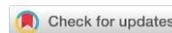


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-109-145



Ссылки для цитирования:

Петров Д.Г. Пути миграции углистых частиц в постпирогенных почвах тайги и тундры в зависимости от особенностей пожара и факторов среды // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 109-145. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-109-145

Cite this article as:

Petrov D.G. The paths of migration of charcoal particles in the post-pyrogenic soils of the taiga and tundra depending on features of fire and environmental factors, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, V. 105, pp. 109-145, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-109-145

Благодарность:

Автор выражает благодарность А.А. Семиколенных, А.А. Алейникову, Л.В. Пучниной, администрациям Печоро-Ильчского и Пинежского заповедников, лесничествам Пинежского лесхоза, Г.В. Матышаку и О.Ю. Гончаровой за возможность участия в экспедиции и предоставленные данные. Особую признательность автор выражает С.В. Горячкину, Н.С. Мергелову, Э.П. Зазовской, А.В. Долгих и научной группе SoilArt. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: № 19-29-05238 “мк” и № 18-05-60279 “Арктика”, а также государственного задания ИГ РАН № 0148-2019-0006 (концептуальное моделирование миграции углистых частиц).

Acknowledgments:

The author expresses gratitude to A.A. Semikolenykh, A.A. Aleinikov, L.V. Puchnina, the administrations of the Pechora-Ilych and Pinezhsky reserves, and the Pinezhsky forestries, to G.V. Matyshak and O.Yu. Goncharova for the opportunity to participate in the expedition and for the data provided. The author especially wants to thank S.V. Goryachkin, N.S. Mergelov, E.P. Zazovskaya, A.V. Dolgikh and SoilArt Research Group. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) in the framework of the scientific projects: No. 19-29-05238 “mk” and No. 18-05-60279 “Arktika”, as well as by the state assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences No. 0148-2019-0006 (conceptual modeling of charcoals particles migration).

¹Пути миграции углистых частиц в постпирогенных почвах тайги и тундры в зависимости от особенностей пожара и факторов среды

© 2020 г. Д. Г. Петров

*Институт географии РАН (ИГ РАН),
119017, Москва, Старомонетный переулок, 29, стр. 4,
<https://orcid.org/0000-0001-8338-5169>, email: pd437807@mail.ru.
Поступила в редакцию 14.05.2020, после доработки 15.12.2020,
принята к публикации 17.12.2020*

Резюме: Работа посвящена анализу закономерностей перемещения углистых частиц в испытывающих периодическое влияние пожаров экосистемах средней тайги, северной тайги и южной тундры. Так как хвойная растительность подвержена интенсивному горению, пожары часто приводят к циклическим изменениям в растительном покрове. В ходе горения происходит повреждение подстилки, что делает почвенный покров уязвимым для эрозии. Интенсивные пожары оказывают влияние на количество пирогенного материала, способного храниться тысячелетиями в благоприятных условиях. Целью исследования стало оценить воздействие факторов среды на особенности миграции углистых частиц в современных хронорядях пожаров (от 1 года до 119 лет). Были рассмотрены особенности почв (гранулометрический состав, влажность), особенности рельефа (наличие понижений), влияние интенсивности осадков после пожара, а также специфика горючего материала подстилки. На территории средней и северной тайги, в Печоро-Ильчском и Пинежском заповедниках, рассмотрены текстурно-дифференцированные и альфегумусовые почвы. На территории южной тундры, в районе п. г. т. Заполярный, рассмотрены торфяно-глееземы. Выявлено, что миграция углей в глубину почвенного профиля в наибольшей степени зависит от гранулометрического состава – так, в более опесчаненных почвах угли рассеяны по всему профилю, а в тяжелых почвах они сконцентрированы выше первого тяжелого горизонта. Характер миграции углей определяет их форма и размер,

¹ Статья рекомендована к публикации по итогам Четвертой открытой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева “Почвоведение: Горизонты будущего”, 11–14 февраля 2020 г.

которые зависят от типа сгоревшего растительного сообщества. Сообщества с разрозненным древостоем с преобладанием в мохово-лишайниковом покрове лишайников горят с образованием микрочастиц угля или дисперсных углистых частиц, легко перемещающихся по профилю почвы (до глубины 80 см). Растительные сообщества, имеющие в своем составе больше древесных видов, формируют при горении крупные углистые частицы, часто присутствующие в новообразованной подстилке. На миграцию угля оказывает влияние как климат природной зоны, так и постпирогенная эрозия. Таким образом, в зависимости от разнообразия условий среды скорость и объемы миграции углистых частиц значительно варьируют как при сравнении разных природных зон, так и в пределах одной зоны. Разработаны четыре схемы путей миграции углистых частиц по профилю с течением времени: равномерно-диффузная, неравномерно-диффузная, барьерная и турбационная.

Ключевые слова: дисперсные углистые частицы, пиролиз, пирогенное событие, интенсивность пожара, послепожарная эрозия, периодичность пожаров, республика Коми.

²The paths of migration of charcoal particles in the post-pyrogenic soils of the taiga and tundra depending on features of fire and environmental factors

D. G. Petrov

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
4 Bld. 29 Staromonetny per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0001-8338-5169>, email: pd437807@mail.ru.*

Received 14.05.2020, Revised 15.12.2020, Accepted 17.12.2020

Abstract: The work is devoted to the analysis of the regularities of the movement of charcoal particles in the ecosystems of the middle taiga, northern taiga and southern tundra experiencing the influence of fires. Since coniferous vegetation is subjected to intense combustion, fires often lead to cyclical changes in the vegetation cover. The process of burning leads to the forest

² The article was recommended for publication at the Fourth Open Conference of Young Scientists of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute. “Soil Science: Horizons of the Future”, February 11–14, 2020.

litter damage, making the soil cover vulnerable to erosion. Intense fires affect the amount of pyrogenic material that can be stored for thousands of years under favorable conditions. The aim of the research was to estimate the influence of environmental factors on the use of carbonaceous particles in modern time series (from 1 to 119 years). The features of soils (particle size distribution, moisture content), relief features (presence of depressions), the effect of precipitation material after a fire, as well as features of combustible litter were considered. On the territory of the middle and northern taiga, in the Pechora-Ilychsky and Pinezhsky reserves, textural-differentiated and alpha-humus soils are considered. On the territory of the southern tundra, in the area of the settlement Zapolyarny, peat-gley soils are considered. It was revealed that the migration of coal to the depth of the soil profile depends to the greatest extent on the particle size distribution – for example, in more sandy soils, coals are scattered throughout the profile, and in clay soils they are concentrated above the first fine-textured horizon. The nature of the coals determines their shape and size, which depend on the type of burnt plant community. Communities with a scattered stand, dominated by lichens in the moss-lichen cover, burn with the formation of microparticles of coal or dispersed carbonaceous particles that easily move along the soil profile (up to the depth of 80 cm). Plant communities with more tree species in their composition, during combustion form large carbonaceous particles, which are often present in the newly formed litter. Charcoal migration is influenced by both the climatic zone and post-pyrogenic erosion. Thus, depending on the variety of environmental conditions, the speed and volume of movement of carbonaceous particles change significantly both when comparing different natural zones and within one zone. Four schemes have been developed for the motion of charcoal along the profile over time: uniformly diffused, unevenly diffused, barrier and turbation.

Keywords: dispersed charcoal particles, pyrogenesis, pyrogenic event, fire intensity, postfire erosion, frequency of fires, Komi Republic.

ВВЕДЕНИЕ

Миграция углистых частиц может служить ключом к реконструкции распространения и интенсивности горения современных пожаров. Важным понятием для описания миграции углистых частиц является понятие антракомассы. Антракомасса или концентрация углистых частиц в почве – это совокупная масса углей, погребенная в почвенном профиле. Также антракомасса может быть определена в отдельном почвенном горизонте или, например, под-

стилке. Данные о путях миграции продуктов пожара помогают оценить степень влияния пирогенного события на эрозию почвенного покрова; в комбинации с дендрохронологическим методом помогают выявить несколько пирогенных событий, наложенных друг на друга (по возрасту шрамов от пожаров), а с использованием метода сухого просеивания позволяют определить концентрацию антракомассы в почвенном профиле ([Carcaillet, Thinon, 1996](#)). Интенсивность пожара определяется температурой горения, что напрямую отражается на повреждениях растительности. В зависимости от температуры горения значительно меняется состав растительных сообществ, химические и физические свойства почв ([Certini, 2005](#)). Исследования путей миграции углистых частиц представляется автору актуальным направлением исследований пирогенеза.

Устойчивость к внешним воздействиям, наряду с хорошей сохранностью анатомической структуры углей ([Scott, 2009](#)), дает возможность определять состав пород на момент пожара ([Бобровский, 2010](#); [Jones et al., 1991](#); [Scott, Jones, 1991](#); [Scott, 2000a](#)). Благодаря современным возможностям мониторинга пожаров (Геосервис “Сканэкс”, <https://fires.ru/>) появилась возможность связать возраст пожара с глубиной проникновения углистых частиц в почвенный профиль. Почвы, в отличие от осадочных пород, обладают особым, палимпсестовым типом записи информации ([Гаргульян, 2019](#)). Такой тип записи, в отличие от книгоподобного в осадочных породах, характеризуется стиранием (полным или частичным) предыдущего этапа функционирования почв и наложению поверх него нового.

В работах, посвященных теме миграции углистых частиц, делается упор на характерные почвенные морфоны, такие как углистые прослои ([Чевычелов, 1997](#)) или угли в пахотном слое и характерные образования от вывалов ([Бобровский, 2010](#); [Bobrovsky et al., 2018](#)). В статье сделана попытка описать закономерности путей миграции углей вне морфонов так как в почвах может не быть вывалов, заполненных углистыми частицами, пахотного горизонта со следами подсечно-огневого земледелия, пирогенных (с высокой концентрацией продуктов горения) горизонтов. Для прогноза закономерности миграции углистых частиц требуется учи-

тывать такие факторы: климат, изменение параметров почвы продуктами горения, интенсивность пожара, в частности температуру горения, видовой состав древесных пород, размеры углистых частиц.

Климат влияет на миграцию продуктов после оголения почвенного покрова – через слепожарную эрозию, вызванную осадками и ветром. Масса углей (антракомасса), эродированных вместе с верхним почвенным слоем в понижениях рельефа всегда выше, чем на повышенных участках ([Moody, Martin, 2001](#); [Shakesby, Doerr, 2006](#)). Это обуславливает поиск углистого материала не только в автоморфных позициях, но и в днищах оврагов, пересохших руслах и других аккумулятивных формах рельефа для формирования полной картины распределения продуктов пожара.

Отдельную группу продуктов пожара составляют ароматические вещества, влияющие на изменения гидрофобных свойств почвы ([Дымов и др., 2015](#); [Sander, Pignatello, 2005](#); [Bodi et al., 2011](#)). Заболачивание, возникающее после особо интенсивных пожаров, обуславливает перенос углистых частиц на значительное расстояние от эпицентра пирогенного события ([Clark, Patterson, 1997](#)).

Другим фактором выступает видовой состав деревьев, который может повлиять на полноту сгорания. В результате действия высокой температуры происходит разрушение части химических связей и изменения функциональных групп, что называется пиролизом ([Bustin, Guo, 1999](#)). Установлено, что древесина большинства лесов, к примеру, включает около 70% целлюлозы и 30% лигнина (без учета других составляющих). В течение процесса обугливания лигнин оказывается устойчивей, чем целлюлоза. Так, после вытеснения влаги (110 °C) начинает разлагаться целлюлоза (110–270 °C) с образованием газов и смол. Лигнин же начинает разрушаться только при температуре 400 °C, а с образованием угля – при температуре около 500 °C ([Pyne et al., 1996](#)). Таким образом, содержание лигнина в древесине косвенным образом влияет на количество образовавшихся углей. Стоит так же отметить, что, если территория подверглась влиянию нескольких пожаров, то возможно дожигание старых продуктов пиролиза ([Certini, 2005](#)). То есть сохранность углей может зависеть от периодичности по-

жаров.

Размер углистых частиц также имеет большое значение. Угли большего размера в ряде экспериментов показали лучшую плаваемость, чем более мелкие ([Vaughn, Nichols, 1995](#)). Николс с соавторами ([Nichols et al., 2000](#)) выявил, что угли могут перемещаться на значительные расстояния в состоянии суспензии, и смогли объяснить их обилие в некоторых прибрежных морских отложениях.

Картину усложняет тот факт, что в зависимости от типа растительности одна и та же температура горения может вызвать гибель леса и полное его сгорание (ель или сосна), или проявиться только в виде шрамов после пожара (лиственница). Связать уголь с определенным видом растения (за исключением мхов, лишайников и трав) бывает просто, так как уголь в большинстве случаев характеризуется хорошей сохранностью ([Scott, 2001](#)). Есть сведения о сохранении в исходном виде даже лепестков растений ([Prior, Alvin, 1983](#); [Lupia, 1995](#)).

Таким образом, характер растительности напрямую связан со следующим фактором миграции продуктов пожара – размером углистых частиц. Частицы угля от 0.001 до 0.063 мм разносятся ветром как часть дыма ([Komarek et al., 1973](#)) и называются дисперсными углистыми частицами. Часто такие частицы в виде маленьких угольных фрагментов образуют листья и тонкие веточки, в результате сожжения верховым/кроновым пожаром. Воздушный тип переноса – наиболее дальний – частицы могут перемещаться на многие километры от места пожара ([Clark, 1988](#)). В зависимости от массы частиц происходит их постепенное оседание, и наиболее тяжелые располагаются ближе к эпицентру ([Clark, Patterson, 1997](#)). По этой причине связать наиболее мелкие частицы угля с определенным пожаром затруднительно.

Угли, имеющие размерность от 0.063 до 0.5 мм, переносятся в основном водными потоками.

Более крупные частицы (> 0.5 мм) часто используются для анализа интервала между пожарами ([Clark, Patterson, 1997](#)). Угли самого разного размера могут образовываться при горении кустарничков и подстилки, а не только древесных остатков, что надо учитывать при исследованиях. Взвешенные частицы переносятся в реки, после чего, дойдя по руслу до заболоченного участка, могут

сформировать пирогенный слой.

Так как ветром переносится небольшое количество углей размером более 0.063 мм, то их скопление в наибольшей степени указывает на факт локального пожара ([Clark et al., 1997](#)). Это подтверждают исследования ученых, показавших ограниченный радиус распространения макрочастиц углей, по сравнению с другими его размерностями: [Nichols et al., 2000](#); [Scott, 2000a](#); [Scott, 2000b](#).

При застойном увлажнении частицы угля любого размера с течением времени оседают на дно ближайшего водоема или болота. Осев один раз, как показано в опыте Николса и соавторов ([Nichols et al., 2000](#)), он становится малоподвижным и для его дальнейшего переноса требуется течение с большой кинетической силой.

Таким образом, уголь размером от 0.063 мм до 0.5 мм может использоваться для определения региональных пожаров. Уголь > 0.5 мм, при его большом скоплении, – свидетельство локального пожара. Смесь углей разного размера тоже указывает на локальные пожары ([Collinson et al., 2007a](#)).

Другие важные факторы миграции могут определяться особенностями самого пожара. Так, для определения миграции и масштабов распространения огня важно определить тип пожара (верховой, низовой), его интенсивность и учесть особенности местности.

В данной работе предполагается, что в разных природных зонах, в зависимости от типа почв, растительности, интенсивности пожара и параметров климата, характер миграции углей существенно меняется. В зависимости от совокупности факторов среды на момент пожара образуются углистые частицы разного размера, меняется характер их распределения по профилю и место аккумуляции в рельефе. Однако, выделив для каждой природной зоны условия среды, значимо влияющие на миграцию продуктов горения, можно предсказать характер их залегания в профиле.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проходили в трех различных районах. Первый район находился в Печоро-Илычском заповеднике (республика

Коми, Троицко-Печорский район), в подзоне средней тайги. Объекты исследования данного участка находились вверх по течению р. Печоры от поселка Якша. Средняя температура января – $-18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, июля – $+16.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, количество осадков 675 мм/год , сумма активных температур $1\ 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.1) ([Семиколенных и др., 2013](#)).

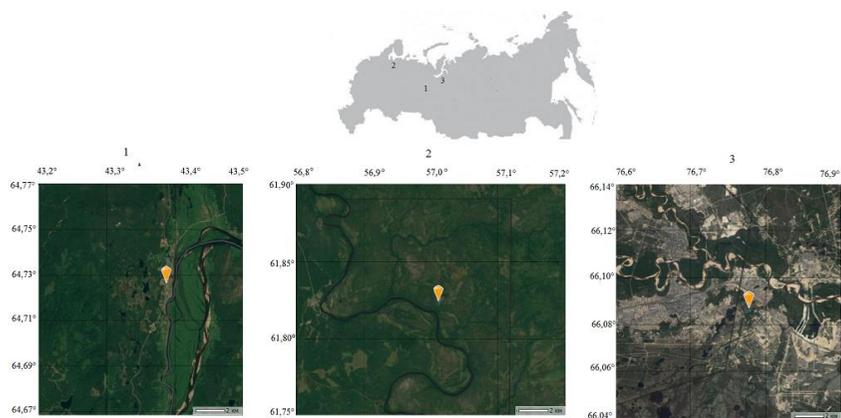


Рис. 1. Расположение районов исследования на контуре России: **1** – Печоро-Илычский заповедник, республика Коми, подзона средней тайги. **2** – Окрестности п. г. т. Пинега, Архангельская область, подзона северной тайги. **3** – Окрестности г. Новый Уренгой, Ямало-Ненецкий автономный округ, граница подзон северной тайги и южной тундры.

Fig. 1. Location of the study areas on the contour of Russia: **1** – Pechora-Ilychsky Nature Reserve, Komi Republic, middle taiga subzone. **2** – Neighborhoods of the urban village of Pinega, Arkhangelsk region, subzone of northern taiga. **3** – Neighborhoods of Novy Urengoy, Yamalo-Nenets Autonomous region, border of subzones of northern taiga and southern tundra.

Были исследованы подзолистые почвы и буроземы. Данные о восьми разрезах представлены в таблице (табл. 1). Разрезы заложены на террасах р. Печоры. Здесь и далее возраст пожаров посчитан на момент исследования – 2019 г. В данном районе наибольшее влияние на миграцию углей оказали высокая влажность и суглинистый гранулометрический состав почв. Рассмотренные пожары зачастую низовые, слабоинтенсивные.

Таблица 1. Объекты в подзоне средней тайги (данные о возрасте пожаров предоставлены А.А. Алейниковым)
Table 1. Objects in the middle taiga subzone (data on the age of fires provided by A.A. Aleinikov)

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей в профиле	Особенности растительности	Возраст пожара	Характер рельефа
Терраса р. Печоры	N: 62°02'11" E: 58°58'07"	Подзолистоглеевая типичная	Первые 30 см	Папоротник с мало-мощной подстилкой и разреженным древостоем	169 лет	Плоский, приствольные повышения
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	79лет	Пологий
Терраса р. Печоры,	N: 62°00'03" E: 58°46'03"	Бурозем грубогумусированный	С поверхности	Разнотравье с бедной подстилкой и плотным древостоем	119 лет	Пологий
Терраса р. Печоры	N: 62°06'08" E: 58°24'57"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Ельник-черничник с плотным древостоем	119 лет	Плоский, приствольные повышения

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей в профиле	Особенности растительности	Возраст пожара	Характер рельефа
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
Терраса р. Печоры, высокий берег	N: 62°03'54" E: 58°29'05"	Подзол иллювиально- железистый	Весь профиль	Ельник-черничник с плотным древостоем	Около 50 лет	Плоский, пристволь- ные повы- шения
Поселок Якша	N: 61°49'12" E: 56°52'39"	Подзол иллювиально- железистый	Весь профиль	Лишайник с редким древостоем	Около 10 лет	Плоский, пристволь- ные повы- шения
Поселок Якша	N: 61°49'12" E: 46°52'41"	Подзол иллювиально- гумусовый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	Около 15 лет	Пологий

Второй район исследования расположен в Пинежском районе Архангельской области, на территории Пинежского заповедника и окрестностей. Данный район, находится в подзоне северной тайги. Средняя температура января – -14.7°C , июля – $+14.3^{\circ}\text{C}$ среднегодовое количество осадков – 570 мм/год, сумма активных температур – $1\ 305^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.2).

Необычность объекта исследования связана с распространением гипсового карста ([Пучнина и др., 2000](#)). Почвы были представлены в основном подзолами иллювиально-железистыми. В таблице приведены данные о восьми типах почв (табл. 2). В данном районе на перераспределение углей влияет рельеф и процессы эрозии. Рассмотренные пожары – низовые и верховые, разной интенсивности.

Третий район исследований расположен на севере Западной Сибири (Надымский район, Тюменская область, ЯНАО) в пределах северной границы распространения северной тайги (рис. 1.3), в краевой части III озерно-аллювиальной равнины р. Надым, на междуречье Хейгияха – Левая Хетта. Средняя температура января – -23.0°C , июля $+13.5^{\circ}\text{C}$, продолжительный зимний период, количество осадков варьирует от 450 до 650 мм в год, сумма активных температур $< 800^{\circ}\text{C}$.

Также было заложено несколько разрезов около поселка городского типа Заполярный (Надымский район, Тюменская область, ЯНАО) в тундровой зоне. Средняя температура января – -26.6°C июля – $+10.5^{\circ}\text{C}$. Количество осадков – 519 мм/год (рис. 3). Поблизости пролегал газопровод, что стало причиной заболачивания. Всего было заложено 6 разрезов. На каждом участке заложено по 2–4 разреза у трубы, где сезонно-талый слой имел большую мощность, чем в среднем по тундре и на контроле в 30–50 м. Почвы представлены глееземами в зоне тундры и подзолами в подзоне северной тайги (табл. 3). Возраст пожара был определен приблизительно по степени развития вторичной сукцессии. Пожар в подзоне северной тайги прошел в течение экспедиции в 2018 г. В подзоне южной тундры на миграцию углей оказала влияние высокая влажность, антропогенные нарушения и криотурбации. Рассмотренные пожары низовые, слабоинтенсивные или подземные.

Таблица 2. Объекты в подзоне северной тайги (данные о возрасте пожаров предоставлены Кулойским и Пинежским лесничествами и Л.В. Пучниной по карте Д.Н. Сабурова)

Table 2. Objects in the northern taiga subzone (data on the age of the fires were provided by Kuloisky and Pinezhsky foresties and L.V. Puchnina on the map of D.N. Saburov)

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей в профиле	Особенности растительности	Возраст пожара	Характер рельефа
Террасы р. Кулой	N: 64°44'51" E: 43°23'01"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	Около 80 лет	Днище воронки
Террасы р. Кулой	N: 64°44'04" E: 43°23'01"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	Около 80 лет	Днище воронки
Центр Пинежского заповедника	N: 64°34'09" E: 43°06'54"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	82 года	Плоский
Центр Пинежского заповедника	N: 64°34'31" E: 43°03'01"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	58 лет	Плоский
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

Северо-запад Пинежского заповедника	N: 64°38'28" E: 42°48'50"	Подзол иллювиально- железистый	Весь профиль	Разнотравье с частым подростом	15 лет	Плоский на повы- шении
Террасы р. Кулой	N: 64°56'35" E: 43°33'25"	Подзол иллювиально- железистый	Весь профиль	Разнотравье с частым подростом	4 года	Плоский
Террасы р. Кулой	N: 64°43'45" E: 43°22'48"	Подзол иллювиально- железистый	Весь профиль	Лишайник с разреженным древостоем	2 года	Плоский

Таблица 3. Объекты в зоне тундры и подзоне северной тайги. Координаты предоставлены Матышаком Г.В.
Table 3. Objects in the tundra zone and the northern taiga subzone. Coordinates are provided by Matyshak G.V.

Местополо- жение	Координаты	Тип почвы	Зона обна- ружения углей в профиле	Особенности Растительности	Возраст пожара	Характер рельефа
Тундра	N: 66°46'14" E: 74°28'03"	Торфяно-глезем типичный	По всему профилю, фрагмен- тарно	Лишайник	Около 10–15 лет	Плоский
Тундра, поблизости газопровод	N: 66°46'14" E: 74°27'46"	Глезем грубогумусиро- ванный	По всему профилю, фрагмен- тарно	Пушицево- осоковая ассоциация	Около 10–15 лет	Плоский, с локальны- ми пони- жениями

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей в профиле	Особенности Растительности	Возраст пожара	Характер рельефа
Тундра, вблизи газопровод	N: 66°46'40" E: 74°27'49"	Глеезем типичный	На глубине 15 см	Лишайник	Около 10–15 лет	Плоский, с локальными понижениями
Тундра, вблизи газопровод	N: 66°46'21" E: 74°27'20"	Торфяно-глезем типичный	По всему профилю, фрагментарно	Пушицево-осоковая ассоциация	Около 10–15 лет	Плоский, с локальными понижениями
Тундра, ровный участок	В 50 м от предыдущей точки	Торфяно-глезем типичный	Прослойкой на 9 см	Пушицево-осоковая ассоциация	Около 10–15 лет	Плоский
Северная тайга, окрестности стационара “Надым”	N: 65°18'53" E: 72°52'52"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Лишайник с фрагментами зеленомошника	1 год	Плоский

В ходе работы рассматривалась исключительно вертикальная миграция углистых частиц. Такое решение было принято по той причине, что для построения модели латеральной миграции пока собрано недостаточно материала. Все представленные схемы относятся к современным хронорядам (1–119 лет) пожаров.

Отбор образцов осуществлялся по горизонтам. Затем анализировалось наличие и относительное количество углистых частиц, их размер, сохранность (по форме и твердости) и распределение по профилю ([Carcaillet, Thinon, 1996](#)). Точки заложения разрезов в каждой зоне выбирались на разных элементах рельефа.

В работе использовались следующие методы: сравнительно-географический, морфологический, метод наблюдения. Проводилось полное морфологическое описание почвенных разрезов ([Классификация и диагностика почв России, 2004](#)), были проанализированы растительные сообщества на местах гарей, отмечены виды, преимущественно появляющиеся после пожаров. В лаборатории осуществлено мокрое просеивание через сита 5, 2, 1 и 0.5 мм ([Carcaillet, Thinon, 1996](#)), построение модельных схем фронтальной миграции (для углистых частиц). Обработка данных осуществлялась в программе Excel. Антракологический анализ проводится при разном разрешении: микроанализ – на оптическом микроскопе, субмикроанализ – на сканирующем электронном микроскопе с использованием антракологического атласа ([Scott, 2001](#)). Были определены особенности формы и сохранности структуры углистых частиц. Концентрация антракомассы была рассчитана как отношение массы углей к массе почвы, выраженное в процентах ($Ca = (m_u/m_p) \cdot 100$), после отделения всех фракций.

Ca – концентрация антракомассы, выраженная в процентах;

m_u – масса углистых частиц всех размерных фракций;

m_p – масса воздушно-сухой навески почвенного образца.

В литературе можно встретить много примеров такого расчета, постоянно меняются только размерные фракции ([Carcaillet, Thinon, 1996](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подзона средней тайги ЕТР (Европейской территории России)

Как показано в таблице 4, в исследованном районе присутствовали и песчаные, и суглинистые почвы. Было установлено, что в качестве слабопроницаемого барьера для углей в суглинистых почвах выступают горизонты ВМ (в буроземах) и ВЕL (в подзолистых почвах). При этом в песчаных почвах ничто не задерживало миграцию углей по профилю. Более гидроморфные суглинистые почвы нередко имели оторфованную подстилку, тогда как напочвенный покров песчаных почв был представлен маломощным слоем лишайника. Рельеф характеризовался в основном небольшими склонами в 2–3° в предгорьях Урала (кордон Строганная доска), что делало возможным перенос углей водными потоками. Угли в подстилке почв гидроморфных позиций пронизаны гифами грибов и приобрели мягкую торфообразную структуру, но частично сохранили прямоугольную форму. Угли между подстилкой и ВЕL подзолистых почв сильно деформированы, нередко аморфны и потеряли анатомическую память. Угли в подзолах, напротив, отлично сохранились – сверху и до середины профиля имеют прямоугольную форму. В горизонте ВС-С подзолов встречаются угли круглой формы размером до 1 мм. Осадки – главный фактор, определяющий миграцию углей в этом районе исследований.

Глубина и время миграции рассчитаны для суглинистых почв по разрезу самого старого пожара (169 лет).

Подзона северной тайги ЕТР

Почвы подзоны северной тайги, выбранные для исследований, по своим свойствам напоминали почвы подзолов средней тайги. Подстилка, при ее неполном сгорании, выступала единственным барьером на пути проникновения углистых частиц в глубину профиля. Два профиля на террасах реки Кулой (табл. 2), а также профили на северо-западе заповедника расположены в сильно расчлененном рельефе. В таких условиях рельеф оказывается определяющим фактором миграции угля, который накапливается в карстовых воронках после слепожарной эрозии.

Таблица 4. Общая характеристика условий миграции углистых частиц в районах исследований
Table 4. General characteristics of the migration conditions of carbonaceous particles in the study areas

Гранулометрический состав	Мощность подстилки	Барьер для миграции углей	Рельеф	Форма и размер углей	Климатический параметр	Глубина и время миграции
Печоро-Ильчский заповедник, подзона средней тайги						
Суглинок Песок	5–15 см	Тяжелый суглинистый горизонт, в подзолах отсутствует	Слабый уклон или плоский	Прямоугольная в подстилке и нарушенная вниз по профилю. Размер от 0.5 до 0.1 мм	Влажность	30–40 см за 169 лет
Окрестности п. Пинега, подзона северной тайги						
Песок	5–10 см	Может создавать подстилка	Воронки до 2–3 м глубиной	Последовательно сменяется с прямоугольной на круглую с глубиной. Все категории размеров	Влажность, ветер	> 80 см за 50 лет
Надымский стационар, подзона северной тайги						
Песок	2–5 см	Нет	Плоский	Изначально формируется много углей размером менее 0.1 мм	Влажность и ветер	Весь профиль за 15 лет
Окрестности п. г. т. Заполярный, подзона южной тундры						
Тиксотропная глина	До 30 см	ММП*	Плоский	Сохраняются лишь крупные угли, бесформенные 2–3 мм	Влажность температура	Весь профиль за 50 лет

Примечание. * – многолетнемерзлые породы.

Угли во всех представленных разрезах (табл. 2) имели прямоугольную форму в верхних и округлую в нижних горизонтах профиля. Содержание антракомассы резко уменьшалось вниз по профилю (табл. 5).

Осадки и ветер, при сильном повреждении подстилки, являются основными факторами миграции для данного района исследований, так как переносят и уголь, и почвенный материал. Глубина и время миграции углей проверены на горельнике возрастом около 80 лет.

Подзона северной тайги Западной Сибири

Почвы подзолов подзоны северной тайги северно Западной Сибири (табл. 3) схожи с почвами северной тайги Европейской территории России (табл. 5). Их особенность – маломощная и уязвимая к воздействию огня лишайниковая подстилка (табл. 7). При горении лишайников и кустарничков нередко образуется уголь менее 0.5 мм, миграция которого протекает с большой интенсивностью. Кроме того, малый размер углистых частиц связан с высокой частотой пожаров – один пожар раз в 10–15 лет, что создает эффект дожигания углей.

Подзона южной тундры севера Западной Сибири

Глееземы, представленные в таблице 3, имеют ряд особенностей. Несмотря на профиль, большая часть которого представлена тиксотропной глиной, и мощную оторфованную подстилку (табл. 8), угли в них встречаются по всему профилю. Причины такого их повсеместного расположения – криотурбации. В результате воздействия влажности от таяния ММП угли быстро повреждаются и теряют свою форму. Температурный режим почв, который может способствовать либо таянию, либо поднятию уровня ММП, во многом определяет миграцию углистых частиц в южной тундре. Скорость миграции рассчитана на антропогенном объекте, представленном газовым трубопроводом.

В Печоро-Ильчском заповеднике на основании исследований 12 разрезов почв с известным возрастом пожаров было замечено, что крупные частицы угля (> 0.5 мм) в основном оседают в подстилке, тогда как угли меньшего размера распространены до

первого горизонта суглинистого гранулометрического состава – ВЕL (что отражено в таблице 4), постепенно уменьшаясь с глубиной. Глубже 30–40 см углистых частиц найдено не было (рис. 2).

Таблица 5. Сравнение концентрации антракомассы в разных горизонтах профиля для карстовой воронки Архангельской области

Table 5. Comparison of the concentration of anthracomass in different profile horizons for the karst sinkholes of the Arkhangelsk region

Образец	Фракция, мм	Концентрация антракомассы от веса почвы, %	Доля каждой фракции в общей антракомассе, %
AE pir1/AEpir2/AEpir3	> 5	1.29	6.29
	2–5		46.13
	1–2		37.80
	0.5–1		9.79
Epir	> 5	0.13	13.54
	2–5		14.26
	1–2		19.79
	0.5–1		52.41
BFpir	> 5	0.02	0.00
	2–5		82.82
	1–2		4.00
	0.5–1		13.17
BCpir	> 5	0.09	0.00
	2–5		44.48
	1–2		41.36
	0.5–1		14.16
[AEpir]	> 5	0.94	23.94
	2–5		61.40
	1–2		12.52
	0.5–1		2.14
[Epir] II	> 5	0.52	4.80
	2–5		75.92
	1–2		12.46
	0.5–1		6.82

Продолжение таблицы 5. Сравнение концентрации антракомассы в разных горизонтах профиля для карстовой воронки Архангельской области

Continued table 5. Comparison of the concentration of anthracomass in different profile horizons for the karst sinkholes of the Arkhangelsk region

Образец	Фракция, мм	Концентрация антракомассы от веса почвы, %	Доля каждой фракции в общей антракомассе, %
[BF/BC]pir II	> 5	0.17	0.00
	2-5		12.06
	1-2		49.29
	0.5-1		38.65
[AEpir] III	> 5	0.74	26.55
	2-5		33.49
	1-2		35.81
	0.5-1		4.15
[AEpir] V	> 5	0.44	21.58
	2-5		29.27
	1-2		40.55
	0.5-1		8.60
[Bpir] III	> 5	0.07	5.03
	2-5		21.44
	1-2		52.12
	0.5-1		21.41
[E/BF] IV	> 5	0.03	0.00
	2-5		28.34
	1-2		24.32
	0.5-1		47.34
[E + BF pir] V	> 5	1.35	13.93
	2-5		61.33
	1-2		20.02
	0.5-1		4.72
[BC pir] V	> 5	0.02	0.00
	2-5		42.95
	1-2		26.18
	0.5-1		30.88
[BC pir] V	> 5	0.14	0.00
	2-5		41.51
	1-2		30.19
	0.5-1		28.30

Такой тип распределения автор предлагает назвать барьерным, поскольку горизонты в профилях подзолистой почвы или бурозема формируют естественный барьер, ограничивая вертикальную миграцию.

Однако в случае подзолов, располагающихся в местах с моховым покровом и плотным древостоем (табл. 1), распределение происходит так, как показано на рисунке 3. И, наконец, в местах с редким древостоем и лишайниковым напочвенным покровом – как на рисунке 4.

В песчаных почвах Пинежского заповедника и его окрестностях в случае наличия мощной подстилки и сомкнутого древесного яруса углистые частицы попадают на остатки горизонта О после пожара. С течением времени уголь проникает вглубь профиля, постепенно разрушаясь (что отражено в столбце “глубина и время миграции” таблицы 4). Это наблюдение было сделано на основании исследования морфологической структуры угля, которая становилась все более округлой вниз по профилю, при этом сам уголь уменьшался в размерах (рис. 3). Так как в результате оказывается, что углистые частицы распределены практически по всему профилю почвы – крупные (2–3 мм) угли сосредотачиваются в верхних горизонтах и постепенно уменьшаются с глубиной, – то было предложено назвать такой тип распределения неравномерно-диффузным.

В ходе наблюдений, проведенных в сосняках ягелевых подзон средней и северной тайги, было замечено, что уголь в профиле находится в виде углистых частиц малого размера (0.001–0.063 мм) и лишь редкие частицы, встречаемые по всему профилю, имеют больший размер. Такую однородную картину предложено назвать равномерно-диффузным распределением углистых частиц. Морфологическое строение углей в этом случае не читается из-за маленького размера. Характеристика условий миграции в этом случае схожа с подзоной северной тайги, но обладает некоторой специфичностью, например, в мощности подстилки (табл. 4).

Равномерно-диффузная модель описывает миграцию углей при распространении в напочвенном покрове ягеля с разреженным древостоем (рис. 4).

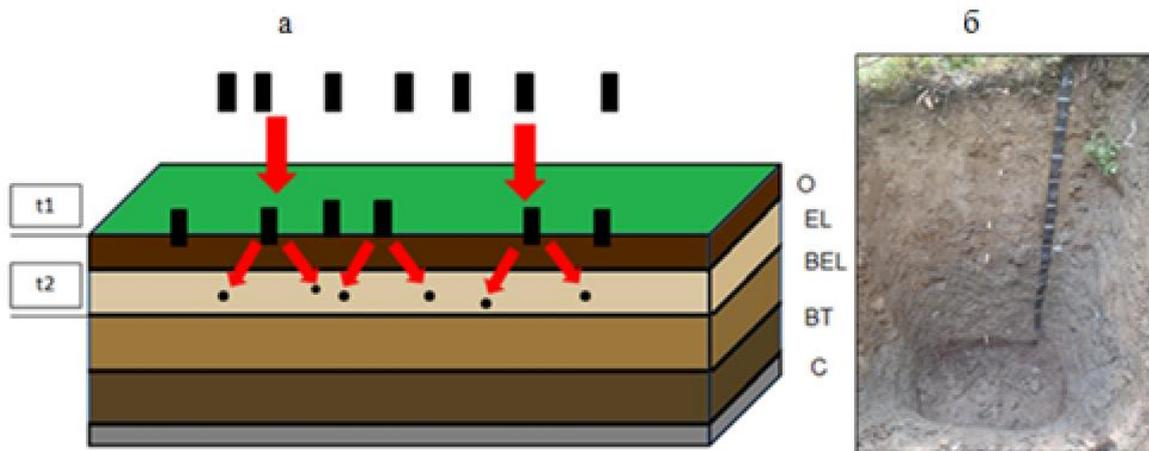


Рис. 2. а – Схема барьерной миграции углей на супесчаных и суглинистых почвах. Черные геометрические фигуры – угли разной формы. Красные стрелки определяют направление вертикальной миграции. Обозначения “t1, t2” характеризуют относительное время, прошедшее с начала пожара. Между завершением пожара – t1 и временем наблюдения – t2 прошло 169 лет. **б** – Пример почвенного разреза.

Fig. 2. a – The scheme of the barrier migration of coal on sandy and loamy soils. Black geometric shapes – coals of different shapes. The red arrows indicate the direction of vertical migration. The designations “t1, t2” characterize the relative time elapsed since the start of the fire. 169 years passed between the end of the fire – t1 and the observation time – t2. **b** – Example of a soil pit.

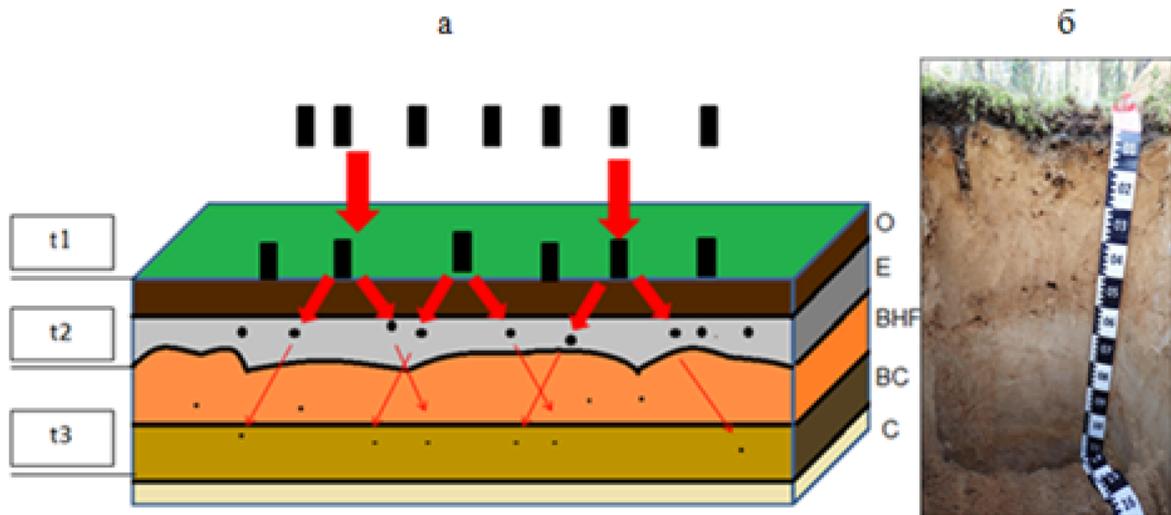


Рис. 3. а – Схема неравномерно-диффузной миграции углей на песчаных почвах. Черные геометрические фигуры – угли разной формы. Красные стрелки определяют направление вертикальной миграции. Обозначения “t1, t2, t3” характеризуют относительное время, прошедшее с начала пожара. Между временем пожара – t1 и временем наблюдения – t3 прошло 50 лет. **б** – Пример почвенного разреза.

Fig. 3. a – The scheme of uneven-diffuse migration. Black geometric shapes – coals of different shapes. The red arrows indicate the direction of vertical migration. The designations “t1, t2, t3” characterize the relative time elapsed since the start of the fire. 50 years have passed between the time of the fire – t1 and the time of observation – t3. **б** – Soil pit example.

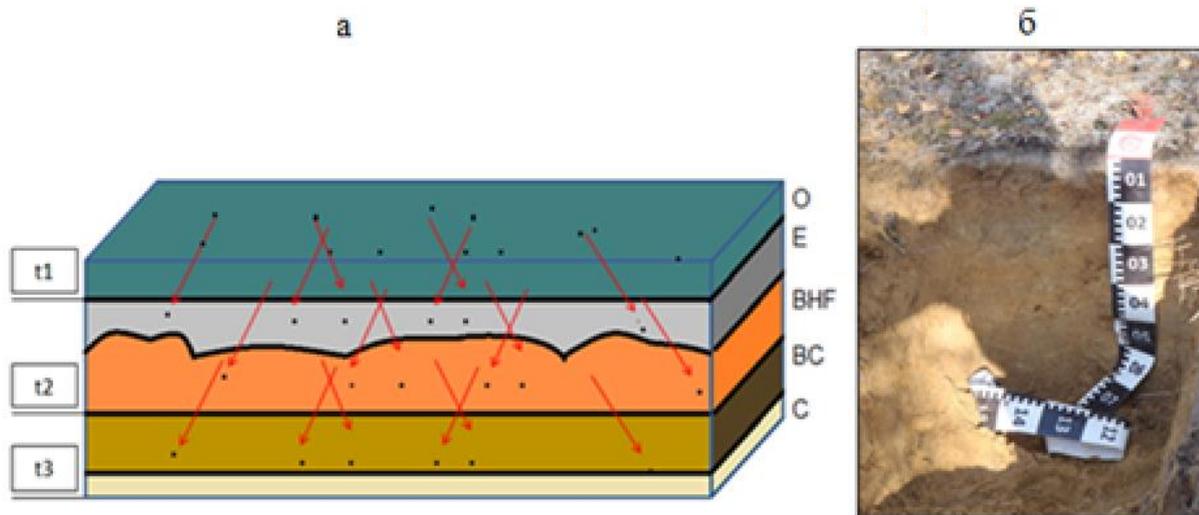


Рис. 4. а – Схема равномерно-диффузной миграции углей в песчаных почвах с лишайниковым покровом. Черные геометрические фигуры – угли. Красные стрелки определяют направление вертикальной миграции. Обозначения “t1, t2, t3” характеризуют относительное время, прошедшее с начала пожара. Интервал между t1 и t2 составляет 10 лет. **б** – Пример почвенного разреза.

Fig. 4. a – Scheme of uniformly diffuse coal migration in sandy soils with lichen cover. Black geometric figures are coals. The red arrows indicate the direction of vertical migration. The designations “t1, t2, t3” characterize the relative time elapsed since the start of the fire. The interval between t1 and t2 is 10 years. **б** – Example of a soil pit.

В тундре были изучены пожары 5–10-летнего возраста (рис. 5).

Заболачивание, распространенное вблизи антропогенных объектов, связанное с близким залеганием ММП (табл. 8), а также криотурбации разрушили углистые частицы. Такой вывод был сделан на основании того, что уголь приобрел неопределенную форму и стал очень похож на торф, в котором он и был найден в профиле. Тип миграции предложено назвать турбационным.

На всех представленных схемах (рис. 2, 3, 4 и 5) можно условно разделить миграцию углей на стадии (t), где возраст увеличивается в ряду $t_1 < t_2 < t_3$. В представленном визуальном материале эти стадии миграции не равны друг другу, как в пределах одной модели миграции, так и при их сравнении, что важно четко понимать. Последовательность стадий для каждого района всегда сохраняется, хотя ее длительность будет зависеть от того, насколько повреждена подстилка, каков гранулометрический состав почвы и какова ее влажность. Так, по наблюдениям, в случае тяжелого гранулометрического состава даже спустя сотни лет после пожара уголь будет сосредоточен в верхних частях профиля (рис. 2). В песчаных почвах уголь распределится по всему профилю на порядок быстрее (рис. 3, 4).

Кроме тундры, во всех остальных подзонах встречались все типы рассмотренных моделей миграции. В подзонах северной и средней тайги возможны сценарии, показанные на рисунках 2, 3 и 4. Рисунки 3 и 4 могут служить примером самого распространенного варианта в местах с песчаными почвами для районов подзон средней и северной тайги, как в Европейском, так и Сибирском районах. Первоначально уголь попадает на остатки подстилки или на горизонт Е (t_1). Затем, все более окатываясь после взаимодействия с водой и с частицами песка, уголь проникает в глубину профиля (t_2, t_3).

Принципиальная разница, однако, заключается в морфологии самого угля в сценариях, показанных на рисунках 3 и 4. В случае лишайникового покрова на поверхность почвы попадает сразу мелкий уголь, что ускоряет его проникновение в почву.

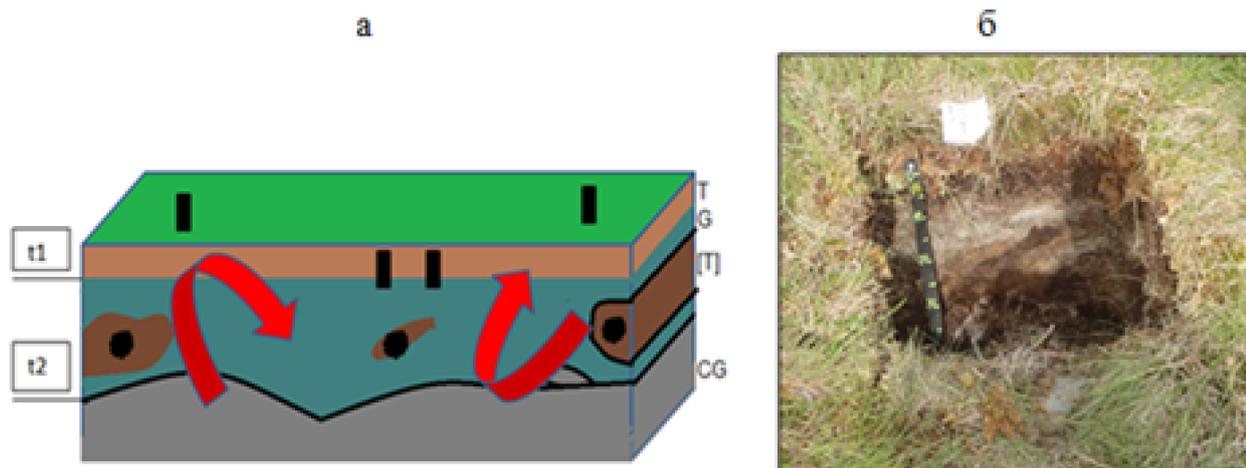


Рис. 5. а – Схема турбационной модели миграции углей при наличии близко расположенных к поверхности многолетнемерзлых пород. Черные геометрические фигуры – угли. Красные стрелки показывают процессы переноса в результате педотурбаций. Обозначения “t1, t2” характеризуют относительное время, прошедшее с начала пожара. Интервал между t1 и t2 составляет 50 лет, отсчитанных по началу установки трубы. **б** – Пример почвенного разреза.

Fig. 5. a – Scheme of a turbulent model of coal migration in the presence of permafrost near the surface. Black geometric figures – coals. The red arrows show the transfer processes as a result of cryoturbation. The designations “t1, t2” characterize the relative time elapsed since the start of the fire. The interval between t1 and t2 is 50 years from the pipe installation. **б** – Example of a soil pit.

В случае промывного водного режима и песчаного состава почвы количество углей обычно равномерно уменьшается с глубиной (табл. 4).

Как демонстрирует рисунок 7, наиболее сохранившуюся структуру имеют угли автоморфных позиций (рис. 7А). В результате продолжительного воздействия влажности углистые частицы теряют морфологическую структуру и прямоугольную форму (рис. 7D), становятся хрупкими и мягкими на ощупь. На рисунке б схематично представлены изменения морфологического облика углей в зависимости от возраста пожара.

Отдельно стоит схема миграции углей тундровых экосистем. Так, высокие температуры пожара могут растопить часть многолетнемерзлых пород, после чего освободившаяся вода способствует миграции и повреждению углей, что на схеме изображено в виде бесформенных фрагментов в погребенном горизонте (рис. 5). В последующем (t_2) происходит процесс криотурбации, случайно распределяющий угли по профилю. Однако собранный материал пока не позволяет привести точных значений изменения многолетнемерзлых пород относительно сезонно-талого слоя под воздействием пожара.

В ходе обсуждения хотелось бы затронуть такие важные факторы, как рельеф, почвенные морфоны, интенсивность и периодичность пожаров.

Несомненно, рельеф сильно влияет на миграцию углистых частиц. Основная масса углистого материала в процессе исследования была набрана из понижений самого разного масштаба. С одной стороны, такая аккумуляция очень важна для исследований абсолютного возраста углей, которые часто образуют прослои одного возраста, с другой стороны, она перемешивает угли пожаров разного возраста. Роль аккумулятора продуктов пожара могут играть овраги, болота и любые резкие понижения в рельефе.

Почвенные морфоны служат источником данных для определения абсолютного возраста углей. Сложность составляет то, что методом радиоуглеродного датирования с применением изотопа ^{13}C , который активно используется в настоящее время, возраст современных пожаров определяется с большой ошибкой. При этом палимпсестовый тип записи, характерный для почвенного

профиля, требует от исследователя хорошего навыка интерпретации почвенных процессов, для выявления морфонов с одним возрастом углей.

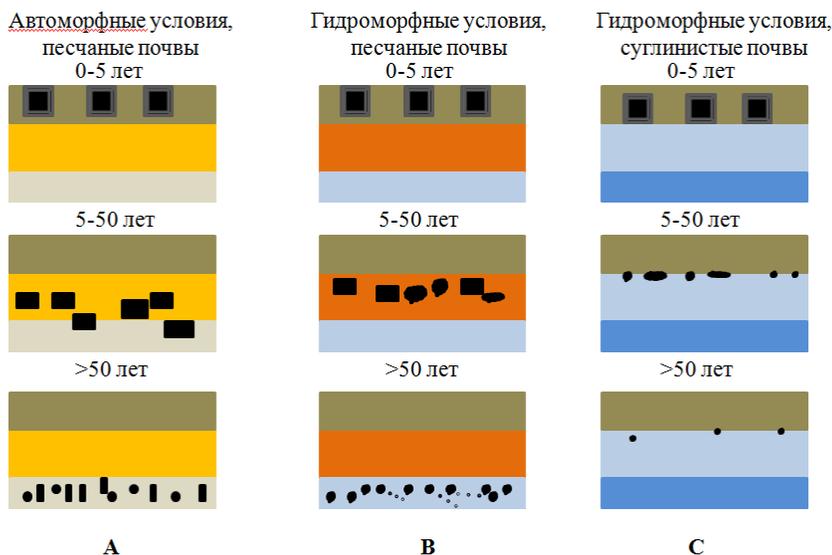


Рис. 6. Влияние возраста пожара на морфологический облик и глубину проникновения углей. Квадратом показана морфологическая структура угля хорошей сохранности. Прямоугольник характеризует нарушенную структуру углей, кружки – округлую. Черные фигуры неопределенной формы показывают сильно деформированный уголь. **А** – демонстрирует миграцию угля в сухих условиях и песчаных почвах. **В** – демонстрирует миграцию угля во влажных условиях и песчаных почвах. **С** – демонстрирует миграцию угля в гидроморфных условиях и суглинистых почвах.

Fig. 6. Influence of fire age on morphological appearance and depth of charcoal penetration. The square shows the morphological structure of well-preserved charcoals. The rectangle characterizes the broken structure charcoals. The circles show rounded formed charcoal. The indefinite black figures show highly deformed charcoal. **A** – demonstrates the migration of coal in dry conditions and sandy soils. **B** – demonstrates the migration of coal in wet conditions and sandy soils. **C** – demonstrates the migration of coal in hydromorphic conditions and loamy soils.

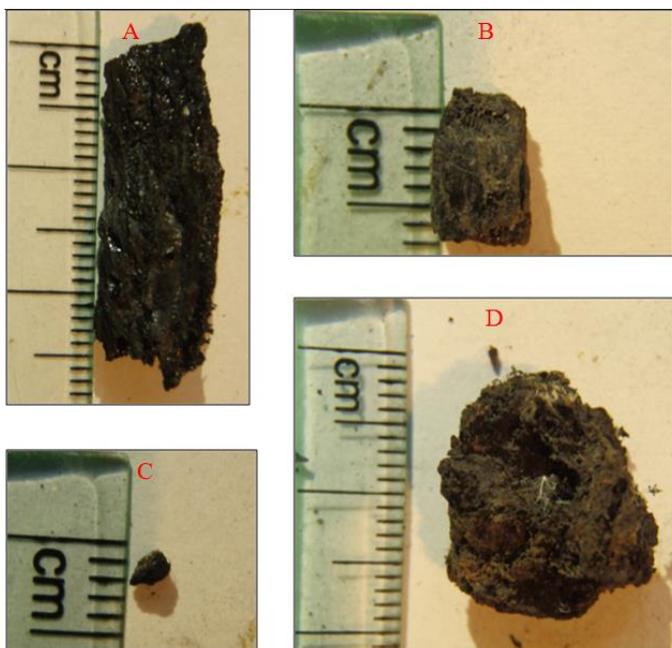


Рис. 7. Показана морфологическая структура угля в зависимости от возраста пожара и влажности подстилки. **А** – пожар возрастом 2 года, автоморфные условия. **В** – пожар возрастом 59 лет, мезоморфные условия. **С** – пожар возрастом 100 лет, гидроморфные условия. **Д** – пожар возрастом 10 лет, гидроморфные условия, криотурбации.

Fig. 7. The morphological structure of coal is shown depending on the age of the fire and the moisture content in the litter. **A** – a fire of 2 years old, automorphic conditions. **B** – a fire aged 59 years, mesomorphic conditions. **C** – a fire aged 100 years, hydromorphic conditions. **D** – a fire aged 10 years, hydromorphic conditions, cryoturbation.

Интенсивность пожара – важный параметр миграции углистых частиц. Так, в данной статье рассматривались случаи, когда напочвенный покров уничтожен пожаром. При слабых низовых пожарах, когда подстилка сгорает не полностью, углистые частицы остаются в подстилке и схемы вертикальной миграции не активизируются до начала более интенсивного пожара.

Периодичность пожаров – фактор, определяющий количе-

ство углистых частиц в почвах. В районе Печоро-Илычского заповедника, к примеру, пожары могут происходить раз в 300 лет благодаря высокому значению влажности почвы, но при этом угли остаются все это время в верхних горизонтах, как показано в барьерной модели миграции углистых частиц. Напротив, в сосняках с лишайниковым покровом пожары могут происходить каждые 10–15 лет, полностью сжигая ягель. Профиль таких почв пронизан углистыми частицами. Из-за этого при изучении миграции в сосняке ягелевом пироженный материал легче найти, но надо помнить, что найденный уголь, с высокой вероятностью, – следствие нескольких пожаров.

ВЫВОДЫ

1. В ходе работы были разработаны следующие модели миграции углистых частиц: барьерная неравномерно-диффузная, равномерно-диффузная и турбационная.

2. С течением времени после пожара осуществляется перенос углистого материала вниз по профилю, что сопровождается его разрушением и изменением формы от прямоугольной до округлой. При этом степень разрушения угля зависит от влажности почвы.

3. Миграция углей в глубину почвенного профиля зависит от гранулометрического состава (определенного полевыми методами) – так, в песчаных почвах угли рассеяны по всему профилю, а в суглинистых почвах они сконцентрированы выше первого тяжелого горизонта.

4. Тот факт, что в сосняке с лишайником не найдено крупных углей, в соответствии с данными литературного обзора, может быть связан с дожиганием углей новыми пироженными событиями, которые, из-за особенности ягеля высыхать в сухие годы, происходят с высокой частотой.

5. Несмотря на широкий географический охват, миграция углей укладывается в три представленные схемы во всех исследованных районах и подзонах тайги, что позволяет сделать вывод об универсальности закономерностей миграции углей.

6. Миграция углей в подзоне южной тундры существенно отличается от подзон тайги, что связано с воздействием влажности,

криотурбаций и глинистого характера горизонтов глееземов. Совокупность этих факторов разрушает углистые частицы и способствует их залеганию в непредсказуемых местах профулия.

7. Определяющим параметром климата для большинства моделей является влажность.

8. В зависимости от возраста пожара, форма углистых частиц, даже в схожих природных условиях, изменяется. В автоморфных условиях угли приобретают круглую форму и уменьшаются в размерах, в гидроморфных – интенсивно разрушаются и теряют анатомическую память.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бобровский М.В.* Лесные почвы Европейской части России: биотические и антропогенные факторы формирования. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 481 с.
2. *Дымов А.А., Милановский Е.Ю., Холодов В.А.* Состав и гидрофобные свойства органического вещества денсиметрических фракций почв Приполярного Урала // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1335–1345. DOI: [10.7868/s0032180x15110052](https://doi.org/10.7868/s0032180x15110052).
3. Классификация и диагностика почв России / Авторы и сост. *Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И.* Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
4. *Пучнина Л.В., Горячкин С.В., Рыков А.М., Рыкова С.Ю., Шаврина Е.В., и др.* Структура и динамика природных компонентов Пинежского заповедника (северная тайга ЕТР, Архангельская область). Биоразнообразие и георазнообразие в карстовых областях. Архангельск, 2000. 257 с.
5. *Семиколенных А.А., Бовкунов А.Д., Алейников А.А.* Почвы и почвенный покров таежного пояса Северного Урала (верховья реки Печора) // Почвоведение. 2013. № 8. С. 1–13. DOI: [10.7868/s0032180x1308008x](https://doi.org/10.7868/s0032180x1308008x).
6. *Таргульян В.О.* Теория педогенеза и эволюции почв. М.: ГЕОС, 2019. 296 с.
7. *Чевычелов А.П.* Пирогенез и горно-таежное континентальное гумидное автоморфное почвообразование на северо-востоке Азии (на примере Южной Якутии): Дисс. ... канд. биол. наук: 03.00.27. Новосибирск: СО РАН, 1997. 281 с.
8. *Bobrovsky M. V., Kupriaynov D.A., Khanina L.G.* Anthracological and morphological analysis of soils for the reconstruction of the forest ecosystem

- history (Meshchera Lowlands, Russia) // *Quaternary International*. 2018. P. 1–13. DOI: [10.1016/j.quaint.2018.06.033](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.06.033).
9. *Bodí M.B., Mataix-Solera J., Doerr S.H., Cerdà A.* The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon content // *Geoderma*. 2011. Vol. 160. No. 3–4. P. 599–607. DOI: [10.1016/j.geoderma.2010.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.11.009).
10. *Bustin R.M., Guo Y.* Abrupt changes (jumps) in reflectance values and chemical compositions of artificial charcoals and inertinite in coals // *International Journal of Coal Geology*. 1999. No. 38. P. 237–260. DOI: [10.1016/S0166-5162\(98\)00025-1](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(98)00025-1).
11. *Certini G.* Effects of fire on properties of forest soils: a review // *Oecologia*. 2005. Vol. 143. No. 1. P. 1–10. DOI: [10.1007/s00442-004-1788-8](https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8).
12. *Collinson M.E., Steart D., Scott A.C., Glasspool I.J., Hooker J.J.* Fire and episodic runoff and deposition at the Paleocene-Eocene boundary // *Journal of the Geological Society*. 2007a. No. 167. P. 87–97. DOI: [10.1144/0016-76492005-185](https://doi.org/10.1144/0016-76492005-185).
13. *Clark J.S.* Particle motion and the theory of charcoal analysis: Source area, transport, deposition and sampling // *Quaternary Research*. 1988. No. 30. P. 67–80. DOI: [10.1016/0033-5894\(88\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90088-9).
14. *Clark J.S., Patterson W.A.* Background and local charcoal in sediments: scales of fire evidence in the palaeo record // *Sediment Records of Biomass Burning and Global Change*. NATO Advanced Science Institutes. 1997. Series I. Vol. 51. P. 23–48. DOI: [10.1007/978-3-642-59171-6_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-59171-6_3).
15. *Carcaillet C., Thinon M.* Pedaanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary data // *Review of Palaeobotany and Palynology*. 1996. Vol. 91. No. 1–4. P. 399–416. DOI: [10.1016/0034-6667\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00060-7).
16. *Jones T.P., Scott A.C., Cope M.* Reflectance measurements against temperature of formation for modern charcoals and their implications for the study of fusain // *Bulletin de la Société Géologique de France*. 1991. No. 162. P. 193–200.
17. *Komarek E.V., Komarek B.B., Carlisle T.C.* The ecology of smoke particulates and charcoal residue from forest and grassland fires: a preliminary atlas. Miscellaneous Publication 3. Tall Timbers Research Station, Tallahassee, 1973.
18. *Lupia R.* Palaeobotanical data from fossil charcoal: an actualistic study of seed plant reproductive structures // *Palaios*. 1995. No. 10. P. 465–477. DOI: [10.2307/3515048](https://doi.org/10.2307/3515048).

19. *Moody J.A., Martin D.A.* Hydrological and sedimentologic response of two burned watersheds in Colorado // Water-Resources Investigation Report. Series Report Number 2001-4122. DOI: [10.3133/wri014122](https://doi.org/10.3133/wri014122).
20. *Nichol G.J., Cripps J., Collinson M.E., Scott A.C.* Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: results and implications // Palaeogeography, Palaeoclimatology Palaeoecology. 2000. No. 164. P. 43–56. DOI: [10.1016/s0031-0182\(00\)00174-7](https://doi.org/10.1016/s0031-0182(00)00174-7).
21. *Prior J., Alvin K.L.* Structural changes on charring woods of *Dichrostachys* and *Salix* from Southern Africa // International Association of Wood Anatomists Bulletin. 1983. No. 4. P. 197–206. DOI: [10.1163/22941932-90000782](https://doi.org/10.1163/22941932-90000782).
22. *Pyne S.J., Andrews P.L., Laven R.D.* Introduction to Wildland Fire. New York: J. Wiley and Sons, 1996. 808 p.
23. *Sander M., Pignatello J.J.* Characterization of charcoal adsorption sites for aromatic compounds: insights drawn from single-solute and bi-solute competitive experiments // Environmental science & technology. 2005. Vol. 39. No. 6. P. 1606–1615. DOI: [10.1021/es049135l](https://doi.org/10.1021/es049135l).
24. *Scott A.C.* The Pre-Quaternary history of fire // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2000a. Vol. 164. P. 281–329. DOI: [10.1016/s0031-0182\(00\)00192-9](https://doi.org/10.1016/s0031-0182(00)00192-9).
25. *Scott A.C.* Fossil Plants. In: The Oxford Companion to the Earth. Oxford: Oxford University Press, 2000b. P. 364–371.
26. *Scott A.C.* Preservation by fire. In: Palaeobiology II. Oxford: Blackwell Science Publ., 2001. P. 277–280.
27. *Scott A.C.* Forest Fire in the Fossil Record. In: Fire Effects on Soils and Restoration Strategies. New Hampshire: Science Publishers Inc., 2009. P. 1–37.
28. *Scott A.C., Jones T.P.* Microscopical observations of recent and fossil charcoal // Microscopy and Analysis. 1991. No. 25. P. 13–15.
29. *Shakesby R.A., Doerr S.H.* Wildfire as a hydrological and geomorphological agent // Earth-Science Reviews. 2006. No. 74. P. 269–307. DOI: [10.1016/j.earscirev.2005.10.006](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.10.006).
30. *Vaughan A., Nichols G.J.* Controls on the deposition of charcoal: implications for sedimentary accumulations of fusain // Journal of Sedimentary Research. 1995. Vol. 65A. No. 1. P. 129–135. DOI: [10.1306/d426804a-2b26-11d7-8648000102c1865d](https://doi.org/10.1306/d426804a-2b26-11d7-8648000102c1865d).

REFERENCES

1. *Bobrovskii M.V., Lesnye pochvy Evropeiskoi chasti Rossii: bioticheskie i antropogennye faktory formirovaniya* (Forest soils of the European part of

Russia: biotic and anthropogenic factors of formation), Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2010, 481 p.

2. Dymov A.A., Milanovskii E.Yu., Kholodov V.A., Sostav i gidrofobnye svoystva organicheskogo veshchestva densimetricheskikh fraktsii pochv Pripolyarnogo Urala (Composition and hydrophobic properties of organic matter of densimetric fractions of soils of the Subpolar Urals), *Pochvovedenie*, 2015, No. 11, pp. 1335–1345. DOI: [10.7868/s0032180x15110052](https://doi.org/10.7868/s0032180x15110052).

3. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of Russian soils), Smolensk: Oikumena, 2004, p. 342.

4. Puchnina L.V., Goryachkin S.V., Rykov A.M., Rykova S.Yu., Shavrina E.V. i dr., *Struktura i dinamika prirodnykh komponentov Pinezhskogo zapovednika (severnaya taiga ETR, Arkhangel'skaya oblast')* (The structure and dynamics of the natural components of the Pinezhsky Reserve (northern taiga of the ETR, Arkhangelsk region)), *Bioraznoobrazie i georaznoobrazie v karstovykh oblastyakh, Arkhangel'sk*, 2000, 257 p.

5. Semikolennykh A.A., Bovkunov A.D., Aleinikov A.A., *Pochvy i pochvennyi pokrov taezhnogo poyasa Severnogo Urala (verkhov'ya reki Pechora)* (Soils and soil cover of the taiga zone of the Northern Urals (upper reaches of the Pechora River)), *Pochvovedenie*, 2013, No. 8, p. 1–13, DOI: [10.7868/s0032180x1308008x](https://doi.org/10.7868/s0032180x1308008x).

6. Targul'yan V.O., *Teoriya pedogeneza i evolyutsii pochv* (Theory of pedogenesis and soils evolution), Moscow: GEOS, 2019, 296 p.

7. Chevychelov A.P., *Pirogenез i gorno-taezhnoe kontinental'noe gumidnoe avtomorfnoe pochvoobrazovanie na severo-vostoke Azii (na primere Yuzhnoi Yakutii): Diss. ... kand. boil. nauk: 03.00.27*, (Pyrogenesis and mountain taiga continental humid automorphic soil formation in northeast Asia (as exemplified in South Yakutia): Cand. boil. sci. thesis), Novosibirsk: SO RAN, 1997, 281 p.

8. Bobrovsky M.V., Kupriaynov D.A., Khanina L.G., Anthracological and morphological analysis of soils for the reconstruction of the forest ecosystem history (Meshchera Lowlands, Russia), *Quaternary International*, 2018, pp. 1–13, DOI: [10.1016/j.quaint.2018.06.033](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.06.033).

9. Bodí M.B., Mataix-Solera J., Doerr S.H., Cerdà A., The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon content, *Geoderma*, 2011, Vol. 160, No. 3–4, pp. 599–607, DOI: [10.1016/j.geoderma.2010.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.11.009).

10. Bustin R.M., Guo Y., Abrupt changes (jumps) in reflectance values and chemical compositions of artificial charcoals and inertinite in coals. *International Journal of Coal Geology*, 1999, No. 38, pp. 237–260, DOI: [10.1016/S0166-5162\(98\)00025-1](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(98)00025-1).

11. Certini G., Effects of fire on properties of forest soils: a review, *Oecologia*, 2005, Vol. 143, No. 1, pp. 1–10, DOI: [10.1007/s00442-004-1788-8](https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8).
12. Collinson M.E., Steart D., Scott A.C., Glasspool I.J., Hooker J.J., Fire and episodic runoff and deposition at the Paleocene-Eocene boundary, *Journal of the Geological Society*, 2007a, No. 167, pp. 87–97, DOI: [10.1144/0016-76492005-185](https://doi.org/10.1144/0016-76492005-185).
13. Clark J.S., Particle motion and the theory of charcoal analysis: Source area, transport, deposition and sampling, *Quaternary Research*, 1988, No. 30, pp. 67–80, DOI: [10.1016/0033-5894\(88\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90088-9).
14. Clark J.S., Patterson W.A., Background and local charcoal in sediments: scales of fire evidence in the palaeo record, *Sediment Records of Biomass Burning and Global Change*, NATO Advanced Science Institutes, 1997, Series I, Vol. 51, pp. 23–48, DOI: [10.1007/978-3-642-59171-6_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-59171-6_3).
15. Carcaillet C., Thinin M., Pedaanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary data, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1996, Vol. 91, No. 1–4, pp. 399–416, DOI: [10.1016/0034-6667\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00060-7).
16. Jones T.P., Scott A.C., Cope M., Reflectance measurements against temperature of formation for modern charcoals and their implications for the study of fusain, *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1991, No. 162, pp. 193–200.
17. Komarek E.V., Komarek B.B., Carlisle T.C., *The ecology of smoke particulates and charcoal residue from forest and grassland fires: a preliminary atlas*, Miscellaneous Publication 3, Tall Timbers Research Station, Tallahassee, 1973.
18. Lupia R., Palaeobotanical data from fossil charcoal: an actualistic study of seed plant reproductive structures, *Palaios*, 1995, No. 10, pp. 465–477, DOI: [10.2307/3515048](https://doi.org/10.2307/3515048).
19. Moody J.A., Martin D.A., Hydrological and sedimentologic response of two burned watersheds in Colorado, *Water-Resources Investigation Report*, Series Report Number 2001-4122, DOI: [10.3133/wri014122](https://doi.org/10.3133/wri014122).
20. Nichol G.J., Cripps J., Collinson M.E., Scott A.C., Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: results and implications, *Palaeogeography, Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2000, No. 164, pp. 43–56, DOI: [10.1016/s0031-0182\(00\)00174-7](https://doi.org/10.1016/s0031-0182(00)00174-7).
21. Prior J., Alvin K.L., Structural changes on charring woods of *Dichrostachys* and *Salix* from Southern Africa, *International Association of Wood Anatomists Bulletin*, 1983, No. 4, pp. 197–206, DOI: [10.1163/22941932-90000782](https://doi.org/10.1163/22941932-90000782).

22. Pyne S.J., Andrews P.L., Laven R.D. Introduction to Wildland Fire. New York: J. Wiley and Sons, 1996, 808 p.
23. Sander M., Pignatello J.J., Characterization of charcoal adsorption sites for aromatic compounds: insights drawn from single-solute and bi-solute competitive experiments, *Environmental science & technology*, 2005, Vol. 39, No. 6, pp. 1606–1615, DOI: [10.1021/es0491351](https://doi.org/10.1021/es0491351).
24. Scott A.C., The Pre-Quaternary history of fire, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000a, Vol. 164, pp. 281–329, DOI: [10.1016/s0031-0182\(00\)00192-9](https://doi.org/10.1016/s0031-0182(00)00192-9).
25. Scott A.C., Fossil Plants, In: *The Oxford Companion to the Earth*, Oxford: Oxford University Press, 2000b, pp. 364–371.
26. Scott A.C., Jones T.P., Microscopical observations of recent and fossil charcoal, *Microscopy and Analysis*, 1991, No. 25, pp. 13–15.
27. Scott A.C., Preservation by fire, In: *Palaeobiology II*, Oxford: Blackwell Science Publ., 2001, pp. 277–280.
28. Scott A.C., Forest Fire in the Fossil Record, In: *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*, New Hampshire: Science Publishers Inc., 2009, pp. 1–37.
29. Shakesby R.A., Doerr S.H., Wildfire as a hydrological and geomorphological agent, *Earth-Science Reviews*, 2006, No. 74, pp. 269–307, DOI: [10.1016/j.earscirev.2005.10.006](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.10.006).
30. Vaughan A., Nichols G.J., Controls on the deposition of charcoal: implications for sedimentary accumulations of fusain, *Journal of Sedimentary Research*, 1995, Vol. 65A, No. 1, pp. 129–135, DOI: [10.1306/d426804a-2b26-11d7-8648000102c1865d](https://doi.org/10.1306/d426804a-2b26-11d7-8648000102c1865d).