структура угля, не успевшая претерпеть видимых послепожарных изменений, ее можно считать первой стадией разрушения. Размер угля зависит от сгоревшего растения и параметров пожара.

2. Прямоугольником изображены угли второй стадии разрушения. Такие угли характеризуются маленькой толщиной (около 1 мм) и длинной (<5 мм), прямоугольной формой и рваными краями; в них все еще прослеживается древесная структура.

3. Кружками обозначены угли круглой формы третьей стадии разрушения. Размер в пределах 1-2 мм или меньше, до $n \cdot 10^{-1}$ мм. Без лупы такие угли легко спутать с темноцветными минералами, например роговой обманкой.

4. Черные фигуры неопределённой формы показывают сильно деформированный уголь во влажной среде (рисунок 80 (Б и В)). Уголь в гидроморфных условиях, например, вследствие послепожарного заболачивания, демонстрирует изменение плотности практически сразу после пожара (<1-2 лет). Такой материал необходимо высушить и только затем провести анализ степени разрушения. Уголь, который пролежал в гидроморфных условиях десятки лет, начинает еще больше размягчаться и становится трудно определяемым, торфообразным, при таком долгом нахождении во влажных условиях деградация угля заходит так далеко, что определить степень разрушения становится невозможно.

Есть предположение, основанное на принципах выветривания, что наибольший разрушительный эффект на структуру угля оказывает чередование сухих и влажных условий в подстилке. Углистые частицы могут служить косвенным параметром определения возраста пожара, однако, т. к. разное топливо в ходе горения изначально оставляет морфологически отличающиеся угли или золу, то приблизительный возраст пирогенного события по стадиям разрушения углистых частиц можно предположить, только зная состав допозарной растительности (травянистое, моховое сообщество, присутствуют ли деревья, кустарни(ч)ки) и приблизительные параметры пожаров на данной территории. Отдельно рассмотрены углистые частицы субмикроскопического размера, скрепленные с минеральной частью почвы преимущественно сорбционными механизмами (рисунок 81), такие частицы не обязательно древесного происхождения. Частицы такого типа особенно выделяются в осветленных горизонтах, где обеспечивают равномерную серую прокраску – цвет, который обеспечивается смешиванием углистых частиц с золой. Такую фракцию антракомассы невозможно отделить просеиванием, но возможно центрифугированием (мы использовали 2 тыс. об. 3 мин). Мы предлагаем частицы угля, не связанные или слабосвязанные физическими силами с

минеральной матрицей называть «свободными». Углистые частицы, связанные с минеральной матрицей – «связанными частицами» или «адсорбированными на минеральной матрице». Как дополнительный индикатор степени связи можно использовать сухое просеивание, для отделения свободных частиц. Расчеты показали, что содержание связанных углей от 0,001% до 0,00001 % от остальных фракций антракомассы в почвах – подзолах иллювиально-железистых и псаммоземах. Мы предполагаем, что их малое количество связано с быстрой биогенной, механической и физическо-химической деградацией вследствие их дисперсности и большой удельной поверхности.



Рисунок 81. Морфологические особенности и способность к миграции по профилю углистых частиц разного размера и связанных с минеральной матрицей. Как микрочастицы определены угли <0.5 мм свободные и неразличимые глазом (только в виде прокраски) связанные.

Заключение

Преимущества использования параметров сохранности и путей миграции углей в качестве индикаторов возраста современных пожаров: доступность; наглядность вертикальной миграции; возможна оценка по цвету почв; простота обследования в поле.

Сложности использования углей как индикаторов возраста пожара:

1. Так как первый локальный максимум концентрации углей наблюдается между подстилкой и верхним минеральным горизонтом; он может состоять из смеси продуктов нескольких пожаров.

2. Угли мигрируют не только в вертикальном, но и в латеральном направлении.

3. Разное топливо может оставлять угли разного размера после горения.

4. Структура гари влияет на вертикальную миграцию углистых частиц, т. к. сила пожара влияет на размер углей.

ГЛАВА 8. ПИРОГЕНЕЗ КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ ОБРАЗОВАНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПОЧВ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ

Наиболее сильные пожары способны создавать особые по своей суровости условия для развития постпирогенных почв. Хотя форма проявления этой суровости может быть различной, примеры таких почв были найдены во всех районах исследования.

8.1. Концепция пирогенной экстремальности почв

Свидетельства об аномальном развитии почв после особо сильных пожаров есть в работах многих исследователей; последствия пирогенной экстремальности касаются как морфологического облика почв, так и их физико-химических свойств [Wildland Fire..., 2005; Doerr et al, 2009; Moody and., Martin, 2009; Robichaud, 2009; Ubeda and Outeiro, 2009; Raison et al., 2009; Гынинова и др., 2020].

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]. Классы экстремальности определяются условием, которое негативно влияет на развитие почвы или комплексом одновременно действующих условий – мультифакторной экстремальностью [Горячкин и др. 2019]. Определим место пирогенных почв концепции экстремальности, разработанных С.В. Горячкиным с соавторами [Горячкин и др. 2019; Горячкин, 2022]. Для этого кратко опишем их.

1. Факторная экстремальность – связанная с факторами почвообразования: климатом, рельефом, биотой, типом субстрата, скоростью седиментации, эндогенными процессами, подводным почвообразованием, грунтовыми водами, человеческой деятельностью.

2. Надземная экстремальность – связанная с развитием тонкого почвенного слоя на мелкозем, накапливаемом на деревьях, крышах и др.

3. Супрагляциальная экстремальность – связанная с почвообразованием на мелкозем на поверхности ледников.

4. Режимно-функциональная экстремальность – связанная с формированием в какой-то период (сезон, год) экстремальных для конкретной территории, прежде всего, погодных условий. Как правило, это обусловлено отсутствием или избытком осадков, крайне высокими или крайне низкими для региона температурами и т.д.

5. Хорологическая (внеареальная) экстремальность – связанная с появлением в почвенном покрове почв, которые обычно характерны для других территорий с иным климатом.

6. Возрастная экстремальность – характерна для очень молодых и очень древних почв.

Мы предлагаем относить пирогенные почвы к различным классам экстремальности по условиям временного или постоянного (условно необратимого) угнетения почв после воздействия пожаров, относя к условиям (пост)пирогенной экстремальности как прямое воздействие пожара, например, температурное, так и косвенное, например, послепожарную эрозию. Постпирогенные почвы попадают в несколько предложенных С.В. Горячкиным классов экстремальности, что относит их к «мультиклассовым».

1. Они могут развиваться в условиях режимно-функциональной экстремальности, так как пожары чаще приурочены к году с определенным гидротермическим режимом – сухим и жарким (реже – холодным и сухим) или со временем достижения зрелости растительной сукцессии, одинаковой для вида доминанта в автосукцессиях [Simard, 1991; Talon, 2005; Talon et al., 2010; Doerr and Satin, 2016; Kupriyanov and Novenko, 2019; Куприянов и Новенко, 2019; Дымов, 2020; Gaboriau et al., 2022]. Следовательно, этот тип экстремальности может зависеть от пирогенного фона и многовековых климатических циклов. Требуется условия, когда количество ЛГМ станет избыточным в засушливых погодных условиях – в еловых лесах, где пирогенный паттерн накопление биомассы может идти 100-400 л. в сосняках лишайниковых – 10-20 л.

2. Поскольку постпирогенные почвы могут формироваться как на эродированных седиментах, с остаточными признаками почв, так и на экспонированной породе – постпирогенные почвы также соответствуют возрастной экстремальности.

3. В случае уничтожения органического горизонта на бедных почвах (например, подзолах) или с близким залеганием плотных пород, условия почвообразования соответствуют подклассу лито-экстремальности, класса факторной экстремальности, связанной с бедностью и/или неблагоприятными физическими условиями субстрата

4. (Пост)пирогенные почвы могут также соответствовать нескольким подклассам факторной экстремальности, таким как: топоэкстремальность – пожары обостряют влияние рельефа на развитие почв через эрозию; экстремальность, связанная с седиментогенезом, например для почв в зоне выраженной послепожарной эрозии – пироциклоземов. В некоторых случаях пирогенная экстремальность связана с неосторожной деятельностью человека, например, ошибками в пожарном менеджменте. При одновременном наличии

нескольких факторов постпирогенные почвы могут считаться мультифакторными класса факторной экстремальности.

Возможен и другой подход к определению пирогенной экстремальности. При масштабных исследованиях и картировании почвенного покрова может быть удобнее отнесение пирогенно-экстремальных почв к единому классу катастрофической экстремальности, наряду с почвами после наводнений, извержений вулканов и других катастроф [Гольева, Бондарева, 2017].

8.2. Пирогенно-уязвимые и пирогенно-устойчивые почвенно-растительные системы

На облик почвы и формирование новой экосистемы после пожаров влияют допожарные фации растительного покрова, как источник ЛГМ. Положение почвы в классификации [КиДПР, 2004] до пожара может служить косвенной основой для прогноза последствий пирогенного события – в полном названии почвы есть указания на водный режим почв, характер и мощность напочвенного покрова (на уровнях типа, подтипа и вида), гранулометрический состав (разновидность), степень развития профиля и тип почвообразующих пород (разряд). Зная приблизительную силу пожаров в регионе, мы можем предположить степень изменения почвы.

Песчаные постпирогенные почвы средней, северной тайги и тундры уязвимы к эрозии по сочетанию причин – рыхлому характеру минеральных горизонтов, отсутствию явной агрегированности и, местами, развитию и устойчивости во времени наиболее «пионерного» тонкого лишайникового напочвенного покрова (например, *Cladonia rangiferina* L. и *C. stellaris* L.). В случае уничтожения подстилочных горизонтов такие почвы подвержены водной и ветровой эрозии. В зоне их распространения после пожаров можно наблюдать размывы и раздувы, может диагностироваться эрозия почвы до породы. Вывалы древесной растительности значительно ускоряют эрозию песчаных почв и, таким образом, увеличивают пространственную неоднородность гари. Обычно материал с комля осыпается постепенно и воронки вывала зарастают дольше, чем основная территория гари. Гибель деревьев меняет водный режим почв, что ведет к еще большей уязвимости песчаных почв после пожаров. На основании этих свойств, предложено считать сосновые, реже еловые лишайниково-зеленомошные сообщества на песчаных и супесчано-песчаных почвах: псаммоземах, подзолах и подбурах типичного подтипа, пирогенно-уязвимыми в случае пожаров любой силы.

Эрозия суглинистых и глинистых почв средней и северной тайги происходит только при сильных пирогенных событиях, когда скорость потоков воды достигает критических величин относительно частиц почвы при линейной эрозии, или если территория гари захватывает крутые склоны элементов рельефа. В этом случае могут формироваться сели и оползни разного масштаба, а также существенно повреждается растительный покров (намывы и смывы, «пьяный лес»). Если рельеф гари пологоволнистый, то объемы эрозии суглинистых почв незначительны, полного смыва верхних минеральных горизонтов не наблюдается, как и условий пирогенной экстремальности. Моховой напочвенный покров суглинистых почв: зеленые мхи, кукушки лен, сфагнум и др. может после пожара слабой и средней интенсивности увеличить свою мощность вследствие послепожарного заболачивания. Проективное покрытие кустарничков также может увеличиться вследствие активизации вегетативного размножения после пожара и реализации почвенного банка семян. Вывалы зачастую редкие, но постоянны в рельефе и могут долго диагностироваться визуально как воронки вывалов. Материал с комля может переноситься ветром после высыхания (пылеватая фракция), но, в основном, осыпается на поверхность почвы. Предложено считать еловые, пихтовые, лиственничные и лиственные сообщества, как моховые, так и разнотравные, на суглинистых и глинистых почвах, таких как пелоземы, подзолистые и буроземы – пирогенно-устойчивыми к пожарам слабой и средней силы.

Суглинистые и глинистые почвы с близким развитием ММП исследованных территорий тундры и лесотундры в малой степени подвержены эрозии, однако нарушаются мерзлотными процессами. На крутых склонах увеличивается вероятность селей вследствие тиксотропности горизонтов G и большой влажности профиля. По причине слаборазвитого растительного покрова нередко наблюдается экспонирование минеральной части почвы, медленно зарастающей коркой из черных лишайников и водорослей, после чего развивается типичный лишайниковый покров (кустистые лишайники – *Cladonia alpestris* L. и др.). Пожары увеличивают глубину залегания ММП и угнетающе влияют на допожарный растительный покров – могут вызвать залесение тундровых участков видами сосны, кедровой сосны и ели вследствие отступления ММП, вызывать термокарстовые процессы, педотурбации и т. д. Повреждение подстилки нарушает температурный режим почв, так как термоизолирующий слой нарушается после пожара [Каверин, 2022]. В некоторых случаях этот процесс оказывается условно-необратимым и меняет все функционирование экосистемы [Каверин, 2022]. Вывалы незначительны, по причине слабого развития древесной растительности – их глубина ограничена мощностью сезонно-талого слоя. На основании этих свойств предложено считать редколесные (межкronовый промежуток >15-20 м) и кустарни(ч)ковые

сообщества на тундрово-глеевых почвах: криоземы, глееземы и их криометаморфические подтипы, пирогенно-уязвимыми в случае изменения уровня ММП, т. е. обычно, к пожарам средней силы. Отдельными факторами, оказывающим негативное влияние на тундровые экосистемы является немедленное увеличение потоков CO_2 и CH_4 вследствие расконсервации запасов углерода, а также перманентное заболачивание отдельных территорий, что ведет к постепенному увеличению потоков метана.

Торфяные и оторфованные почвы обычно подвергаются пирогенным повреждениям в верхней части профиля – обугливаю подстилки и подсушинам на стволах деревьев. Такие признаки могут свидетельствовать о том, что экосистема выступила барьером (зоной границы) на пути распространения пожара. Прогорание оторфованного слоя целиком или проседание торфяной залежи – достаточно редкое явление, которое может быть связано с подземным пожаром. Эрозия таких почв после подземного пожара проявляется в просадках на территории их распространения, ведет к криотурбациям в зоне распространения ММП. Вывалы не имеют значительного влияния на почвы, так как корневая система обычно угнетена и расположена близко к поверхности вследствие высокой влажности и/или близкого залегания ММП. Предложено считать болотные сообщества (сфагновые, пушицевые, вахтовые и др.) на оторфованных и органогенных почвах пирогенно-устойчивыми в случае низовых пожаров любой силы и пирогенно-уязвимыми в случае подземных пожаров.

Степень уязвимости исследованных почв к послепожарной эрозии и турбациям (от высокой к незначительной):

Псаммоземы и маломощные подзолы > глееземы > подзолистые почвы и буроземы > торфяно-глееземы и торфяно-подзолисто-глеевые.

8.3. Пирогенные трансформации почвенного покрова

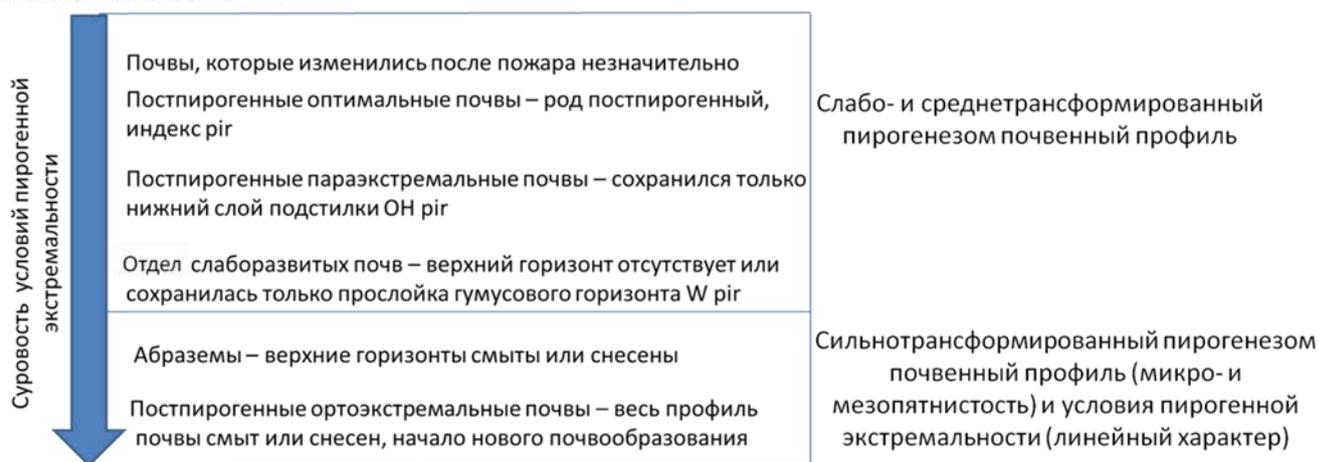
Отображение в почвенной классификации КиДПР 2004 г.

Разберем трансформацию и деградацию почвенного покрова после прохождения катастрофических по силе и интенсивности пожаров или пожаров в уязвимых экосистемах. На верхних иерархических уровнях почвенной классификации может произойти переход почвы из постлитогенного в ствол первичного почвообразования (например, для почв, вынужденных развиваться с 0-момента на осадках после переотложения). На уровне подтипа возможно распространение выделенного для многих типов поверхностно-турбированного и криотурбированного, оглеенного и торфяного (после послепожарного заболачивания), потечно-гумусового, и стратифицированного подтипов. Изменения на уровне

рода могут быть связаны с миграцией золы в минеральные горизонты – «насыщенный» род, а также на основании присвоения рода «постпирогенный» после диагностирования большого объема углистого материала (род «постпирогенный» может появиться в новом издании КиДПР). На уровне вида пожары могут менять мощность и видовой состав торфяного горизонта, положение оподзоливания и оглеения в профиле. На уровне разновидности пожары могут изменять глубину актуального почвенного профиля после послепожарной эрозии. Температурное воздействие, в зависимости от продолжительности и интенсивности, может утяжелять или разрыхлять сложение отдельных горизонтов вследствие прямого спекания или разрушения органического вещества и минералов или косвенно, через изменение водного режима (оглеение). На уровне разряда пирогенная активность может приводить к тому, что актуальный почвенный профиль развивается непосредственно на палеопочве или породе (*in situ*, в отличие от первого пункта).

Показанный масштаб влияния пожара на почвы доказывает, что пирогенное событие, в определенных условиях, может полностью менять классификационное положение почв. Для постпирогенной экстремальности, которая выражается как повреждение подстилки до состояния ОН или до горизонта W (до 2 см) на бедных почвах, т. е. доводит их до состояния псаммоземов, мы, в соответствии с концепцией экстремальности почв [Горячкин и др., 2019; Горячкин, 2022] вводим термин «постпирогенная параэкстремальность». Для постпирогенной экстремальности с экспонированием породы после послепожарной эрозии мы вводим термин «постпирогенная ортоэкстремальность» (рисунок 82).

Слабая степень



Сильная степень

Рисунок 82. Положение пирогенно-экстремальных почв в КиДПР, 2004 г.

Результаты исследований актуальной и палеопирогенной экстремальности

Экстремальность часто носит характер очаговости на территории гари (чаще именно гари, а не горельника) – почвенный покров вне очага может оставаться оптимальным или

слабоповрежденным после пожара. В случае микро- и мезоочаговости мы предлагаем относить поврежденный почвенный профиль к сильнотрансформированным пирогенезом, а в случае линейной эрозии почвы – пирогенно-экстремальным (т. е. на основе площади повреждений) (рисунок 83).



Рисунок 83. Пример ортоэкстремальных и параэкстремальных почв гарей.

Особенность пирогенной экстремальности в том, что поврежденная почва находится в соседстве с оптимальными почвами и неповрежденной растительностью в рефугиумах (оврагах, логах, болотах), что ускоряет ее восстановление, особенно, если характер повреждений очаговый. Опад растительности соседней экосистемы частично защищает почвы от полной эрозии [Thomas, 1991; Lloret and Zelder, 2009; Doerr and Satin, 2016]. По этой причине пирогенная экстремальность динамична и изменчива в пространственном и временном отношении – во время разных пожаров почвы одной и той же гари может быть в ортоэкстремальных, параэкстремальных и оптимальных условиях. Мы можем, опираясь на литературные и эмпирические данные, назвать характерные времена восстановления почв после условий пирогенной экстремальности (рисунок 84).



Рисунок 84. Характерное время восстановления почв после наступления условий пирогенной экстремальности. Мысленный эксперимент – рассматривается влияние одного пожара, хотя в природе он бы повторился.

Условия пирогенной экстремальности почв широко распространены на территории Европейского и Западно-Сибирского севера России; почвы в пирогенно-уязвимых экосистемах после прохождения пожаров не могут в полной мере выполнять свои экосистемные функции – это существенный признак пирогенной экстремальности. Голоценовая пирогенная экстремальность читается в почвенном профиле как последовательность погребенных почв с разными стадиями развития профилей. Процесс накопления седиментов с выраженными в разной степени процессами почвообразования в зонах аккумуляции (например, воронках, оврагах и др.) без формирования полноценного почвенного профиля может, наряду с пирогенными морфонами, свидетельствовать о голоценовой пирогенной экстремальности. Такой тип отложений можно определить как пирогенное-синлитогенное почвообразование (по аналогии с синпедолитогенезом по С.А. Сычевой (2008)). Пирогенное-синлитогенное почвообразование, при наличии пирогенных горизонтов и углистых морфонов – признак древних пирогенно-экстремальных событий. Подразумевается, что из седиментов, которые мы наблюдаем в профиле архива, после их отложения, формировались почвы, или выполняющие их функции образования, в условиях возрастной и факторной экстремальности (рисунок 84). Наоборот, если почва в палео профиле демонстрирует нормальное развитие (полный профиль), то можно предположить, что в период развития этой почвы интенсивных пожаров не было.

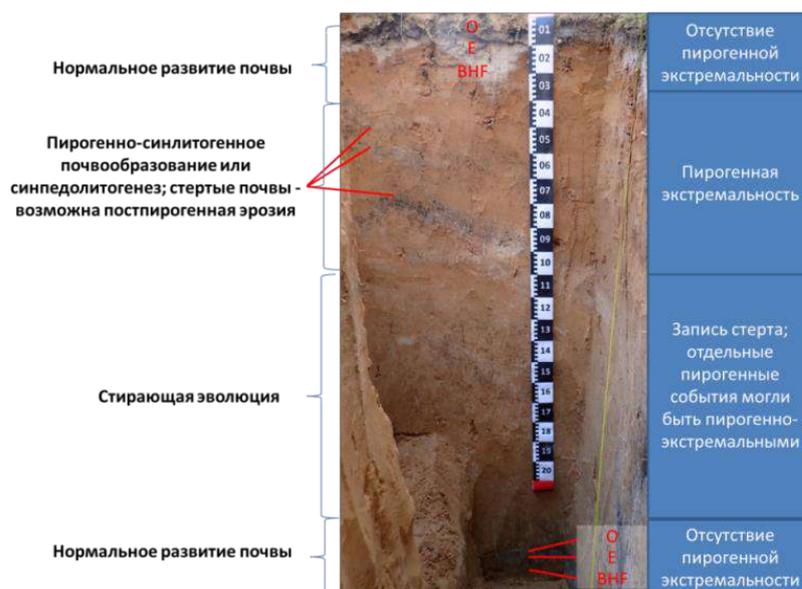


Рисунок 84. Запись голоценовой истории пожаров в профиле палеопочвы.

Заключение

Результаты наших исследований показали, что вне зависимости от расположения объектов исследования (подзоны ЕТР или подзоны СЗС) во всех подзонах наблюдаются орто- и параэкстремальные почвы, раздувы и размывы после пожаров. Следовательно, воздействие

пожара на почвы, пирогенная экстремальность и скорость постпирогенной эрозии для севера России больше зависят не от климатической зоны, а от гранулометрического состава почв, рельефа и характера растительной сукцессии.

ГЛАВА 9. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО КЛАССИФИКАЦИИ ПИРОГЕННЫХ ПОЧВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ИХ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОЖАРОМ

Сложность выделения пирогенных таксонов состоит в отсутствии единой точки зрения на оценку влияния пожаров в изменение почвенного функционирования. До недавнего времени влияние пожаров на почвы недооценивалось, что отражалось в игнорировании в классификациях процессов пирогенной трансформации и взаимодействий почвенного тела с продуктами пожаров. Между тем, все результаты, собранные в нашей работе, говорят о значительном, иногда необратимом влиянии пожаров на направление почвообразования. Ю. Н. Краснощеков [Краснощеков, 2011; Краснощеков, Чередникова, 2012], А. П. Чевычелов (2018), А. А. Дымов (2020) и Е. Ю. Чебыкина с соавторами (2021, 2022) в своих работах отмечают, что постпирогенные почвы нашли слабое отражение в современных классификациях, несмотря на значительную роль пожаров в их развитии. Ю. Н. Краснощеков говорил об изменении мощности верхних горизонтов в результате пирогенеза. А. П. Чевычелов ввел понятия «пироциклоземов» (см гл 4). А. А. Дымов выделяет поверхностные и полнопрофильные изменения постпирогенных почв по типу воздействия в зависимости от силы пожара; в случае очаговых гарей А. А. Дымов также выделяет образование полугидроморфных почв. Большим шагом к пониманию роли пирогенеза в развитии почв стало появление в новом издании WRB (2022) вспомогательного квалификатора Rугic: слой или слои ≥ 10 см занимающие не менее чем 5% прокрашенной продуктами пожара площади профиля в пределах 100 см толщи. В новом издании КиДПР также планируется включить род «постпирогенный» в почвенную таксономию, с отдельными характеристиками для минеральных горизонтов (в прошлом издании признак указывался только для торфяных): наличие угольков в верхних горизонтах и темных прослоев мощностью 2-5 см и органогенных почв: наличие прослойки желто-охристой золы мощностью 0,5-1,0 см.

По нашему мнению, классификационное выделение пирогенных почв должно строиться на двух основных принципах: возможности нетрудоемкого полевого определения и адекватного отражения степени трансформации почвы пожаром. Из нашей работы, следует, что существует три степени трансформации постлигитогенной почвы пожаром (рисунок 86).

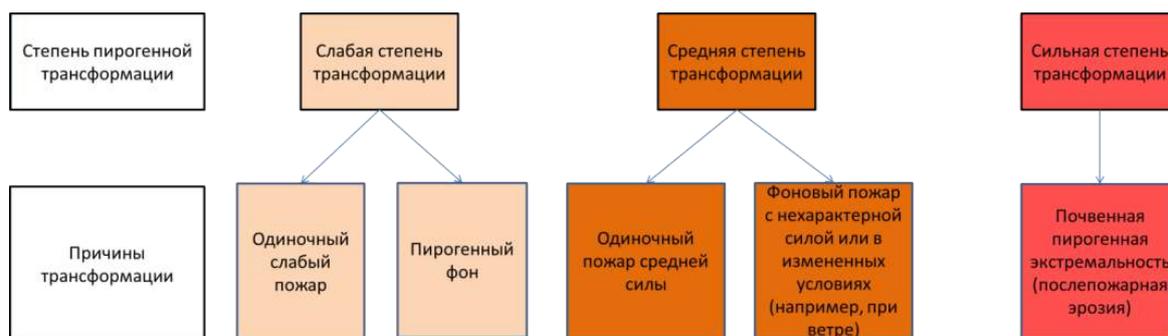


Рисунок 86. Степень и причины пирогенной трансформации почв севера ЕТР и СЗС.

Слабая степень трансформации почв подразумевает неполное прогорание подстилки. При этом морфология минеральной части профиля не меняется, но возможны включения угля между подстилкой и минеральным горизонтом и морфоны, оставленные прогоревшими корнями. Может повыситься актуальная кислотность, насыщенность основаниями и содержание $C_{орг}$ в верхнем минеральном горизонте. Слабая степень пирогенной трансформации часто встречается в зоне границы неоднородных гарей и на горельниках. Средняя степень трансформации почв подразумевает неоднородное повреждение пожаром напочвенного покрова, местами до полного прогорания подстилки, частое наличие вывалов деревьев (если они присутствовали). В минеральном почвенном профиле диагностируется поверхностная турбация, выраженная в морфонах вывалов, заполненных углем, углистых линзах и прослоях (глава 5); диагностируемые морфоны должны относиться к конкретному изучаемому пожару. Может повыситься содержание несиликатного железа и значительно уменьшится, до пределов обнаружения, содержание $N_{общ}$ в верхних минеральных горизонтах. Средняя степень пирогенной трансформации часто встречается в зоне периферии и очага неоднородной гари или в очаге горельника. Сильная степень трансформации почв сопровождается послепожарной эрозией и ведет к потере всего органогенного и части верхнего минерального горизонта. Со временем возможна полная деградация (снос) почвы. От условий пирогенной экстремальности отличается микро- и мезопятнистым характером и более благоприятными внешними факторами (отсутствие склонов, дождя после пожаров, наличие вокруг неповрежденной экосистемы). Сильная степень пирогенной трансформации часто встречается в зоне очага гари, редко встречается в горельниках безособых внешних условий (склон, маломощные почвы и др.). Химические свойства могут полностью измениться после почвенной эрозии. Степень пирогенной трансформации больше зависит от сочетания внешних факторов и параметров пожара, чем от абсолютного выражения его параметров, т. е. силы, интенсивности и устойчивости.

При анализе пирогенных почв исследователь сначала обращает внимание на морфологию почвенного профиля, в том числе, его цветность (рисунок 87, пункт 1). Источник поступления продуктов пожара в почву, т.е. допожарная растительность может не рассматриваться, между тем, некоторые растения оставляют после сгорания продукты, хорошо прокрашивающие почвенный профиль (золу и сажу), другие склонны к неполному горению и образованию крупных углей. Таким образом, оценка степени трансформации почвенных свойств пожаром должна производиться при имеющейся информации о типе допожарной растительной сукцессии (рисунок 87, пункт 2). Наиболее полное исследование подразумевает лабораторный этап, что также отражено на схеме (рисунок 87, пункт 3). Для получения обоснованного вывода о степени трансформации почв пожаром следует пройти хотя бы первые два пункта предложенного алгоритма.



Рисунок 87. Алгоритм исследования степени трансформации почв пожаром.

Может наблюдаться обратная зависимость между степенью трансформации почв пожаром и мощностью прокрашенных горизонтов. В сильно-трансформированных почвах верхние горизонты могут быть эродированы, в результате чего прокраска профиля продуктами пожара не будет наблюдаться. В этом случае исследователь должен заложить разрезы не только на повышениях, но и в депрессиях местности, куда переместился почвенный и пирогенный материал. Мы предлагаем выделять несколько уровней при пространственной классификации пирогенных почв. При возможности следует определить характер пожара – однородный или неоднородный, так как этот параметр напрямую влияет на степень трансформации почв гари. Следующий шаг, – определение в какой почвенно-растительной экосистеме прошел пожар – пирогенно-уязвимой или пирогенно-устойчивой. Если пожар прошел в пирогенно-уязвимой экосистеме, то продукты пожара могут быть переотложены процессами послепожарной эрозии. Мы предлагаем использовать

подход WRB (цветность), предложенный для выделения субквалификатора Rугis для присвоения рода «постпирогенный» для слабо- и среднетрансформированных почв, поскольку он отражает тот факт, что не всякая почва, которая испытала воздействие пожара, существенно изменяет свои свойства, но, кроме этого, учитывать несколько важнейших характеристик пожара, отражающих его пространственную неоднородность (рисунок 88). Анализ неоднородности гари (ее структуры) по силе пожара и допожарной растительности поможет разработать более эффективную стратегию отбора полевого материала еще до начала полевой работы. Однородный пожар имеет преимущественно одну зону, неоднородный несколько зон, очаговый включает несколько элементарных зон, иногда разделенных рельефом. Современные технологии, такие как ДЗЗ, могут помочь определению изменений допожарной и послепожарной растительности. Это, в свою очередь, поможет спланировать пожарный менеджмент, необходимость восстановления экосистемы, спрогнозировать время следующего пожара и даже определить степень его пространственной неоднородности.

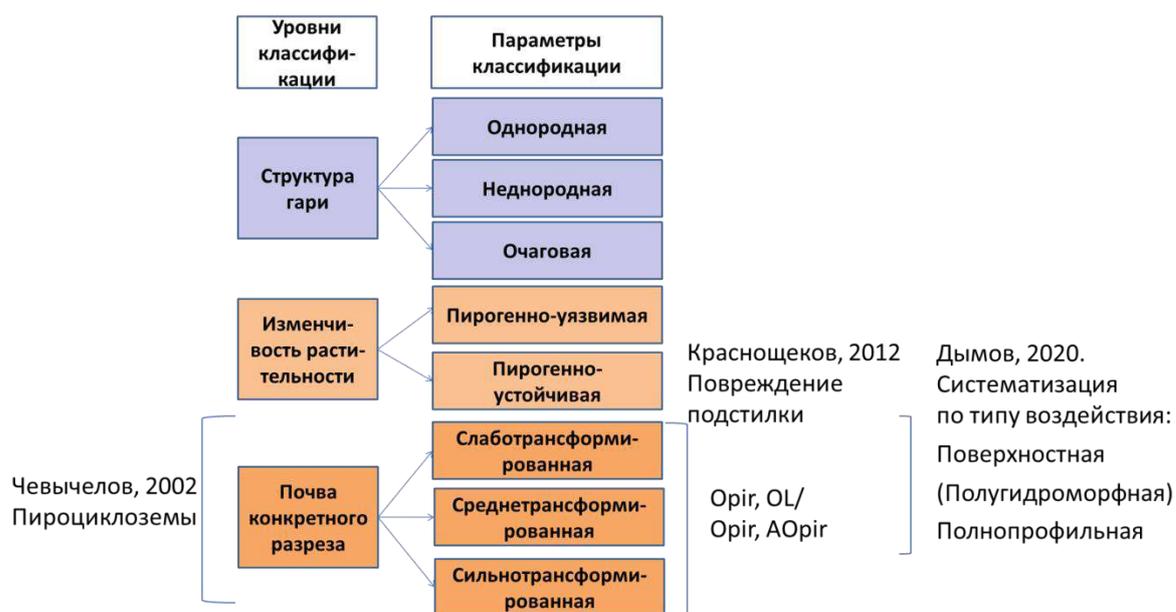


Рисунок 88. Структура пространственной неоднородности пожара; сравнение классификации почв с работами других исследователей.

Определение почвы конкретного разреза включает анализ ее пирогенной трансформации. Если почвы определены по всем зонам пожара – это повышает возможность их экстраполяции на территорию гари (по зонам). Например, можно назвать почвы Горельника 2017 г. в зоне очага пожара (глава 5): среднетрансформированная в пирогенно-уязвимой экосистеме – сосняке лишайниковом, сохранившемся после пожара; на неоднородной гари с обрезанной границей – зона очага и зона периферии выражены хорошо. Почвы гари 2015 г.: сильнотрансформированная в пирогенно-уязвимой экосистеме – сосняке

лишайниковом с участками зеленомошника, сменившаяся на пирогенно устойчивую – осинник разнотравный; на однородной гари. Почвы гари 2004 г. в зоне очагов пожара: сильнотрансформированная определение допожарной растительности затруднено, послепожарная растительность пирогенно-устойчивая – осинник-березняк разнотравный; на очаговой гари. Если данных для пространственного анализа и степени трансформации почвенного покрова недостаточно, то предлагается применять к почве род «постпирогенный».

ВЫВОДЫ

1. По данным радиоуглеродного датирования максимальный возраст продуктов пирогенеза в погребенных почвах ледниково-карстовых ландшафтов севера ЕТР составил 10260 ± 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 ± 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 ± 140 ppm; склоны карстовых воронок – 12330 ± 2870 ppm; центр воронки – 110000 ± 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 ± 29 °C; средний – 773 ± 48 °C; сильный или зона очага – 788 ± 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 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровский, А. Л. Этапы и скорость развития почв в поймах рек центра Русской равнины / А. Л. Александровский // Почвоведение. – 2004. – № 11. – С. 1285-1295. – ISSN 0032-180X.
2. Александровский, А.Л. Эволюция почв и географическая среда / А. Л. Александровский, Е. И. Александровская. – М. : Наука, 2005. –223 с. – ISBN 5-02-033947-4.
3. Александровский, А. Л. Пирогенное карбонатообразование: результаты почвенно-археологических исследований / А. Л. Александровский // Почвоведение. – 2007. – № 5. – С. 517-524. – ISSN: 0032-180X.
4. Александровский, А. Л. Запись природной среды в почвах голоцена / А. А. Александровский // Почва как память биосферно-геосферно-антропоферных взаимодействий : монография ; отв. ред. В. О. Таргульян, С. В. Горячкин / Российская академия наук, И-т географии. – М. : Изд-во. ЛКИ, 2008 – С. 75-105. – ISBN 978-5-382-00704-5.
5. Антракологический и морфологический анализ старопахотных и антропогенных почв ландшафтов моренно-водноледниковых равнин Верхневолжья (Пеновский район Тверской области) / Д. А. Куприянов, А. Л. Смирнов, Л. Г. Ханина, М. В. Бобровский // Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове : Сб. материалов VII Международной науч. конф., посвящ. 90-летию каф. почвоведения и экологии почв ТГУ, Томск 14–19 сентября 2020 года. – Томск: Изд. Дом Томского гос. ун-та, 2020. – С. 183-186.
6. Арефьева, З. Н. Динамика аммиачного и нитратного азота в лесных почвах Зауралья при высоких и низких температурах / З. Н. Арефьева, Б. П. Колесников // Почвоведение – 1964. – №3. – С. 30-35.
7. Аринушкина, Е. В. Руководство по химическому анализу почв : руководство / Е. В. Аринушкина – 2-е изд., перераб. и доп.; Мин. выс. и среднего спец. обр. СССР ; отв. ред. А. И. Бусев – М. : Изд-во МГУ, 1970 – 488 с.
8. Атлас почв Республики Коми / Под ред. Г. В. Добровольского, А. И. Таскаева, И. В. Забоевой. – Сыктывкар : ООО «Коми республиканская типография», 2010. – 356 с. – ISBN 978-5-7934-0315-3.
9. Ащепкова, А. А. Отложения болот и пещер Пинежского карстового массива (Архангельская область) как индикатор изменений природной среды в плейстоцене-

- голоцене / А. А. Ащепкова, А. А. Семиколенных // Спелеология и Спелестология: сб. материалов конф.. – 2014. – №5.– С. 92-98.
10. Бобровский, М. В. Лесные почвы Европейской России: биотические и антропогенные факторы формирования / М. В. Бобровский. – М. : КМК, 2010. – 359 с. – ISBN 978-5-87317-733-2.
 11. Васенев, И. И. Ветровал и таежное почвообразование. Режимы, процессы, морфогенез почвенных сукцессий / И. И. Васенев, В. О. Таргульян // Российская академия наук, Ин-т Географии ; отв. ред. Н. А. Караваева – М.: Наука, 1995. – 247 с. – ISBN 5020039012
 12. Вернадский, В. И. Живое вещество / [Предисл. К. П. Флоренского] В. И. Вернадский; редкол. Т. В. Дроздова, Б. М. Кедров, В. М. Кутюрин и [др.]. ; составители В. С. Неаполитанская, Н. В. Филиппова – М. : Наука, 1978. – 358 с.
 13. Вихров, В. Е. Диагностические признаки древесины главнейших лесохозяйственных и лесопромышленных пород СССР : учеб. пособие / В. Е. Вихров ; Акад. наук СССР. Ин-т леса. – М. : Изд-во. Акад. наук СССР, 1959 – 132 с.
 14. Влияние лесных пожаров на свойства почв (обзор литературы) = Impact of forest fire on soil properties (review)/ А. А. Дымов, Е. В. Абакумов, И. Н. Безкоровайная [и др.] // Теоретическая и прикладная экология ; отв. ред. Т. Я. Ашихмина.–2018. – № 4 – С. 13-23 DOI 10.25750/1995-4301-2018-4-013-023
 15. Влияние пожаров на свойства почв национального парка «Земля леопарда» (Приморский край) / В. М. Пискарева, Т. С. Кошовский, Е. А. Бисикалова [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5: География. –2019ю – № 3. – С. 11-24.
 16. Влияние пожаров на состав органического вещества торфяников средней тайги республики Коми / Н. М. Горбач, В. В. Старцев, И. Н. Кутявин [и др.] // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее : Материалы Шестого Международного полевого симп., Ханты-Мансийск, 28 июня – 08 июля 2021 года. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2021. – С. 116-118.
 17. Водяницкий, Ю.Н. Минералы железа как память почвенных процессов / Ю. Н. Водяницкий // Почва как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий : монография; отв. ред. В. О. Таргульян, С. В. Горячкин / Российская академия наук, Ин-т географии. – М. : Изд-во. ЛКИ, 2008. – С. 289-309. – ISBN 978-5-382-00704-5.
 18. Воздействие лесных пожаров на состав и распределение ПАУ в почвах Южного Прибайкалья / Т. С. Кошовский, В. М. Пискарева, Т. Е. Язрикова, Н. С. Гамова // Почвенные ресурсы Сибири: вызовы XXI века : Сб. материалов Всероссийской научной конф. с международным уч., посв. 110-летию первого дир. ИПА СО РАН Р. В. Ковалева,

- Новосибирск, 04–08 декабря 2017 года / Отв. ред. А. И. Сысо Т. Ч. II. – Новосибирск : Изд. дом Томского ун-та, 2017. – С. 58-62. – DOI 10.17223/9785946216463/13.
19. Воробьева, Л. А. Химический анализ почв : Учебник / Л. А. Воробьева – М. : Изд-во МГУ, 1998. – 272 с. – ISBN 5-211-03973-4.
 20. Геннадиев, А. Н. Факторы и особенности накопления пирогенных полициклических ароматических углеводородов в почвах заповедных и антропогенно измененных территорий / А. Н. Геннадиев, А. С. Цибарт // Почвоведение. – 2013. – № 1. – С. 32-40. – DOI: 10.7868/S0032180X13010024.
 21. Геоботаническая карта Пинежского заповедника. М 1:25000 / гл. ред. Д. Н. Сабуров. – Фонды гос. природного запов. «Пинежский», 1988. – 1 л.
 22. Герасимов, И. П. Ледниковый период на территории СССР / И. П. Герасимов, К. К. Марков. – Москва-Ленинград : АН СССР, 1939. – 462 с.
 23. Герасимова, М. И. «Короткая память» дерново-подзолистых почв в лесовосстановительных сукцессиях / М. И. Герасимова, Л. Б. Исаченкова // Почва как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий : монография; отв. ред. В. О. Таргульян, С. В. Горячкин / Российская академия наук, Ин-т географии. – М. : Изд-во. ЛКИ, 2008. – С. 638-649. – ISBN 978-5-382-00704-5.
 24. Глазовская, М. А. Денудационно-аккумулятивные структуры почвенного покрова как формы проявления педолитогенеза / М. А. Глазовская // Почвоведение. – № 2 – 2000. – С. 134-147.
 25. Глазовская, М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов / М. А. Глазовская. – Смоленск : Ойкумена, 2002. – 286 с. – ISBN 5-93520-013-9.
 26. Глазовская, М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов : (ландшафтно-геохимические процессы) : учебное пособие для студентов, обучающихся по специальностям 020401 – География и 020804 – Геоэкология / М. А. Глазовская ; Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – Москва : Геогр. фак. МГУ, 2007. – 350 с. – ISBN 5-85941-225-8.
 27. Гольева, А. А. Микробиоморфная память почв / А. А. Гольева // Почва как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий : монография ; отв. ред. В. О. Таргульян, С. В. Горячкин / Ин-т географии РАН. – М. : Изд-во. ЛКИ, 2008. – С. 500-509. – ISBN 978-5-382-00704-5.
 28. Гольева, А. А. Почвы археологических памятников в лесной зоне как почвы катастроф / А. А. Гольева, Ю. А. Бондарева // Лесоведение. – 2017. – № 3. – С. 205-211. – ISSN 0024-1148

29. Горбунова, А. Ю. География и структура сообществ почвенных беспозвоночных после пожаров в лесах Европейской России : дис ... канд. географ. наук : 25.00.23 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов / Горбунова Анастасия Юрьевна ; МГУ им. М. В. Ломоносова. – Москва, 2022. – 187 с.
30. Горячкин, С. В. Генезис, эволюция и динамика почвенно-геоморфологических систем карстовых ландшафтов европейского севера / С. В. Горячкин, Е. В. Шаврина // Почвоведение. – 1997. – № 10. – С. 1173-1185. – ISSN 0032-180X.
31. Горячкин, С. В. Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция) / С. В. Горячкин. – Москва: ООО «Изд-во ГЕОС», 2010. – 414 с. – ISBN 978-5-89118-508-1.
32. Горячкин, С. В. Генезис и география почв экстремальных условий: элементы теории и методические подходы / С. В. Горячкин, Н. С. Мергелов, В. О. Таргульян // Почвоведение. – 2019. – № 1. – С. 5-19 – DOI 10.1134/S0032180X19010040.
33. Горячкин, С. В. География экстремальных почв и почвоподобных систем / С. В. Горячкин // Вестник Российской академии наук. – 2022. – Т. 92, № 6. – С. 564-571. – DOI 10.31857/S0869587322060056.
34. Грачева, Р. Г. Запись природной среды в гидроморфных почвах / Р. Г. Грачева // Почва как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий : монография ; отв. ред. В. О. Таргульян, С. В. Горячкин / Российская академия наук, Ин-т географии.– М. : Изд-во. ЛКИ, 2008. – С. 106-127. – ISBN 978-5-382-00704-5.
35. Громцев, А. Н. Основы ландшафтной экологии европейских таежных лесов России / А. Н. Громцев ; РАН, Карельский научный центр, Ин-т леса. – Петрозаводск : Карельский науч. центр РАН, 2008. – 238 с. – ISBN 978-5-9274-0372-1.
36. Губенко, И. М. Сравнительный анализ методов расчета индексов пожарной опасности / И. М. Губенко, К. Г. Рубенштейн // Труды Гидрометеорологического науч.-исслед. центра Российской Федерации. – 2012. – № 347. – С. 207-222. ISSN 0371-7089.
37. Дезинтеграционно-метаморфические горизонты и признаки в почвах на плотных карбонатных и гипсовых породах в различных условиях криогенеза / С. В. Горячкин, И. А. Спиридонова, Д. Е. Конюшков // Криогенные ресурсы полярных регионов : международная конф., июнь 2007 г. : материалы. – [Салехард], С. 67-70.
38. Динамика ландшафтов и климата на Северо-Западе Среднерусской возвышенности в голоцене / Е. Ю. Новенко, А. Н. Цыганов, Е. М. Волкова [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2014. – № 6. – С.24-31.

39. Динамика пожаров на Северо-Востоке европейской части России в голоцене / Н. М. Горбач, И. Н. Кутявин, В. В. Старцев, А. А. Дымов // Теоретическая и прикладная экология. – 2021. – № 3. – С. 104-110. – DOI 10.25750/1995-4301-2021-3-104-110.
40. Дмитриев, Е. А. Математическая статистика в почвоведении : учебник / Е. А. Дмитриев ; Е. А. Дмитриев ; науч. ред. Благовещенский. – Изд. 3-е, испр. и доп.. – М. : URSS, 2008. – 326 с. – ISBN 978-5-397-00039-0.
41. Дымов, А. А. Пирогенные изменения подзолов иллювиально-железистых (средняя тайга, Республика Коми) / А. А. Дымов, Ю. А. Дубровский, Д. Н. Габов // Почвоведение. –2014. – № 2. – С. 144-154. – DOI 10.7868/S0032180X14020051.
42. Дымов, А. А. Состав и гидрофобные свойства органического вещества денсиметрических фракций почв Приполярного Урала / А. А. Дымов, Е. Ю. Милановский, В. А. Холодов // Почвоведение – 2015. – № 11. – С. 1335-1345. DOI 10.7868/s0032180x15110052
43. Дымов, А. А. Почвы послерубочных, постпирогенных и постагрогенных лесных экосистем европейского Северо-Востока России : дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.13 – Почвоведение / Дымов Алексей Александрович. – Москва, 2018 –406 с.
44. Дымов, А. А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми / А. А. Дымов. – Москва : ООО «Изд-во ГЕОС», 2020. – 336 с. – ISBN 978-5-89118-815-0. – DOI 10.34756/GEOS.2020.10.37828.
45. Елина, Г. А. Принципы и методы реконструкции и картирования растительности голоцена / Г. А. Елина// Л.: Наука, 1981. – 159 с.
46. Еловичева, Я. К. Условия накопления карбонатных отложений голоцена Архангельской области / Я. К. Еловичева // Озерные карбонаты Нечерноземной зоны СССР : Межвуз. сб. . науч. тр. – Перм. политех. ин-т, 1985. – . С. 69-78
47. Ефименко, А. С. Роль микросайтов в естественном возобновлении деревьев в темнохвойных высокотравных лесах Северного Предуралья / А. С. Ефименко, А. А. Алейников // Известия Российской академии наук. Серия Биологическая. – 2019. – № 2. – С. 202-214. – DOI 10.1134/S000233291902005X.
48. Зазовская, Э. П. Радиоуглеродное датирование – современное состояние, проблемы, перспективы развития и использование в археологии / Э. П. Зазовская // Вестник археологии, антропологии и этнографии. – 2016. – № 1(32). –С. 151-164. – DOI 10.20874/2071-0437-2016-32-1-151-164.
49. Зайдельман, Ф. Р. Рекомендации по защите торфяных почв от деградации и уничтожения при пожарах / Ф. Р. Зайдельман ; Ф. Р. Зайдельман ; Российская акад. с.-х. наук,

Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Фак. почвоведения, Каф. физики и мелиорации почв. – Москва : URSS, 2011. – 79 с. – ISBN 978-5-397-02297-2.

50. Залесов, А. С. Классификация лесных пожаров : метод. указания по курсу "Лесная пирология" для студентов по направлению подготовки 25.02.00 – Лесное хозяйство и ландшафтное строительство и 25.01.00 – Лесное дело / А. С. Залесов ; ред. Е. Л. Михайлова, Урал. гос. лесотехн. ун-т, Каф. лесоводства. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2011. – 100 экз. – 14 с.
51. Звонарев, С. В. Основы математического моделирования: учебное пособие : Рекомендовано методическим советом УрФУ для студентов вуза, обучающихся по направлению подготовки 11.03.04 — Электроника и нанoeлектроника / С. В. Звонарев ; науч. ред. В. Г. Мазуренко ; Мин. обр. и науки Российской Федерации, УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2019. – 112 с. – ISBN 978-5-7996-2576-4.
52. Зубович, С. Ф. Климат севера лесной зоны европейской части СССР в голоцене (на примере территории Архангельской области) / С. Ф. Зубович, В. В. Кокаровцев, О. Н. Успенская // Палеоклиматы голоцена европейской территории СССР. – М. : 1988. – С. 29-35. б.
53. Каверин, Д. А. Температурные режимы почв субарктики европейского северо-востока в условиях современных климатических и ландшафтных изменений : специальность 1.6.12 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов : дис. ... д-ра геогр. наук: / Каверин Дмитрий Александрович. – Москва : Ин-т географии РАН 2022. – 380 с.
54. Карпачевский, Л. О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе / Л. О. Карпачевский. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1977. – с. 312.
55. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации 1:8 млн (электронная версия). / Гл. ред. И. С. Урусевская, И. О. Алябина, С. А. Шоба, комп. обработка А. В. Андреев ; науч ред. проф. И. С. Урусевская – М.: Фак. почвоведения Мос.гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Каф. географии почв, 2019. – 1 л.
56. Классификация и диагностика почв России / Л. Л. Шишов, В. Д. Тонконогов, И. И. Лебедева, М. И. Герасимова. – Смоленск : Ойкумена, 2004.– 341 с.
57. Классификация и диагностика почв СССР / В. В. Егоров, Е. Н. Иванова, В. М. Фридланд ; ВАСХНИЛ. – М.: Колос, 1977. – 225 с.
58. Климанов, В. А. Климат Северной Евразии в позднеледниковье и голоцене (по палинологическим данным) : специальность 11.00.04 – Геоморфология и эволюционная

- география : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. / Климанов Владимир Андреевич – Москва, 1996. – 46 с.
59. Клименко, В. В. Холодный климат ранней субатлантической эпохи в Северном полушарии / В. В. Клименко, В. А. Климанов // Доклады АН. – 2003. –Т. 391, № 3 – С. 393-397. – ISSN 0869-5652
60. Козловский, Ф. И. Теория и методы изучения почвенного покрова / Ф. И. Козловский. – М. : ООО «Изд-во ГЕОС», 2003. – 536 с. – 589118317X.
61. Краснощеков, Ю. Н. Трансформация серогумусовых почв сосновых лесов под влиянием пожаров в Юго-Западном Прибайкалье / Ю. Н. Краснощеков // Лесоведение. – 2011. – № 2. – С. 3-12.
62. Краснощеков, Ю. Н. Постпирогенная трансформация почв кедровых лесов в Южном Прибайкалье / Ю. Н. Краснощеков, Ю. С. Чередникова // Почвоведение. – 2012. – №10. – С.1057-1067.
63. Куприянов, Д. А. Реконструкция динамики лесных пожаров Центральной Мещеры в голоцене (по данным палеоантропологического анализа) / Д. А. Куприянов, Е. Ю. Новенко // Сибирский экологический журнал. – 2019. – Т. 26, № 3. – С. 253-263. – DOI 10.15372/SEJ20190302.
64. Курбатский, Н. П. Пожары тайги, закономерности их возникновения и развития: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук / Курбатский Николай Петрович. – Красноярск, 1964. – 40 с.
65. Курбатский, Н. П. О классификации лесных пожаров / Н. П. Курбатский // Лесное хозяйство ; гл. ред. П. Н. Кузин. – М.: Московская тип. № 13 Главполиграфпрома Ком. по печати при Сов. Мин. СССР, 1970. – № 3. – С. 68-73.
66. Кутявин, И. Н. Сосновые леса Северного Приуралья: строение, рост, продуктивность : монография / И. Н. Кутявин ; отв. ред. К. С. Бобкова. – Сыктывкар : ФГБУ науки ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2018. – 176 с. – ISBN 978-5-6040622-0-3. – DOI 10.31140/book-2018-02.
67. Кутявин, И. Н. Динамика структуры постпирогенных древостоев сосняков брусничных северного Приуралья (Республика Коми) / И. Н. Кутявин, А. В. Манов, А. А. Дымов // Экобиотех. – 2020. –Т. 3, № 4 – С. 627-633. – DOI 10.31163/2618-964X-2020-3-4-627-633.
68. Малков, В. Н. Условия формирования субтерральных отложений Голубинских пещер / В. Н. Малков, Е. В. Шаврина ; отв. ред. И. И. Минькевич // Минералы и отложения пещер и их практическое значение : Тез. докл. совещ., Пермь, 27-28 сент. 1989 г. – Пермь : Перм. Дом науки и техники, 1989. – С.60-61.
69. Марфенина, О. Е. Свойства почвенной микробиоты как одна из форм биотической памяти почв / О. Е. Марфенина // Почва как память биосферно-геосферно-антропосферных

взаимодействий : монография ; отв. ред. В. О. Таргульян, С. В. Горячкин / Российская академия наук, Ин-т географии.– М. : Изд-во. ЛКИ, 2008. – С. 561-575. – ISBN 978-5-382-00704-5.

70. Матышак, Г. В. Особенность формирования почв севера Западной Сибири в условиях криогенеза : автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27 – Почвоведение / Матышак Георгий Валерьевич. – Москва, 2009.– 24 с.
71. Мелехов, И.С. Влияние пожаров на лес / И.С. Мелехов. – М. ; Л. : Гос. лесотехн. изд-во 1948. – 126 с.
72. Москаленко, Н. Г. Антропогенная динамика растительности равнин криолитозоны России / Н. Г. Москаленко. – Новосибирск : Наука, 1999.– 280 с. – ISBN 5020312991
73. Москаленко, Н. Г. Изменения криогенных ландшафтов северной тайги Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенеза / Н. Г. Москаленко // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 16, № 2. – С. 38-42.
74. Нейштадт, М. И. История лесов и палеогеография СССР в голоцене / М. И. Нейштадт / Акад. наук, Ин-т географии – Москва : Изд-во АН СССР, 1957. – 404 с.
75. Низовцев, Н. А. Почвенное органическое вещество в парцеллах преобладающих хвойных пород средней тайги / Н. А. Низовцев, А. А. Дымов // Актуальные проблемы биологии и экологии : мат. докладов XXII Всероссийской молодежной науч. конф., Сыктывкар, 06-10 апреля 2015 г. / ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2015. – С. 152-156
76. Николаев, Ю. И. Лабиринтово-решетчатый тип пещер Беломоро-Кулойского плато / Ю. И. Николаев // Проблемы изучения, экологии и охраны пещер : V Всесоюз. совещ. по спелеологии и карстоведению [гл. ред. И. А. Печоркин], Киев, октябрь 1987. – Киев : Б. и., 1987 – С.38.
77. О некоторых теоретических аспектах исследования лесных подстилок / Л. Г. Богатырев, В. В. Демин, Г. В. Матышак, В. А. Сапожникова // Лесоведение. – 2004. –№ 4. – С. 17-29. – ISSN 0024-1148.
78. Определение пород дерева по углям для целей палеоэкологических реконструкций (по материалам археологических памятников второй пол. I тыс. н. э. на Средней Оке) / Н. С. Семеняк, А. А. Гольева, А. С. Сыроватко, А. А. Трошина // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 4. – С. 88-92. – DOI 10.24411/1728-323X-2018-14088.
79. Основные типы почв темнохвойных лесов нижнего участка бассейна реки Большая Порожня (приток р. Печоры) / А. Д. Бовкунов, А. А. Семиколенных, А. А. Алейников, В. Г. Ухтомский // Тр. Печоро-Илычского запов. ; отв. ред. А. И. Таскаев, А. Г. Куприянов. Том Выпуск 16. – Сыктывкар : Коми, Научный центр УрО РАН, 2010. – С. 22-30.

80. Особенности почвообразования ветровальных комплексов в ельниках южной тайги / М. Н. Строганова, В. О. Таргульян, Н. Ю. Гончарук, И. И. Васенев, // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 1985. – № 3. – С. 3-31.
81. Отчет о результатах гупповой геологической съемки и геологического доизучения площадей масштаба 1:200000 в Беломорско-Кулойском районе Архангельской области (Кулойская ГСП) (листы: Q-37-XVII, XVIII; -XXII-XXIV; -XXVIII-XXX; -38-XIII, XIV; -XIX, XX; -XXV-XXVI; -XXXI, XXXII). Кулойская ГСП, 1974-80 гг. в 4 книгах, 6 папках / А. Ф. Станковский, Е. М. Веричев, А. Т. Ерохин [и др.] – Архангельск : Архангельское ГУ, 1980.
82. Палеоэкология крупнобугристого болота в окрестностях г. Игарка в голоцене / Е. Ю. Новенко, Н. Г. Мазей, Н. А. Куприянов [и др.] // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее : Мат. Шестого Международного полевого симп., Ханты-Мансийск, 28 июня – 08 июля 2021 г. – Томск : Изд-во Томского университета, 2021. – С. 179-181.
83. Петрографическое и минералогическое исследование «зольников» Павлинова городища (V в. до н. э., Курганская область) / А. А. Каздым, Л. Н. Корякова, А. А. Ковригин, Н. А. Берсенева // Минералогия техногенеза. – 2003. – Т. 4. – С.198-203.
84. Плихт, Й. ван дер. Радиоуглеродное датирование. Хронология археологических культур и резервуарный эффект / Й. ван дер Плихт, Н. И. Шишлина, Э. П. Зазовская // Труды Гос. ист. музея. – М. : Палеограф – 2016. – Вып. 203 –112 с., вкл. – ISBN 978-5-89076-290-0. – ISBN 978-5-89526-028-9.
85. Поведение углеводов в карстовых ландшафтах / Ю. И. Пиковский, М. А. Смирнова, Р. Г. Ковач [и др.] // Естественные и технические науки. – 2014. – № 9-10 (77). – С. 133-143.
86. Пожары как фактор утраты биоразнообразия и функций лесных экосистем / А. П. Гераськина, Д. Н. Тебенкова, Д. Н. Ершов [и др.]. // Вопросы лесной науки . – 2021. – Т. 4, № –14 с. – DOI 10.31509/2658-607x-202142-11.
87. Послепожарная эволюция лесных экосистем на песчаных террасах юго-восточного Прибайкалья / А. Б. Гынинова, Л. Л. Убугунов, Л. Л. Куликов [и др.] // Сибирский экологический журнал. – 2020.– Т. 27, № 1. – С. 13-25. – DOI 10.15372/SEJ20200102.
88. Полевой определитель почв России / Российская акад. с.-х. наук Гос. науч. учреждение Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, О-во почвоведов им. В. В. Докучаева. – Москва: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. – 182 с. – ISBN 978-5-85941-255-6.

89. Полициклические ароматические углеводороды в пирогенных почвах заболоченных ландшафтов Мещеры / А. С. Цибарт, А. Н. Геннадиев, Т. С. Кошовский, Н. С. Гамова // Почвоведение. – 2016. – № 3. – С. 312-320. – DOI 10.7868/S0032180X16030114.
90. Попов, С. Ю. Карта нарушений растительного покрова Пинежского заповедника с конца XVIII по начало XXI веков / С. Ю. Попов, Л. В. Пучнина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 1. – С. 147- 156. – DOI 10.21046/2070-7401-2017-14-1-147-156.
91. Попова, В. П. Влияние низового пожара в сосняке лишайниковом на свойства почвы / В. П. Попова, А. А. Дымов // Актуальные проблемы биологии и экологии : Материалы докладов XXI Всероссийской молодежной науч. конф., посвящ. 70-летию А. И. Таскаева, Сыктывкар, 07-11 апреля 2014 г. – Сыктывкар: Коми науч. центр УрО РАН, 2014 – С. 246-249.
92. Почвы заповедников и национальных парков Российской Федерации / Е. В. Абакумов, А. Б. Александрова, В. А. Андроханов [и др.] ; Ин-т экологического почвоведения МГУ им. М. В. Ломоносова, Ин-т проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Ин-т фундаментальных проблем биол. РАН, Науч. совет по почвоведению РАН. – Москва : НИИ-Природа, 2012 – 476 с. – ISBN 978-5-9562-0087-2.
93. Почвы и почвенный покров Печоро-Илычского заповедника (Северный Урал) / И. В. Забоева, Е. М. Лаптева, Е. В. Жангуров [и др.] – Сыктывкар : Федеральное ГБУ науки Фед. исслед. центр «Коми науч. центр Уральского отд. РАН», 2013. – 328 с. – ISBN 978-5-89606-513-5.
94. Природно-антропогенные изменения почв и среды в пойме Москвы-реки в голоцене: педогенные, пыльцевые и антракологические маркеры / А. Л. Александровский, Е. Г. Ершова, Е. В. Пономаренко [и др.] // Почвоведение. – 2018. – № 6. – С. 659-673. – ISSN 0032-180X.
95. Пространственная неоднородность химических свойств почв после верхового пожара в пределах дюнного повышения в городских лесах Тольятти / Е. Ю. Максимова, А. С. Цибарт, Т. С. Кошовский, Е. В. Абакумов // Экологический сборник 5. Труды молодых ученых Поволжья : Международная науч. конф, Тольятти, 11–12 марта 2015 года / Под ред. С. А. Сенатора, О. В. Мухортовой, С. В. Саксонова. – Тольятти: Кассандра, 2015 – С. 225-227.
96. Радиоуглеродный анализ и проблемы памяти почв / О. А. Чичагова, О. С. Хохлова, Э. П. Зазовская, С. В. Горячкин // Почва как память биосферно-геосферно-антропоферных взаимодействий : монография ; отв. ред. В. О. Таргульян, С. В. Горячкин / Российская

- академия наук, Ин-т географии.– М. : Изд-во. ЛКИ, 2008. – С. 182-203. – ISBN 978-5-382-00704-5.
97. Роде, А. А. Почвообразовательный процесс и эволюция почв / А. А. Роде – Москва: Географгиз, 1947. –145 с.
98. Роде, А.А. Избранные труды в 4 томах / А. А. Роде ; гл. ред. Добровольский ; Рос. акад. с.-х. наук, Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева. – Москва: Почвенный ин-т им В.В. Докучаева р.-х. акад., 2008. – ISBN 978-5-86921-064-7. Т. 2 : Подзолообразовательный процесс / отв. ред. В. А. Рожков. – Печать по изд. 1936-1984 гг. – 2008. – 480 с. – ISBN 978-5-869621-066-1.
99. Самохина, О. И. Свойства почв и культурных слоев археологических памятников пойм как архив палеоэкологической информации (на примере бассейна р. Оки) : специальность 03.02.13 – Почвоведение дис... канд. биол. наук/ Самохина Ольга Игоревна. – Москва, 2017. – 123 с.
100. Севергина, Д. А. Содержание свободного и окклюдированного органического вещества в подзолах постпирогенных сосняков Республики Коми и Красноярского края / Д. А. Севергина, В. В. Старцев, А. А. Дымов// Актуальные проблемы биологии и экологии : Материалы XXVII Всероссийской молодежной науч. конф. (с элементами научной школы), Сыктывкар, 16-20 марта 2020 г. / Отв. ред. С. В. Дегтева. – Сыктывкар: Ин-т биол. Коми науч. центра Уральского отд. РАН, 2020 – С.65-68.
101. Семиколенных, А. А. Структура и состояние почвенного покрова в полосе экологической тропы к плато Мань-Пупу-Нер / А. А. Семиколенных, Д. В. Добрынин // Труды Печоро-Илычского заповедника / Отв. ред. А. И. Таскаев, А. Г. Куприянов. Том. Выпуск 16. – Сыктывкар : Коми науч. центр УрО РАН, 2010. – С. 141-146.
102. Семиколенных, А. А. Почвы и почвенный покров таёжного пояса Северного Урала (верховья реки Печора) / А. А. Семиколенных, А. Д. Бовкунов, А. А. Алейников // Почвоведение. – 2013. –№ 8. – С. 911–923. – DOI 10.7868/S0032180X1308008X.
103. Смирнова, М. А., Геннадиев А.Н. Почвы карстовых воронок юго-востока Беломоро-Кулойского плато / М. А. Смирнова, А. Н. Геннадиев // Почвоведение. – 2011. –№ 2. – С. 131-141.
104. Смирнова, М. А. Почвенные катены карстовых воронок : специальность 25.00.23 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов : дис. ... канд. географических наук / Смирнова Мария Андреевна. – Москва, 2015. –170 с.
105. Спиридонова, И. А. Почвообразование и выветривание на плотных гипсах в бореальной зоне: пространственные закономерности : специальность 25.00.23 –

Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов : дис. ... канд. геогр. наук / Спиридонова Инга Александровна. – Москва, 2007. – 126 с.

106. Сравнение методов определения соединений углерода пирогенно измененных органических соединений / А. А. Дымов, В. В. Старцев, Н. М. Горбач [и др.] // Почвоведение. – 2021. – № 11. – С. 1332-1345. – DOI 10.31857/S0032180X2111006X.
107. Старцев, В. В. Почвы постпирогенных лиственничников средней Сибири: морфология, физико-химические свойства и особенности почвенного органического вещества / В. В. Старцев, А. А. Дымов, А. С. Прокушин // Почвоведение. – 2017. – № 8. – С. 912-925. – DOI 10.7868/S0032180X17080111.
108. Структура и динамика природных компонентов Пинежского заповедника (Северная тайга ЕТР, Архангельская область). Биоразнообразие и георазнообразие в карстовых районах / Л. В. Пучнина, С. В. Горячкин, А. М. Рыков [и др.] – Архангельск : Правда Севера, 2000. – 267 с.
109. Сычева, С. А. Морфолитогенез в аккумулятивных и трансаккумулятивных ландшафтах как особый механизм почвенно-литогенной памяти // Почва как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий : монография ; отв. ред. В. О. Таргульян, С. В. Горячкин / Российская академия наук, Институт географии.– М. : Изд-во. ЛКИ, 2008. – С. 128-161. – ISBN 978-5-382-00704-5.
110. Сычева, С. А. Малый климатический оптимум голоцена и малый ледниковый период в памяти почв и отложений пойм рек Русской равнины / С. А. Сычева // Изв. Российской академии наук. Серия географическая. – 2011. – № 1. – С. 79–93. – ISSN 2587-5566.
111. Сычева, С. А. Почвенно-геоморфологические аспекты формирования культурного слоя древних поселений / С. А. Сычева // Почвоведение. – 1994. – № 3. – С. 28-33.
112. Таргульян, В. О. Структурный и функциональный подход к почве: почва-память и почва-момент / В. О. Таргульян, И. А. Соколов // Математическое моделирование в экологии : Материалы III школы по мат. моделированию слож. биол. систем / Академия наук СССР. Научный совет по проблемам биосферы ; Отв. ред. А. М. Молчанов. – Москва : Наука, 1978. – С.17-33.
113. Таргульян, В. О. Память почв: формирование, носители, пространственно-временное разнообразие / В. О. Таргульян // Почва как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий : монография ; отв. ред. В. О. Таргульян, С. В. Горячкин / Российская академия наук, Ин-т географии.– М. : Изд-во. ЛКИ, 2008. – С. 24-57. – ISBN 978-5-382-00704-5.

114. Таргульян, В. О. Эволюция почв в голоцене (проблемы, факты, гипотезы) / В. О. Таргульян, А. Л. Александровский // История биогеоценозов СССР в голоцене : [сборник статей] / АН СССР. Научный совет по проблемам биосферы, Ин-т эволюц. морфологии и экологии животных им. А. Н. Северцева ; [Отв. ред. Л . Г. Динесман]. Москва : Наука, 1976. – С. 57-78.
115. Таргульян, В. О. Теория педогенеза и эволюции почв =: Theory of Pedogenesis and Soil Change in Time : монография / В.О. Таргульян. – ООО «Изд-во ГЕОС», 2019. – 296 с. – ISBN 9785891188044
116. Теория и практика химического анализа почв (Под редакцией Л.А. Воробьевой) =: Theory and Practice Chemical Analysis of Soils (Edd. Vorobyova L.F.) : монография / Факультет почвоведения МГУ : отв. ред. Л. А. Воробьева. – ООО «Изд-во ГЕОС», 2019. – 400 с. – ISBN 5-89118-344-7.
117. Туюкина, Т. Ю. Геохимия северотаежных ландшафтов в литоэкстремальных условиях: открытый гипсовый карст европейского Севера / Т. Ю. Туюкина, А. А. Семиколенных, С. В. Горячкин // Геохимия ландшафтов. К 100-летию со дня рождения Александра Ильича Перельмана [коллективная моногр.] / Под. ред. Н. С. Касимова, А. Н. Геннадиева. – Москва : АПР, 2017. – С. 189-223. ISBN 978-5-904761-73-8
118. Углеводородное состояние почв при разновозрастном нефтяном загрязнении / А. Н. Геннадиев, Ю. И. Пиковский, Р. Г. Ковач [и др.] // Почвоведение. – 2016. – № 5. – С. 574-583. – DOI 10.7868/S0032180X16050051.
119. Факторы и модификации углеводородного состояния почв / А. Н. Геннадиев, Ю. И. Пиковский, А. П. Жидкин [и др.] // Почвоведение. – 2015. – № 11. – С. 1314-1329 – DOI 10.7868/S0032180X15110076.
120. Филимонова, Л. В. Изменение количественных показателей палеоклимата в среднетаежной подзоне Карелии за последние 11000 лет / Л. В. Филимонова, В. А. Климанов // Тр. Краельского науч. центра РАН. – 2005. – № 8. – С. 112-120. – ISSN 1997-3217
121. Филимонова, Л. В. Палеогеография Заонежского полуострова в позднем плейстоцене и голоцене / Л. В. Филимонова, Н. Б. Лаврова // Тр. Краельского науч. центра РАН. – 2015. – № 4. – С. 30-47. – DOI 10.17076/bg22.
122. Характеристика древостоя и валежа в послепожарных осиново-березовых лесах северного Предуралья / А. А. Алейников, А. В. Тюрин, П. Я. Грабарник, А. С. Ефименко // Лесоведение. – 2018. – №4 – С. 258-272. – DOI 10.1134/S0024114818040034.

123. Харук, В. И. Пожары и гари сибирской тайги / В. И. Харук, Е. И. Пономарев // Наука из первых рук. – 2020. – № 2(87). – С. 56-81. – ISSN 1810-3960
124. Ходаков, В. Е. Лесные пожары: методы исследования : монография / В. Е. Ходаков, М. В. Жарикова. – Херсон : Гринь Д. С., 2011. – 470 с. – ISBN 9662660348.
125. Хотинский, Н. А. Голоцен Северной Евразии = Holocene of the Northern Eurasia: опыт трансконтинентальной корреляции этапов развития растительности и климата: к X конгрессу INQUA (Великобритания, 1977): монография / Н. А. Хотинский ; [АН СССР, Ин-т географии]. – М. : Наука, 1977. – 200 с.
126. Цибарт, А. С., Пирогенные полициклические ароматические углеводороды в почвах заповедных и антропогенно-измененных территорий / А. С. Цибарт, А. Н. Геннадиев // Геохимия ландшафтов и география почв: 100 лет со дня рождения Марии Альфредовны Глазовской : [сб. статей] / Под. ред. Н. С., Касимова, М. И. Герасимовой. – Москва : АПР, 2012. – С. 483-505. – ISBN 978-5-904761-29-5.
127. Цибарт, А. С. Влияние пожаров на свойства лесных почв Приамурья (Норский заповедник) / А. С. Цибарт, А. Н. Геннадиев // Почвоведение. 2008. – № 7. – С. 783-792. – ISSN 0032-180X.
128. Чебыкина, Е. Ю. Исследование пирогенных территорий зон притундровых лесов и редкостойной тайги (на примере Надымского лесничества ЯНАО) / Е. Ю. Чебыкина, Т. И. Низамутдинов, Е. В. Абакумов // Устойчивое развитие территорий: теория и практика : Материалы II Международной научно-практической конф., Сибай, 18-21 ноября 2021 г. – Сибай : Сибайский инф. центр-филиал ГУПРБИ; изд. дом «Респ. Башкортостан», 2021. – С. 285-287. – ISBN 978-5-6047479-0-2. – ISBN 978-5-6047479-2-6.
129. Чебыкина, Е. Ю. Мониторинг почвенных экосистем в условиях пирогенного воздействия на примере Новгородской области (Северо-Запад России) / Е. Ю. Чебыкина, Т. И. Низамутдинов, Е. В. Абакумов // Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки : Материалы Международной молодежной науч. школы, Ростов-на-Дону, 27-30 сентября 2022 г. – Ростов-на-Дону - Таганрог: Южный федеральный ун-т, 2022. – С. 263-267. – ISBN 978-5-9275-4169-0
130. Чевычелов, А. П. Постпирогенные полициклические почвы в лесах Якутии и Забайкалья : специальность 03.00.27 – Почвоведение : автореф. дис. ... д-р. биол. наук / А. П. Чевычелов, Е. Ю. Шахматова // Почвоведение. – 2018. – № 2. – С. 243-252. – DOI 10.7868/S0032180X18020120.
131. Чевычелов А.П. Пирогенез и зональное горно-таежное континентальное гумидное автоморфное почвообразование на северо-востоке Азии (на примере Южной Якутии) :

- специальность 03.00.27 – Почвоведение : автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Чевычелов Александр Павлович. – Новосибирск, 1997. – 33 с.
132. Чевычелов, А. П. Пирогенная трансформация почв и почвенного покрова в горно-таежных регионах мерзлотной области северо-востока Азии / А. П. Чевычелов // Антропогенная деградация почвенного покрова и меры ее предупреждения : Тез. докл. Всероссийской конф.: в 2-х томах, Москва, 16-18 июня 1998 г. Том 2. – Москва, Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, 1998. – С. 212-214.
133. Чичагова, О. А. Радиоуглеродное датирование гумуса почв. Метод и его применение в почвоведении и палеогеографии : монография / О. А. Чичагова ; отв. ред. И. П. Герасимов, В. О. Таргульян. – Москва : Наука, 1985. – 157 с.
134. Шнитников, А. В. Изменчивость общей увлажненности материков Северного полушария : [монография] / А. В. Шнитников; гл. ред. Н. Н. Павловский, отв. ред. Л. К. Давыдов ; Зап. геогр. о-ва Союза ССР Т. 16. Новая серия. – Москва-Ленинград : Изд-во АН СССР, 1957. – 337 с.
135. Шнитников, А. В. Многовековой ритм развития ландшафтной оболочки / А. В. Шнитников // Хронология плейстоцена и климатическая стратиграфия : К IX Международному конгрессу INQUA, Новая Зеландия, 1973 / [Ред. В. А. Зубаков] ; геогр. о-во СССР. Плейстоценовая комис. – Ленинград, 1973. – С. 7-38
136. Эволюция почв и почвенного покрова : Теория, разнообразие природной эволюции и антропогенных трансформаций почв / И. В. Иванов, А. Л. Александровский, А. О. Макеев [и др.] ; Российская акад. наук; Ин-т физ.-хим. и биол. проблем почвоведения; О-во почвоведов им. В. В. Докучаева; Комис. истории, философии и социологии почвоведения; Науч. совет РАН по проблемам почвоведения. – Москва : ООО «Изд-во ГЕОС», 2015. – 925 с. – ISBN 978-5-89118-659-0.
137. Экстремальные экосистемы и почвы открытых гипсово-карстовых ландшафтов тайги Европейского Севера / А. А. Семиколенных, И. А. Спиридонова, Т. Ю. Туюкина [и др.] – Москва : Медиа-Пресс, 2015. – 208 с. – ISBN 978-5-89658-045-4.
138. Язрикова, Т. Е. Влияние лесного пожара на содержание биогенных элементов в почвах (Южное Прибайкалье) / Т. Е. Язрикова, Т. С. Кошовский // Почвенные ресурсы Сибири: вызовы XXI века : Сб. материалов Всероссийской науч. конф. с международным участием, посвящ. 110-летию выдающегося организатора науки и первого дир. ИПА СО РАН Романа Викторовича Ковалева, Новосибирск, 04-08 декабря 2017 г. / Отв. ред. А. И. Сысо. Том Часть II. [отв. ред. А.И. Сысо]. – Новосибирск : Изд. Дом Томского гос. ун-та, 2017. – С. 144-148. – DOI 10.17223/9785946216463/34.

139. A computer-based system for fire managements in the mountains of the Cape Province, South Africa / D. M. Richardson, B. W. van Wilgen, D. C. Lemaitre [et al.] // *Int. J. Wildland Fire*, 1994. – Vol. 4. – № 1. – P. 17-32. – DOI 10.1071/WF9940017.
140. A modern analogue matching approach to characterize fire temperatures and plant species from charcoal / S. Y. Maezumi, W. D. Gosling, J. Kirschner [et al] // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2021. – Vol. 578. – P. 110580, – DOI 10.1016/j.palaeo.2021.110580.
141. A 10 000 year local forest fire history in a dry heath forest site in eastern Finland, reconstructed from charcoal layer records of a small mire / A. Pitkänen, P. Huttunen, H. Jungner, K. Tolonen // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2002. – Vol. 32. – № 10. – P. 1875–1880. – DOI 10.1139/x02-103.
142. Abney, R. B. Pyrogenic carbon erosion: implications for stock and persistence of pyrogenic carbon in soil / R. B. Abney, A. A. Berhe // *Frontiers in Earth Science*. – 2018. – Vol. 6. –P. 1-16. – DOI 10.3389/feart.2018.00026.
143. Ahlgren, C.E. Some effects of fire on forest reproduction in northeastern Minnesota // *J. Forestry*. – 1959. – Vol. 57. – № 3. – P. 194-200.
144. Albic Podzols of boreal pine forests of Russia: soil organic matter, physicochemical and microbiological properties across pyrogenic history / A. A. Dymov, I. D. Grodnitskaya, E. V. Yakovleva [et al.] // *Forests*. – 2022 (a). – Vol. 13. – № 11 – P. 1831. – DOI 10.3390/f13111831
145. Alonso, I. First phases of regeneration of *Cistus laurifolius* and *Cistus ladanifer* after burning and cutting in experimental plots / I. Alonso, E. Luis, R. Tarrega // *Int. J. Wildland Fire*. – 1992. – Vol. 2. – № 1. – P. 7-14. – DOI 10.1071/WF9920007.
146. Analysis of experimental simulation of ground surface heating during a prescribed burn / D. Pafford, V. K. Dhir, E. Anderson, J. Cohen // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 2. P. 125 – 146. – DOI 10.1071/WF9910125.
147. Anders, E. Major wildfires at the Cretaceous/Tertiary boundary / E. Anders, W. S. Wolbach, I. Gilmour // *Geological Society of America Special Paper*. – 1991. – Vol. 247. – P. 485-492. DOI 10.1130/SPE247-p391.
148. Anderson, J. E. Initial floristics in lodgepole pine (*Pinus contorta*) forests following the 1988 Yellowstone Fires / J. E. Anderson, W. H. Romme // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1 – № 2. – P. 119-124. DOI 10.1071/WF9910119.

149. Atlantic SSTs control regime shifts in forest fire activity of Northern Scandinavia / I. Drobyshev, Y Bergeron, A. Vernal [et al.] // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – № 22532. – P. 1–13. – DOI 10.1038/srep22532.
150. Badmaev, N. Correlation analysis of terrestrial and satellite meteorological data in the territory of the Republic of Buryatia (Eastern Siberia, Russian Federation) with forest fire statistics / N. Badmaev, A. Bazarov // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2021. – Vol. 297. – C. 108245. – DOI 10.1016/j.agrformet.2020.108245.
151. Bautista, S. Post-fire mulching / S. Bautista, P. R. Robichaud, C. Blade // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 353-372. – DOI 10.1201/9781439843338-c13. – ISBN: 9781578085262.
152. Beyers, Jan L. Non-native and native seeding / Jan L. Beyers // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 321-326. DOI 10.1201/9781439843338.
153. Blank, R. R. Influence of simulated burning of soil-litter from low sagebrush, squirreltail, cheatgrass, and medusahead on water-soluble anions and cations / R. R. Blank, F. L. Allen, J. A. Young // *Int. J. Wildland Fire* – 1996. Vol. 6. – № 3. – P. 137-143. – DOI 10.1071/WF9960137.
154. Bobrovsky, M. V. Anthracological and morphological analysis of soils for the reconstruction of the forest ecosystem history (Meshchera Lowlands, Russia) / M. V. Bobrovsky, D. A. Kupriaynov, L. G. Khanina // *Quaternary International*. – 2019. – Vol. 516. – P. 70-82. – DOI 10.1016/j.quaint.2018.06.033.
155. Brenner, J. Southern Oscillation Anomalies and their relationship to wildfire activity in Florida / J. Brenner // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 1 – P. 73–78. – DOI 10.1071/WF9910073.
156. Bronk Ramsey, C. Bayesian analysis of radiocarbon dates / C. Bronk Ramsey // *Radiocarbon*. – 2009. – Vol. 51. – № 1 – P. 337–360. – DOI 10.2458/azu_js_rc.51.3494.
157. Brown, P. M. Fire history in interior ponderosa pine communities of the Black Hills, South Dakota, USA / P. M. Brown, C. H. Sieg // *Int. J. Wildland Fire*. – 1996. – Vol. 6. – № 3. – P. 97-105. – DOI 10.1071/WF9960097.
158. Bustin, R. M. Abrupt changes (jumps) in reflectance values and chemical compositions of artificial charcoals and inertinite in coals / R. M. Bustin, Y. Guo // *International Journal of Coal Geology*. – 1999. – Vol. 38. – № 3-4. – P. 237-260. – DOI 10.1016/S0166-5162(98)00025-1
159. Byram, G. M. Forest Fire Behavior / G. M. Byram // *Forest Fires: Control and Use* / Eds. K. P. Davis. – New York: McGraw-Hill, 1959. – P. 90-123. – ISBN 0070154848.

160. Calvo, L. Regeneration in *Quercus Pyrenaica* Ecosystems After Surface Fires / L. Calvo, R. Tarrega, E. Luis // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 4. – P. 205-210. – DOI 10.1071/WF9910205.
161. Canti, M. G. Aspects of the chemical and microscopic characteristics of plant ashes found in archaeological soils / M. G. Canti // *CATENA* – 2003. – Vol. 54 – № 3. – P. 339-361. – DOI 10.1016/S0341-8162(03)00127-9.
162. Carcaillet, C. Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper timberline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary data / C. Carcaillet, M. Thinon // *Review of Palaeobotany and Palynology*. – 1996. – Vol. 91. – № 1-4. – P. 399–416. – DOI 10.1016/0034-6667(95)00060-7.
163. Carcaillet, C. Once upon a time biomass burning in the western Alps: Nesting effects of climate and local drivers on long-term subalpine fires / C. Carcaillet, B. Bouley, F. Carcaillet // *Forest Ecosystems*. – 2022. – Vol. 9. – № 1-10. – P. 100024. – DOI 10.1016/j.fecs.2022.100024.
164. Carrega, P. A Meteorological Index of forest fire hazard in Mediterranean France / P. Carrega // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 2. – P. 79-86. – DOI 10.1071/WF9910079
165. Cathpole, E. A. Modelling moisture damping for fire spread in a mixture of live and dead fuels / E. A. Cathpole, W. R. Cathpole // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 2. – P. 101–106. – DOI 10.1071/WF9910101.
166. Cedra, A. Fire effects on soil infiltration / A. Cedra, P. R. Robichaud // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 81-103. – DOI 10.1201/9781439843338.
167. Certini, G. Effects of fire on properties of forest soils: a review / G. Certini // *Oecologia*. – 2005. – Vol. 143. – № 1. – P.1-10. – DOI 10.1007/s00442-004-1788-8.
168. Clark, J. S. Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area, transport, deposition, and sampling / J. S. Clark // *Quaternary Research*. – 1988. Vol. 30. – № 1. – P. 67–80. – DOI 10.1016/0033-5894(88)90088-9.
169. Clementa, A. S. Demographic patterns and productivity of post-fire regeneration in Portuguese Mediterranean maquis / A. S. Clementa, F. C. Rego, O. A. Correia // *Int. J. Wildland Fire*. – 1996. Vol. 6. –№ 1. – P. 5-12. – DOI 10.1071/WF9960005.
170. Combustion of fossil organic matter at the Cretaceous-Paleocene (KP) boundary / M. C. Harvey, S. C. Brassell, C. M. Belcher, A. Montanari // *Geology*. – 2008. – Vol. 36. – № 5. – P. 355-358. – DOI 10.1130/G24646A.1.

171. Compostella, C. Late Holocene soil evolution and treeline fluctuations in the Northern Apennines / C. Compostella, L. Trombino, M. Caccianiga // *Quaternary international*. – 2013. – Vol. 289. – P. 46–59. – DOI 10.1016/j.quaint.2012.02.011.
172. Cryosols: genesis, ecology and management : Materials of the IV international Conference on Cryopedology / Eds. M. A. Bronnikova S. V. Goryachkin, Arkhangelsk-Pinega, 01-08 August 2005. – Moskva : MSU, 2005. – 88 p. – ISBN-5-89658-027-4.
173. Curran, M. P. Fire landscapes in Canada: how to restore or prevent them / M. P. Curran , D. F. Scott // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 453-465. –DOI 10.1201/9781439843338.
174. Daskalakou, E. V. Aleppo pine (*Pinus halepensis*) postfire regeneration: the role of canopy and soil seed bank / E. V. Daskalakou, C. A. Thanos // *Int. J. Wildland Fire*. – 1996. – Vol. 6. – № 2. – P. 59-66. – DOI:10.1071/WF9960059.
175. Deldicque, D. A Raman – HRTEM study of the carbonization of wood: A new Raman-based paleothermometer dedicated to archaeometry / D. Deldicque, J.-N. Rouzaud, B. A. Velde // *Carbon*. – 2016. – Vol. 102. – P. 319-329. – DOI 10.1016/j.carbon.2016.02.042.
176. Deldicque, D. Temperatures reached by the roof structure of Notre-Dame de Paris in the fire of April 15th 2019 determined by Raman paleothermometry /D. Deldicque, J.-N. Rouzaud // *Comptes Rendus. Géoscience*. – 2020. – Vol. 352. – № 1. – P. 7-18. –DOI 10.5802/crgeos.9.
177. Dendroclimatology and historical climatology of Voronezh region, European Russia, since 1790s / V. Matskovsky, E. Dolgova, N. Lomakin, S. Matveev // *International Journal of Climatology*. – 2016. – Vol. 37. – № 7. – P. 3057-3066. – DOI 10.1002/joc.4896.
178. Despain, Don G. Simulation of Crowne Fire effects on canopy seed bank in lodgepole pine / D. G. Despain, D. L. Clark, J. J. Reardon // *Int. J. Wildland Fire*. – 1996 – Vol. 6. – № 1. – P. 45-49. – DOI 10.1071/WF9960045.
179. Doerr, S. H. Soil water repellency: a key factor in post-fire erosion / S. H. Doerr, R. A. Shakesby, L. H. MacDonald // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 197-223. – DOI 10.1201/9781439843338.
180. Doerr, S. H. Global trends in wildfire and its impacts: perception versus realities in a changing world / S. H. Doerr, C. Santin // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. – 2016. – Vol. 371. – № 1696 –P. 20150345. – DOI 10.1098/rstb.2015.0345.

181. Drivers of extreme wildfire years in the 1965–2019 fire regime of the Tłı̨chǫ First Nation territory, Canada / D. M. Gaboriau, H. Asselin, A. A. Adam [et al.] // *Ecoscience*. – 2022. – Vol. 29. – № 3. – P. 249-265. – DOI 10.1080/11956860.2022.2070342.
182. Dupuy, J.-L. Slope and fuel load effect on fire behaviour: laboratory experiments in pine needles fuel beds / J.-L. Dupuy // *Int. J. Wildland Fire*. – 1995. – Vol. 5. – № 3. – P. 153-164. – DOI 10.1071/wf9950153.
183. Effects of fire on forest nutrient cycles / R. J. Raison, P. K. Khanna, K. L. S. Jacobsen [et al.] // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 225-256. – DOI 10.1201/9781439843338.
184. Engle, D. M. Fire behaviour and fire effects on redcedar in hardwood leaf-litter fires / D. M. Engle, J. F. Strizke // *Int. J. Wildland Fire*. – 1995. – Vol. 5. – № 3. – P. 135-141. – DOI 10.1071/WF9950135.
185. Episodic fire, run-off and deposition at the Paleocene-Eocene boundary / M. E. Collinson, D. Steart, A. C. Scott [et al.] // *Journal of the Geological Society*. 2007. – Vol. 164. № 1. – P. 87-97. – DOI 10.1144/0016-76492005-185.
186. Experimental assessment of tundra fire impact on element export and storage in permafrost peatlands / D. Kuzmina, A. G. Lim, S. V. Loiko, O. S. Pokrovsky // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 853. – № 4. – P. 158701. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.158701.
187. Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: Results and implications / G. J. Nichols, J. Cripps, M. E. Collinson, A. C. Scott // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2000. – Vol. 164. – № 1. – P. 43-56. – DOI 10.1016/S0031-0182(00)00174-7.
188. Extreme weather and climate events in northern areas: A review / J. E. Walsh, T. J. Ballinger, E. S. Euskirchen [et al.] // *Earth-Science Reviews*. – 2020. – Vol. 209. – № 4. – P. 103324. – DOI 10.1016/j.earscirev.2020.103324.
189. Falkland Island peatland development processes and the pervasive presence of fire / D. Mauquoy, R. J. Payne, K. V. Babeshko [et al.] // *Quaternary Science Reviews*. – 2020. – Vol. 240. – P. 106391. – DOI:10.1016/j.quascirev.2020.106391.
190. Ferguson, S. A. Modeling smoldering emissions from prescribed broadcast burns in the Pacific-Northwest / S. A. Ferguson, C. C. Hardy // *Int. J. Wildland Fire*. – 1994. – Vol. 4. – № 2. – P. 135-142. – DOI 10.1071/WF9940135.
191. Ferns and fires: Experimental charring of ferns compared to wood and implications for paleobiology, coal petrology and isotope geochemistry / L. McParland, M. E. Collinson, A. C. Scott, D. Steart // *Palaios*. – 2007. – Vol. 22. – P. 528-538. – DOI 10.2110/palo.2005.p05-138r.

192. Ferrandis, P. The role of soil seed Bank in the early stages of plant recovery after fire in a pinus pinaster forest in SE Spain / P. Ferrandis, J. J. Martinez-Sanchez, J. M. Herranz // *Int. J. Wildland Fire*. – 1996. – Vol. 6. – № 1. – P. 31-35. – DOI 10.1071/WF9960031.
193. Fire, catchment run-off and erosion processes, and Post-fire Rehabilitation programs: recent Australian experience / D. Dunkerley, N. Martin, S. Berg, R. Ferguson // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 467-509. – DOI 10.1201/9781439843338.
194. Fire impact on carbon pools and basic properties of Retisols in native spruce forests of the European North and Central Siberia of Russia / V. V. Startsev, E. V. Yakovleva, I. N. Kutyavin, A. A. Dymov // *Forests – 2022 (a)*. – Vol. 13. № 7. – P. 1135 – DOI: 10.3390/f13071135.
195. Fire-vegetation interactions during last 11000 years in boreal and cold temperate forests of Fennoscandia / C. Molinari, C. Carcaillet, R. H. W. Bradshaw [et al.] // *Quaternary Science Reviews*. – 2020. – Vol. 241 – № 1. – P. 106408. – DOI 10.1016/j.quascirev.2020.106408.
196. Forbes, M. S. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems / M. S. Forbes, R. J. Raison, J. O. Skjemstad // *Science of The Total Environment*. – 2006. – Vol. 370. – № 1 – P. 190-296. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2006.06.007.
197. Forest Fire Effects on Soil Microbiology / J. Mataix-Solera, C. Guerrero, F. García-Orenes [et al.] // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 133-175. – DOI 10.1201/9781439843338.
198. Frandsen, W. H. Heat evolved from smoldering peat / W. H. Frandsen // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 3. – P. 197-204. – DOI 10.1071/WF9910197.
199. Gavin D.G. Forest soil disturbance interval inferred from soil charcoal radiocarbon dates // *Can. J. For. Res.* 2003, 33, 12, 2514-2518. DOI:10.1139/x03-185
200. Gavin, D.G. Holocene fire history of a coastal temperate rain forest based on soil charcoal radiocarbon dates / D. G. Gavin, L. B. Brubaker, K. P. Lertzman // *Ecology*. – 2003. – Vol. 84. – № 1. – P. 186–201. – DOI 10.1890/0012-9658(2003)084[0186:HFHOAC]2.0.CO;2.
201. Global biomass burning: A synthesis and review of Holocene paleofire records and their controls / J. R. Marlon, P. J. Bartlein, A.-L. Daniau [et al.] // *Quaternary Science Reviews*. – 2013. – Vol. 65. – P. 5–25. – DOI 10.1016/j.quascirev.2012.11.029.
202. Golyeva, A. A. Microbiomorph analysis as part of micromorphological investigations: composition, diagnostics and informative capacity for paleoenvironmental reconstructions / A. A. Golyeva // *Dokuchaev Soil Bulletin*. – 2016. – Vol. 86. – P. 154-160. – DOI 10.19047/0136-1694-2016-86-153-160.

203. Gerdelidani A.F. Effects of sugar cane bagasse biochar and spent mushroom compost on phosphorus fractionation in calcareous soils / A. F. Gerdelidani, H. M. Hossein // *Soil Research* – 2018. – Vol. 56 – № 2. – P. 136-144. – DOI 10.1071/SR17091.
204. Gradually increasing forest fire activity during the Holocene in the northern Ural region (Komi Republic, Russia) / C. Barhoumi, O. Peyron, S. Joannin [et al.] // *The Holocene*. – 2019. Vol. 29 – № 12. – P. 1906–1920. – DOI 10.1177/0959683619865593.
205. Hardy, B. Identification of thermal signature and quantification of charcoal in soil using differential scanning calorimetry and benzene polycarboxylic acid (BPCA) markers / B. Hardy, N. Borchard, J. Leifeld // *SOIL*. – 2022. – Vol. 8. – № 2. – P. 451-466. – DOI 10.5194/soil-8-451-2022.
206. Heat-transfer in the soil during very low-intensity experimental fires – the role of duff and soil moisture content / J.-C. Valette, V. Gomendy, J. Marechal [et al.] // *Int. J. Wildland Fire*. – 1994. – Vol. 4. – № 4. – P. 225-237. – DOI: 10.1071/WF9940225.
207. Holocene and recent fires influence on soil organic matter, microbiological and physico-chemical properties of peats in the European North-East of Russia / A. A. Dymov, N. M. Gorbach, N. N. Goncharova [et al.] // *Catena*. – 2022 (b). – Vol. 217. – № 106449. – P. 1-15. – DOI 10.1016/j.catena.2022.106449.
208. Hua, Q. Atmospheric radiocarbon for the period 1950–2010 / Q. Hua, M. Barbetti, A. Z. Rakowski // *Radiocarbon*. – 2013. – Vol. 55 – № 4 – P. 2059–2072. – DOI 10.2458/azu_js_rc.v55i2.16177.
209. IntCal 13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP / P. J. Reimer, E. Bard, A. Bayliss [et al.] // *Radiocarbon*. – 2013. – Vol. 55. – Iss. 4. – P. 1869–1887. DOI 10.2458/azu_js_rc.55.16947/.
210. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2022. 4th editions. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. – Viena : IUSS. – ISBN 979-8-9862451-1-9.
211. Kazanis, D. Vegetation composition in a post-fire successional gradient of *Pinus halepensis* forests in Attica, Greece / D. Kazanis, M. Arianoutsou // *Int. J. Wildland Fire*. – 1996. – Vol. 6. – № 2. – P. 83-91. – DOI 10.1071/WF9960083.
212. Killops, S. D. Polycyclic aromatic hydrocarbons of pyrolytic origin in ancient sediments: Evidence for Jurassic vegetation fires / S. D. Killops, M. S. Massoud // *Organic Geochemistry*. – 1992. – Vol. 18. – № 1. – P. 1-7. – DOI 10.1016/0146-6380(92)90137-M.
213. Kupriyanov, D. A. Reconstruction of the Holocene Dynamics of forest fires in the central part of Meshcherskaya Lowlands according to antracological analysis / D. A. Kupriyanov, E. Y.

- Novenko // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2019. – Vol. 12. – № 3. – P. 204–212. – DOI 10.1134/S1995425519030065.
214. Lacustrine charcoal peaks provide an accurate record of surface wildfires in a North European boreal forest / G. Magne, B. Brossier, E. Gandouin [et al.] // *The Holocene*. – 2020. – Vol. 30. – № 3. – P. 380-388. – DOI:10.1177/0959683619887420.
215. Lloret, E. The effect of forest fire on vegetation / E. Lloret, P. H. Zedler // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 257-295 – DOI 10.1201/9781439843338.
216. Long-distance transport of macroscopic charcoal by an intensive crown fire in the Swiss Alps-implications for fire history reconstruction / W. Tinner, S. Hofstetter, F. Zeugin [et al.] // *The Holocene*. – 2006. – Vol. 16. – № 2. – P. 287–292. – DOI 10.1191/0959683606hl925rr.
217. Long term fire frequency not linked to prehistoric occupations in northern Swedish boreal forest / C. Carcaillet, I. Bergman, S. Delorme [et al.] // *Ecology*. – 2007. – Vol. 88. – № 2. – P. 465–477. – DOI 10.1890/0012-9658(2007)88[465:LFFNLT]2.0.CO;2.
218. Long-term fire regime estimated from soil charcoal in coastal temperate rainforests / K. Lertzman, D. Gavin, D. Hallet [et al.] // *Ecology and Society*. – 2002. – Vol. 6 – № 2. – P. 1–13. – DOI 10.5751/ES-00432-060205.
219. Long-term restoration strategies and techniques / V. R. Valejo, I. Serrasolses, J. A. Alloza [et al.] // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P. R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5 – P. 373-398. – DOI 10.1201/9781439843338-c14.
220. Luis-Calabuig, E. Seedling regeneration of two cistus species after experimental disturbances / E. Luis-Calabuig, R. Tarrega, R. Alonso // *Int. J. Wildland Fire* – 1996. – Vol. 6. – № 1. – P. 13-19. – DOI 10.1071/WF9960013.
221. Lupia, R. Palaeobotanical data from fossil charcoal: an actualistic study of seed plant reproductive structures / R. Lupia // *Palaios* – 1995. – Vol. 10. – № 5. – P. 465-477. – DOI 10.2307/3515048.
222. MacDonald, L. H. Effects of forest fires and post-fire rehabilitation: A Colorado case study / L. H. MacDonald, I. J. Larsen // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 423-452. – DOI 10.1201/9781439843338-c16.
223. Macrocharcoal signals in Histosols reveal wildfire history of vast Western Siberian forest-peatland complexes / V. Startsev, N. Gorbach, A. Mazur [et al.] // *Plants*. – 2022 (b). – Vol. 11. P. 3478. – DOI 10.3390/plants11243478.

224. Marlon, J. R. What the past can say about the present and future of fire / J. R. Marlon // *Quaternary Research*. – 2020. – Vol. 96. – P. 66-87. – DOI 10.1017/qua.2020.48
225. Masrur, A. Circumpolar spatio-temporal patterns and contributing climatic factors of wildfire activity in the Arctic tundra from 2001–2015 / A. Masrur, A. N. Petrov, J. DeGroot // *Environmental Research Letters*. – 2018. – Vol. 13. – № 1. – P. 014019 – DOI: 10.1088/1748-9326/aa9a76.
226. Mercer, G. N. Plumes above line fires in a cross wind / G. N. Mercer, R. O. Weber // *Int. J. Wildland Fire*. – 1994. – Vol. 4. – № 4. – P. 201-207. – DOI:10.1071/WF9940201.
227. Minnich, R. A. Wildland fire and chaparral succession along the California-Baja California boundary / R. A. Minnich, C. J. Bahre // *Int. J. Wildland Fire*. – 1995. – Vol. 5. – № 1. – P. 13-24. – DOI 10.1071/WF9950013.
228. Mid-and Late Holocene vegetation dynamics and fire history in the boreal forest of European Russia: A case study from Meshchera Lowlands / E. Y. Novenko, A. N. Tsyganov, E. M. Volkova [et al.] // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2016. – Vol. 459. – № 2. – P. 570–584. – DOI 10.1016/j.palaeo.2016.08.004.
229. Moody J.A. Forest Fire Effects on Geomorphic Processes / J. A. Moody, D. A. Martin// *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies: / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud*. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 41-79. – DOI 10.1201/9781439843338.
230. Munsell Soil Color Charts, 2009. USA.
231. Nobel, J. C. Behaviour of a very fast grassland wildfire on the Riverine plain of southeastern Australia / J. C. Nobel // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 3. – P. 189 – 196. – DOI 10.1071/WF9910189.
232. North Atlantic-Fennoscandian Holocene climate trends and mechanisms / H. P. Sejrup, H. Seppä, N. P. McKay [et al.] // *Quaternary Science Reviews*. – 2016. – Vol. 147. № 1. –P. 365-378. – DOI 10.1016/j.quascirev.2016.06.005.
233. Novák, J. Unusual vegetation stability in a lowland pine forest area (Doksy region, Czech Republic) / J. Novak, J. Sádlo, H. Svobodová-Svitavská // *The Holocene*. – 2012. – Vol. 22. – № 8. – P. 947–955. – DOI 10.1177/0959683611434219.
234. Ohlson, M. Interpretation of the charcoal record in forest soils: Forest fires and their production and deposition of macroscopic charcoal / M. Ohlson, E. Tryterud // *The Holocene*. – 2000. – Vol. 10. – № 4. – P. 519–525. – DOI 10.1191/095968300667442551.

235. Ojeda F. Postfire regeneration of a Mediterranean Heathland in Southern Spain / F. Ojeda, T. Marañon, J. Arroyo // *Int. J. Wildland Fire* – 1996. – Vol. 6. – № 4. – P. 191-198. DOI 10.1071/WF9960191.
236. Organic matter of cultural layers as a material for radiocarbon dating / E. Zazovskaya, V. Shishkov, A. V. Dolgikh [et al.] // *Radiocarbon*. – 2017. – Vol. 59. – № 6. – P. 1931-1944. – DOI 10.1017/RDC.2017.134.
237. Ouyang, L. Effects of amendment of different biochars on soil carbon mineralisation and sequestration / L. Ouyang, L. Yu, R. Zhang // *Soil Research*. – 2014. – Vol. 52. – № 1. P. 46-54. – DOI 10.1071/SR13186.
238. Postfire growth of *Pseudotsuga menziesii* and *Pinus contorta* in the northern Rocky Mountains, USA / D. L. Peterson, M. J. Arbaugh, G. H. Pollock, L. J. Robinson // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 1. – P. 63 – 71. – DOI 10.1071/WF9910063.
239. Potter, B. E. Atmospheric Properties Associated with Large Wildfires / B. E. Potter // *Int. J. Wildland Fire*. – 1996. – Vol. 6. – № 2. – P. 71-76. – DOI 10.1071/WF9960071.
240. Pyne, S. J. *Introduction to Wildland Fire*. 2nd edition. / S. J. Pyne, P. L. Andrews, R. D. Laven // NY: John Wiley and Sons, Inc 1996. – 769 p. – ISBN 0471549134, 9780471549130.
241. Quantitative studies on charcoalification: Physical and chemical changes of charring wood / Li Gang, L. Gao, F. Lui [et al.] // *Fundamental Research* – 2022. In Press. – DOI 10.1016/j.fmre.2022.05.014.
242. Reconstructions of biomass burning from sediment charcoal records to improve data-model comparisons / J. R. Marlon, R. Kelly, A.-L. Daniau [et al.] // *Biogeosciences*. – 2016. – Vol. 13. – № 11. – P. 3225–3244. – DOI 10.5194/bg-13-3225-2016.
243. Reconstruction of the long-term fire history of an old-growth deciduous forest in Southern Québec, Canada, from charred wood in mineral soils / B. Talon, S Payette, L. Fillion, A. Delwaide // *Quaternary Research*. – 2005. – Vol. 64. – № 1. – P. 36–43. – DOI 10.1016/j.yqres.2005.03.003.
244. Relationships between charcoal particles in air and sediments in West-central Siberia / J. S. Clark, J. Lynch, B. J. Stock, J. G. Goldammer // *The Holocene*. – 1998. – Vol. 8. – № 1. – P. 19–29. – DOI 10.1191/095968398672501165.
245. Robichaud, P. R. Post-fire stabilization and rehabilitation. // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 299-320. – DOI 10.1201/9781439843338.

246. Robin, V. Contribution to the reconstruction of central European fire history, based on the soil charcoal analysis of study sites in northern and central Germany / V. Robin, O. Nelle // *Vegetation History and Archaeobotany*. – 2014. – Vol. 23. – Iss. S1. – P. 51–65. – DOI 10.1007/s00334-014-0438-2
247. Rothermel, R. C. Predicting behavior of the 1988 Yellowstone Fires: Projections versus reality / R. C. Rothermel // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 1. – P. 1-10. – DOI 10.1071/WF9910001.
248. Ryan, K. C. Basal injury from smoldering fires in mature *Pinus Ponderosa* laws / K. C. Ryan, W. H. Frandsen // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 2. – P. 107– 118. – DOI 10.1071/WF9910107.
249. Sander, M. Characterization of charcoal adsorption sites for aromatic compounds: Insights drawn from single-solute and bi-solute competitive experiments / M. Sander, J. J. Pignatello // *Environmental Science and Technology*. – 2005. – Vol. 39. – № 6. – P. 1606–1615. – DOI 10.1021/es049135l.
250. Scott, A. C. The Pre-Quaternary history of fire / A. C. Scott // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2000 (a). – Vol. 164 – № 1. – P. 281-329. DOI: 10.1016/S0031-0182(00)00192-9.
251. Scott, A. C. Fossil Plants / A. S. Scott // *The Oxford Companion to the Earth* / Eds. P. L. Skinner, B. J Hancock. – Oxford University Press, 2000(b). – P. 364-371. – ISBN 0198540396.
252. Scott, A. C. Preservation by fire / A. C. Scott // *Palaeobiology II* / Eds. P. J. Crowther. – Oxford Blackwell Publishing, 2001 – P. 277-280. – ISBN: 9780632051496. – DOI 10.1002/9780470999295ch.62.
253. Scott, A. C. Forest Fire in the Fossil Record / A. C. Scott // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 1-37 – DOI 10.1201/9781439843338.
254. Scott, A.C., T.P. Jones. Microscopical observations of recent and fossil charcoal // *Microscopy and Analysis*, 25, 1991, 13-15.
255. Seasonal and site-specific variation in vapour and aerosol phase PAHs over Flanders (Belgium) and their relation with anthropogenic activities / T. D. Ravindra, L. Bees, E. Wouters [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2006. – Vol. 40. – Iss. 4. – P. 771-785. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2005.10.011.

256. Sediment records of biomass burning and global change / Eds. J. S. Clark, H. Cachier, J.C. Goldammer, B. Stocks. – Springer Berlin, Heidelberg, 1997 – ASII, Vol. 51. – XII, 492 p. – DOI 10.1007/978-3-642-59171-6. – ISBN 978-3-642-63881-7.
257. Shakesby, R. A. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent / R. A. Shakesby, S. H. Doerr // *Earth-Science Reviews*. – 2006. – Vol. 74. – № 3. – P. 269–307. DOI: 10.1016/j.earscirev.2005.10.006.
258. Shortened fire intervals stimulate carbon losses from heterotrophic respiration and reduce understorey plant productivity in boreal forests / J. A. Shabaga, R. Bracho, P. A. Klockow [et al.] // *Ecosystems*. – 2022. – Vol. 26. – №1. –P. 318-343. – DOI: 10.1007/s10021-022-00761-w.
259. Sieg, C. H. The role of prescribed burning in regenerating *Quercus macrocarpa* and associated woody plants in Stringer Woodlands in the Black Hills, South Dakota / C. H. Sieg, H. A. Wright // *Int. J. Wildland Fire*. – 1996. – Vol. 6. – № 1. P. 21-29. – DOI 10.1071/WF9960021.
260. Simard, A. J. Fire severity, changing scales, and how things hang together / A. J. Simard // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 1. – P. 23-34. – DOI 10.1071/WF9910023.
261. Simoneit, B. Biomass burning – A review of organic tracers for smoke from incomplete combustion / B. Simoneit // *Applied Geochemistry*. – 2002. – Vol. 17. – № 3. – P. 129-162. – DOI 10.1016/S0883-2927(01)00061-0.
262. Sjörgen Per J. E. An overview of Holocene climate reconstructions in northernmost Fennoscandia. A contribution to the Stone Age Demographics project / Per J. E. Sjörgen // *Septentrio Reports. Stone Age Demographics*. –2021. – Iss. 3. – 31 p. – DOI 10.7557/7.5747.
263. Soil temperatures during and following low-intensity prescribed burning in a *Eucalyptus pauciflora* forest / R. J. Raison, P. V. Woods, B. F. Jacobsen, A. V. Bary // *Australian Journal of Soil Research*. – 1986. – Vol. 24. – № 1. – P. 33-47. – DOI 10.1071/SR9860033.
264. Soil erosion after forest fire / D. F. Scott, M. P. Curran, P. R. Robichaud, J. W. Wagenbrenner // *Fire effects on soils and restoration strategies* / Eds. A. Cedra, P. R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. P. 185-195. – DOI 10.1201/9781439843338.
265. Talon, B. Reconstruction of Holocene high-altitude vegetation cover in the French southern Alps: Evidence from soil charcoal / B. Talon // *The Holocene*. – 2010. – Vol. 20 – № 1. – P. 35–44. – DOI:10.1177/0959683609348842.
266. The applicability of Raman spectroscopy in the assessment of palaeowildfire intensity / T. Theurer, D. K. Muirhead, D. Jolley, D. Mauquoy // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2021. – Vol. 570. P. 110363. – DOI 10.1016/j.palaeo.2021.110363.

267. The climate of Europe during the Holocene: A gridded pollen-based reconstruction and its multi-proxy evaluation / A. Mayri, B. A. S. Davis, P. M. Collins, J. O. Kaplan // *Quaternary Science Reviews*. – 2015. – Vol. 112. – № 6. – P. 109-127. – DOI 10.1016/j.quascirev.2015.01.013.
268. The climate, the fuel and the land use: Long-term regional variability of biomass burning in boreal forest / C. Molinari, V. Lehsten, O. Blarquez [et al.] // *Global Change Biology*. – 2018. – Vol. 24. – № 10. – P. 4929-4945. – DOI 10.1111/gcb.14380.
269. The ecology of smoke particulates and charcoal residue from forest and grassland fires : A preliminary atlas (Iss. 2-5). / Eds. E. V. Komarek, B. B. Komarek, T. C. Carlisle. – Tall Timbers Research Station, 1973. – P. 1-75. – ISBN 0598257047. – ISBN – 9780598257048.
270. The Portuguese experience in managing fire effects / A. J. D. Ferreira, J. S. Silva, C. Coelho [et al.] // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 401-422. – DOI 10.1201/9781439843338-c15.
271. The Pyrogenic Carbon Cycle / M. I. Bird, J. G. Wynn, G. Saiz [et al.] // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 2014. – Vol. 43. – № 1. – P. 150223150959000. – DOI 10.1146/annurev-earth-060614-105038.
272. The role of climate, forest fires and human population size in Holocene vegetation dynamics in Fennoscandia / N. Kuosmanen, L. Marquer, M. Tallavaara [et al.] // *Journal of Vegetation Science*. – 2018. – Vol. 29. – № 3. – P. 82–392. – DOI 10.1111/jvs.12601.
273. The role of fires in the Holocene landscape dynamics of the southeastern part of Meshchera Lowlands / K. N. Dyakonov, E. Y. Novenko, I. V. Mironenko [et al.] // *Doklady Earth Sciences*. – 2017. – Vol. 477. – № 1. – P. 1336–1342. – DOI 10.1134/S1028334X17110125.
274. The taphonomic characterization of a charcoal production platform. Contribution of an innovative pair of methods: Raman analysis and micromorphology / A. Dupin, D. Sordoillet, K. Freville [et al.] // *Journal of Archaeological Science*. – 2019. – Vol. 107. – P. 87-99. – DOI 10.1016/J.JAS.2019.05.003.
275. Thermokarst acceleration in Arctic tundra driven by climate change and fire disturbance / Y. Cheng, M. J. Lara, B. M. Jones [et al.] // *One Earth*. – 2021 – Vol. 4. – P.1-12. – DOI 10.1016/j.oneear.2021.11.011.
276. Thomas, P. A. Response of succulent to fire: A review / P. A. Thomas // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 1. – P. 11-22. – DOI 10.1071/WF9910011.
277. Tongway, D. J. The effect of fire on the soil in a degraded semi-arid woodland. III. Nutrient pool sizes, biological activity and herbage response / D. J. Tongway, K. C. Hodgkinson //

- Australian Journal of Soil Research. –1992. – Vol. 30. – № 1. – P. 17-26. – DOI 10.1071/SR9920017.
278. Touflan, P. Soil charcoal analysis: A reliable tool for spatially precise studies of past forest dynamics: A case study in the French southern Alps / P. Touflan, B. Talon, K. Walsh // *The Holocene*. – 2010. – Vol. 20. – № 1. – P. 45–52. – DOI 10.1177/0959683609348900.
279. Ubeda, X. Physical and Chemical Effects of Fire on Soil / X. Ubeda, L. R. Outeiro // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P. R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 105-132. – DOI 10.1201/9781439843338.
280. Vaughan, A. Controls on the deposition of charcoal; implications for sedimentary accumulations of fusain / A. Vaughan, G. J. Nichols // *Journal of Sedimentary Research*. – 1995. – Vol. 65A. – № 1. P. 129-135. – DOI 10.1306/D426804A-2B26-11D7-8648000102C1865D.
281. Viegas, D. X. Wall shear-stress as a parameter to correlate the rate of spread of a wind induced forest fire / D. X. Viegas, L. P. C. Neto // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 3. – P. 177– 188. – DOI 10.1071/WF9910177.
282. Viney, N. R. Estimating fuel moisture response times from field observations / N. R. Viney, E. A. Cathpole // *Int. J. Wildland Fire*. – 1991. – Vol. 1. – № 4. – P. 211– 214. – DOI /10.1071/WF9910211.
283. Wildfires and seasonal aridity recorded in Late Cretaceous strata from south-eastern Arizona, USA / D. B. Finklestein, L. M. Pratt, T. M. Curtin, S. C. Brassel // *Sedimentology*. – 2005. – Vol. 52. – № 3. – P. 587–599. – DOI 10.1111/j.1365-3091.2005.00712.x.
284. Wildland fire in ecosystems: Effect of fire on soil and water : Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-32-vol. 4. US Department of Agriculture / Eds. N. G. Daniel, R. C. Kevin D. F. Leonard (revised 2008) // Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2005 – 250 p.
285. Wohlgemuth, P. M. Rehabilitation strategies after fire: The California, USA experience / P. M. Wohlgemuth, J. L. Beyers, K. R. Hubbert // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* / Eds. A. Cedra, P. R. Robichaud. – Science Publishers, 2009. – Vol. 5. – P. 511-535. – DOI 10.1201/9781439843338
286. Zobitz J., Aaltonen H., Zhou X., Berninger F., Pumpanen J., Köster K. Comparing an exponential respiration model to alternative models for soil respiration components in a Canadian wildfire chronosequence (FireResp v1.0) / J. Zobits, H. Aaltonen, X. Zhou [et al.] // *Geoscientific Model Development*. – 2021. – Vol. 14. – № 10. – P. 6605-6622. – DOI: 10.5194/gmd-14-6605-2021.

Интернет-источники:

287. Государственный природный заповедник «Пинежский» [сайт]. – Пинежский заповедник, 2009. – URL: <http://www.zarovednik-pinega.ru/> (дата обращения 5.10.2019).
288. Диагностика почв: учебное пособие, [электронное издание сетевого распространения] /М. И. Герасимова, М. А. Смирнова. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. – 277 с. URL: <https://bookonlime.ru/node/43776>. – DOI [10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1213-6-2022-277](https://doi.org/10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1213-6-2022-277). – ISBN 978-5-7913-1213-6 (дата обращения 15.10.2020).
289. Карта пожаров в реальном времени : [сайт]. – Москва, 2023, группа компаний «СКАНЭКС».– URL: <https://fires.ru/> (дата обращения 10.05.23).
290. ООПТ России. Информационно-справочная система [сайт]. – Москва, 2011. – <http://oopt.info/> (дата обращения 20.09.2022).
291. Печоро-Илычский государственный природный биосферный заповедник [сайт]. – Печоро-Илычский заповедник, 2022. – URL: <https://www.pechora-reserve.ru/> (дата обращения 7.10.2022).
292. International Paleofire Network (IPN) : [сайт]. – Безансон, Ун-т Франш-Конте, 2015 – URL: <https://www.paleofire.org/> (дата обращения 11.05.23).
293. OxCal v. 4.4 : [сайт]. – Oxford, 2022. – URL: <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html> (дата обращения 15.11.22).

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Материалы и методы исследования

Приложение А.1

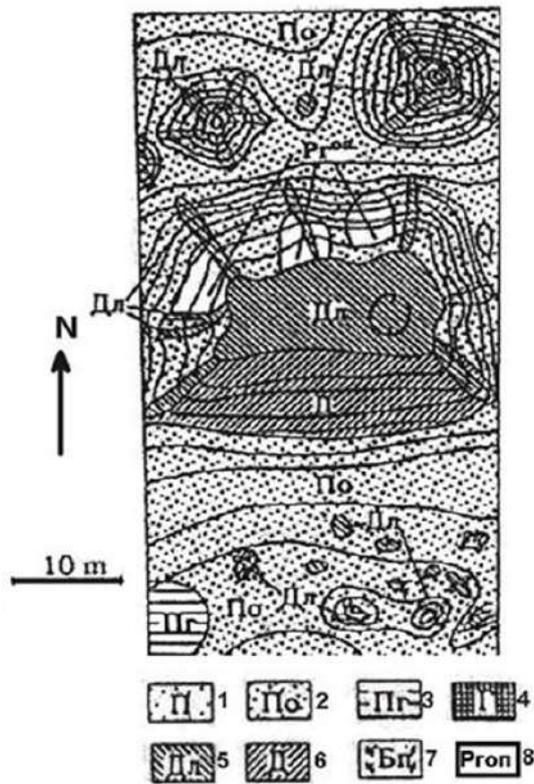
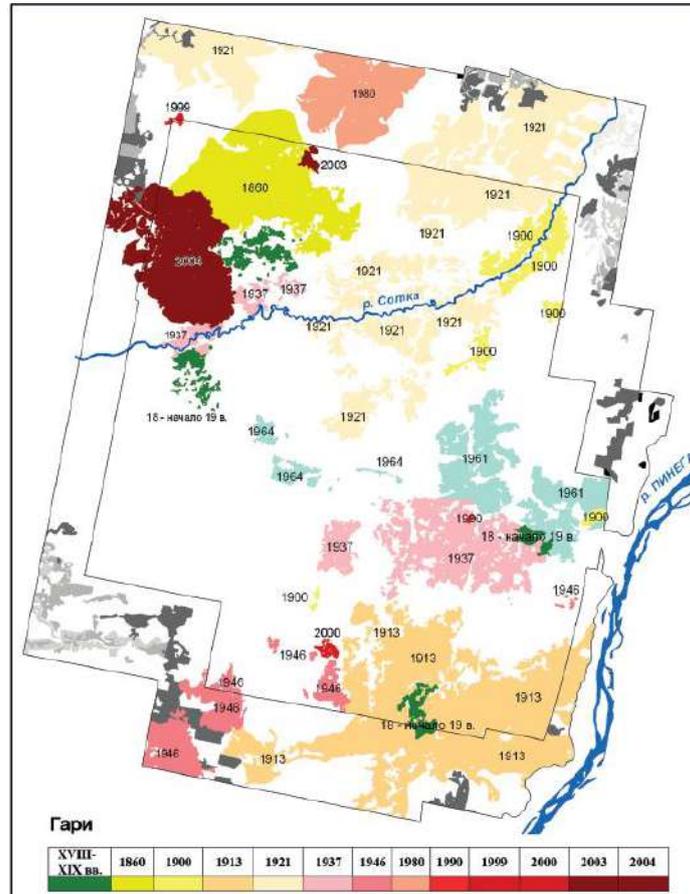


Рисунок А.1. План нарушений растительного покрова Пинежского заповедника (сверху) по С.Ю. Попову и Л.В. Пучниной (2017) и типичная структура почвенного покрова заповедника в зоне карстового рельефа, по С.В. Горячкину (2010)

Приложение А.2

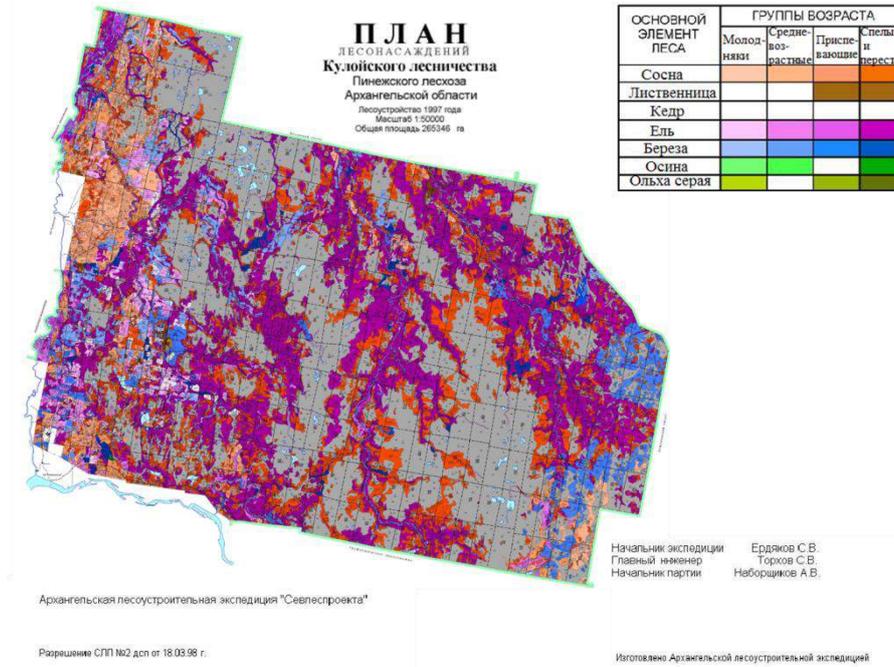


Рисунок А.2. План лесонасаждений Кулойского лесничества

Приложение А.3

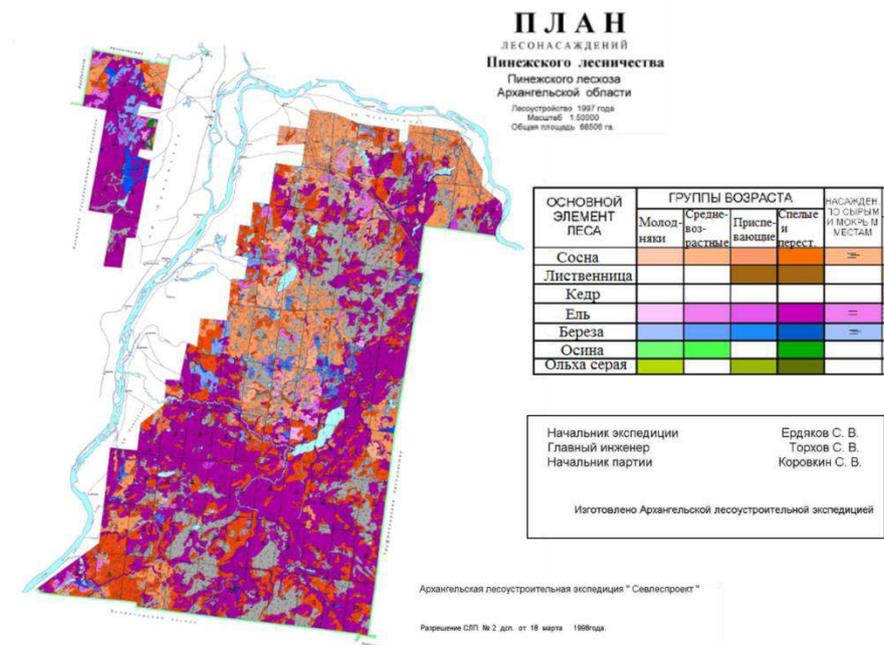


Рисунок А.3. План лесонасаждений Пинежского лесничества

Приложение А.4

Таблица А.4. Сравнение названий горизонтов основных почвенных типов, подверженных интервальному и непериодическому пирогенезу, по классификациям КиДП СССР 1977 г., КиДПР 2004 г. и Почвенному определителю..., 2008 г.

Подзолистая, торфяно-подзолистая-глеевые и дерново-подзолистые почвы		
КиДП СССР 1977	КиДПР 2004 г.; Почвенный определитель 2008 г.	Генетико-субстантивная особенность горизонта.
A0*	O (L, H, F); Oг; Oао; Oруг	Подстилка разной степени разложения.
T*	TE; TO; TJ; Tруг	Торфа разного типа, подстилаемые минеральным горизонтом.
A1	AУ; AU; АУруг	Гумусовый горизонт, возможен дерновый процесс.
A1A2	AYEL; AEL	Переходный к элювиальному. Некоторая "элювиированность" гумусового горизонта
A2; A2g	EL, Elруг, Ely; Elg	Элювиальный горизонт. Процессы лессиважа и партлювации.
A2B1; A2B1g	BEL; BELg	Переходный к текстурному, может характеризоваться пятнистостью. Зона элювиальной деградации BT.
B2; B2g	BT; BTg	Текстурный. Зона аккумуляции из горизонта EL, обилие кутан, структура близка или соответствует призматической.
BC; BCg	BC; BCg	Переходный к породе
C; Cg	C; Cg; G	Порода
Подзолы, подзолы иллювиально железистые, иллювиально-гумусово-железистые, дерново-подзолы, торфяно-подзолы глеевые		
КиДП СССР 1977	КиДПР 2004 г.; Почвенный определитель 2008 г.	Генетико-субстантивная особенность горизонта.
A0*	O (L, H, F); Oг; Oао; Oруг	Подстилка разной степени разложения.
T*	TE; TO; TJ; Tруг	Торфа разного типа, подстилаемые минеральным горизонтом.
A1*	AУ; АУруг	Гумусовый горизонт, возможен дерновый процесс.

Таблица А.4. Продолжение

КиДП СССР 1977	КиДПР 2004 г.; Почвенный определитель 2008 г.	Генетико-субстантивная особенность горизонта.
A2*	E; E _y ; E _{yp} ; E _h i	Вынос материала с его разрушением
B _{hf} ; B _{hfg}	B _{hF} ; B _h ; B _F ; B _{hF} _{yp} , B _{hF} _g	Альфегумусовый горизонт - процесс иллювиования
BC; BC _g	BC; BC _g	Переходный к породе
C; C _g	C; C _g ; G	Порода
Подбуры, дерново-подбуры, торфяно-подбуры глеевые		
КиДП СССР 1977	КиДПР 2004 г.; Почвенный определитель 2008 г.	Генетико-субстантивная особенность горизонта.
A ₀	O (L, H, F); O _t ; O _{ao} ; O _{yp}	Подстилка разной степени разложения
T*	T _E ; T _O ; T _J ; T _{yp}	Торфа разного типа, подстилаемые минеральным горизонтом.
A ₁ *	A _Y ; A _Y _{yp}	Гумусовый горизонт, возможен дерновый процесс.
B _{hf} ; B _{hfg}	B _{hF} ; B _h ; B _F ; B _{hF} _{yp} , B _{hF} _g	Альфегумусовый горизонт
BC; BC _g	BC; BC _g	Переходный к породе
C; C _g	C; C _g ; G	Порода
* - горизонты, которые могут отсутствовать в профиле, в том числе по причине пожара		

Приложение А.5.1.



Рисунок А.5.1. Принципы отбора образцов, примененные для пирогенных почвенных палеоархивов (через 10 см) и для современных хронорядов пожаров (по горизонтам). Красные маркеры – линейный отбор образцов; белые маркеры – отбор образцов из морфонов.

Приложение А.5.2.

Классификации пожаров

Мелехов, 1947. По ярусам

I. Низовые пожары	II. Верховые пожары	III. Подземные пожары
Подстилично-гумусовые: 1) устойчивые	Вершинные: 8) устойчивые, 9) беглые	Торфяные: 13) устойчивые
Напочвенные: 2) устойчивые, 3) беглые	Повальные: 10) устойчивые, 11) беглые	
Подлесно-кустарниковые: 4) устойчивые, 5) беглые	Стволовые: 12) устойчивые	
Валежные и пневые: 6) устойчивые, 7) беглые		

По ландшафтам и структуре

М.А. Сафронова (1971)
Ландшафтные типы пожаров
Тундровые (Т)
Собственно лесные (Л)
Степные (С)
Кустарниковые (К)
Луговые (Л)
Болотно-моховые (Б)
Болотно-травяные (Н)
Пожары в редицах (Р)
Пожары в сухостойниках (Г)
Пожары на вырубках (В)

Н.П. Курбатского (1970)
1. Однородные
1.1. Тундровые
1.2. Лесные
1.3. Степные
1.4. Кустарниковые
1.5. Луговые
1.6. Болотно-моховые
1.7. Болотно-травяные
1.8. Болотно-лесные
2. Смешанные

Классификация лесных пожаров по интенсивности горения

Вид лесного пожара	Параметры пожара	Подвид лесного пожара		
		слабый	средний	сильный
Низовой	Скорость распространения, м/мин	До 1	1-3	Свыше 3
Верховой	Скорость распространения, м/мин	До 3	3-100	Свыше 100
Торфяной	Глубина прогорания, см	До 25	25-50	Более 50

Рисунок 5.2. Принципы классификации пожаров предшественников. По Залесову (2011).

Приложение А.6.

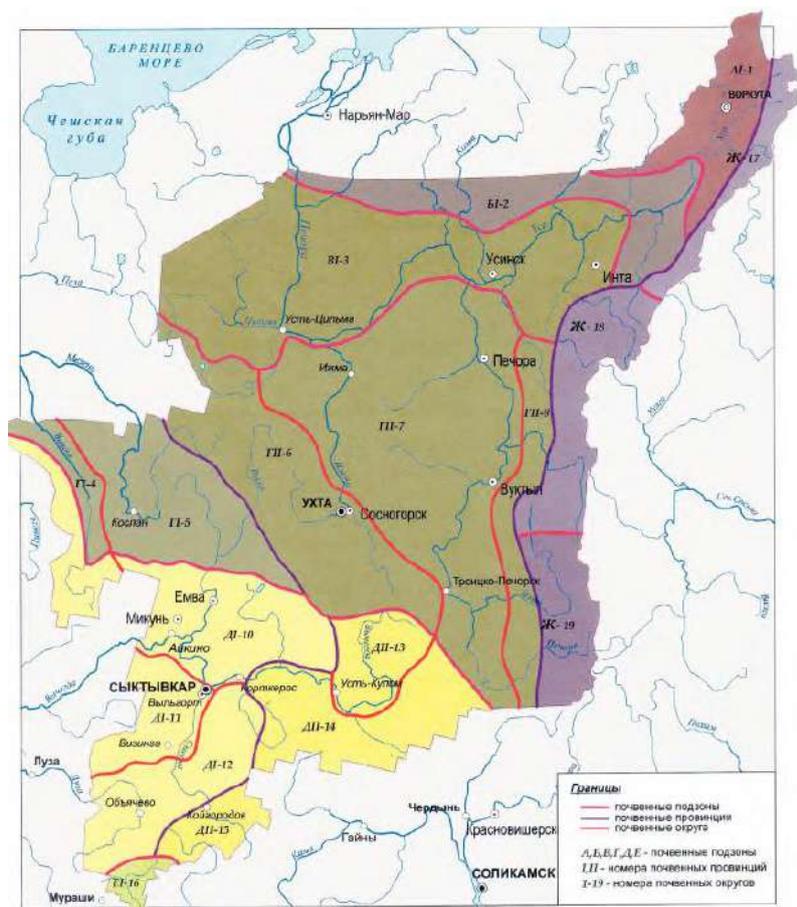
Таблица А.6. Сравнение концентрации антракомассы после мокрого и сухого просеивания в горизонтах песчаной почвы пирогенного почвенного палеоархива.

№	Глубина, см*	Мокрое просеивание	Сухое просеивание
		Концентрация антракомассы на вес почвы, %	Концентрация антракомассы на вес почвы, %
1	4-10	1.29	1.29
60	75-85	17.38	17.39
15	130-155	0.02	0.02
7	30-33	0.94	0.93
14	110-130	1.34	1.35
4	10-20	0.13	0.13
51	210-230	0.18	0.11
11	71-90	0.42	0.44
12	63-68	0.07	0.07
8	33-41	0.52	0.52

Статистическое сравнение	
$\mu(\text{мокрое}) =$	2.229
$\mu(\text{сухое}) =$	2.225
$S^2(\text{мокрое}) =$	28.581
$S^2(\text{сухое}) =$	28.640
$S(\text{мокрое}) =$	5.346
$S(\text{сухое}) =$	5.352
$V(\text{мокрое}) =$	2
$V(\text{сухое}) =$	2
$Med(\text{мокрое}) =$	0.47
$Med(\text{сухое}) =$	0.48
$r(\text{мокрое; сухое}) \approx$	1.00
$R^2 \approx$	1.00

* – разброс в глубинах горизонтов объясняется анализом разных стенок (А, В и С) общего разреза

Приложение А.7



Масштаб 1 : 6 000 000

Авторы: И.В. Забова, В.Г. Казиков

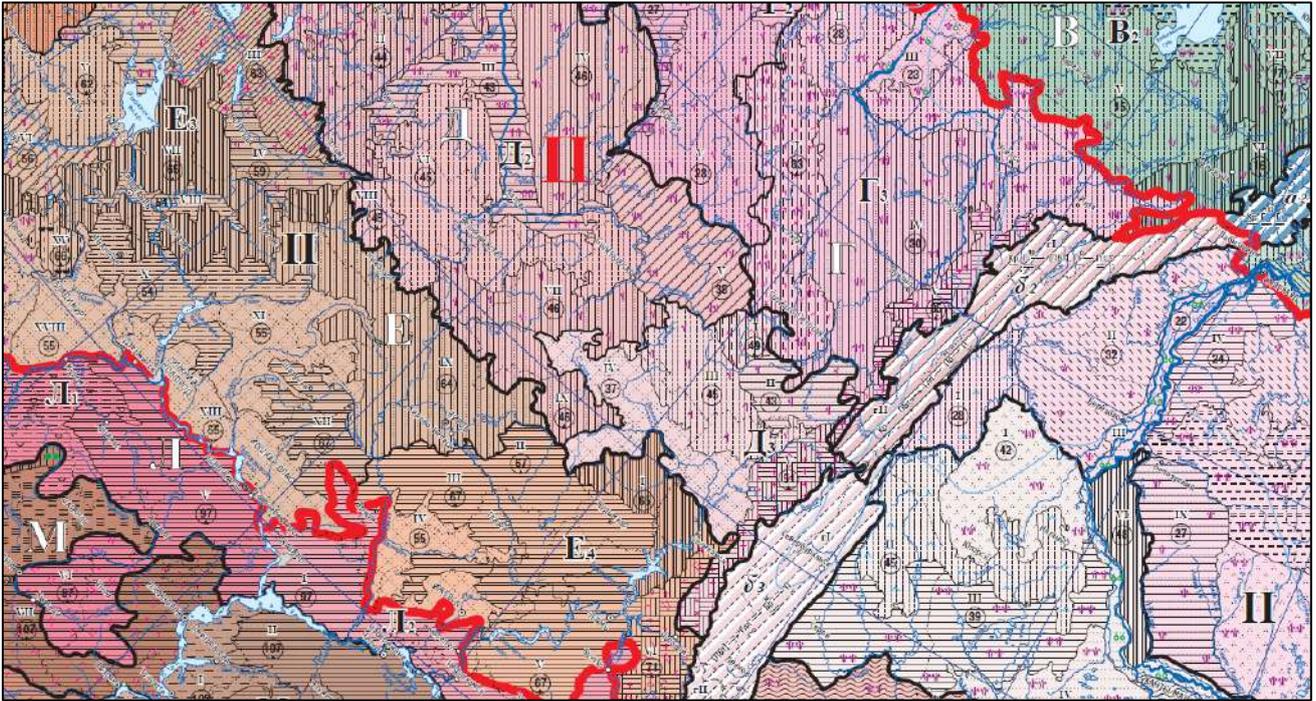


Рисунок А.7а. Почвенно-географическое районирование Республики Коми по КиДП СССР 1977 г. [Атлас почв Республики Коми, 2010] и по Карте почвенно-экологического районирования Российской Федерации [Карта почвенно-экологического..., 2019].

Условные обозначения к карте «Почвенно-географическое районирование Республики Коми»

А – Подзона южной тундры

АI – Большеземельская провинция:

АI-1. Воркутинский округ тундровых поверхностно-глеевых, торфянисто- и торфяно-тундровых глеевых мерзлотных почв

Б – Подзона лесотундры

БИ – Канино-Печорская провинция:

БИ-2. Колва-Усинский округ тундровых поверхностно-глеевых оподзоленных, крупнобугристых болотных комплексов с тундровыми остаточнo-торфяными мерзлотными (бугров) и торфяно-болотными (мочажин), глееподзолистых потечно-гумусовых почв.

В – Подзона крайнесеверной тайги

ВI – Печоро-Усинская провинция:

ВI-3. Печоро-Усинский округ болотно-подзолистых, глееподзолистых, болотных торфяных и тундрово-болотных почв.

Г – Подзона северной тайги

ГI – Мезень-Тиманская провинция:

ГI-4. Вашкинский округ болотно-подзолистых, болотных торфяных почв, иллювиально-гумусово-железистых подзолов;

ГI-5. Мезень-Вымский округ глееподзолистых, болотно-подзолистых почв, иллювиально-гумусово-железистых подзолов.

ГII – Тимано-Печорская провинция:

ГII-6. Тиманский округ глееподзолистых, болотно-подзолистых, горных лесных глееподзолистых иллювиально-гумусовых почв;

ГII-7. Ижма-Печорский округ подзолов иллювиально-гумусово-железистых, торфянисто- и торфяно-подзолисто-глеевых иллювиально-гумусовых, глееподзолистых и болотно-подзолистых почв.

ГII-8. Подгорно-Уральский округ глееподзолистых и горных лесных глееподзолистых иллювиально-гумусовых почв.

Д – Подзона средней тайги

ДИ – Сысола-Вычегодская провинция:

ДИ-9. Вашка-Пинежский округ болотно-подзолистых и глееподзолистых почв;

ДИ-10. Вымь-Вычегодский округ типичных подзолистых, иллювиально-железистых подзолов, торфянисто-подзолисто-глееватых иллювиально-гумусовых почв;

ДИ-11. Сысольский округ типичных подзолистых и торфянисто-подзолисто-глееватых почв;

ДИ-12. Луза-Сысольский округ типичных подзолистых и болотно-подзолистых почв.

ДП – Вычегодская провинция:

ДП-13. Южно-Тиманский округ типичных подзолистых и торфянисто-подзолисто-глееватых почв;

ДП-14. Верхневыхегодский округ болотно-подзолистых и типичных подзолистых почв;

ДП-15. Верхнесысольский округ иллювиально-железистых подзолов и торфянисто-подзолисто-глееватых иллювиально-гумусовых почв.

Е – Подзона южной тайги

Е1 – Среднерусская провинция:

Е1-16. Летский округ дерново-подзолистых почв.

Ж – Уральская горная провинция:

Ж-17. Округ Полярного Урала горно-тундровых почв и гольцов;

Ж-18. Округ Приполярного Урала горно-тундровых и горно-лесных глееподзолистых потечно-гумусовых почв;

Ж-19. Округ Северного Урала горно-лесных глееподзолистых иллювиально-гумусовых и горно-тундровых почв.

Условные обозначения к карте «Почвенно-экологического районирования Российской Федерации»

П-бореальный климатический пояс, Европейско-Западно-Сибирская таежно лесная область.

В2-подзона тундровых глеевых почв и подбуров субарктической тундры, Канинско-Печерская провинция.

Г2-подзона глееподзолистых почв глееземов и подзолов северной тайги, Онежско-Тиманская провинция.

Г3- подзона глееподзолистых почв глееземов и подзолов северной тайги, Тимано-Печорская провинция.

Д2-подзона подзолистых почв средней тайги, Онего-Двинская провинция.

Д3- подзона подзолистых почв средней тайги, Камско-Верхневыхегодская провинция

Е3-зона дерново-подзолистых почв южной тайги, Среднерусская южнотаежная провинция

Е4- зона дерново-подзолистых почв южной тайги, Вятско-Камская провинция

Л1-зона серых лесных почв лиственных лесов, Среднерусская широколиственно-лесная провинция

Л2- зона серых лесных почв лиственных лесов, Прикамская провинция

М2-зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых почв лесостепи, Заволжская лесостепная провинция

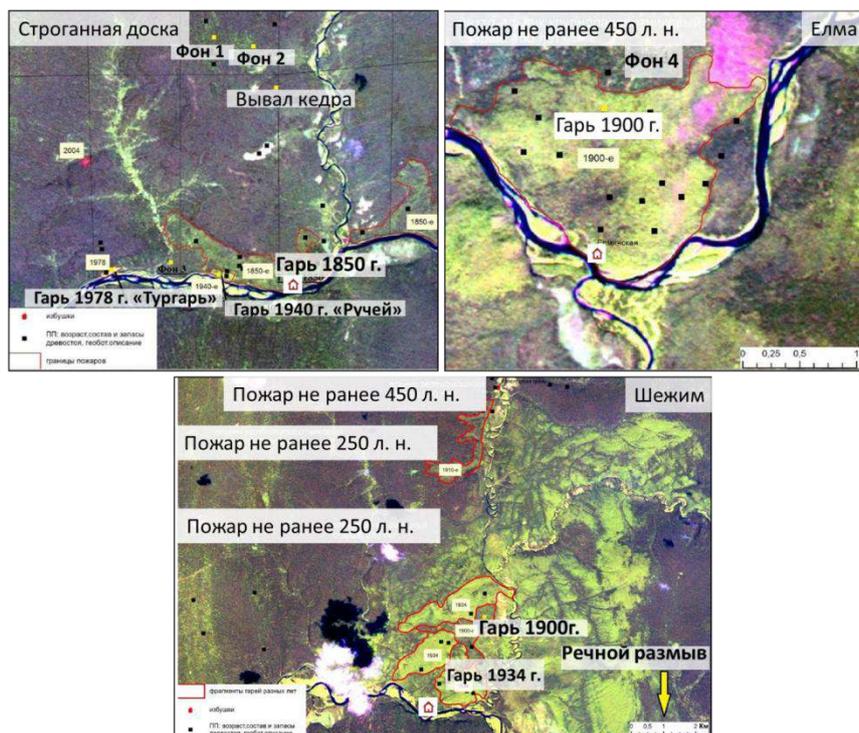


Рисунок А.7б. Участки исследования в Печоро-Илычском заповеднике. Возраст, границы пожаров и координаты предоставлены А.А. Алейниковым и А.А. Семиколенных.

Приложение А.8.

Таблица А.8.1. Общая характеристика объектов исследования в подзоне северной тайги (по данным полевых исследований и материалам Пинежского заповедника, а также Пинежского и Кулойского лесничеств). Возраст пожара дан на период 2019 г.

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей	Растительность	Возраст пожара
Пинежский заповедник, центр, плоский участок	N:64°34'9" E: 43°6'54"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Ельник-зеленомошник. Плотный подрост березы (<i>Betula pendula</i>), и ели (<i>Picea abies</i>), единичные взрослые особи лиственницы (<i>Larix sp.</i>). В моховом покрове <i>Bryidae sp.</i> с участками политрихума (<i>Polytrichum</i>)	82 года
Центр Пинежского заповедника, плоский участок	N:64°34'31" E:43°3'1"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Ельник-зеленомошник. В древесном ярусе – ель (<i>Picea abies</i>), береза (<i>Betula pendula</i>), единичные особи сосны (<i>Pinus sylvestris</i>), кусты рябины (<i>Sorbus aucuparia</i>). В травяно-кустарничковом ярусе брусника (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>), В моховом покрове <i>Bryidae sp.</i> ,	29 лет
Северо-запад Пинежского заповедника, воронка	N:64°38'28" E:42° 48'50"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Разнотравное сообщество. В травяно-кустарничковом ярусе семейство злаков (<i>Gramineae</i>), иван- чай (<i>Epilobium angustifolium</i>), малина (<i>Rubus idaeus</i>), брусника (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>), черника (<i>Vaccinium myrtillus</i>), хвощ (<i>Equisetum</i>) редкий политрихум (<i>Polytrichum sp.</i>) в моховом покрове	15 лет
Северо-запад Пинежского заповедника, повышение	N:64°38'28" E:42°48'50"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Подрост березняка разнотравного. Береза (<i>Betula pendula</i>), редкий выживший древостой сосны (<i>Pinus sylvestris</i>) и единичные выжившие особи <i>Larix sp.</i> В травяно-кустарничковом ярусе семейство злаков (<i>Gramineae</i>), иван-чай (<i>Epilobium angustifolium</i>), хвощ (<i>Equisetum sp.</i>)	15 лет
Террасы р. Кулой, плоский участок	N:64°43'45" E:43°22'48"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Разнотравье под подростом осины. Частый подрост осины <i>Populus tremula</i> и единичный подрост сосны (<i>Pinus sylvestris</i>). Злаки (<i>Gramineae sp.</i>) и вереск (<i>Calluna sp.</i>) в травяно-кустарничковом ярусе	4 года
Террасы р. Кулой, плоский участок	N:64°56'35" E:43°33'25"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Сосняк с лишайником Сосна (<i>Pinus sylvestris</i>) в древесном ярусе и кладония (<i>Cladonia stellaris</i>) в лишайниковом покрове	2 года

Таблица А.8.2. Общая характеристика объектов исследования в подзоне средней тайги.

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей	Растительность	Возраст пожара
Терраса р. Печоры, плоский участок	N:62°2'11" E: 58°58'7"	Подзолисто-глеявая типичная	Первые 30 см	Пихтовый лес с папоротником в травяном ярусе. Пихты (<i>Abies sibirica</i>), с подростом березы (<i>Betula pendula</i>) в древесном ярусе. В травяно-кустарничковом покрове осоки (<i>Carex sp.</i>) и злаки (<i>Gramineae sp.</i>), а также папоротники (<i>Polypodiophyta sp.</i>), встречаются кустарнички брусники (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>)	169 лет
Терраса р. Печоры, русло ручья	N:62°2'15" E: 58°58'40"	Бурозем оподзоленный	Первые 10 см	Плотный древостой пихты (<i>Abies sibirica</i>) и ели (<i>Picea abies</i>) с одиночными кедрами (<i>Pinus sibirica</i>) с разнотравьем папоротников, осок и герани (<i>Polypodiophyta sp.</i> , <i>Carex sp.</i> , и <i>Geranium sp.</i>)	79 лет
Терраса р. Печоры пологий склон	N:62°0'3" E: 58°46'3"	Бурозем грубогумусовый	С поверхности	Пихтово-ельник разнотравный с плотным древостоем <i>Abies sibirica</i> и <i>Picea abies</i> , с редкой <i>Betula pendula</i> и кустами <i>Sorbus aucuparia</i> среди трав доминирует герань (<i>Geranium sp.</i>)	119 лет
Терраса р. Печоры, пологий участок	N:62°6'8" E:58°24'57"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Ельник-черничник с плотным древостоем ели (<i>Picea abies</i>) и единичными березами (<i>Betula pendula</i>) в травяно-кустарничковом ярусе черника (<i>Vaccinium myrtillus</i>) и злаки (<i>Gramineae sp.</i>)	119 лет
Терраса р. Печоры, пологий участок	N:62°6'18" E:58° 25'22"	Бурозем типичный	Первые 10 см	Ельник-черничник с плотным древостоем ели (<i>Picea abies</i>) и единичной березой (<i>Betula pendula</i>). В травяно-кустарничковом ярусе черника и брусника (<i>Vaccinium myrtillus</i> и <i>Vaccinium vitis-idaea</i>), а также злаки (<i>Gramineae</i>)	85 лет
Терраса р. Печоры, высокий берег	N:62°3'54" E:58°29'05"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Елово-пихтарник брусничный с плотным древостоем ели (<i>Picea abies</i>) и пихты (<i>Abies sibirica</i>). В травяно-кустарничковом ярусе – брусника (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>) и осоки (<i>Carex sp.</i>). В моховом покрове <i>Bryidae sp.</i>	Около 50 лет
Поселок Якша	N:61°49'12" E:56°52'39"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Сосняк (<i>Pinus sylvestris</i>) лишайниковый (<i>Cladonia alpicola</i>) и брусника (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>) в кустарничковом ярусе	Около 10 лет
Поселок Якша	N:61°49'12" E:56°52'41"	Подзол иллювиально-гумусовый	Весь профиль	Ельник-зеленомошник с плотным древостоем ели (<i>Picea abies</i>) и кустарничками брусники (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>) и багульника (<i>Ledum palustre</i>), с <i>Bryidae sp.</i> в моховом покрове	Около 15 лет

Приложение А.9.

Таблица А.9.1. Общее описание участков, выбранных для изучения путей вертикальной миграции углей по почвенному профилю (Пути миг.) и пирогенной экстремальности (Пир. экстр.)

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей	Растительность	Возраст пожара	Характер рельефа	Объект исследования
Междуречье Кулой/Пинега	N: 64°44'51" E: 43°23'12"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	Около 80 лет	Днище воронки	Пути миг.
Междуречье Кулой/Пинега	N: 64°44'4" E: 43°23'1"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	Около 80 лет	Днище воронки	Пути миг.
Центр Пинежского заповедника	N:64°34'09" E:43°06'54"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	82 года	Пологоволнистый	Пути миг.
Центр Пинежского заповедника	N:64°34'31" E:43°003'01"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	29 лет	Пологоволнистый	Пути миг.
Северо-запад Пинежского заповедника,	N:64°38'28" E:42°48'50"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Разнотравье с редким древостоем	15 лет	Днище воронки	Пир. экстр.
Северо-запад Пинежского заповедника,	N:64°38'28" E:42°48'50"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Разнотравье с частым подростом	15 лет	Пологоволнистый	Пир. экстр.
Террасы р. Кулой,	N:64°56'35" E:43°33'25"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Разнотравье с частым подростом	4 года	Пологоволнистый	Пути миг. и пир. экстр.
Террасы р. Кулой,	N:64°43'45" E:43°22'48"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Лишайник с разреженным древостоем	2 года	Пологоволнистый	Пути миг. и пир. экстр.

Таблица А.9.2. Участки, в подзоне средней тайги ЕТР

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей	Растительность	Возраст пожара	Характер рельефа	Объект исследования
Терраса р. Печоры	N:62°02'11" E:58°58'07"	Подзолисто-глеявая типичная	Первые 30 см	Папоротник с мало мощной подстилкой и разреженным древостоем	169 лет	Приствольные повышения	Пути миг.
Терраса р. Печоры, русло ручья	N:62°02'15" E:58°58'40"	Бурозем оподзоленный	Первые 10 см	Разнотравье с бедной подстилкой и плотным древостоем	79 лет	Пологоволнистый	Пути миг.
Терраса р. Печоры,	N:62°00'03" E: 58°46'03"	Бурозем грубогумусированный	С поверхности	Разнотравье с бедной подстилкой и плотным древостоем	119 лет	Пологоволнистый	Пути миг.
Терраса р. Печоры,	N:62°06'08" E:58°24'57"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Ельник-черничник с плотным древостоем	119 лет	Приствольные повышения	Пути миг.

Таблица А.9.2. Продолжение

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей	Растительность	Возраст пожара	Характер рельефа	Объект исследования
Терраса р. Печоры,	N:62°06'18" E:58°25'22"	Бурозем типичный	Первые 10 см	Ельник-черничник с плотным древостоем, с примесью березы	85 лет	Плоский	Пути миг.
Терраса р. Печоры, высокий берег	N:62°03'54" E:58°29'05"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Ельник-черничник с плотным древостоем	50 лет	Приствольные повышения	Пути миг.
Поселок Якша	N:61°49'12" E:56°52'39"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Лишайник с редким древостоем	10 лет	Приствольные повышения	Пути миг.
Поселок Якша	N:61°49'12" E:46°52'41"	Подзол иллювиально-гумусовый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	15 лет	Пологоволнистый	Пути миг.

Таблица А.9.3. Участки, в подзонах северной тайги и кустарниковой тундры СЗС

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей в профиле	Растительность	Возраст пожара	Характер рельефа	Объект исследования
Тундра	N: 66°46'14" E: 74°28'3"	Торфяно-глеезём типичный	По всему профилю, фрагментарно	Лишайник	Около 10-15 лет	Пологоволнистый	Пути миг.
Тундра, близости газопровод	N:66°46'14.4" E:74°27'46"	Глеезём грубогумусированный	По всему профилю, фрагментарно	Пушицево-осоковая ассоциация	Около 10-15 лет	С локальными понижениями	Пути миг.
Тундра, близости газопровод	N:66°46'40" E:74°27'49 "	Глеезём типичный	На глубине 15 см	Лишайник	Около 10-15 лет	С локальными понижениями	Пути миг.
Тундра, близости газопровод	N:66°46'21" E:74°27'20"	Торфяно-глеезём типичный	По всему профилю, фрагментарно	Пушицево-осоковая ассоциация	Около 10-15 лет	С локальными понижениями	Пути миг.
Тундра, ровный участок	В 50 м от предыдущей точки	Торфяно-глеезём типичный	Прослойкой на 9 см	Пушицево-осоковая ассоциация	Около 10-15 лет	Пологоволнистый	Пути миг.
Северная тайга, окрестности стационара «Надым»	N:65°18'53" E:72°52'52"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Лишайник с фрагментами зеленомошника	1 год	Пологоволнистый	Пути миг. и пир. экстр.

Таблица А.9.4. Участки, в подзоне северной тайги СЗС

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей в профиле	Растительность	Возраст пожара	Характер рельефа	Объект исследования
Плакор	N:64°56'36" E:69°51'23"	Подзол иллювиально-железистый	Первые 10 см	Детрит	Около 5 лет	Уклон к З. 1-2°	Пир. экстр.
Терраса р. Сухой Полуи	N:64°56'45" E:69°51'8"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Детрит и лишайник	Около 5 лет	Уклон к С.-З. 2-3°	Пир. экстр.
Плакор	N:64°56'55" E:69°50'38"	Псаммозем	Первые 20 см	Не присутствует	Около 5 лет	Пологоволнистый	Пир. экстр.
Плакор	N:64°56'42" E:69°51'18"	Псаммозем	Первые 20 см	Лишайники	Около 5 лет	Пологоволнистый	Пир. экстр.
Плакор	N:64°57'25" E:69°51'19"	Абразем на подзоле	Первые 5 см	Не присутствует	Около 5 лет	Уклон 1-2° к З.	Пир. экстр.
Плакор	N:64°57'29" E:69°51'16"	Абразем на подзоле	Первые 10 см	Детрит	Около 5 лет	Холмистый – песчаные дюны	Пир. экстр.

Приложение А.10

Таблица А.10. Совокупность методов исследования

Определяемый параметр и единица измерения	Название метода	Примечания к методике/краткое описание	Источники
Химические и физико-химические методы			
pH(H ₂ O), у.е.	Определение pH водного	Определение pH pH-метром в водной вытяжке 1:2.5 при встряхивании 10 мин., методика стандартна	Теория и практика..., 2006; Воробьева, 1998; Аринушкина, 1970
pH(KCl), у.е.	Определение pH солевого	Определение pH pH-метром в 1М KCl при встряхивании 10 мин., методика стандартна	То же

Таблица А.10. Продолжение

Определяемый параметр и единица измерения	Название метода	Примечания к методике/краткое описание	Источники
ППК, %	Метод сухого озоления в муфеле	После достижения 600 °С, через 10-15 мин. проводилось 4-х час-е озоление орг. вещ.. Вес определялся на в.-с. навеску	Теория и практика..., 2006
Определение связанной влаги, %	Определение гигроскопической влажности	Высушивание 1-2 г в.-с. почвы при 105 °С в течение 5 час. Вес определялся на в.-с. навеску. Методика стандартна	Аринушкина, 1970
Определение обменных ионов H^+ и Al^{3+} , г-экв/100 г	Определение гидролитической кислотности	К 60 г почвы приливают 150 мл 1М КСl, взбалтывают, отстаивают, фильтруют. Фильтрат с добавлением фенолфталеина титруют 0.02-0.01 М NaOH. Методика стандартна	Теория и практика..., 2006; Воробьева, 1998
Определение суммы обменных оснований, г-экв/100г	Определение суммы обменных оснований по методу Каппена-Гильковица	К 20 г почвы приливают 100 мл 0.1 н. HCl. Взбалтывают, отстаивают и фильтруют. Фильтрат с добавлением фенолфталеина титруют 0.1 н. NaOH. Методика стандартна	То же
Определение Ca^{2+} и Mg^{2+} , г-экв/100 г	Определение обменных оснований Ca и Mg в некарбонатных незасоленных почвах	К 2-10г почвы приливают 1М NaCl, отстаивают. Многократное фильтрование после обработки 1М NaCl. К 1-2мл фильтрата добавляют 5 мл дистиллированной воды, гидроксилламин и диэтилдитиокарбаминат натрия. Кальций определяют, добавляя к фильтранту гидроксилламин, сульфид натрия, 5мл 10% -ного NaOH, добавляют мурексид и титруют 0.01-0.02М раствором комплексона III. Для определения Ca+Mg титруют фильтрат с гидроксилламином, сульфидом натрия 5мл буферного раст-ра и эриохромом черным, раст-ом комплексона III	Теория и практика..., 2006; Воробьева, 1998
Несиликатное железо, вытесненное вытяжкой Мера-Джексона, %	Метод вытяжки Мера-Джексона	К 0.5-2.0г почвы приливают 20мл реактива Джексона и 2.5мл 1М гидрокарбоната натрия. Нагревают до 80 °С, добавляют 0.5г дитионита Na при той же температуре. Добавляем 5мл NaCl и ацетона. Центрифугирование 5-10 мин на 3 тыс. об/мин. Фильтрование. Добавляют 3-5 капель 30% пероксида водорода, упаривают и фильтруют. К фильтрату добавляют 5мл 25% сульфосалициловой кислоты и 25% аммиака и 1мл аммиака. Фотометрическое определение на 420-430нм.	Теория и практика..., 2006; Воробьева, 1998
Подвижное "аморфное" железо, вытесненное вытяжкой Тамма, %	Метод вытяжки Тамма с модификацией Аринушкиной	К 1г почвы приливают 50мл буфф. раст-ра Тамма, взбалтывают. Центрифугирование 2.7 тыс. об/мин. фильтруют до прозрачности подкисленной шав. кислотой водой. Далее добавление 10% H_2SO_4 , нагревание до 80 °С с добавлением 1 н. $KMnO_4$, после добавление 0.05 н. шавелевой кислоты	Теория и практика..., 2006; Воробьева, 1998; Аринушкина, 1970
Физические методы			

Таблица А.10. Продолжение

Определяемый параметр и единица измерения	Название метода	Примечания к методике/краткое описание	Источники
Удельная магнитная восприимчивость, у.е.*10 ⁻⁵	Использование полевого капнометра Карраметр КТ-6	Цилиндр с основанием 5 см высотой 7 см заполнялся почвой, после чего перемещался на панель детектора каппаметра	Карраметр КТ-6 Instruction Manual, 2007
Определение концентрации и размера состава антракомассы, ppm	Методы сухого и мокрого просеивания	Просеивание почвенного образца 0.5-1 кг через систему сит 5 мм, 2 мм, 1 мм, 0.5 мм. Раздельный отбор фракций антракомассы	Carcaillet and Thinon, 1996
Содержание органического N и C, %	Сухое сжигание на газоанализаторе	Сжигание пробы при подготовке к графитизации образца	Zazovskaya et al., 2017
Абсолютный возраст углистых частиц, кал. л. ВР	Определение абсолютного возраста методом ускорительной масс-спектропии (AMS)	Подготовка пробы по схеме АВА (кислота-щелочь-кислота – 1М HCl-0.1М NaOH-10% HCl), мишени графитизировали и прессовали, после чего проводили AMS	Плихт и др., 2016; Зазовская, 2016; Лойко и др., 2022; Bobrovsky et al., 2019
Максимальные температуры горения, °С	Рамановская спектроскопия, примененная как "палеотермометр"	Углистые частицы >2 мм очишались от минеральных зерен, дополнительно разрезались и подвергались излучению лазером 532нм с выбранной мощностью 1% в течение 3 мин. Анализ проводился в интервале 900-2000 см ⁻¹	Deldicque et al., 2016; Deldicque and Rouzaud, 2020
Рода и виды сгоревшей древесины	Световой микроскоп, сканирующий микроскоп	Углистые частицы очишались от почвы, подготавливались к обследованию (разрезались).	Вихров, 1959; Golyeva, 2016
Программное обеспечение			
OxCal v.4.3.2	Построение калибровочных кривых, определение разброса возраста	Ввод данных в программу. Расчет по принципу Байесовской статистики	Bronk Ramsey, 2009
Wire™	Работа со спектрами, обработка и анализ	Получение кривых спектров после запуска процесса спектрометрии	Renishaw
Microsoft, 2016	Анализ данных	Работа с графиками, статистическими параметрами и таблицами	Microsoft Excel, Paint, PowerPoint, Word, Дмитриев, 2009

Приложение А.11

Таблица А.11. Сравнение хода анализа, итогов и перспектив дальнейшего изучения пирогенных палеоархивов и хронорядов пирогенных почв

Параметры сравнения	Хроноряды пирогенных почв	Пирогенные палеоархивы	Типизация вертикальной миграции углей	Классификация пирогенно-экстремальных почв современных/древних
Объекты исследования	Современная почва	Современная почва и палеопочвы	Угли в верхних горизонтах современной почвы	Верхние горизонты почв/горизонты палеопочв
Полевое описание почв	Морфологический анализ	Морфологический анализ и поиск комплементарных архивов	Морфологический анализ, поиск пирогенных морфонов и рассеянных углистых частиц	Морфологический анализ/морфологический анализ и поиск комплементарных архивов
Принцип отбора образцов	По горизонтам	Каждые 10 см, и отдельно в морфонах	По горизонтам	По горизонтам/по пирогенным горизонтам
Глубина отбора образцов, м	0,0-0,6(0,8)	0,0-2,5	0,0-0,6(0,8), часто до 0,4	0,0-0,6 (0,0-2,5)
Лабораторная обработка образцов	Просеивание, физико-химические методы	Просеивание, антракологический анализ, определение радиоуглеродного возраста	Просеивание, анализ концентрации антракомассы, анализ морфологии и размера углей	Просеивание, анализ концентрации антракомассы/просеивание, анализ концентрации антракомассы
Визуализация результатов	Блочные графические схемы, типизация, классификация	Сравнение динамики пожара и климатических изменений с помощью моделей “возраст-глубина”. Графики плотности вероятности. Кривые температуры и влажности в голоцене	Схемы вертикальной миграции углистых частиц	Название почв и палеопочв в соответствии с классификацией экстремальных условий почвообразования и пирогенной экстремальности
Область применения результатов	Изменение почвенных физико-химических свойств под влиянием пожара в разных локальных и зональных условиях. Закономерность смены почв и растительности после пирогенных событий разных параметров в средней и северной тайге ЕТР и СЗС.	Реконструкция наиболее выраженных периодов пирогенной активности за период голоцена и их связь с изменениями климата	Скорость разложения низко-температурных углей. Скорость погребения углистых частиц в почву биогенными и абиогенными факторами. Количество RuS , которое выходит из биологического круговорота	Пространственная неоднородность и динамика пирогенных почв. Деградация почвенного покрова в результате пожара

Таблица А.11. Продолжение

Параметры сравнения	Хроноряды пирогенных почв	Пирогенные палеоархивы	Типизация вертикальной миграции углей	Классификация пирогенно-экстремальных почв современных/древних
Перспективы развития	<p>Набор статистики. Добавление к «схемам типизации» математического аппарата. Автоматизация расчетов, составление базы данных изменяя пожаром почв и растительности</p>	<p>Расширение района исследований и выделение общих закономерностей распространения пожаров в эпоху голоцена в условиях разных экосистем и их почвенного покрова</p>	<p>Расширение базовых схем миграции углистых частиц случаями, которые осложнены выраженными элементами рельефа, растительностью и другими факторами</p>	<p>Выявление закономерностей нарушения почвенного покрова пожарами. Разработка стратегии «смягчения» повреждений почвенного покрова пожарами</p>

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Информационная роль почв

Приложение Б.1

Таблица Б.1. Описание почвенных пирогенных палеоархивов и фоновых почв к ним

Название объекта	Координаты	Участок	Угол наклона, °	Глубина воронки, м	Диаметр воронки, м	Глубина профиля, м	Растительность
Пирогенные палеоархивы							Ельник-зеленомошник. В древесном ярусе – ель (<i>Picea abies</i>), береза (<i>Betula pendula</i>), единичные особи сосны (<i>Pinus sylvestris</i>), кусты рябины (<i>Sorbus aucuparia</i>). В травяно-кустарничковом ярусе брусника (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>), В моховом покрове <i>Bryidae</i>
Pin01-18	N:64°44'47" E:43°23'10"	Карстовая воронка	<10	1	15	2.5	
Pin02-18	N:64°44'51" E:43°23'12"	Карстовая воронка	20-35	5	25	1.1	
Pin03-18	N:64°44'49" E:43°23'11"	Карстовая воронка	<5	0.5	10	1.3	
Pin01-20	N:64°40'45" E:42°55'52"	Воронка смешанного генезиса	>20	5-6	30-40	1.5	
Фоновые почвы							
Pin02-19	N:64°44'51" E:43°23'16"	Пологоволнистый	0-2	-	-	1.1	
Pin04-19	N:64°44'47" E:43°23'10"	Пологоволнистый	0-2	-	-	1.7	

Приложение Б.2а.



Рисунок Б.2а. Почвы межвороночных повышений

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Постпирогенная трансформация морфологии почвенного профиля

Приложение В.1. Гари северной тайги ЕТР. Почвенные описания

В.1.1. Горельник 2017 г.

Условный фон

Описание профиля условно фоновой почвы:

O pig (0-2) остатки лишайника и зеленые мхи, слаборазложившаяся, свежая-влажная, бурая (7,5YR 3/2), губчатая, пронизана корнями, в нижней части углистые частицы;

E pig, hi (2-5) свежий-влажный, окраска от серого и светло-серого до белесого (10YR 4/1), супесь-песок, слабоструктурный, комковатый, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, включения угля в верхней части, уголь, адсорбированный на минеральной матрице, покрашен потечным органическим веществом, граница волнистая, переход резкий по цвету;

BHF (5-9) свежий, буровато-палевый (10YR 4/4), песок-супесь, слабоструктурный, комковатый, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, мало корней, граница волнистая, переход ясный по цвету;

C (9-40) свежий, от палевого до светло-палевого (10YR 6/6), песок-супесь, чешуйчатый, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, единичные корни.

Подзол типичный постпирогенный поверхностно-подзолистый супесчано-песчаный со слабо развитым профилем на аллювиальных отложениях / Histic Albic Podzols (Arenic, Pyric).

Граница горельника

Описание профиля почвы на границе распространения пожара:

Очес (OL) pig (1 см) представлен остатками растительности и лишайников, фрагментами бурого торфа (7,5YR 2,5/2) сухой, угли встречаются на обугленных деревьях и около их стволов, в лежащих на почве растительных остатках их меньше;

E pig, hi (0-5) свежий, от серого до серовато-белесого (10YR 6/2) песок, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, корни, встречаются средние и маленькие углистые частицы (1-3 мм), угли, адсорбированные на минеральной матрице, потечное органическое вещество, граница волнистая, переход резкий по цвету и плотности;

BFred (5-40) в основном присутствует на левой стенке разреза, фрагментарно заходит на переднюю, сухой, охристо-красный (2,5YR 5/8), цементированный песок, плотный, твердый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, корней нет, цементирован железом, скрипит на лопате, граница волнистая, фрагментами языковатая, переход резкий по цвету, плотности и твердости.

BF1 (5-30) залегает в промежутках между BFred на передней стенке разреза и левой, на остальных стенках превалирует, свежий, от буровато-палевого до бурого (10YR 4/4), песок-супесь, комковатый, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, много корней, граница волнистая, на контакте мелкокарманная, переход заметный по цвету;

BF2fn (F) (30-45) залегает под BFred и BF1, сухой охристо-бурый (2,5YR 4/8), в нижней части с темными пятнами конкреций, цементированный супесь-песок, плотный, твердый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, корней нет, цементирован железом, скрипит на лопате, железо-марганцевые конкреции, граница слабоволнистая, переход резкий по плотности, наличию конкреций, ясный по цвету;

C ff (30(45)-60) свежий, светло-палевый (10YR 7/3), крупный песок, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, остаточное ожелезнение, с некоторым намеком на псевдофибровость.

Подзол (оруденелый) пирогенный ненасыщенный поверхностно-подзолистый супесчано-песчаный со среднеразвитым профилем на аллювиальных отложениях / Ortsteinic Histic Albic Podzols (Arenic, Pyric).

Периферия горельника

Описание профиля почвы в зоне периферии пожара:

Очес руг (1 см) практически отсутствует, уголь прямо на горизонте E;

Pig (1- 2(3)) сухой, темно-серо-черный горизонт, сформированный, в основном углями меньше 3 мм, крупные угли редки и приурочены к стволам деревьев, граница ровная и слабоволнистая, переход резкий по цвету и размеру углей;

E pig, hi (2(3)-5(10)) сухой, сверху серый, ниже светло-серый и белесый (7,5YR 6/1), песок, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, мало корней, сверху углистые частицы, переходящие к низу в уголь, адсорбированный на минеральной матрице, потечное органическое вещество, граница волнистая, переход резкий по цвету и количеству угля;

BF pig, fn (5(10)-10 (12)) сухой, бурый (10YR 4/4) супесь-песок, плотный, твердый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, много корней вверху горизонта, редкие углистые частицы 1 мм, граница волнистая, переход заметный по плотности и цвету;

C pig (12-70) сухой, палевый (2,5Y 7/6), в верхней части пятна верхнего горизонта (10YR 4/4), крупный песок, рыхлый, пористый, трещиноватый, единичные угли 1 мм и <1 мм в верхней части горизонта.

Подзол иллювиально-железистый постпирогенный ненасыщенный поверхностно-подзолистый песчаный на аллювиальных отложениях / Ortsteinic Histic Albic Podzols (Arenic, Pyric).

Очаг горельника

Описание профиля почвы в зоне предполагаемого очага пожара:

Pig (0-3(20)) сухой, черный слой углей, фрагментарно покрытый сверху остатками злаков, лишайника и веточек, угли всех размерностей, почвенный морфон от вывала, также заполненный углем, само дерево убрано в ходе восстановительных мероприятий (чистка гари), граница ровная, волнистая по морфонам, переход резкий по цвету;

E pig, hi (0 (3)-5(20)) фрагментарен, сухой, от серого до сероватого и белесого (7,5YR 6/1), песок, рыхлый, пористый, трещиноватый, корни, угли 1-2 мм и < 1 мм, дисперсные углистые частицы, угли, адсорбированные на минеральной матрице, потечное органическое вещество, граница волнистая, переход резкий по цвету и количеству углей;

[E, VHF, BF, C] pig, tr, y, fn, g, e (5(20)-60(70)) свежий, бурые (10YR 4/4), буровато-охристые (2,5YR 5/8) и палевые (2,5Y 7/6) пятна, примерно в равном соотношении (33% каждые), фрагментами присутствует сизый оттенок, песок-супесь, с линзами песка и фрагментами сцементированной железом супеси, плотный, мягкий, пористый, трещиноватый, мало корней, в нижней части слой с железо-марганцевыми конкрециями, маленькие частицы угля часто беспорядочно встречаются вверху горизонта и убывают к низу, исчезая в слое «конкреций», сильно турбированный, в горизонт заходит язык горизонта E по ходу корней, частицы кремнезема из горизонта C, граница волнистая переход ясный по цвету, наличию конкреций и углей;

C (> 70) g свежий, красновато-сизый оглеенный легкий суглинок с линзами песка (2,5Y 7/6) , плотный, мягкий, призматический-комковатый, тонкопористый, трещиноватый, валуны моренного происхождения, интенсивное оглеение по слоям.

Подзол (оруденелый) постпирогенный поверхностно-турбированный ненасыщенный поверхностно-оглеенный поверхностно- и мелкоподзолистый супесчано-песчаный на аллювиальных отложениях / Ortsteinic Histic Albic Podzols (Arenic, Pyric).

В.1.2. Гарь 2015 г.

Условный фон

Описание разреза условного фона:

Oot pig (0-5(7)) зеленомошная, слаборазложенная, свежая, бурая (10YR 2/2), губчатая, пронизана корнями, многочисленные угли в нижней части, граница волнистая, переход резкий;

E pig, hi (5(7)-20) сухой, белесо-сероватый (2,5Y 7/2), песок, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, корни, многочисленные микроугли, угли, адсорбированные на минеральной матрице, потечное органическое вещество, граница ровная, переход резкий по цвету;

BF (20-30) свежий, буро-охристый (10YR 6/4), супесь-песок, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, редкие корни, переход ясный по цвету и плотности;

C e (30-50) свежий-влажный, палево-светло-серый (10YR 6/6), супесь-легкий суглинок, плитчатый, плотный, мягкий, пористый, трещиноватый, слои песчаного материала.

Подзол иллювиально-железистый постпирогенный мелкоподзолистый супесчано-песчаный на моренных и аллювиальных отложениях / Histic Albic Podzols (Arenic, Pyric, Drainic).

Очаг гари

Описание разреза на гари:

Очес (OL) pig (< 1 см) фрагментарен, сухой, остатки ветоши и кустарничков вереска, угли с поверхности;

E pig (C1) (1-10) сухой, от темно-серого сверху (угли) до белесого (10YR 7/2), песок, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, мало корней, углистые частицы всех размерных фракций и адсорбированные на минеральной матрице, граница волнистая, переход неясный;

VHF (C2) (10-30) сухой, буровато-серый (10YR 7/3), песок, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, редкие корни, переход постепенный;

C (30-60) сухой, косая слоистость, буровато-серые (10YR 7/3) слои чередуются с палевыми (10YR 6/6), песок, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, единичные корни.

Подзол пирогенный, или псаммозем постпирогенный мелкоподзолистый песчаный на аллювиальных отложениях / Albic Podzols/Arenosols (Arenic, Pyric).

В.1.3. Гарь и горельники 2004 г.

Условный фон

Описание разреза в воронке (слева на рисунке в тексте):

Oot (0-5) зеленомошная среднеразложенная, влажная, темно-бурая (10YR 3/2), губчатая, пронизана корнями;

EL (5-6) фрагментарный, свежий-влажный, палево-белесый (10YR 7/1), чешуйчатый, супесь-легкий суглинок, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, мало корней, граница волнистая, переход резкий по цвету;

[EL, BEL, BT] g, cs, tu (5-40) влажный, чередование циклов эрозии-почвообразования светло-бурого и бурого цвета (2,5Y 6/4 и 10YR 7/1) слабый сизый оттенок, чешуйчатый, супесь-легкий суглинок, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, корни, горизонт с линзами песка и гипсовыми пятнами, переход постепенный;

C cs [pig*] (40-90) от влажного до сырого, светло-бурый (2,5Y 6/2) с темными пятнами, легкий суглинок.

Подзолистая поверхностно-турбированная поверхностно-оглееная поверхностно-элювиальная легкосуглинистая со среднеразвитым профилем на моренных отложениях/ Gleyic Gypsic Luvisols (Turbic) (WRB, 2022).

* – здесь и далее руг обозначает «современные» углистые частицы, а [pig] обозначает погребенные углистые частицы.

Описание разреза на повышении (справа на рисунке):

Oot (T)*(0-10) зеленомошная среднеразложенная, свежая, бурая (10YR 2/2), оторфованная губчатая, пронизанная корнями граница ровная переход резкий;

E (10-15) свежий, белесый (10YR 7/1), песок, бесструктурный, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, корней мало, граница карманная, переход резкий по цвету;

VHfg (15-20) свежий-влажный, от бурого до темно-бурого (10YR 4/6), местами слабый сизый оттенок, супесь, бесструктурный-комковатый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, редкие корни, слабое оглеение, граница волнистая, переход заметный по цвету и плотности;

BCg (20-60) свежий-влажный, светло-бурый (10YR 6/3), местами слабый сизый оттенок, легкий суглинок, более плотный, плитчатый-чешуйчато-комковатый, пористый, трещиноватый, слабое оглеение, граница волнистая, переход заметный по цвету и плотности;

C (60-90) влажный, красноватый (10YR 7/1) со светло-бурыми прожилками, глина-тяжелый суглинок, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, призматическая структура твердые моренные включения.

Торфяно-подзол иллювиально-железистый или подзол иллювиально-железистый поверхностно-оглееный мелкоподзолистый мелкоторфянистый гипновый песчано-супесчаный со среднеразвитым профилем на моренных отложениях / Gleyic Albic Podzol (Arenic).

* – в скобках указана другая интерпретация горизонта

Граница, горельник

Описание профиля почвы (верхний рисунок)

OL-ON pig (0-2) сухая из веток и листвы березы, среднеразложенная, серовато-бурая (7,5YR 2,5/2), губчатая, много корней, угли с поверхности;

E pig, hi (2-4) свежий, светло-серый до серого (7,5YR 3/1), цвет изменен дисперсными углистыми частицами и углями, адсорбированными на минеральной матрице, супесь-песок, бесструктурный, рыхлый, пористый, трещиноватый, много корней, потечное органическое вещество, граница волнистая, переход заметный;

VHf pig, hi, e, cs (10-20) свежий, бурый (10YR 3/3), супесь, комковато-чешуйчатый, плотный, мягкий, пористый, трещиноватый, корни, кремнеземистая присыпка, прокрашенная продуктами пожара, в верхней части горизонта, потечное органическое вещество, встречаются камни моренного происхождения и включения гипса;

D (20-50) - выход белесого гипса.

Подбур оподзоленный постпирогенный поверхностно-подзолистый песчаный со слабо развитым профилем на моренных отложениях / Entic Podzols (Arenic, Pyric).

Описание разреза в воронке (слева на нижнем рисунке):

T (0-5(10)) сложен сфагнумом и политрихумом, слабо разложен, влажный, темно-бурый (7,5YR 2,5/1), мало корней, губчатый, граница ровная, переход резкий;

E_{hi} pig (5-10) фрагментарный, свежий, белесый (10YR 3/3), супесь-песок, комковатый, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, много корней, с углями, адсорбированными на минеральной матрице и дисперсными углистыми частицами, потечное органическое вещество, граница волнистая, переход резкий по цвету;

VNF[pig], f (10-40) свежий, бурый (10YR 5/4), супесь, чешуйчатый, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, угли, адсорбированные на минеральной матрице, моренные включения в виде валунов, скрип лопаты по железу, корни, переход постепенный;

BC e (40-80) влажный-сырой, светло-бурый (10YR 7/3), супесь, комковатый, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, корни, кремнеземистая присыпка, алевриты, много камней моренного генезиса, переход резкий;

D (>80) булыжники.

Подзол иллювиально-гумусово-железистый постпирогенный мелкоторфянистый сфагновый песчано-супесчаный на моренных отложениях / Histic Albic Podzols (Arenic, Pyric).

Описание разреза на повышении (справа на нижнем рисунке):

O pig (0-2) зеленомошная, слабо-средне разложенная, свежая, светло-бурая (10YR 2/2), губчатая, пронизана корнями, много углей в нижней части, граница ровная, переход резкий;

Pig (2-10(30)) морфон, возникший от древесного вывала, заполнен углями;

E (30-32) фрагментарен, распространен только в районе вывала, свежий светло-серый (7,5YR 7/1), песок, бесструктурный, пористый, тонкотрещиноватый, граница языковатая, переход резкий по цвету;

BF_u, e, f (2(30)-60) свежий, бурый (10YR 5/4), супесь-песок, рыхлый, бесструктурный, тонкопористый, трещиноватый, мало корней, включения щебня, алевриты, сильно ожелезнен – до скрипа лопаты, кремнеземистая светлая присыпка, язык подзолистого горизонта;

D (>60) смесь карстового и моренного материала разной плотности.

Подбур оподзоленный иллювиально-железистый постпирогенный неглубокоподзолистый супесчано-песчаный на моренных отложениях, подстилаемых плотными гипсами/ Entic Podzols (Arenic, Pyric).

Зона периферии, гарь

Описание разреза в воронке (слева на рисунке):

O pig (0-2, в месте валежа около 10) зеленомошная, слабо-средне разложенная, сухая, бурая (7,5YR 2,5/3), пронизанная корнями, губчатая подстилка встречаются угли, но локально, граница волнистая, переход резкий;

Участок с разлагающейся древесиной влажный, охристо-бурый (10R 5/6), слабо разложенный, корней много, трещины по структуре древесины, крошится.

E pig (2-10) свежий, белесый (10YR 6/1), супесь-песок, комковатый, слабообструктурный, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, много корней, уголь, в основном, в виде дисперсных частиц и адсорбированный на минеральной матрице, до первых двух миллиметров, граница волнистая, переход резкий;

VNF (10-40) сухой, от бурого до светло-бурого (2,5YR 7/3) песок-супесь, комковатый, плотный, мягкий более твердый, чем E, мало корней, пористый, тонкотрещиноватый, встречается микроуголь, в поле отобрать невозможно, волнистая граница, переход заметный;

BC (40-60) свежий, чуть светлее предыдущего (2,5Y 7/2), больше опесчанен, песок-супесь, комковатый, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, мало корней, присыпка кремния, встречаются белые пятна гипса, не окатанные глыбы и щебень до 15 см; граница волнистая, переход заметный.

[E] [pig](60-100) свежий, сероватого цвета со щебнем (7,5YR 8/1), супесь-легкий суглинок, чешуйчатой структуры, плотный, мягкий, без корней, тонкопористый, тонкотрещиноватый, внизу профиля прослой палеоуглей, адсорбированных на минеральной матрице, есть несколько крупных углей, горизонт погребенный;

D (>100) гипсы, мягкие, но уплотняющиеся с глубиной.

Подзол иллювиально-железистый постпирогенный (планируемое обновленное издание почв России, 2022 г.) ненасыщенный поверхностно-подзолистый песчано-супесчаный на плотных гипсах / Albic Podzol (Pugic).

Описание разреза на повышении (справа на рисунке):

O ao, pig (0-2) зеленомошная с листьями березы, слабо-среднеразложенная, свежая, бурая (7,5YR 2,5/2), губчатая подстилка, переход резкий, присутствует уголь > 1 см, внизу горизонта грубогумусовая прослойка, граница ровная, переход резкий;

E pig (2-4) фрагментарен, свежий, выше горизонта E в воронке, белесый (10YR 6/2), песок, бесструктурный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, заходят сгоревшие корни, присутствуют микроугли и угли до 1 см, а также уголь, адсорбированный на минеральной матрице, много корней, граница фрагментарная, карманная, переход резкий;

VNF (4-30) свежий, бурый до темно-бурого (7,5YR 6/6), пятна ожелезнения по корням, супесь, более твердый, чем E, комковатый, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, корни, вскипает от HCl в нижней части, граница волнистая, переход заметный;

BC (30-70) свежий, светло-бурый с темными прослоями и бурыми пятнами (10YR 6/2, пятна 10YR 4/6), супесь, чешуйчатый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, щебня меньше, чем в воронке и он мельче, редкие корни, переход постепенный;

C (70-110) свежий-влажный, палево-белесый (2,5Y 8/3), флювиогляциальные отложения представленные крупным бесструктурным песком

Подбур оподзоленный постпирогенный ненасыщенный слабовыщелоченный песчано-супесчаный на плотных гипсах / Entic Podzol (Pugic).

Зона очагов гари

Описание разреза в воронке (слева на рисунке):

Oot (T)* pig (0-10) слаборазложенная злаково-зеленомошная подстилка, буровато-темно-серая (7,5YR 2,5/3), заново сформировалась после пожара, насыщена углями;

[EL, BEL, BT] pig, g, tu, cs (10-40) влажный, бурый с палевыми и сизыми пятнами (7,5YR 4/4 и 2,5Y 6/4), супесь до легкого суглинка, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, мало корней, чешуйчатый, с микроуглями и углями, адсорбированными на минеральной матрице, присутствует гипс переработанный почвообразованием, слабое оглеение, турбированность, как следствие послепожарных изменений, переход постепенный;

C (30-60) влажный, от грязно-палевого до светло-бурого, представлен рыхлой породой, верхняя часть карста копается как размокшее печенье, комковатой структуры, слипается, плотный, мягкий;

D - щебень белого цвета.

(Торфяно)-подзолистая поверхностно-турбированная постпирогенная поверхностно-оглееная мелкоторфянистая злаково-гипсовая супесчанно-легкосуглинистая на плотных гипсах / Gleyic Gypsic Luvisols (Loamic, Pyric)

* –в скобках даны другие возможные интерпретации горизонтов.

Описание разреза на повышении (справа на рисунке):

Очес (OL) p_{1g} (1 см) фрагментарен, представлен ветошью злаков и обгоревшими остатками растений, сухой, слаборазложившийся;

B₁H₁F p_{1g} (1-10) сухой-свежий, от бурого до темно-серовато-бурого, окраска однородная (10YR 5/3) песок-супесь, слабооскруктуренный комковатый, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, много корней, встречается крупный уголь, граница волнистая переход резкий, контакт с породой, слабое вскипание от HCl;

D (>10) свежий, желто-буро-палевый, гипс, верхняя часть представлена гипсовым щебнем, ниже гипс залегает сплошным щитом, цвет становится бледнее и утрачивает желто-бурый оттенок.

Подбур иллювиально-железистый постпирогенный карбонатный песчано-супесчаный со слаборазвитым профилем на плотных гипсах / Entic Podzols (Arenic, Pyric).

В.1.4. Гарь 1990 г.

Описание профиля почвы:

OL-OF p_{1g} (0-2) зеленомошная, слабо- и среднеразложившаяся, свежая, бурая (7,5YR 2,5/2), губчатая, пронизана корнями, угли с поверхности, особенно много между горизонтами, длиной 0,5-1 см, граница ровная, переход резкий;

E p_{1g}, h₁ (2-20) сухой, от серого до светло-серого (2,5Y 8/1), песок-супесь, комковатый, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, мало корней, угли 1-3 мм, количество снижается вниз по горизонту, угли, адсорбированные на минеральной матрице, почечное органическое вещество, граница мелкокарманная, резкий по цвету и заметный по плотности;

B₁F (20-22) сухой, темно-бурый (10YR 5/3), супесь, комковатый, плотный, мягкий, пористый, трещиноватый, много корней, граница волнистая, переход заметный по цвету;

C (22-80) сухой, буро-палевый (10YR 7/3), супесь с линзами песка, комковатый, рыхлый, пористый, трещиноватый, единичные корни, включения щебня.

Подзол иллювиально-железистый постпирогенный ненасыщенный мелкоподзолистый песчано-супесчаный со слаборазвитым профилем на антропогенной насыпи / Histic Albic Podzols (Arenic, Pyric).

В.1.5. Горельник 1937 г.

Полугидроморфные условия

Описание профиля почвы:

OL-OF p_{1g} (0-3) представлена зелеными мхами, свежая-влажноватая, бурая (10YR 2/2), слабо-среднеразложившаяся, губчатая, корни, немногочисленные угли на нижней границе, граница волнистая, переход резкий;

EL [e-bhf], p_{ir}, h_i (3-10) влажный, от серого до белесого (7,5YR 7/1) супесь, рыхлый, слабовыраженно-комковатый, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, единичные корни, угли, потерявшие плотное строение, угли, адсорбированные на минеральной матрице, потечное органическое вещество, микропрофиль подзола, граница волнистая, переход резкий по цвету и наличию углей;

[EL, BEL, BT] tr, ek (10-12) сухой, бурый (10YR 7/3), средний суглинок, комковатый, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, обильные корни, контактное осветление, граница ровная, переход резкий по цвету и гранулометрическому составу;

C g (12-40) сухой, палевый (10YR 7/2) с сизым оттенком, тяжелый суглинок, плитчато-комковатый, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, следы оглеения, переход резкий к породе;

D (>40) слой щебня и плотной породы моренного происхождения, серо-палевой окраски.

Подзолистая почва с микропрофилем подзола поверхностно-турбированная контактно-осветленная поверхностно-элювиальная супесчано-среднесуглинистая со слабообразованным профилем на моренных отложениях /Histic Gleyic Luvisols (Loamic).

Переходные между полугидроморфными и автоморфными условия

Описание профиля почвы:

T p_{ir} (0-10) зеленомошный, свежий, темно-бурый (10YR 2/2), губчатый, пронизан корнями, встречаются угли 1-3 мм в толще подстилки, насыщен крупными углями на границе с EL, граница волнистая, переход резкий по цвету;

EL [e-bf], p_{ir}, g, h_i (10-30) свежий, сверху серый, к середине серо-белесый с сизым оттенком (7,5YR 7/1), супесь-легкий суглинок, плитчато-комковатый, плотный, мягкий, пористый, трещиноватый, мало корней, имеет мелкие угли в верхней части (около 1 мм) и угли, адсорбированные на минеральной матрице, потечное органическое вещество, граница ровная, переход заметный по цвету и плотности;

BEL g (30-45) слабо выражен, свежий, пятнистый темно- и светло-бурый (10YR 7/3) легкий сизый оттенок, легкий суглинок, комковатый, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, переход постепенный;

BT g (45-60) влажный, темно-бурый (10YR 7/2) с сизым оттенком, легкий суглинок, комковатый, плотный, мягкий, пористый, трещиноватый, единичные корни, граница волнистая, переход заметный по цвету и плотности;

Cg (40-100) влажный, красновато-палевый с сизым оттенком, средний суглинок, призматический-комковатый, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, покровные моренные суглинки с включением щебня и валунов, слабо вскипают от HCL.

Торфяно-подзолисто-глеевая с микропрофилем подзола ненасыщенная мелкоторфянистая гипсовая поверхностно-оглеенная неглубокоэлювиальная супесчано-легкосуглинистая со среднеразвитым профилем на моренных отложениях / Histic Gleyic Calcic Luvisols (Loamic).

Автоморфные условия

Описание профиля почвы:

Очес (OL) (2 см) представлена слаборазложившимися листьями березы, свежая, желто-оранжевая;

O p_{ir}, (0-2) фрагментарна, сложена зеленомошником и политрихумом, сухая, слабообразованная, бурая (7,5YR 2,5/2), губчатая, пронизана корнями и углями, угли более 1 см в нижней части, граница ровная, переход резкий;

E p_{ir}, h_i (2-10) сухой, серый до светло-серого и белесого (7,5YR7/1), песок, пористый, трещиноватый, мало корней, насыщен углями в верхней части (1-2 мм), угли, адсорбированные на минеральной матрице, граница ровная, переход резкий по цвету;

VNF p_{ir}, e_k, h_i (10-20) свежий, бурый (10YR5/4), супесь-суглинок, комковатый, плотный, мягкий, пористый, трещиноватый, много корней, угли около 1 мм, потеки органики по корню, осветление на контакте с С, граница слабоволнистая, переход резкий по цвету и плотности;

С (20-50) свежий, буро-палевый, легкий суглинок, плитчато-комковатый, тонкопористый, трещиноватый, резкий переход к твердым моренным отложениям;

D (>50) щебень и дресва.

Подзол иллювиально-железистый контактно-осветленный мелкоподзолистый песчано-супесчаный со слаборазвитым профилем на моренных отложениях / Histic Albic Podzols (Arenic, Pyric).

В.1.6. Горельник 1860 г.

Гидроморфные условия

Усредненное описание подзолистых почв:

Oot (0-2(5)) сырая-мокрая, темно-серая, губчатая, мало корней, граница ровная, переход резкий;

EL g, h_i (2(5)-5) сырой, серый в верхней и белесый в нижней части, с сизым оттенком, супесь, комковато-плитчатый, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, единичные корни, потечное органическое вещество, граница карманная, переход резкий по цвету;

(BEL) g, h_i (5-6) фрагментарен, сырой, представлен белесыми пятнами на буровато-красном фоне, легкий суглинок, комковатый, плотный, мягкий, тонкопористый, трещиноватый, потечное органическое вещество, переход постепенный;

BT g, h_i (6-30) сырой-мокрый, палево-бурый сверху и буро-палевый к низу, с выраженным сизым оттенком, легкий-средний суглинок, плитчато-комковатый, плотный, мягкий, тонкопористый, трещиноватый, потечное органическое вещество, переход резкий к породе;

D (>40) щебнистый материал, представленный гранитоидами.

Подзолисто-глеевые потечно-гумусовые поверхностно-элювиальные супесчано-легкосуглинистые со слаборазвитым профилем на моренных отложениях / Skeletic Gleyic Cambisols (Loamic).

Усредненное описание полупрофиля подзолов:

Oot (T) (0-2 (10)) зеленомошиково-сфагновая слаборазложенная, сырая, темно-серая, губчатая, пронизана корнями, граница ровная, переход резкий;

E h_i,g (2(10)-5(20)) сырой, от серого сверху до белесого к низу песок, с сизоватым оттенком, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, единичные корни, потечное органическое вещество, граница от слабоволнистой до карманной, переход резкий по цвету;

VNF h_i, g (5(20)-30) мокрый, розовато-красный с сизым оттенком, супесь, комковатый, рыхлый, пористый, трещиноватый, потечное органическое вещество, граница ровная, переход резкий к породе;

D (>40) щебнистый материал, представленный гранитоидами.

Подзолы глеевые или торфяно-подзолы глеевые поверхностно-оглеенные мелкоподзолистые песчаные со слаборазвитым профилем на моренных отложениях /Histic Gleyic Albic Podzols (Arenic, Turbic).

Полугидроморфные условия

Описание профиля на повышении:

T(Oot) (0-10) зеленомошниковая слабо и среднеразложенная, влажная, серовато-бурая (10YR 2/2), губчатая, пронизана корнями, встречаются микроугли 4-ой стадии разрушения неопределенной формы, граница волнистая, переход резкий;

C1 (ВНF1) руг, hi (10-21) свежий, палево-бурый (5YR 4/6), супесь, чешуйчатый, плотный, мягкий, пористый, трещиноватый, корни, корневины, в верхней части горизонта угли, адсорбированные на минеральной матрице и потечное органическое вещество, граница слабоволнистая, переход резкий по цвету и наличию углей, адсорбированных на минеральной матрице;

Pig hi (21-30) свежий, от серого до темно-серого, супесь, комковатый, более плотный, чем предыдущий, возможно связан органическим веществом, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, корни, меньше, чем в предыдущем, угли, адсорбированные на минеральной матрице, внизу потечное органическое вещество, граница ровная, переход резкий по цвету и наличию углистого материала;

C2 (ВНF2) hi (40-50) свежий, палево-бурый (5YR 5/6), супесь, чешуйчатый, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, единичные корни, корневины, потечное органическое вещество, угли, адсорбированные на минеральной матрице, граница слабоволнистая, переход резкий по цвету, плотности и наличию углей;

BC pig, ff (50-70) свежий, от светло-серого до белесого с охристыми пятнами (10YR 6/3), песок, рыхлый, пористый, трещиноватый, угли, адсорбированные на минеральной матрице и неопределенной формы хрупкие микроугли – сосредоточены в верхней части горизонта, переход постепенный;

C (70-130) влажный, розовато-палевый (10YR 7/4), песок, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, мелкослоистый.

Слоисто-аллювиальные потечно-гумусовые почвы или серия погребенных подбуров иллювиально-гумусово-железистых постпирогенных ненасыщенных мелкокорфянистых гипново-осоковых супесчаных на аллювиальных отложениях / Transportic Calcaric Arenosols/Fluvisols (Pytic).

Описание профиля в депрессии:

T pig (0-7(10)) зеленомошниково-сфагновый слаборазложенный торф, влажный, темно-серый, губчатый, пронизан корнями, ближе к нижней части угли 4 стадии разрушения (потерявшие структуру), граница ровная, переход резкий;

E pig, hi (7(10)-20) влажный, песок, от серого сверху до белесого к низу, с розоватым оттенком, рыхлый, пористый, трещиноватый, корни, сосредоточены сверху, угли, адсорбированные на минеральной матрице, редкие угли 3-4 стадии разрушения (окатанные и потерявшие структуру), потечное органическое вещество, граница волнистая и карманная, переход резкий по цвету;

ВНF y, hi, g (20-40) влажный, чередование бурого материала с сизым оттенком и белесого с сероватым оттенком из языков E, супесь, комковатый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, языки верхнего горизонта, по ним затеки органического вещества, граница ровная, переход резкий по цвету и наличию углей;

[E] pig (40-41(42)) фрагментарный, погребенный, влажный, серый от углистых частиц, рыхлый, песок, тонкопористый, тонкотрещиноватый, редкие угли 4 стадии разрушения, угли, адсорбированные на минеральной матрице, граница фрагментарная, переход резкий по цвету и наличию углей;

[ВНФ] g (41(42)-80) влажный, погребенный, бурый с буро-палевыми пятнами и розоватым и сизоватым оттенком, супесь, плитчатый, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, граница ровная, переход резкий по цвету к погребенному подзолу

Торфяно-подзолы глееватые постпирогенные насыщенные мелкоторфянистые сфагново-гипновые мелкоподзолистые песчано-супесчаные со слабо развитым актуальным профилем на погребенной почве – оподзоленном подбуре пирогенном на моренных отложениях / Histic Gleyic Albic Podzols (Arenic, Pyric).

Приложение В.2. Гари и горельники средней тайги ЕТР. Почвенные описания

В.2.1. Горельники 2009.

Условный фон, древняя гарь

Описание профиля:

Oot p_{ir} (0-5) среднеразложенная зеленомошная, оторфованная, влажная, темно-бурая (7,5YR 2,5/2), губчатая, пронизана корнями, крупные угли, корневины с углями, идущие в горизонт E, граница волнистая, переход резкий;

E p_{ir}, h_i, g (5-20(25)) – мокрый, серовато-белёсый (10YR 7/1, 10YR 7/2, 10YR 6/2) в средней части бурые пятна органического вещества, песок, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, мало корней, микроугли, угли, адсорбированные на минеральной матрице, затеки органического вещества, граница волнистая, переход заметный по цвету и резкий по количеству угля;

ВНФ h_i, g (20(25)-40) мокрый, грязно-бурый с немногочисленными охристыми пятнами (10YR 6/4; пятна 10YR 6/6), песок, рыхлый, пористый, трещиноватый, единичные корни, пятна ожелезнения, затеки органического вещества, переход резкий к воде.

Подзол иллювиально-гумусово-железистый постпирогенный поверхностно-оглееный неглубокоподзолистый песчаный со слабо развитым профилем (до воды) на иллювиальных отложениях / Histic Gleyic Albic Podzols (Arenic, Pyric)

Зона очага

Описание профиля почвы (правый профиль):

OL p_{ir} (0-2) маломощная лишайниковая подстилка, с отпадом кустарничков и ягелевым торфом, серого цвета (7,5 YR 2,5/2 с долей 10YR 7/1), губчатая, к низу вязкая, корни, угли 2-ой стадии разрушения между O и E, граница ровная, переход резкий;

E p_{ir} (2-7) свежий, белёсый (10YR 7/1), песок, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, единичные корни, угли 2 и 3-ей стадии разрушения и угли, адсорбированные на минеральной матрице сверху горизонта, граница слабоволнистая, переход резкий по цвету;

BF p_{ir} (7-35) – свежий, влажнее предыдущего, охристый (10YR 6/6 до 10YR 7/8) язык тёмного-бурого цвета, пересекающий горизонты BF и C, супесь, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, много корней в верхней части, редкие угли 3-ей стадии разрушения, граница ровная, переход заметный по цвету.

C (35-90) свежий, светло-буро-палевый (10 YR 5/6 и с 10YR 7/4 с долей 10YR 7/2) с частью языка тёмно-бурого цвета из ВНФ, супесь, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, корней нет, единичные угли 3-ей стадии разрушения.

Подзол иллювиально-железистый постпирогенный ненасыщенный в верхних горизонтах поверхностно-подзолистый песчано-супесчаный со слаборазвитым профилем на аллювиальных отложениях / Albic Podzols (Arenic, Pyric).

В.2.2. Горельник 1978 г.

Участок на террасе:

Очес (OL) (2-3) свежий, слаборазложенный опад, сформированный злаками и кустарничками;

AY (0-3) свежий, от бурого до серого (10YR2/2 с включениями 10YR 5/1), много корней, граница ровная, переход резкий;

BM g, e (3-7) свежий, темно-бурый с фрагментарным осветлением (сизый оттенок) в верхней части (10YR 5/1), легкий суглинок, непрочнокомковатый, плотный, мягкий, тонкопористый, трещиноватый, корни, кремнезёмистая присыпка, граница слабоволнистая, переход заметный по цвету;

BC g (7-25) свежий, светло-бурый, средний суглинок, комковато-призматический, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, единичные корни, переход постепенный.

C g (25-40) свежий, светло-бурый, светлее предыдущего, средний суглинок, призматическая структура, плотный, мягкий, тонкопористый, трещиноватый, в нижней части щебень;

D (>40) щебень и валуны

Буроземы глееватые маломощные поверхностно-оглеенные легко-среднесуглинистые со слаборазвитым профилем на элювии горных пород / Skeletic Gleyic Cambisols (Loamic)

Участок на пойме:

Очес (OL-OH) p₁g (2 см) влажный, слабо- среднеразложенный опад листьев берёзы и трав;

АО (H) p₁g (0-30) влажный, от бурого до тёмно-серого (10YR2/1), состоит из органической и минеральной части, мажется, легкий суглинок, комковатый, много корней, червороины, углистые частицы до 1 см но с плохо сохранившейся структурой;

R (> 30) щебень и галька.

Литозем грубогумусовый постпирогенный перегнойно-торфяный легкосуглинистый на элювии горных пород (Lithic Leptosols (Pyric, Turbic)).

В.2.3. Горельник 1950 г.

Описание почвенного профиля:

O a₀, p₁g (0-5) оторфованная маломощная зеленомошниковая подстилка, сухая, бурая (2,5YR 2,5/2) с серыми минеральными пятнами (2,5YR5/1), губчатая, пронизанная корнями, встречаются мелкие угольки в нижней части, граница волнистая переход резкий;

E p₁g, h₁ (5-7) свежий, белёсый (от 7,5 YR 5/2 до 7,5YR 4/2), песок, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, мало корней, микроугли, углистые частицы, адсорбированные на минеральной матрице, граница слабоволнистая, переход резкий по цвету и наличию углей;

BF (7-9) маломощный, свежий, охристый, песок-супесь, комковатый, плотный, мягкий, но скрипит на лопате, тонкопористый, тонкотрещиноватый, единичные корни, сцементирован железом, граница слабоволнистая, переход резкий по твердости ясный по цвету;

BC (9-25) свежий, светло-бурый (7,5YR 5/6 пятна 10YR 7/4), легкий суглинок, комковатая структура, плотный, мягче предыдущего, тонкопористый, трещиноватый, редкие корни, переход постепенный.

C (25-55) свежий, темнее предыдущего (7,5 YR 4/4), легкий суглинок, комковатая структура, плотный, мягкий, тонкопористый, трещиноватый;

D (>55) в разной степени окатанная галька от 5 до 15 см, аллювиального происхождения.

Подзол иллювиально-железистый постпирогенный поверхностно-подзолистый супесчано-песчаный со слабо развитым профилем на аллювиальных отложениях / Histic Albic Podzols (Arenic, Pyric).

В.2.4. Горельник 1934 г.

Условный фон

Описание почвенного профиля:

T(Оао) (0-(5)10) торф зеленомошный, свежий, темно-бурый (7,5YR 2,5/2), губчатый, пронизан корнями, граница слабоволнистая, переход резкий;

E ((5)9-11) свежий, белёсый (7,5 YR 6/4 до 7,5 YR 6/2), супесь-песок, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, единичные корни, граница карманная, переход резкий по цвету;

BF (11-13) распространен фрагментарно, свежий, охристый, со светлыми пятнами (7,5YR 4/6), супесь, комковатый, плотный, твердый, скрипит на лопате, тонкопористый, тонкотрещиноватый, корни, сцементирован железом, граница волнистая, переход заметный по цвету и уменьшению цементации железом;

BC (13-30) свежий, светло-бурый (7,5YR 4/6), легкий суглинок, комковатый, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, мало корней, переход постепенный;

C (30-50) свежий, влажнее предыдущего, более светлый, чем предыдущий (10YR 4/4), средний суглинок, призмовидно-зернистый, плотный, тверже предыдущего, мягкий, тонкопористый, трещиноватый.

(Торфяно-)подзол иллювиально-железистый ненасыщенный мелкоторфянистый гипновый мелкоподзолистый супесчано-легкосуглинистый со слабо развитым профилем на моренных отложениях / Albic Podzols (Arenic)

Территория горельника

Описание почвенного профиля:

Oot (0-8) слабо разложившийся опад хвои и кустарничков, зеленый мох, сухая, бурая, местами красновато-бурая (7,5YR 2,5/2), губчатая, пронизана корнями, мелкие углистые частицы 1-3 мм, граница ровная, переход резкий;

EL рiг, ус, hі (8-10) – распространён фрагментарно, свежий, серый до светло-серого и палево-серого, легкий суглинок, комковато-порошистая структура, плотный, мягкий, тонкопористый, тонкотрещиноватый, много корней, угли, адсорбированные на минеральной матрице, потечное органическое вещество, граница волнистая, переход ясный по цвету;

BM (10-40) свежий, светло-бурый (7,5YR3/3 и 10YR 3/4), средний суглинок, комковато-ореховатая структура, плотный, тонкопористый, тонкотрещиноватый, мягкий, мало корней, граница волнистая, переход заметный по интенсивности окраски;

C (40-65) свежий влажнее предыдущего, похож по цвету, но темнее (7,5YR3/4), средний суглинок, массивная структура, плотный, мягкий, тверже предыдущего, тонкопористый, тонкотрещиноватый, единичные корни.

Элювиально-метаморфическая темная языковатая поверхностно-элювиальная легко-среднесуглинистая со слабо развитым профилем на моренных отложениях / Histic Luvisols (Loamic).

В.2.5. Гарь 1940 и горельник 1850 г.

Описание профиля почвы, заложенного на гари 1940 г.:

Очес (OL-OF) (2см) слабо и среднеразложенный опад из хвои, листьев берёзы и остатков злаков;

ОН рiг (0-10) фрагментарно в правой части профиля, сложена в основном остатками листьев и трав, свежая, темно-бурая (10YR 2/2 с пятнами 10YR 6/4), губчатая, пронизана корнями, угли 2-ой и 4-ой стадии разрушения, встречаются крупные (0,5 см), граница слабоволнистая, переход резкий;

АУ е, рiг (10-15) приурочен к левой части профиля, свежий, буровато-серый (10YR 4/4 с пятнами 10YR 7/3), легкий суглинок, комковатая структура, рыхлый, пористый, тонкотрещиноватый, кремнезёмистая присыпка, корней много, встречаются угли 3-ей стадии разрушения, граница ровная, переход заметный;

ВМ рiг, tu (15-55) свежий влажнее предыдущего, светло-бурый (7,5YR 4/3), с глубиной становится последовательно от 10YR 4/4 до 10YR 3/4, затем 7,5YR 4/4 и, у самого дна 10 YR7/3 с пятнами 10YR7/1, легкий-средний суглинок, комковатая структура, плотный, мягкий, тонкопористый, трещиноватый, в верхней части (15-20 см) угли, адсорбированные на минеральной матрице и в нижней части (40-50 см) угли 3-ей стадии разрушения;

D (C) (> 55) гранитный щебень.

Бурозём оподзоленный постпирогенный маломощный легко-среднесуглинистый со среднеразвитым профилем на элювии горных пород / Skeletic Luvisols (Loamic, Pyric).

Описание профиля почвы, заложенного на горельнике 1850 г.:

ОН-OF рiг (0-2) зеленомошниковая слабо – среднеразложенная, свежая, от светло-серого до серого, (10YR 2/1), губчатая, пронизана корнями, в нижней части угли 3-ей стадии разрушения, граница слабоволнистая, переход резкий;

ЕL рiг, hi (2-7) свежий, буровато-серый с пятнами темно-серого (10YR 5/2; пятна 10YR 2/2), супесь – легкий суглинок, чешуйчатая структура, плотный, мягкий, тонкопористый, трещиноватый, мало корней, угли 3-ей стадии разрушения и угли, адсорбированные на минеральной матрице, граница волнистая, переход заметный по цвету и резкий по наличию углей;

ВЕL g (7-25) свежий, бурый со светло-бурыми и тёмными пятнами, с сизым оттенком (10YR 7/3), легкий суглинок, призмовидно-ореховатый, плотный, мягкий, тонкопористый, трещиноватый, корней нет, переход постепенный;

ВТg (25-60) свежий, влажнее предыдущего, светло-бурый (10YR 6/3) ниже более желтый (5Y8/2), средний суглинок, комковато-призмовидная структура, плотный, мягкий, тонкопористый, трещиноватый, с кутанами, граница волнистая, переход заметный по цвету;

ВСg (60-75) влажный, смесь бурых, серых и светло-бурых пятен (10YR 5/2 до 10YR 5/1), средний суглинок, плитчатый, плотный, твердый, тонкопористый, трещиноватый, с небольшой примесью гранитного щебня, граница ровная, переход заметный по цвету;

G (75-110) влажный, влажнее предыдущего, серовато-сизый (10YR 6/2), средний-тяжелый суглинок, плитчатый, плотный, твердый с большим количеством щебня, тонкопористый, трещиноватый, граница волнистая, переход резкий по цвету;

ССGoh (110-130) влажный, влажнее предыдущего, тёмно-бурый (7,5YR 3/3), глина, массивный, щебня меньше, чем в предыдущем.

Подзолисто-глеявая потечно-гумусовая ненасыщенная в верхней части профиля поверхностно-оглееная поверхностно-элювиальная легко-среднесуглинистая с мощным профилем на моренных отложениях и элювии горных пород /Histic Gleyic Luvisols (Loamic, Pyric).

Приложение В.3. Горельники северной тайги и кустарниковой тундры СЗС. Почвенные описания

В.3.1. Горельник 2019 г.

Профиль почвы на гари:

OL (2-3) очес лишайника – кладонии альпийской, сухой, резкая граница;

OF/ОН (3-7) политриховый, свежий, бурый, губчатый, пронизан корнями, в нижней части угольки 1-3 мм и более мелкие, второй стадии разрушения, граница волнистая, переход резкий;

E_{rig}, h_i (7 – 20(100)) неоднородный по мощности, свежий белесый, песок, рыхлый, пористый, мелкотрещиноватый, угли, адсорбированные на минеральной матрице, угли до 2 мм, второй и третьей стадии разрушения, корневины, потечное органическое вещество, криогенное растрескивание, палеокриогенные линзы суглинка с песком, ооидной структуры, граница языковатая, переход резкий по цвету;

BF @, y (20-30) фрагментарный, влажный, охристый и буро-охристый, супесь-песок, слабооструктуренный комковатый, сцементирован железом, плотный, мелкопористый, мелкотрещиноватый, языки горизонта E, криогенное растрескивание, криотурбации, происходящие, судя по всему в палеокриогенных линзах суглинка с песком, граница волнистая, фрагментарная, переход резкий по цвету и ожелезнению;

BC @, y, g (30-40) влажный, палевый, песок, криогенное растрескивание, заходят языки E, переход постепенный;

C y, g (40-60(100)) сырой, в разрез затекает вода, палевый с металлическим оттенком, песок, пористый, трещиноватый, пронизан языками E, которые уходят в воду.

Подзол иллювиально-железистый глубокооглееный от глубоко- до сверхглубоко подзолистого супесчано-песчаный с глубокоразвитым профилем на аллювиальных или пролювиальных отложениях/ Entic Histic Podzols (Arenic, Pyric, Turbic).

В.3.2. Горельник 2005 г.

Среднее описание профилей почвы на гари:

T (15-20) от свежего до влажного, политрихово-осоковый, от бурого до темно-бурого, губчатый, пронизан корнями, угли, размякшие от влажности, граница ровная или слабоволнистая, переход резкий;

CR_{rig}, h_i (20-40) влажный до сырого, грязно-бурый с турбированным горизонтом T, бурого цвета, средний суглинок, массивная структура, тиксотропный, угли, поврежденные влажностью, в остатках горизонта T, переход постепенный;

C_⊥ нижняя часть горизонта CR имеет шпировую структуру и переходит в ММП.

Криозем потечно-гумусовый мелкоторфянистый перегнойно-торфяный осоковый среднесуглинистый со слабообразованным профилем подстилаемым ММП/ Turbic Criosols (Loamic, Pyric, Thixotropic).

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Пирогенная трансформация физико-химических свойств почв

Приложение Г.1.

Таблица Г.1. Основные химические свойства постпирогенных почв.

Подзона/ гео- морфоло- гическая принад- лежность	Пос- леднее пиро- генное событие, г	Глубина, см	Горизонт	pH вод- ный	pH соле- вой	Гидроли- тическая кислот- ность, г- экв/100г	Обменные основания Са, г- экв/100г	Обменные основания Mg, г- экв/100г	Насы- щенность основа- ниями, %
Средняя тайга, плакор	1850	5	EL	5.2	4.5	14.50	3.0	0.8	21
Средняя тайга, плакор	1850	15	BELg	5.1	4.6	8.80	8.0	0.7	50
Средняя тайга, плакор	1850	20	BTg	5.1	4.7	10.70	2.2	0.4	19
Средняя тайга, плакор	1850	40	BTg	5.8	5.6	8.20	1.8	0.7	23
Средняя тайга, плакор	1850	65	BCg	6.1	5.4	1.90	6.9	0.5	80
Средняя тайга, терраса	1900	7	E	5.2	3.9	12.30	0.9	0.2	8
Средняя тайга, терраса	1900	15	BF	5.3	4.2	12.51	10.2	0.8	47
Средняя тайга, терраса	1900	30	BC	5.2	4.2	12.90	1.1	0.2	9
Средняя тайга, терраса	1900	50	C	5.1	4.4	13.05	0.9	0.2	7
Средняя тайга, терраса	2009	02 июл	E	6.0	4.9	1.40	0.3	0.1	22
Средняя тайга, терраса	2009	35	BHF	5.2	4.7	2.68	0.6	0.1	21
Средняя тайга, терраса	2009	50	BC	5.2	4.7	0.68	1.1	0.3	67
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	3	E	4.8	3.8	12.32	2.5	0.9	22

Таблица Г.1. Продолжение

Подзона/ гео- морфоло- гическая принад- лежность	Пос- леднее пиро- генное событие, г	Глубина, см	Горизонт	рН вод- ный	рН соле- вой	Гидроли- тическая кислот- ность, г- экв/100г	Обменные основания Са, г- экв/100г	Обменные основания Mg, г- экв/100г	Насы- щенность основа- ниями, %
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	15	ВНФ	5.6	4.4	5.65	3.0	1.0	42
Северная тайга, плакор, карстовый рельеф	2004	40	ВС	5.8	4.4	4.08	3.8	1.3	55
Северная тайга, плакор	1919	5	Е	5.4	4.5	1.53	0.8	0.4	43
Северная тайга, плакор	1919	20	ВНФ	5.4	4.9	4.50	7.9	0.1	64
Северная тайга, плакор	1919	30	С	5.5	4.8	5.90	3.4	1.2	44
Северная тайга, плакор	1937	12	Е	5.1	3.9	8.07	0.7	0.3	11
Северная тайга, плакор	1937	30	ВНФ	5.3	4.8	4.80	0.9	5.1	55
Северная тайга, терраса реки Кулой	2017	0-2	Е	6.4	4.5	3.04	0.6	0.3	24
Северная тайга, терраса реки Кулой	2017	8	ВНФ	6.9	4.9	3.58	0.4	0.2	13
Северная тайга, терраса реки Кулой	2017	35	С	7.3	4.8	1.37	0.3	0.1	26
Северная тайга, терраса реки Кулой	2015	5	Е	6.0	5.0	3.04	0.7	0.2	22

Таблица Г.1. Продолжение

Подзона/ гео- морфоло- гическая принад- лежность	Пос- леднее пиро- генное событие, г	Глубина, см	Горизонт	pH вод- ный	pH соле- вой	Гидроли- тическая кислот- ность, г- экв/100г	Обменные основания Са, г- экв/100г	Обменные основания Mg, г- экв/100г	Насы- щенность основа- ниями, %
Северная тайга, терраса реки Кулой	2015	15	BHF	5.6	5.1	3.17	0.9	0.1	23
Северная тайга, терраса реки Кулой	2015	22	C	5.8	5.1	1.67	0.4	0.3	30
Северная тайга, междуречье Пинег и Кулоя	1975	4.5	E/EB руг	5.3	4.7	5.84	1.0	0.1	15
Северная тайга, междуречье Пинег и Кулоя	1975	13.5	BC	5.5	4.8	3.46	0.1	0.2	9
Северная тайга, междуречье Пинег и Кулоя	1975	32.5	C	5.6	4.9	2.08	0.6	0.2	28
Северная тайга, междуречье Пинег и Кулоя	1975	50	D1	5.8	4.9	1.08	0.4	0.3	39
Северная тайга, плакор	1919	30	C	5.5	4.8	5.90	3.4	1.2	44
Северная тайга, плакор	1937	12	E	5.1	3.9	8.07	0.7	0.3	11
Северная тайга, плакор	1937	30	BHF	5.3	4.8	4.80	0.9	5.1	55
Северная тайга, терраса реки Кулой	2017	0-2	E	6.4	4.5	3.04	0.6	0.3	24

Таблица Г.1. Продолжение

Подзона/ гео- морфоло- гическая принад- лежность	Пос- леднее пиро- генное событие, г	Глубина, см	Горизонт	рН вод- ный	рН соле- вой	Гидроли- тическая кислот- ность, г- экв/100г	Обменные основания Са, г- экв/100г	Обменные основания Mg, г- экв/100г	Насы- щенность основа- ниями, %
Северная тайга, терраса реки Кулой	2017	8	ВНФ	6.9	4.9	3.58	0.4	0.2	13
Северная тайга, терраса реки Кулой	2017	35	С	7.3	4.8	1.37	0.3	0.1	26
Северная тайга, терраса реки Кулой	2015	5	Е	6.0	5.0	3.04	0.7	0.2	22
Северная тайга, терраса реки Кулой	2015	15	ВНФ	5.6	5.1	3.17	0.9	0.1	23
Северная тайга, терраса реки Кулой	2015	22	С	5.8	5.1	1.67	0.4	0.3	30
Северная тайга, междуречье Пинег и Кулоя	1975	4.5	Е/ЕВ руг	5.3	4.7	5.84	1.0	0.1	15
Северная тайга, междуречье Пинег и Кулоя	1975	13.5	ВС	5.5	4.8	3.46	0.1	0.2	9
Северная тайга, междуречье Пинег и Кулоя	1975	32.5	С	5.6	4.9	2.08	0.6	0.2	28
Северная тайга, междуречье Пинег и Кулоя	1975	50	D1	5.8	4.9	1.08	0.4	0.3	39

Приложение Г. 2.

Таблица Г.2. Содержание $C_{орг}$ и $N_{общ}$ в почвах фона и постпирогенных

Подзона/геоморфологическая принадлежность	Последний пожар, г	Горизонт	Глубина	C [%]	N [%]	C/N
Средняя тайга, плакор	<1720	Oao	0-2	25.04	1.32	22
Средняя тайга, плакор	<1720	EL	0-5	2.09	0.14	17
Средняя тайга, плакор	<1720	BEL	15	1.13	0.08	16
Средняя тайга, плакор	<1720	C	60	0.38	0.03	15
Средняя тайга, плакор	<1719	O	0-5	21.53	1.14	22
Средняя тайга, плакор	<1720	BM	45	1.41	0.10	16
Средняя тайга, плакор	<1720	C	85	0.48	0.04	14
Средняя тайга, терраса	1940	O	0-2	24.22	1.32	21
Средняя тайга, терраса	1940	BM	15	2.11	0.12	21
Средняя тайга, терраса	1940	EL	5	0.90	0.10	11
Средняя тайга, терраса	1940	BM	20	2.63	0.15	20
Средняя тайга, терраса	1940	BM	40	0.55	0.05	13
Средняя тайга, терраса	1940	BM	60	1.29	0.10	15
Средняя тайга, терраса	1940	AU	0-2	11.11	0.52	25
Средняя тайга, терраса	1940	BM	35	1.89	0.12	18
Средняя тайга, терраса	1940	BM	40	2.52	0.14	21
Средняя тайга, плакор	1850	EL	5	2.25	0.19	14
Средняя тайга, плакор	1850	BELg	15	0.86	0.11	9
Средняя тайга, плакор	1850	BTg	20	0.96	0.12	9
Средняя тайга, плакор	1850	BTg	40	0.51	0.10	6
Средняя тайга, плакор	1850	BCg	65	0.25	0.10	3
Средняя тайга, плакор	1850	CG	100	0.33	0.10	4
Средняя тайга, плакор	1850	Gox	130	0.46	0.11	5
Средняя тайга, терраса	1978	AO	2	10.03	0.72	16
Средняя тайга, плакор	<1570	AY	5	7.22	0.46	18
Средняя тайга, плакор	<1570	BM/EL	7	3.72	0.26	17
Средняя тайга, плакор	<1570	BC	20	1.68	0.13	15
Средняя тайга, плакор	<1570	C	30	1.32	0.10	15
Средняя тайга, плакор	1900	Oao	2	15.82	0.91	20
Средняя тайга, плакор	1900	AY/EL	5	4.81	0.29	19
Средняя тайга, плакор	1900	BM	20	1.89	0.11	20
Средняя тайга, терраса	1950	O	0-2	17.82	0.72	29
Средняя тайга, терраса	1950	E	7	2.59	0.14	22
Средняя тайга, терраса	1950	BHF	30	2.18	0.10	25
Средняя тайга, терраса	1950	C	55	0.91	0.06	18
Средняя тайга, плакор	1900	Oao	0-2	26.22	1.10	28
Средняя тайга, плакор	1900	E	7	1.60	0.09	21
Средняя тайга, плакор	1900	BF	15	1.53	0.09	20
Средняя тайга, плакор	1900	BC	30	1.78	0.10	21
Средняя тайга, плакор	1900	C	50	0.78	0.05	18
Средняя тайга, плакор	1900	C	55	3.19	0.18	21
Средняя тайга, плакор	1934	OL	0-2	14.87	0.69	25
Средняя тайга, плакор	1934	OF	0-5	13.51	0.53	30
Средняя тайга, плакор	1934	E	7	1.29	0.09	17
Средняя тайга, плакор	1934	C	65	0.98	0.07	16
Средняя тайга, терраса	2009	O	0-2	9.87	0.24	48
Средняя тайга, терраса	2009	E	0-6	0.89	0.05	21
Средняя тайга, терраса	2009	BHF	35	0.67	0.03	26
Средняя тайга, терраса	2009	BC	50	0.11	0.01	13
Средняя тайга, терраса	2009	C	80	0.07	0.01	8
Средняя тайга, терраса	>1960	Oe	0-7	12.79	0.35	43
Средняя тайга, терраса	>1960	E	10	0.62	0.04	18

Таблица Г.2. Продолжение

Подзона/геоморфологическая принадлежность	Последний пожар, г	Горизонт	Глубина	С [%]	N [%]	C/N
Средняя тайга, терраса	>1960	ВН	60	0.24	0.02	14
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	О	0-5	19.93	0.81	29
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	Е	7	0.79	0.05	18
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	ВНF	25	0.31	0.02	18
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	BC	55	0.38	0.02	22
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	С	90	0.19	0.01	22
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	О	0-2	14.43	0.63	27
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	Е	3	2.44	0.09	32
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	ВНF	15	0.46	0.03	18
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	BC	40	0.19	0.01	22
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	С	80	0.13	0.01	15
Северная тайга, карстовый рельеф	<1860	О	0-7	45.28	1.44	37
Северная тайга, карстовый рельеф	<1860	Е	12	0.65	0.03	25
Северная тайга, карстовый рельеф	<1860	ВНF	15	1.08	0.06	21
Северная тайга, карстовый рельеф	<1860	BC	32	0.29	0.02	17
Северная тайга, карстовый рельеф	<1860	С	72	0.14	0.01	16
Северная тайга, карстовый рельеф	<1860	О	0-2	34.78	1.03	39
Северная тайга, карстовый рельеф	<1860	В	35	0.30	0.01	35
Северная тайга, карстовый рельеф	<1860	С	80	0.65	0.03	25
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	О	0-2	42.11	1.51	33
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	EL	11	0.61	0.04	18
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	BT	40	1.64	0.10	19
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	В	10	0.32	0.02	19
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	О	5	28.26	1.12	29
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	Е	5	1.44	0.06	28
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	О	0-5	42.93	0.87	58
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	Е	7	3.35	0.19	21
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	ВНF	15	1.64	0.10	19
Северная тайга, терраса	2015	ВНF	15	0.41	0.02	24
Северная тайга, терраса	2015	С	22	0.09	0.00	
Северная тайга, терраса	1980	О	0-2	30.20	0.81	43
Северная тайга, терраса	1980	Е	5	2.91	0.06	57
Северная тайга, терраса	1980	ВНF	25	0.72	0.03	28
Северная тайга, терраса	1980	С	40	0.43	0.02	25
Северная тайга, терраса	1960	Е	4.5	0.76	0.02	44
Северная тайга, терраса	1960	BC	13.5	0.17	0.01	20

Приложение Г. 3.

Таблица Г.3. Оценка содержания железа в вытяжках Тамма и Мера-Джексона и алюминия в вытяжке Тамма

Подзона/геоморфологическая принадлежность	Последнее пирогенное событие, г	Глубина, см	Горизонт	Feокс, %	Feдит, %	Алюкс, %
Средняя тайга, терраса	2009	2-7	Е	0.01	0.07	0.01
Средняя тайга, терраса	2009	35	ВНF	0.19	0.49	0.16
Средняя тайга, терраса	2009	50	BC	0.07	0.24	0.19
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	3	Е	0.17	0.53	0.31

Таблица Г.3. Продолжение

Подзона/гео-морфологическая принадлежность	Последнее пирогенное событие, г	Глубина, см	Горизонт	Feокс, %	Feдит, %	Алокс, %
Северная тайга, карстовый рельеф	2004	15	ВНФ	0.22	0.70	0.28
Северная тайга, плакор, карстовый рельеф	2004	40	ВС	0.15	0.64	0.13
Северная тайга, плакор	1937	12	Е	0.01	0.19	0.03
Северная тайга, плакор	1937	30	ВНФ	0.48	1.07	1.15
Северная тайга, терраса реки Кулой	2017	0-2	Е	0.04	0.15	0.31
Северная тайга, терраса реки Кулой	2017	8	ВНФ	0.22	0.32	0.15
Северная тайга, терраса реки Кулой	2017	35	С	0.13	0.19	0.13
Северная тайга, терраса реки Кулой	2015	5	Е	0.19	0.40	0.25
Северная тайга, терраса реки Кулой	2015	15	ВНФ	0.25	0.41	0.66
Северная тайга, терраса реки Кулой	2015	22	С	0.09	0.35	0.28

Приложение Г.4. Физико-химические свойства почв после молодых пожаров**Приложение Г.4. Условные обозначения (УО) профилей почв после молодых пожаров**

Северная тайга		
Зона пожара/сила пожара	Рельеф/год пожара	УО
Условный фон к гари 2004 г.	Карстовый, слаборасчлененный/-	1Ф2004
Граница/слабый	Среднерасчлененный/2004	2Г2004
Зона периферии /сильный	Сильнорасчлененный/2004	3П2004
Очаг/катастрофа	Сильнорасчлененный/2004	4О2004
Условный фон к гари 2015 г.	Пологоволнистый/-	5Ф2015
Очаг/сильный	Пологоволнистый/2015	6О2015
Условный фон к гари 2017 г.	Пологоволнистый/-	7Ф2017
Очаг/средний	Пологоволнистый/2017	8О2017
Средняя тайга		
Зона пожара/сила пожара	Рельеф/год пожара	УО
Условный фон к гари 2009г.	Бассейн реки, пологоволнистый, склон террасы	1Ф2009
Очаг/слабый	То же/2009г.	2О2009

Таблица Г.4а. Химические свойства органических горизонтов постпирогенных почв (мощность варьируется от 1 до 10 см). ППП – потери при прокаливании; Ц – цветность по Манселу. Предельные и средние значения каждого параметра заданы в виде: min/max/ μ , там, где выборка не допускает усреднения, дано одно значение

Северная тайга								
Зона пожара/сила пожара	Рельеф/год пожара	pH _{водный}	pH _{солевой}	ППП, %	C _{орг} , %	N _{орг} , %	C/N	Ц
Условный фон к гари 2004 г.	Карстовый, слаборасчлененный/-	5.5/6.1/ 5.8	3.5/3.6/ 3.6	64.2/89.4/7 6.8	34.8/45.3/ 40.0	1.4/1.0/ 1.2	37/39/38	10YR 3/2
Граница/слабый	Среднерасчлененный/2004	4.6/7.2/ 5.8	3.4/5.3/ 4.5	95.9/14.8/5 2.8	7.0/42.9/2 6.1	0.4/1.1/ 0.8	21/58/36	10YR 2/2
Зона периферии/сильный	Сильнорасчлененный/2004	5.7/5.9/ 5.8	4.4/4.5/ 4.4	20.7/27.9/2 4.3	14.4/19.9/ 17.1	0.6/0.8/ 0.7	27/29/28	7,5YR 2,5/2
Очаг/оч. сильный	Сильнорасчлененный/2004	5.6	3.8	80.4	42.1	1.5	33	7,5YR 2,5/3
Условный фон к гари 2015 г.	Пологоволнистый/-	5.2	4.2	53.8	30.2	0.8	43	10YR 2/2
Очаг/сильный	Пологоволнистый/ 2015	Горизонт отсутствует						
Условный фон к гари 2017 г.	Пологоволнистый/ 2017	6.3	4.6	50.3	25.6	0.5	56	7,5YR 3/2
Очаг/средний	Пологоволнистый/ 2017	6.2	4.9	25.2	Не определялось	Не определялось	Не определялось	7,5YR 2,5/2
Средняя тайга								
Зона пожара	Рельеф/год пожара	pH _{водной}	pH _{солевой}	ППП, %	C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N	Ц
Условный фон к гари 2009г.	Бассейн реки, пологоволнистый, склон террасы	6.3	4.2	20	12.8	0.4	43	7,5YR 2,5/2
Очаг/слабый	То же/2009г.	5.2	4.0	16	9.9	0.2	48	10YR 7/1

Таблица Г.4б. Химические свойства первого минерального горизонта (отбор варьировался от 2 до 20 см) постпирогенных почв северной тайги. Условные обозначения гранулометрического состава (Гран. с.), здесь и далее: п. – песок; сп. – супесь; л.с.; ср.с.; т.с. – легкий, средний и тяжелый суглинок; г. – глина. R – следовые количества; V – насыщенность основаниями

Северная тайга													
УО	pH вод-ный	pH соле-вой	Ca, г-экв/100г	Mg, г-экв/100г	V, %	Fe _{диг} , %	Fe _{окс} , %	Al _{окс} , %	Fe _{диг-Fe_{окс}} , %	C орг, %	N общ, %	C/N	Гран. с./Ц
1Ф 2004	4.8/6.0/5.4	3.9/4.2/4.0	НО	НО	НО	0.09	0.06	0.10	0.03	0.3/0.7/0.5	R	25/35/30	с.-л.с.; 10YR 7/1
2Г 2004	5.0/7.0/6.1	3.4/6.0/4.6	НО	НО	НО	0.19/0.78/0.51	0.07/0.21/0.13	0.07/0.21/0.13	0.38	1.4/4.4/3.1	0.1/0.3/0.2	20/28/23	п.-сп.; 7,5YR 3/1
3П 2004	4.8/5.8/5.3	3.7/4.4/4.1	2.52	0.87	22	0.41/0.53/0.47	0.15/0.17/0.16	0.05/0.14/0.10	0.31	0.8/2.4/1.6	0.1/0.1/0.1	18/32/25	сп.-п.; 10YR 6/2
4О 2004	5.2/6.1/5.6	4.2/4.8/4.5	НО	НО	НО	0.81/0.83/0.82	0.20/0.28/0.24	0.12/0.16/0.14	0.58	0.3/0.6/0.5	R	18/19/18	сп.-л.с.; 10YR 5/3
5Ф 2015	5.1	4.4	НО	НО	НО	0.58	0.31	0.19	0.27	2.9	0.1	57	п.; 2,5Y 7/2
6О 2015	6.0	5.0	0.69	0.18	22	0.40	0.19	0.28	0.21	0.8	R	44	п.; 10YR 7/2
7Ф 2017	6.0	4.4	НО	НО	НО	0.12	0.04	0.04	0.08	2.5	0.1	59	сп.-п.; 10YR 4/1
8О 2017	6.4/6.4/6.4	4.5/4.5/4.5	0.34	0.14	26	0.10/0.23/0.17	0.04/0.09/0.07	0.07/0.08/0.08	0.10	1.7/2.8/2.3	R/R/R	R	п.; 10YR 6/2

Таблица Г.4в. Физико-химические свойства постпирогенных почв средней тайги

Средняя тайга, сравнение гари с фоном по горизонтам														
Тип горизонта (см)	УО	pH вод-ный	pH соле-вой	Ca, г-экв/100г	Mg, г-экв/100г	V, %	Fe _{диг} , %	Fe _{окс} , %	Al _{окс} , %	Fe _{диг-Fe_{окс}} , %	C орг, %	N общ, %	C/N	Гран. с./Ц
Верхний минеральный гор. (2-7)	1Ф 2009	6.3	4.4	НО	НО	НО	0.11	0.06	0.04	0.05	0.6	R	18	п.; 10 YR 7/2
	2О 2009	6.0	4.9	0.34	0.05	22	0.07	0.01	0.01	0.06	0.1	R	21	п.; 10 YR 7/1
Средний гор. (7-10)	1Ф 2009	6.0	4.7	НО	НО	НО	0.10	0.04	0.10	0.06	0.2	R	14	п.; 10 YR 6/4
	2О 2009	5.2	4.7	0.63	0.07	21	0.49	0.19	0.16	0.30	0.7	R	26	сп.; 10 YR 6/6

Таблица Г.4в. Продолжение

Тип горизонта (см)	УО	pH водный	pH солевой	Ca, г-ЭКВ/100г	Mg, г-ЭКВ/100г	V, %	Fe _{диг} , %	Fe _{окс} , %	Al _{окс} , %	Fe _{диг} ⁻ Fe _{окс} , %	C орг, %	N общ, %	C/N	Гран. с./Ц
Переход к породе (35-50)	1Ф 2009	Верховодка												
	2О 2009	5.2	4.7	1.13	0.26	67	0.24	0.07	0.19	0.17	0.1	R	13	сп.; 10 YR 7/4
Породы (50-80)	1Ф 2009	Верховодка												
	2О 2009	6.8	4.9	НО	НО	НО	0.13	0.03	0.11	0.10	0.1	R	8	сп.; 10 YR5/6

Таблица Г.4г. Химические свойства срединных горизонтов постпирогенных почв северной тайги (отбор варьировался от 20 до 40 см).

УО	pH водный	pH солевой	Ca, г-ЭКВ/100г	Mg, г-ЭКВ/100г	V, %	Fe _{диг} , %	Fe _{окс} , %	Al _{окс} , %	Fe _{диг} ⁻ Fe _{окс} , %	C орг, %	N общ, %	C/N	Гран. с./Ц
1Ф 2004	5.1/ 6.0/ 5.5	4.2/ 4.4/ 4.3	НО	НО	НО	1.47	0.59	1.54	0.88	0.3/ 1.1/ 0.7	R/R /R	21/ 35/ 28	с.-л.с.; 10YR 4/6
2Г 2004	5.3/ 7.5/ 6.4	4.1/ 7.0/ 5.5	НО	НО	НО	0.79/ 1.14/ 0.97	0.21/ 0.55/ 0.38	0.60/ 0.66/ 0.63	0.59	1.6/ 3.5/ 2.6	0.1/ 0.2/ 0.2	17/ 19/ 18	сп.; 10YR 5/4
3П 2004	5.6/ 5.7/ 5.7	4.4/ 4.4/ 4.4	3.04	1.00	42	0.70/ 1.09/ 0.90	0.22/ 0.43/ 0.33	0.19/ 0.28/ 0.24	0.57	0.3/ 0.5/ 0.4	R/R /R	18/ 18/ 18	п.-сп.; 7,5YR 6/6
4О 2004	6.5	4.7	НО	НО	НО	1.09	0.3	0.19	0.79	1.6	0.1	19	сп.-л.с.; 7,5YR 4/4
5Ф 2015	5.1	4.6	НО	НО	НО	0.63	0.37	0.66	0.26	0.7	R	28	сп.-п.; 10YR 6/4
6О 2015	5.6	5.1	0.85	0.11	23	0.41	0.25	0.66	0.16	0.4	R	24	п.; 10YR 7/3

Таблица Г.4з. Продолжение

УО	pH вод-ный	pH соле-вой	Ca, г-экв/100г	Mg, г-экв/100г	V, %	Fe дит, %	Fe окс, %	Al окс, %	Fe дит-Fe окс, %	C орг, %	N общ, %	C/N	Гран. с./Ц
7Ф 2017	5.8	4.8	НО	НО	НО	0.30	0.19	0.04	0.11	2.3	0.1	44	п.-сп.; 10YR 4/4
8О 2017	6.2/ 6.9/ 6.6	4.9/ 5.0/ 4.9	0.39	0.16	13	0.28/ 0.63/ 0.46	0.09/ 0.22/ 0.17	0.15/ 0.31/ 0.24	0.29	0.2/ 1.6/ 0.9	R/R /R	23/ 37/ 32	сп.-п.; 10YR 4/4

Таблица Г.4д. Химические свойства глубинных горизонтов постпирогенных почв северной тайги (отбор варьировался от 40 до 120 см) постпирогенных почв северной тайги. Н – ниже пределов обнаружения.

УО	pH вод-ный	pH соле-вой	Ca, г-экв/100г	Mg, г-экв/100г	V, %	Fe дит, %	Fe окс, %	Al окс, %	Fe дит-Fe окс, %	C орг, %	N общ, %	C/N	Гран. с./Ц
1Ф 2004	5.5/ 6.7/ 5.9	4.4/ 4.5/ 4.4	НО	НО	НО	0.80/ 0.84/ 0.82	0.22/ 0.27/ 0.25	0.16/ 0.32/ 0.24	0.57	0.1/ 0.7/ 0.4	R/R /R	16/ 25/ 20	л.с.- ср.с.; 10YR 6/3
2Г 2004	6.6	4.2	НО	НО	НО	1.18	0.32	0.34	0.86	0.40	R	15	сп; 10YR 7/3
3П 2004	5.7/ 6.6/ 6.0	4.3/ 4.6/ 4.4	3.8	1.27	55	0.54/ 0.84/ 0.69	0.15/ 0.30/ 0.21	0.10/ 0.31/ 0.17	0.52	0.1/ 0.4/ 0.2	R/R /R	15/ 22/ 20	сп.; 10YR 6/2
4О 2004	Плотная порода												
5Ф 2015	5.1	4.7	0.44	0.29	30	0.71	0.25	0.65	0.46	0.4	R	25	сп.; 10YR 6/6
6О 2015	5.8	5.1	НО	НО	НО	0.35	0.09	0.28	0.26	0.1	Н	НО	п.; 10YR 6/6
7Ф 2017	5.6	5.0	НО	НО	НО	0.23	0.12	0.39	0.11	0.6	R	33	п.-сп.; 10YR 6/6
8О 2017	6.2/ 7.3/ 6.7	4.8/ 5.1/ 5.0	0.34	0.14	26	0.13/ 0.26/ 0.20	0.05/ 0.13/ 0.09	0.23/ 0.37/ 0.30	0.11	0.1/ 0.3/ 0.2	Н/Н /Н	НО	п.; 10YR 4/4

Приложение Г5. Физико-химические свойства почв после средневозрастных пожаров

Таблица Г.5. Условные обозначения фона и постпирогенных почв

Северная тайга		
Зона пожара/сила пожара	Рельеф/год пожара	УО
Автоморфные ус./слабый	Ледникового происхождения, слабоволнистый/1937 г.	1А1937
Переходные ус./слабый-средний	То же, плосковолнистый/1937г.	2П1937
Полугидроморфные ус./средний	То же, плосковолнистый/1937г.	3П1937
Очаг гари/сильный	Антропогенный нанос, вершина холма/1990г.	4О1990
Средняя тайга		
Условный фон к гари 1934г.	Увалистое предгорье Урала	1Ф1934
Периферия/средний	Увалистое предгорье Урала/1934г.	2П1934
Граница/слабый	Терраса Печоры/≈1950г.	3Г1950
Условный фон к гари 1978г.	Верхняя пойма Печоры	4Ф1978
Очаг/средний	Верхняя пойма Печоры/1978	5О1978

Таблица Г.5а. Химические свойства органогенных горизонтов постпирогенных почв (отбор варьировался от 2 до 10 см).

Северная тайга								
Зона пожара/сила пожара	Рельеф/год пожара	рН водный	рН _{солевой}	ППП, %	С _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N	Ц
Автоморфные ус./слабый	Ледникового происхождения, слабоволнистый/1937 г.	5.3	4.2	92	45.7	1.1	47	10YR 2/2
Переходные ус./слабый-средний	То же, плосковолнистый/1937г	5.2	4.0	48	25.3	0.9	32	7,5YR 2,5/2
Полугидроморфные ус./средний	То же, плосковолнистый/1937г	6.8	5.1	46	45.7	1.1	47	10YR 2/2
Очаг гари/сильный	Антропогенный нанос, вершина холма/1990г.	6.6	4.1	37	19.3	0.7	32	7,5YR 2,5/2
Средняя тайга								

Таблица Г.5а. Продолжение

Зона пожара/сила пожара	Рельеф/год пожара	pH водный	pH _{солевой}	ППП,%	C _{орг} ,%	N _{общ} ,%	C/N	Ц
Условный фон к гари 1934 г.	Увалистое предгорье Урала	5.9	4.1	50	26.2	1.1	28	7,5YR 2,5/2
Периферия/средний	Увалистое предгорье Урала/1934г.	5.3	4.5	27	14.9	0.7	25	7,5YR 2,5/2
Граница/слабый	Терраса Печоры/≈1950г.	5.9	3.8	34	17.8	0.7	29	2,5YR 5/1
Условный фон к гари 1978 г.	Верхняя пойма Печоры	5.9	5.8	10	7.2	0.5	18	10YR2/2
Очаг/средний	Верхняя пойма Печоры/1978 г.	7.5	7.2	27	10.0	0.7	16	10YR2/1

Таблица Г.5б. Химические свойства первого минерального горизонта постпирогенных почв северной тайги (отбор варьировался от 3 до 15 см)

УО	pH водный	pH солевой	Ca, г-экв/100г	Mg, г-экв/100г	V,%	Fe дит., %	Fe окс., %	Al окс., %	Fe _{дит} - Fe _{окс.} , %	C орг., %	N общ., %	C/N	Гран. с./Ц
1А 1937	5.1	3.9	8.07	0.69	11	НО	НО	НО	НО	1.0	R	39	сп.-л.с.; 7,5YR 7/1
2П 1937	4.7	3.8	НО	НО	НО	НО	НО	НО	НО	0.6	R	24	п.; 7,5YR 7/1
3П 1937	5.6	3.7	НО	НО	НО	НО	НО	НО	НО	0.1	H	НО	сп.; 7,5YR 7/1
4О 1990	5.3	3.9	1.27	0.22	34	0.19	0.01	0.03	0.18	0.8	R	30	п.-сп.; 2,5Y 8/1

Таблица Г.5в. Химические свойства первого минерального горизонта постпирогенных почв средней тайги (отбор варьировался от 7 до 13 см).

УО	pH _{водный}	pH _{солевой}	Ca, г-экв/100г	Mg, г-экв/100г	V,%	C _{орг} ,%	N _{общ} ,%	C/N	Гран. с./Ц
1Ф1934	5.2	3.9	0.91	0.23	8	1.6	0.1	21	сп.-п.; 7,5 YR 6/4
2П1934	5.4	4.4	НО	НО	НО	13.5	0.5	30	л.с.; палево-серый

Таблица Г.5в. Продолжение

УО	pH _{водный}	pH _{солевой}	Ca, г-экв/100г	Mg, г-экв/100г	V, %	C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N	Гран. с./Ц
3Г1950	4.9	3.4	НО	НО	НО	2.6	0.1	22	сп.; 7,5 YR 5/2
4Ф1978	5.2	5.1	НО	НО	НО	3.7	0.3	17	л.с.; 10YR 5/1
5О1978	Отсутствует								

Таблица Г5.г. Химические свойства срединных горизонтов постпирогенных почв северной тайги (отбор варьировался от 15 до 30 см).

УО	pH _{водный}	pH _{солевой}	Ca, г-экв/100г	Mg, г-экв/100г	V, %	Fe _{дигт} , %	Fe _{окс} , %	Al _{окс} , %	Fe _{дигт} - Fe _{окс} , %	C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N	Гран. с./Ц
1А 1937	5.3	4.8	0.87	5.07	55	НО	НО	НО	НО	0.4	R	22	л.с.; 10YR 7/2
2П 1937	6.2	4.8	НО	НО	НО	НО	НО	НО	НО	0.8	R	25	п.-сп.; 10YR5/4
3П 1937	5.9	4.2	НО	НО	НО	НО	НО	НО	НО	0.6	R	34	ср.с.; 10YR 7/3
4О 1990	5.8	4.6	1.95	0.16	35	0.93	0.48	1.15	0.45	0.8	R	33	сп.-л.с.; 7,5YR 4/4

Таблица Г.5д. Химические свойства срединных горизонтов постпирогенных почв средней тайги (отбор варьировался от 13 до 30 см).

УО	pH _{водный}	pH _{солевой}	Ca, г-экв/100г	Mg, г-экв/100г	V, %	C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N	Гран. с./Ц
1Ф1934	5.3	4.2	10.22	0.79	47	1.5	0.1	20	сп.; 7,5YR 4/6
2П1934	4.9	4.3	НО	НО	НО	1.3	0.1	17	ср.с.; 7,5YR3/3
3Г1950	5.4	4.1	НО	НО	НО	2.2	0.1	25	п.-сп.; 7,5YR 5/6
4Ф1978	5.1	4.9	НО	НО	НО	1.7	0.1	15	ср.с.; светло-бурый

501978	Отсутствует
--------	-------------

Таблица Г.5е. Химические свойства глубинных горизонтов постпирогенных почв гарей северной тайги (отбор варьировался от 30 до 50 см).

УО	pH водный	pH солевой	Ca, г-экв/100г	Mg, г-экв/100г	V, %	Fe _{диг} , %	Fe _{окс} , %	Al _{окс} , %	Fe _{диг} - Fe _{окс} , %	C орг, %	N общ, %	C/N	Гран. с./Ц
1А 1937	5.7	4.4	0.63	0.33	16	НО	НО	НО	НО	0.1	R	11	ср.с.; 10YR 7/2
2П 1937	Не определялся												
3П 1937	5.8	3.9	НО	НО	НО	НО	НО	НО	НО	0.8	R	25	т.с.; 10YR 7/2
4О 1990	5.8	5.3	1.3	0.5	44	0.41	0.12	0.14	0.29	0.2	R	20	сп.; 10YR 7/3

Таблица Г.5ж. Химические свойства глубинных горизонтов постпирогенных почв средней тайги (отбор варьировался от 30 до 60 см).

УО	pH _{водный}	pH _{солевой}	Ca, г-экв/100г	Mg, г-экв/100г	V, %	C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N	Гран. с./Ц
1Ф1934	5.1	4.3	0.97	0.16	7	1.3	0.10	20	сп.; 7,5YR 4/6
2П1934	5.0	4.2	НО	НО	НО	1.0	0.1	16	ср.с.; 7,5YR3/3
3Г1950	5.4	4.2	НО	НО	НО	0.9	0.1	18	п.-сп.; 7,5YR 5/6
4Ф1978	5.1	4.8	НО	НО	НО	1.3	0.1	15	ср.с.; светло-бурый
501978	Отсутствует								

Приложение Г.6. Физико-химические свойства почв после старовозрастных пожаров

Таблица Г.6. Условные обозначения почв

Северная тайга		
Зона пожара/сила пожара	Рельеф/год пожара	УО
Повышение	Склон террасы/1860 г.	1П1860
Воронка	Карстовый среднерасчлененный/1860г.	2В1860
Средняя тайга		

Таблица Г.6. Продолжение

Зона пожара/сила пожара	Рельеф/год пожара	УО
Неизвестно	Верхняя террасы Печоры реки/≈1619г.	1Н1619
Неизвестно	Верхняя терраса Печоры/≈1719г.	2Н1719
Периферия/неизвестно	Нижняя терраса Печоры/1850г.	3П1850
Очаг/неизвестно	Верхняя пойма Печоры/1940	4О1940
Периферия/неизвестно	Верхняя терраса Печоры/1900г.	6П1900

Таблица Г.6а. Химические свойства органических горизонтов постпирогенных почв северной тайги (отбор варьировался от 5 до 7 см).

Зона пожара	Рельеф/год пожара	pH _{водный}	pH _{солевой}	ППП, %	C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N	Ц
Повышение	Склон террасы/1860 г.	6.5	5.4	68	36.8	1.4	31	10YR 2/2
Воронка	Карстовый среднерасчлененный/1860г.	Не рассматривался						

Таблица Г.6б. Химические свойства органических горизонтов постпирогенных почв средней тайги (отбор варьировался от 2 до 35 см).

Зона пожара/сила пожара	Рельеф/год пожара	pH _{водный}	pH _{солевой}	ППП	C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N	Ц
Неизвестно	Верхняя терраса, ровный/≈1619г.	5.9	4.6	46	25.0	1.3	22	10YR 2/2
Неизвестно	Верхняя терраса, ровный/≈1719г.	5.7	5.4	41	21.5	1.1	22	10YR 2/2
Периферия/неизвестно	Нижняя терраса, уклон 1-2°/1850г.	НО						
Периферия/неизвестно	Верхняя терраса, уклон 2-3°/1900г.	5.3	3.1	34	15.8	0.1	20	2,5YR 2,5/2

Таблица Г.6г. Сравнение по горизонтам почв воронки и повышения северной тайги

Тип горизонта (см)	УО	pH водный	pH солевой	Ca, г-экв/100г	Mg, г-экв/100г	V, %	C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N	Гран. с./Ц
Верхний минеральный гор. (10-15)	1П1860	5.3	4.2	НО	НО	НО	1.4	0.1	21	сп.; 5YR 4/6
	2В1860	5.4	4.5	0.75	0.41	43	0.2	R	32	п.; светло-серый
Срединный гор. (15-20)	1П1860	7.1	6.5	НО	НО	НО	2.7	0.2	18	сп.; черный
	2В1860	5.4	4.9	7.9	0.11	64	0.6	R	24	сп.; бурый, с сизым оттенком
Палеогоризонт (20-100)	1П1860	8.1	7.1	НО	НО	НО	0.8	R	24	сп.-п.; 10YR 6/3
	2В1860	5.5	4.8	3.4	1.17	44	0.2	R	23	п.-сп.; бурый, с сизым оттенком

Таблица Г.6д. Химические свойства верхних минеральных и глубинных горизонтов почв средней тайги

Верхние минеральные горизонты (7-15 см)										
УО	pH _{водный}	pH _{солевой}	Ca, г-экв/100г	Mg, г-экв/100г	V, %	C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N	Гран. с./Ц	
1Н1619	4.5	4.3	НО	НО	НО	2.1	0.1	17	сп.-л.с.; 7,5YR 5/6	
2Н1719	Отсутствует									
3П1850	5.2	4.5	3.0	0.8	21	2.3	0.2	14	сп.-л.с.; 10YR 5/2	
4О1940	5.6	4.7	НО	НО	НО	0.9	0.1	11	л.с.; 10YR 4/4	
6П1900	4.6	3.9	НО	НО	НО	4.8	0.3	19	л.с.-ср.с.; 7,5 YR 4/2	
Срединные горизонты (25-50 см)										
УО	pH _{водный}	pH _{солевой}	Ca, г-экв/100г	Mg г-экв/100г	V, %	C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N	Гран. с./Ц	
1Н1619	4.7	4.6	НО	НО	НО	1.1	0.1	16	л.с.; 7,5YR 4/6	

Таблица Г.6д. Продолжение

УО	pH _{водный}	pH _{солевой}	Ca, г- экв/100г	Mg г- экв/100г	V, %	C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N	Гран. с./Ц
2Н1719	6.2	5.3	НО	НО	НО	1.4	0.1	16	л.с.; 7,5YR 3/3
3П1850	5.1	4.6	5.1	0.6	35	0.9	0.1	9	л.с.-ср.с.; 10YR 7/3
4О1940	6.0	5.3	НО	НО	НО	2.6	0.2	20	л.с.-ср.с.; 7,5YR 4/3
6П1900	4.8	3.9	НО	НО	НО	1.9	0.1	20	л.с.-ср.с.; 7,5 YR 4/2
Глубинные горизонты (50-100 см)									
УО	pH _{водный}	pH _{солевой}	Ca, г- экв/100г	Mg г- экв/100г	V, %	C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N	Гран. с./Ц
1Н1619	5.1	4.5	НО	НО	НО	0.4	R	15	ср.с.; 7,5YR 4/4
2Н1719	6.4	5.3	НО	НО	НО	0.5	R	14	л.с.-ср.с.; 10YR 3/6
3П1850	5.1	4.4	6.92	0.47	80	0.4	0.1	4	ср.с.-т.с.; 10YR 6/2
4О1940	6.4	5.5	НО	НО	НО	1.3	0.1	15	ср.с.; 10 YR7/3
6П1900	Плотная порода - кристаллические сланцы								