

УДК 631.44

DOI:10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-1-16-24

ПИРОГЕННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПОЧВЫ СЕВЕРНОЙ И СРЕДНЕЙ ТАЙГИ РОССИИ

Д. Г. Петров, А. А. Гольева

Институт географии Российской академии наук, 119017, Россия, Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4

E-mail: pd437807@mail.ru

С ростом числа пожаров доля пирогенных почв России постоянно увеличивается. Задача исследования – выявить, насколько контрастные условия среды способны создавать лесные пожары, и показать сценарии постпирогенного восстановления. В данном исследовании, проведенном на территории тайги России: в Пинежском и Печоро-Илычском заповедниках на европейской территории России и в 200 км на юго-запад от г. Надым, в бассейне р. Сухой Полуи на севере Западной Сибири, рассмотрены измененные пожаром подзолы и подзолистые почвы. Используются методы морфологического описания почв, анализ концентрации антракомассы (в данном исследовании концентрация антракомассы рассчитывалась как сумма углистых частиц более 0,5 мм) и комплекс химических методов. Показано, что некоторые пожары могут кардинально менять направленность процессов почвообразования, формируя особые почвы, характеризующиеся одним из следующих свойств: 1) потерей органического(их) горизонта(ов); 2) потерей части минерального(ых) горизонта(ов); 3) началом первичного почвообразования в случае полной деградации почвенной толщи в результате пожара. Такие почвы нами предложено выделить в класс пирогенно-экстремальных почв зарождающегося направления «География и генезис почв экстремальных условий». Показано, что на горячих могут соседствовать как слабо трансформированные полнопрофильные (параэкстремальные), так и сильно деградированные, фрагментарно стертые до породы почвы (ортоэкстремальные). Пирогенно-уязвимыми, в отношении почвообразования на горячих, предложено называть экосистемы, в которых сложились условия — обусловленные климатом, рельефом и неполным восстановлением подстилки после предыдущего пожара, — предопределяющие значительное повреждение растительности в ходе горения и последующую эрозию почвенного покрова. Среди рассмотренных факторов выявлена преобладающая роль послепожарной эрозии на долговременное изменение направления почвообразования после пожара. Предложено понятие «очаговости» пожара и способ диагностирования его очага(ов) по концентрации антракомассы. Показана динамичность разных классов экстремальности на одной территории.

Ключевые слова: пирогенные почвы, экстремальные почвы, ортоэкстремальность, параэкстремальность, антракомасса, уязвимые экосистемы, очаговость и динамичность пожаров.

Введение

Необходимость исследования пирогенных почв России обусловлена тем, что по открытым данным статистики ФГБУ ВНИИПО МЧС в 2010–2021 гг. лесные пожары в нашей стране происходят каждый год на площади приблизительно 18 млн га леса, из которых более восьми млн га приходится на европейскую территорию России (ЕТР) [Дымов, 2020]. Многие лесные почвы, прошедшие через пожары, теряют верхние горизонты, трансформируются или даже деградируют до породы [Мелехов, 1948; Бобровский, 2010; Чевычелов, Шахматова, 2016; Дымов, 2020; Shakesby, Doerr, 2006; Moody, Martin, 2009; Abney, Berhe, 2018; Carcaillet et al., 2022]. Все чаще возникает вопрос об отнесении пирогенных почв к классам экстремальности, согласно теории генезиса и географии экстремальных почв, разработанной С.В. Горячкиным с соавторами [Горячкин и др., 2019; Горячкин, 2022]. Конечной целью работ в данной области должна стать разработка методов прогнозирования и оценки площади «пирогенно-

экстремальных» почв по климатическим параметрам и свойствам пожара для расчета почвенного покрова, неспособного в полной мере выполнять экосистемные функции.

Суть отнесения пирогенных почв к различным классам экстремальности состоит в выделении причины временного угнетения почв или постоянного их развития в неблагоприятных условиях [Горячкин и др., 2019; Горячкин, 2022]. Пирогенно-экстремальные почвы попадают в несколько предложенных классов, что трактуется как мультифакторная экстремальность [Горячкин и др., 2019; Горячкин, 2022]. С одной стороны, они могут развиваться в условиях режимно-функциональной экстремальности, так как пожары чаще приурочены к годам с определенным гидротермическим режимом — сухим и жарким или, реже, холодным и сухим. С другой стороны, так как новый пост-пирогенный почвенный покров формируется на переотложенных и остаточных почвенных горизонтах и на экспонированной породе, пирогенно-экстремальные почвы также соответствуют возрастной экстремальности [Го-

рячкин, 2022]. Наконец, в случае уничтожения органического горизонта пожаром на мощном подзоле сверхглубокоподзолистого вида, по КиДПР 2004 г., класс экстремальности почв соответствует лито-экстремальности, связанной с бедностью субстрата [Горячкин и др., 2019; Горячкин, 2022].

Одним из факторов, оказывающих сильное влияние на распространение пожара, является рельеф. Как отмечено исследователями [Горячкин, 2010; Семиколенных и др., 2015; Чевычелов, Шахматова, 2016], почвенный и растительный покров на территории распространения выраженных форм рельефа, например, карстовых и ледниковых воронок, зависит от положения на склоне или днище карстовой воронки.

Последствия пожаров касаются изменений химических свойств, растительности и перераспределения седиментов эрозионными процессами [Бобровский, 2010; Дымов, 2020; Certini, 2005; Ubeda, Outeiro, 2009; Walker et al., 2021]. Например, после полного сжигания растительности образуются карбонаты кальция и калия, т.е. зола, которая способна существенно увеличить значения pH [Александровский, 2007; Дымов, 2020; Certini, 2005; Ubeda, Outeiro, 2009].

Наиболее сильные, «катастрофические» пожары приводят к прогоранию напочвенного покрова, подстилки, торфа, что может привести к эрозии почвенных горизонтов на разную глубину [Carcaillet, Thinon, 1996; Moody, Martin, 2009; Gaboriau et al., 2022; Robichaud, 2009; Shakesby, Doerr, 2006]. В некоторых случаях наблюдается развитие почв с «0-момента» на плотных горных породах, подзолистых горизонтах мощных подзолов и перевеянных стратифицированных отложениях, что соответствует классу возрастной экстремальности почв [Горячкин и др., 2019; Горячкин, 2022; Таргульян, 2019].

Опираясь на литературные данные, указанные выше, мы определяем экосистемы северной и средней тайги с хвойной растительностью, лишайниковой или сухой зеленомошной подстилкой на песчаных и супесчаных почвах как пирогенно-уязвимые при сочетании следующих факторов: 1) преимущественно элювиальная или трансэлювиальная позиция; 2) свободный дренаж; 3) наличие пожароопасного топлива. Дополнительным фактором пирогенной уязвимости будут условия сложного микро- и мезорельефа, такого как холмисто-увалистый и/или денудационно-расчлененный.

Цель работы: показать необходимость выделения почв гарей как пирогенно-экстремальных, особенностей их пространственно-временного распределения и определить их место в классах экстремальности, а также определить морфологические, антракологические и химические свойства пирогенно-экстремальных почв и последствия слепожарной эрозии в эволюционном тренде пирогенных почв.

Объекты и методы

В подзоне северной тайги исследования проводились на территории Пинежского заповедника (64° с. ш., 42–43° в. д.) (рис. 1, точка 1). Средняя температура января –14,7°С, июля +14,3°С, среднегодовое количество равномерно распределенных по сезонам осадков 570 мм, сумма активных температур 1305°С [Горячкин, 2010; Семиколенных и др., 2015]. Геологический фундамент на территории заповедника включает гипсы и ангидриты соткинской свиты нижней перми, перекрытые верхнепермскими красноцветными песчаниками и известняками. Последнее оледенение — верхневалдайское, закончилось 9–12 тыс. л. н. [Горячкин, 2010]. Геоморфологически территория Пинежского заповедника делится на три района, в каждом из которых проводились работы: возвышенное холмистое структурно-денудационное плато, плоская заболоченная водораздельная равнина и карстовая равнина [Горячкин, 2010; Попов, Пучнина, 2017]. Было рассмотрено три молодых гари в пределах 15 лет и пять средневозрастных от 15 до 100 лет в качестве условного фона. Эти возрастные критерии соответствуют всем рассмотренным объектам (табл. 1).

При сильных пожарах на суглинках образовывался плотный подрост березы и осины (*Betula* L. и *Populus tremula* L.). В травяно-кустарничковом ярусе появлялось много злаков (*Gramineae* spp.), формирующих густую дернину, а также кипрей (*Epilobium angustifolium* L.) и брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.). Появлялись кусты малины (*Rubus idaeus* L.). Общая жизнеспособность кустарничков и кустов выросла (количество и размер ягод, высота кустарничков). При слабых пожарах в сосняках лишайниковых (*Cladoniaceae* spp.) выживали сосны (*Pinus sylvestris* L.), нижние ярусы были угнетены и восстанавливались медленно (брусника, черника (*Vaccinium myrtillus* L.), позже злаки). Общий бонитет упал. В сосняках зеленомошных (*Bryidae* spp.) и долгомошниковых (*Polytrichum commune* Hedw.) нижние ярусы восстанавливались быстрее (мхи, кустарнички и злаки) [Попов, Пучнина, 2017].

Почвообразующие породы в районе изучения были представлены моренными отложениями — покровными легкими и средними суглинками с включением щебня и валунов. На некоторых территориях наблюдались открытые формы сульфатного карста.

Почвы закарстованных ландшафтов северо-запада заповедника представлены перегнойно-карбонатными и неполноразвитыми сульфореңдзинами [Горячкин, 2010]. В зоне исследований встречались подзолистые почвы, подзолы иллювиально-железистые и элювоземы потечно-гумусовые в днищах некоторых карстовых воронок [Классификация и диагностика почв России, 2004].

В подзоне средней тайги работы проходили на территории Печоро-Илычского заповедника

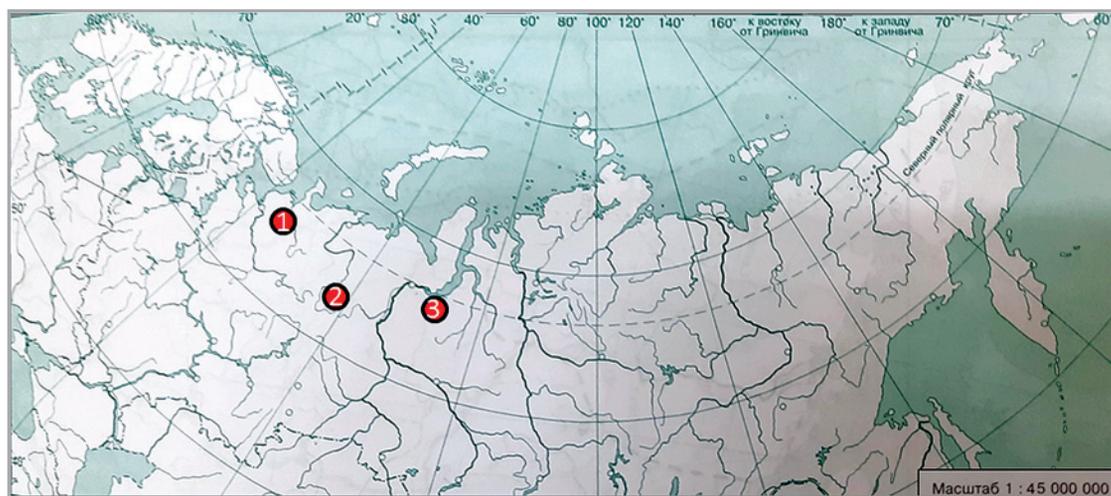


Рис. 1. Расположение районов исследования на контуре России. 1 — подзона северной тайги ЕТР; 2 — подзона средней тайги ЕТР; 3 — подзона средней тайги СЗС

между (62 и 63° с. ш., 56–58° в. д.) (рис. 1, точка 2). Средняя температура января $-18,2^{\circ}\text{C}$, июля $+16,8^{\circ}\text{C}$, количество осадков 675 мм/год, сумма активных температур 1600°C [Атлас почв Республики Коми, 2010].

Ландшафт представлен водно-ледниковыми и моренными равнинами с полого-волнистым характером рельефа.

Были рассмотрены две молодых гари в пределах 15 лет и четыре средневозрастных гари от 15 до 100 лет. Растительность на хорошо дренированных гаях в сосняках лишайниковых представлена выжившими деревьями сосны с восстановившимся лишайниковым покровом (*Cladoniaceae* spp.) с угнетенным кустарничковым ярусом (*Vaccinium vitis-idaea* L.). В условиях большего увлажнения, где

Таблица 1

Количество исследованных гаях и точек опробования с учетом неоднородности воздействия пирогенного фактора на подстилочные горизонты. В точках опробования заложены разрезы

Районы исследований и точки опробования		Возраст рассмотренных гаях		Напочвенный покров молодых гаях*			Типы почв на гаях разного возраста КиДПР (WRB)	
Район	Общее количество рассмотренных почв, гаях/точки опробования	15–100 лет	<15 лет	Лишайниковый нижний ярус	Моховый нижний ярус	Не восстановился	15–100 лет	<15 лет
Северная тайга, ЕТР	8/17	5/5	3/12	2/7	1/5	3/0**	Подзолистые глееватые; подзолистые с микропрофилем подзола, подзолы иллювиально-железистые, литоземы грубогумусовые (Albic Podzol (Arenic, Pyric); Gleyic Luvisols (Loamic))	Подзолы пирогенные; гипсопетроземы, торфяно-подзолы пирогенные; элювоземы потечно-гумусовые, подбуры пирогенные (Albic Podzol (Arenic, Pyric); Entic Podzols (Arenic, Pyric); Lithic Leptosols (Loamic, Pyric))
Средняя тайга, ЕТР	6/8	4/4	2/4	1/3	1/1	0/0	Буроземы типичные; подзолистые глеевые; литоземы грубогумусовые (Skeletal Gleyic Cambisols (Loamic); Gleyic Luvisols (Loamic))	Подзолы пирогенные; подзолы потечно-гумусовые Albic Podzol (Arenic, Pyric)
Средняя тайга, СЗС	8/12	3/3	5/9	4/4	1/0	5/5	Подзолы иллювиально-железистые; торфяно-подзолы языковатые (Albic Podzol (Arenic))	Псаммоземы стратифицированные; подзолы пирогенные (Arenosols (Arenic, Pyric)); (Albic Podzol (Arenic))

* — так как разные типы напочвенных покровов часто встречаются на территории одной гаях, некоторые из них соответствуют нескольким критериям; ** — 0 точек опробования означает, что почвенный разрез не закладывался.

местами сохраняется напочвенный покров, может восстанавливаться ель (*Picea obovata* Ledeb). На суглинистых почвах при сильных пожарах восстанавливаются береза и осина.

Почвообразующие породы в районах исследования представлены мореной с обломками кристаллических сланцев. Ближе к реке Печоре, на первых террасах, породы были представлены аллювием с гравием и галькой. В окрестностях п. Якша породы были представлены песчаным слоистым аллювием без примесей гальки или гравия [Атлас почв Республики Коми, 2010].

Почвенный покров включал подзолистые почвы, подзолисто-глеевые, буроземы, подзолы и оподзоленные подбуры. Подтипы подзолистых почв и буроземов были представлены, в основном, грубогумусированными и глееватыми вариантами, подзолы и подбуры — грубогумусированными и иллювиально-железистыми вариантами [Атлас почв Республики Коми, 2010; Классификация и диагностика почв России, 2004].

В подзоне средней тайги описаны также почвы гарей на территории севера Западной Сибири (СЗС) (около 64° с. ш., 69° в. д.) (рис.1, точка 3). Климатические характеристики температуры схожи с районом средней тайги ЕТР, но объем осадков меньше 500 мм/год.

Характер рельефа полого-волнистый. Гари охватывают террасы р. Сухой Полуи. Были рассмотрены пять молодых гарей в пределах 15 лет и три средневозрастных гари от 15 до 100 лет.

Растительность на гарях была представлена сосновыми и сосново-еловыми (*Picea obovata* Ledeb и *Pinus sylvestris* L.) лишайниковыми (*Cladoniaceae* spp.), угнетенными лесами. После сильных пожаров некоторые гари не имели напочвенного покрова, или единичные злаки.

Почвообразующие породы представлены древнеаллювиальными песчаными отложениями.

Почвы представлены подзолами иллювиально-железистыми, псаммоземами стратифицированными и иллювиальными слоистыми подтипами [Классификация и диагностика почв России, 2004].

Среди обычных методов изучения пирогенных почв используются морфологический, химический и физический анализы и анализ концентрации антракомассы [Бобровский, 2010; Воробьева, 2004; Дымов, 2020; Carcaillet, Thion, 1996]. Для реконструкции распространения пожара наиболее перспективным нам представляется анализ концентрации антракомассы, который позволяет получить сведения об объемах послепожарной эрозии и очагах пожара [Abney, Berhe, 2018].

Методы исследований включали морфологическое описание почвенного профиля, измерения рН водной и солевой вытяжек стеклянным электродом, железо в вытяжках Тамма и Мера-Джексона с окончанием на спектрофотометре КФК-3-01 «ЗОНЗ»

[Воробьева, 2004]. Исследования концентрации антракомассы проводили сухим и мокрым просеиванием на серии сит, после чего делили на фракции: <0,5, 0,5–1, 1–2, 2–5, >5 мм [Carcaillet, Thion, 1996].

В программе Excel (2016) были определены такие базовые статистические параметры, как коэффициент корреляции, коэффициент детерминации, коэффициент вариации, дисперсия, стандарт и др. [Дмитриев, 2009].

Результаты

На территории северной тайги мы наблюдали смену лиственничных и сосновых зеленомошных лесов, с приблизительной формулой Л5С4, на густой подрост осины и березы разнотравный — О5Б5. При этом мощность мохового покрова уменьшалась с возрастом гари: мощность горизонта О составила от двух до пяти сантиметров на молодой гари и 7–10 см на средневозрастной гари. На территории молодой гари также появилось больше долгомошниковых участков, и, в целом, она стала более сухой, по сравнению с фоном. Не исключено, что поступление больших количеств К и Са с опадом лиственных растений, которыми была представлена вторичная сукцессия, увеличило плодородие, что сказалось на жизнеспособности трав и кустарничков. Резкое чередование растительных сукцессий от спелых и перестойных хвойных к молодым лиственным приводит к формированию пирогенно-устойчивой экосистемы взамен пирогенно-уязвимой.

На территории средней тайги ЕТР и Сибири на гари часто возобновляется исходная сукцессия сосняка лишайникового С10 или С8-9Б1-2, но с появлением злаков, растущих, предположительно, на скоплениях золы. Возможно также последовательное чередование сукцессий сосняка лишайникового — березняка и сосняка разнотравного — сосняка зеленомошного, достаточно пирогенно-устойчивого, более характерное для территории средней тайги ЕТР.

В средней тайге Сибири на исследованных участках редкостойный сосняк лишайниковый С10 способен восстанавливаться без существенных изменений в течение 10–15 лет, после чего снова подвержен горению. В этих условиях пирогенно-уязвимая экосистема систематически реплицируется, что обусловлено, по нашему мнению, высоким риском эрозии и низкой влажностью в условиях свободного дренажа песчаных пород.

На молодых гарях верхние почвенные горизонты редко восстанавливаются до естественной мощности в течение 15 лет. Наибольшие повреждения подстилочных горизонтов почв наблюдались в экосистемах с лишайниковым напочвенным покровом. Во всех рассмотренных молодых гарях, где были участки лишайника, после пожара он выгорел полностью и мощность подстилки, если она уже

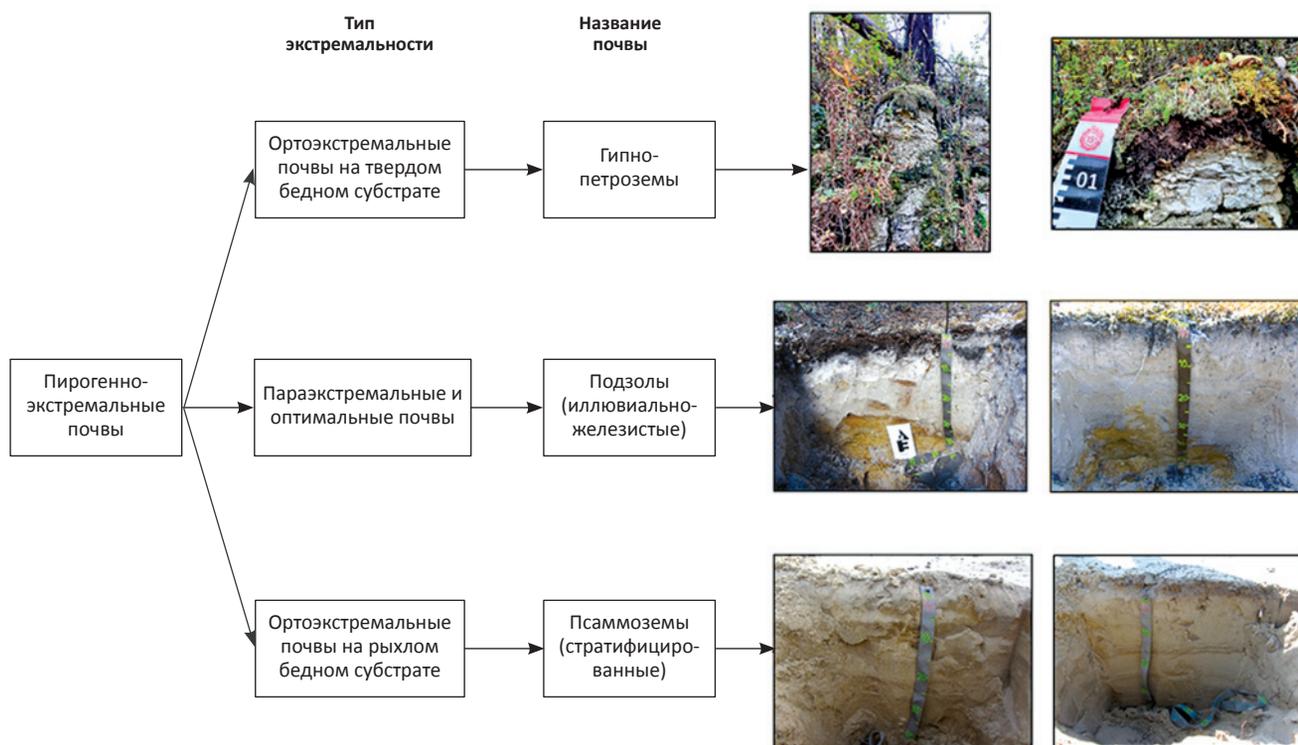


Рис. 2. Пример ортоэкстремальных и параэкстремальных почв гарей

сформировалась, составила 1 ± 1 см. Участки зеленомошника прогорали на глубину от двух до трех сантиметров в молодых гарях, при 5 ± 3 см обычной мощности подстилки. На участках, где гари не было более 100 лет, мощность подстилки составила 10 ± 5 см.

Участки уничтоженной и подпаленной подстилки располагались на гари очагами. Почвы, лишённые подстилки, подверглись водной и ветровой эрозии, что приводило к образованию участков перемещённых стратифицированных псаммоземов. В зависимости от степени послепожарной эрозии нами предлагается выделять две группы почв по типу пирогенной экстремальности:

- ортоэкстремальная группа характеризуется отсутствием гумусовых или подстилочных горизонтов. Представлена псаммоземами и петроземами;

- параэкстремальная группа характеризуется мощностью органических горизонтов меньше двух см. Представлена подзолами пирогенными (рис. 2).

Результаты показали, что вне зависимости от расположения объектов исследования характер пост-пирогенного развития почв сходен, т.е. азонален. Например, на склонах и в воронках, а также в экосистемах с маломощной и/или лишайниковой подстилкой наблюдались все разновидности пирогенно-экстремальных почв. Наиболее склонными к очаговому характеру экстремальности оказались экосистемы со смешанным типом пожаров, приобретающие дополнительную расчленённость рельефа после вывалов деревьев, такую как западины ветровальных комплексов.

После пирогенной эрозии до ортоэкстремальных почв длительность постпирогенной эволюции велика — за 15 лет на гипсах и за 10 лет на песках почвенный покров не восстановился до оптимального полнопрофильного состояния, что говорит об устойчивости изменений, вызванных послепожарной эрозией. На выровненных, неэродированных участках за это время сформировался горизонт O мощностью пять-семь сантиметров.

Распределение концентрации антракомассы позволило выявить (а) пространственную организацию — очаговость пожара и (б) временную динамику пожаров (рис. 3). На рис. 3 представлен участок северной тайги Беломоро-Кулойского плато в зоне активности карста, выраженного в воронках просадочного происхождения. Расстояние между элювиальными системами и трансаккумулятивным дном карстовой воронки (необходимым атрибутом карстовой воронки является понор) может колебаться от двух до 20 м в зависимости от ее размеров. После знака «равно» на рисунке дана концентрация антракомассы ($A = [\text{ppm}]$) размерных фракций $> 0,5$ мм со стандартным отклонением, там, где позволяла повторность ($n=10$).

Пространственную динамику пожаров в почвенном профиле записывают элювиальные и трансэлювиальные геосистемы, а временную — аккумулятивные и трансаккумулятивные. Анализ концентрации антракомассы на рис. 3 (правый разрез) показал нелинейный характер распределения антракомассы с глубиной. Древние пожары, таким образом, характеризовались разной относительной

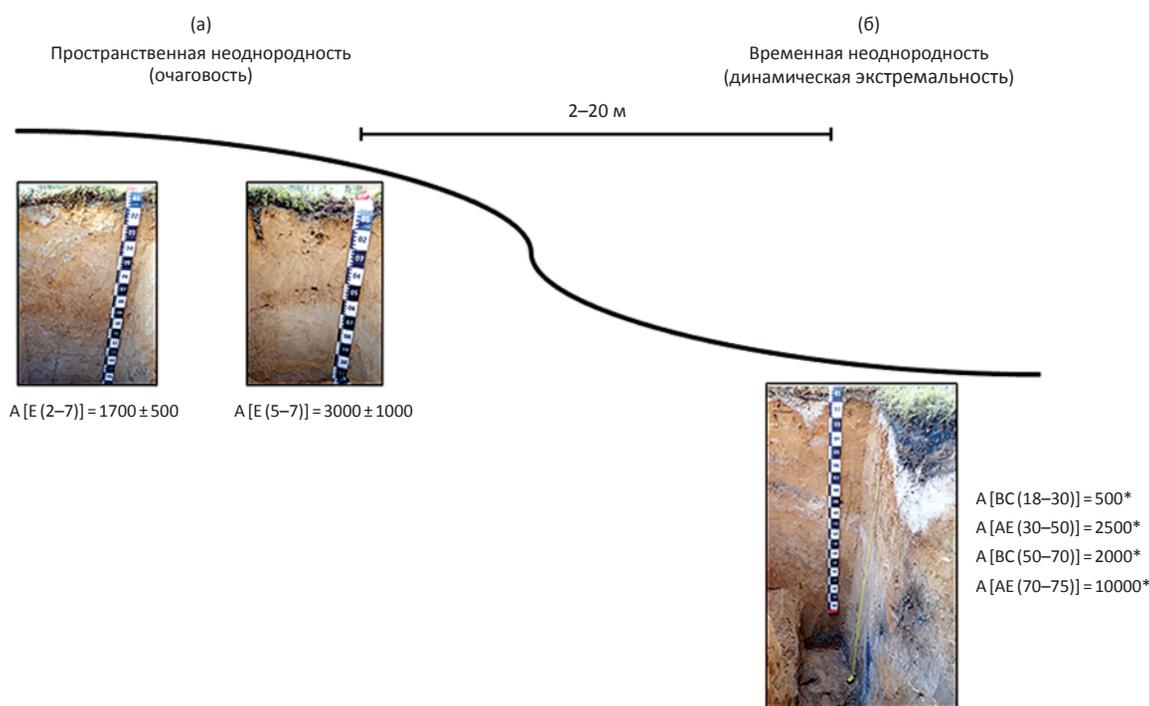


Рис. 3. Диагностирование временной и пространственной неоднородности по концентрации антракомассы. А[E(2-7)] — А — концентрация антракомассы (ppm); Е — почвенный горизонт, актуальный или погребенный; в скобках мощность горизонта

экстремальностью: разница в концентрации антракомассы доходила до четырех раз в разных горизонтах палеопочв (в горизонте [АЕ] на 30–50 см 2500 ppm, а в [АЕ] на 70–75 см 10000 ppm). Стандартное отклонение для концентраций антракомассы почв с пространственной неоднородностью пожаров дано на основе анализа 10 молодых гарей.

Интересно распределение углистых частиц по фракциям в разных растительных ассоциациях в почвах молодых гарей. В сосняках лишайнико-

вых после пожара по весу доминировала фракция антракомассы меньше одного миллиметра, доля фракции больше пяти миллиметров была незначительной. В сосняках и ельниках зеленомошных доминировала фракция углей больше одного миллиметра, с частой встречаемостью фракции больше пяти миллиметров. Фракцией антракомассы, преобладающей в погребенных горизонтах почв, была фракция на ситах в один и два миллиметра — такая стратификация может быть связана как с типом

Таблица 2

Химические свойства и статистические показатели верхних минеральных горизонтов (Е) пирогенных почв песчаного и супесчаного гранулометрического состава северной тайги

Общие данные			Молодые гары				Фоновые почвы				
Подзона	Сила и тип пожара	Мощность гор., см	pH водный	pH солевой	Fe _{окс} %	Fe _{дит} %	Мощность гор., см	pH водный	pH солевой	Fe _{окс} %	Fe _{дит} %
Средняя тайга	Слабый низовой	2–7	6,0	4,9	0,01	0,07	2–9	5,0	3,4	0,06	0,11
Северная тайга	Сильный смешанный	5–7	5,8	4,4	0,15	0,41	2–10	6,0	4,2	0,07	0,09
Северная тайга	Сильный смешанный	3–15	4,8	3,7	0,17	0,53	7–15	4,8	3,9	0,09	0,10
Северная тайга	Катастрофический смешанный	0–10	6,1	4,8	0,20	0,82	5–15	5,0	3,4	0,27	0,56
Северная тайга	Слабый низовой	7–10	7,0	6,0	0,16	0,78	3–5	6,4	4,4	0,07	0,19
Северная тайга	Сильный низовой	3–10	5,3	3,8	0,01	0,19	3–15	4,7	3,8	0,05	0,15
Северная тайга	Средний низовой	2–5	6,4	4,5	0,09	0,23	2–5	6,0	4,4	0,04	0,14
Северная тайга	Сильный смешанный	0–5	6,0	5,0	0,19	0,40	2–5	5,1	4,4	0,31	0,58
Северная тайга	Слабый низовой	5–10	5,4	4,5	0,02	0,17	3–6	4,8	3,5	0,03	0,12

Таблица 3

Общая тенденция изменения почвенных свойств под молодыми гарями после пожаров разного типа и интенсивности в подзоне северной тайги

Молодые гары		Фоновые почвы	
$\mu[\text{pH}_{\text{вод.}}]$	5,9	$\mu[\text{pH}_{\text{вод.}}]$	5,4
$\mu[\text{pH}_{\text{сол.}}]$	4,6	$\mu[\text{pH}_{\text{сол.}}]$	4,0
$\mu[\text{Fe}_{\text{окс.}}]$	0,10	$\mu[\text{Fe}_{\text{окс.}}]$	0,10
$\mu[\text{Fe}_{\text{дит.}}]$	0,38	$\mu[\text{Fe}_{\text{дит.}}]$	0,22
$S^2[\text{pH}_{\text{вод.}}]$	0,387	$S^2[\text{pH}_{\text{вод.}}]$	0,431
$S^2[\text{pH}_{\text{сол.}}]$	0,416	$S^2[\text{pH}_{\text{сол.}}]$	0,184
$S^2[\text{Fe}_{\text{окс.}}]$	0,006	$S^2[\text{Fe}_{\text{окс.}}]$	0,010
$S^2[\text{Fe}_{\text{дит.}}]$	0,070	$S^2[\text{Fe}_{\text{дит.}}]$	0,035
$S[\text{pH}_{\text{вод.}}]$	0,622	$S[\text{pH}_{\text{вод.}}]$	0,657
$S[\text{pH}_{\text{сол.}}]$	0,645	$S[\text{pH}_{\text{сол.}}]$	0,429
$S[\text{Fe}_{\text{окс.}}]$	0,078	$S[\text{Fe}_{\text{окс.}}]$	0,100
$S[\text{Fe}_{\text{дит.}}]$	0,264	$S[\text{Fe}_{\text{дит.}}]$	0,186
$V[\text{pH}_{\text{вод.}}]$	11	$V[\text{pH}_{\text{вод.}}]$	12
$V[\text{pH}_{\text{сол.}}]$	14	$V[\text{pH}_{\text{сол.}}]$	11
$V[\text{Fe}_{\text{окс.}}]$	75	$V[\text{Fe}_{\text{окс.}}]$	96
$V[\text{Fe}_{\text{дит.}}]$	70	$V[\text{Fe}_{\text{дит.}}]$	83
$r(\text{pH}_{\text{вод.}}; \text{pH}_{\text{сол.}})$	0,79	–	–
R^2	79	–	–

Примечание: μ — среднее; S^2 — дисперсия; S — стандарт; V — коэффициент вариации; r — коэффициент корреляции; R^2 — коэффициент детерминации.

сгоревшей растительности, так и с разрушением крупных углей в процессе перемещения в аккумулятивные системы.

В табл. 2 даны конкретные значения химических показателей, полученные для пост-пирогенных и фоновых почв, на основании которых был проведен статистический анализ.

Статистический анализ химических свойств (табл. 3) показал, что значения pH солевой и водной вытяжки хорошо аппроксимируются нормальным законом — $V < 30$. Дитионит- и оксалат-растворимое железо, измеренное в вытяжках Тамма и Мера-Джексона, имеют распределение, отличное от нормального — $V > 70$. Значения pH в пирогенных почвах повышается в среднем на 0,5–1 по сравнению с фоновыми pH. Значения pH водной вытяжки после пожара на 79% зависят от исходного значения pH ненарушенной почвы, при этом для солевой вытяжки такой закономерности не наблюдается. Изменений рассматриваемых показателей недостаточно для значительного изменения почвенных процессов с точки зрения почвообразовательного процесса.

Обсуждение

Пространственная неоднородность пожаров.

Мы установили, что мощная подстилка и плотный опад хвои и листьев являются хорошей экосистемной защитой от пожаров. Мхи хорошо сохраняют влагу, особенно в нижней части подстилки (ОН), что препятствует ее полному выгоранию. Предметом обсуждения может быть эффект конкретных видов мха на устойчивость экосистемы к пожарам. Наибольшую защиту, по нашему мнению, формируют виды сфагнома (*Sphagnaceae*) как рекордсмена по запасанию воды.

Причиной долговременного изменения почвообразования и экстремальных условий на гарях были низкое содержание биогенных элементов в сульфатных породах и выраженный раздув псаммоземов в условиях сложного рельефа. Предметом обсуждения может быть влияние факторов эрозии на почвенный покров после пожара и скорость стабилизации условий почвообразования. Мозаика разного характера подстилки и комплекса внешних условий, неоднородно меняющаяся в конкретной местности, обуславливает очаговость пожара, т.е. его пространственную неоднородность.

Динамика пожаров. По характеру чередования постпирогенных наносов в трансаккумулятивных и аккумулятивных позициях можно определить характер относительной экстремальности пирогенного события, однако методы морфологического выделения и количественной оценки таких событий все еще требуют обсуждения. Так, доминирование неполнопрофильных псаммоземов, а также сдвоенных почв говорит о влиянии частых пожаров, тогда как полнопрофильные погребенные почвы говорят о существенном времени, прошедшем после пирогенного события. Роль эрозии как маркера пожара, таким образом, является определяющей в установлении почвенной пирогенной экстремальности во времени. Роль пирогенеза в почвообразовании на значительной территории Сибири широко обоснована в работе [Чевычелов, Шахматова, 2016]. Авторы отмечают важность послепожарной эрозии, рассматривают циклический характер пирогенеза, его кратковременные и долговременные свойства, которые согласуются с нашими выводами. При этом концентрация антракомассы может служить косвенным свидетельством масштабов и силы пирогенного события.

Классы экстремальности. Пирогенно-экстремальные почвы могут быть подчинены временным трендам — сезонным или более глобальным, отброшены на разные этапы начального почвообразования и вынуждены развиваться на бедном, перемещенном или экспонированном материале. Следовательно, они соответствуют режимно-функциональному, возрастному и факторному классам (лито-)экстремальности, т.е. всем критериям, предъявляемым для почв экстремального ряда.

В работе не рассматривалась трансформация органогенных почв Пинежского заповедника и территорий средней тайги, поскольку органогенные почвы требуют особого подхода к выделению классов экстремальности. Чаще всего в болотах распространены особый тип пожара — подземный, который, хотя и вызывает деградацию торфяника, не ведет к активизации механической эрозии. По этим причинам этот блок почв должен быть рассмотрен в отдельных работах с разработкой индивидуальных критериев их экологического статуса. Трансформация органогенных почв пожарами освещена, например, в работах Ф.Р. Зайделямана (2011).

Заключение

В зависимости от форм рельефа и типа растительности меняются параметры пожара и послепожарной эрозии. Очаги — участки, характеризующиеся наибольшей интенсивностью горения, формируют «очаговость пожара», обуславливающую его пространственную неоднородность. Пространственная неоднородность пожара хорошо просматривается при анализе подстилки, а конкретно — ее мощности и содержания в ней углистых частиц разных размерных фракций.

Повторяемость пожара во времени на одной территории приводит к появлению специфических структур почвенного покрова — морфонов и углистых горизонтов, отраженных в почвенном профиле, заключающихся в чередовании пирогенных слоев экстремальных и оптимальных почв. Такое чередование раскрывает локальную пирогенную историю почв и режим пожаров — «динамичность пожаров». На примере пожаров в Пинежском заповеднике рассмотрены почвенные горизонты одного профиля, резко отличные по содержанию антракомассы, что служит косвенным свидетельством различного влияния пирогенных событий на почвенный покров во времени.

Пирогенно-экстремальные почвы достаточно широко распространены и должны учитываться в почвенных классификациях, землепользовании и лесоводстве, так как они на самом деле являются характерными почвами бореальных лесов России.

Концентрация антракомассы — «след» пожара — является иллюстрацией его пространственной и временной неоднородности. В трансаккумулятивных позициях она больше связана с характером (силой) пирогенного события, чем с возрастом гари, в элювиальных позициях фракционный анализ антракомассы отражает характер сгоревшей растительности.

Процессы эрозии влияют не только на пространственную неоднородность почв гари, но и на запись динамики пожаров, что видно на примере почв Пинежского заповедника, а именно — наличия сдвоенных почв и слоев седиментов без признаков почвообразования.

Изменение химических свойств песчаных почв средней и северной тайги пожарами не влияет на общее направление почвообразования после пожаров.

Информация о финансировании работы

Полевые и лабораторные исследования выполнены за счет гранта РФФИ 19-29-05238 «МК», теоретическое обобщение выполнено за счет госзадания Института географии РАН ААА-А19-119022190169-5 (FMGE-2019-0006), анализ антракомассы — за счет мегагранта (соглашение № 075-15-2021-599 от 08.06.2021).

Благодарность

Выражаем благодарность администрациям Пинежского и Печоро-Ильчского заповедников и лично Л.С. Пучниной, А.А. Семиколенных и А.А. Алейникову за помощь в организации экспедиции. С.В. Горячкину и Н.С. Мергелову за помощь в редактировании статьи и ценные предложения. Г.В. Матышаку и О.Ю. Гончаровой за помощь в организации экспедиции на СЗС. Особая благодарность Н.М. Фазульдиновой за помощь в определении концентрации антракомассы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровский А.Л. Пирогенное карбонатообразование: результаты почвенно-археологических исследований // Почвоведение. 2007. № 5.
2. Атлас почв Республики Коми / Под ред. Г.В. Добровольского, А.И. Таскаева и И.В. Забоевой. Сыктывкар, 2010.
3. Бобровский М.В. Лесные почвы Европейской части России: биотические и антропогенные факторы формирования. М., 2010.
4. Воробьева Л.А. Химический анализ почв: Учебник. М., 1998.
5. Горячкин С.В. Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М., 2010.
6. Горячкин С.В. География экстремальных почв и почвоподобных систем // Вестник РАН. 2022. Т. 92, № 6.
7. Горячкин С.В., Мергелов Н.С., Таргульян В.О. Генезис и география почв экстремальных условий: элементы теории и методические подходы // Почвоведение. 2019. № 1.
8. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении: Учебник. 3-е изд. М., 2009.
9. Дымов А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. М., 2020.
10. Классификация и диагностика почв России / Под ред. Л.Л. Шишова, В.Д. Тонконогова, И.И. Лебедевой и М.И. Герасимовой. Смоленск, 2004.
11. Мелехов И.С. Влияние пожаров на лес: Учебное пособие. М.; Л., 1948.
12. Попов С.Ю., Пучнина Л.В. Карта нарушений растительного покрова Пинежского заповедника с конца

XVIII по начало XXI веков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 1.

13. Семиколенных А.А., Спиридонова И.А., Тююкина Т.Ю. и др. Экстремальные экосистемы и почвы открытых гипсово-карстовых ландшафтов тайги европейского севера. М., 2015.

14. Таргульян В.О. Теория педогенеза и эволюции почв. М., 2019.

15. Чевычелов А.П., Шахматова Е. Ю. Постпирогенные полициклические почвы в лесах Якутии и Забайкалья // Почвоведение. 2016. № 2.

16. Abney R.B., Berhe A.A. Pyrogenic carbon erosion: implications for stock and persistence of pyrogenic carbon in soil // *Frontiers in Earth Science*. 2018. Vol. 6.

17. 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, № 1–4.

18. Carcaillet C., Bouley B., Carcaillet F. Once upon a time biomass burning in the western Alps: Nesting effects of climate and local drivers on long-term subalpine fires // *Forest Ecosystems*. 2022. Vol. 9.

19. Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review // *Oecologia*. 2005. Vol. 143, № 1.

20. Gaboriau D.M., Asselin H., Adam A. A. et al. Drivers of extreme wildfire years in the 1965–2019 fire regime of the Tłı̨ch̄o First Nation territory, Canada // *Ecoscience*. 2022. Vol. 29, № 3.

21. Moody J.A., Martin D.A. Forest fire effects on geomorphic processes // *Fire effects on soils and restoration strategies* / Eds. A. Cedra and P.R. Robichaud. Enfield, NH, 2009. Vol. 5.

22. Robichaud P.R. Post-fire stabilization and rehabilitation // *Fire effects on soils and restoration strategies* / Eds. A. Cedra and P.R. Robichaud. Enfield, NH, 2009. Vol. 5.

23. Shakesby R.A., Doerr S.H. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent // *Earth-Science Reviews*. 2006. Vol. 74, № 3–4.

24. Ubeda X., Outeiro L.R. Physical and chemical effects of fire on soil // *Fire effects on soils and restoration strategies* / Eds. A. Cedra and P.R. Robichaud. Enfield, NH, 2009. Vol. 5.

25. Walker X.J., Howard B.K., Jean M. et al. Impacts of pre-fire conifer density and wildfire severity on ecosystem structure and function at the forest-tundra ecotone // *PLoS ONE*. 2021. Vol. 16, № 10.

Поступила в редакцию 17.06.2022

После доработки 29.09.2022

Принята к публикации 26.10.2022

PYROGENIC-EXTREME SOILS OF THE NORTHERN AND MIDDLE TAIGA OF RUSSIA

D. G. Petrov, A. A. Golyeva

With the rise in the number of fires, the proportion of pyrogenic soils in Russia is constantly increasing. The objective of this study is to determine how contrasting environmental conditions can trigger wildfires and affect post-fire recovery scenarios. Post-pyrogenic Arenosols, Podzols and Fluvisols have been studied in the taiga subzones: in the Pinezhsky and Pechoro-Ilychsky nature reserves at the European territory of Russia and in the basin of Sukhoi Polui river in the north of Western Siberia. We employed soil morphology description, analysis of anthracomass concentration (calculated as the sum of charcoal particles >0,5 mm) and a set of chemical methods. We demonstrate that some fires dramatically change the direction of soil formation, causing: 1) loss of organic horizon(s); 2) partial loss of mineral horizon(s); 3) restart of soil formation if the soil stratum has been completely degraded. We propose to distinguish such varieties as pyro-extreme soils. Both weakly transformed full-profile soils (para-extreme) and strongly degraded soils (ortho-extreme) can coexist in the fire-damaged areas. Ecosystems whose properties (e.g. climate, topography, fire-return intervals) predetermine severe fire damage to vegetation and soil cover are proposed as pyrogenically vulnerable. Among studied factors, the post-fire erosion has proven to be a predominant control over long-term changes in the direction of soil formation. We propose a concept of «fire centers» for description of spatial heterogeneity in burning, which can be tracked by changes in the anthracomass concentration.

Key words: pyrogenic soils, extreme soils, para-extreme, ortho-extreme, anthracomass, vulnerable ecosystems, fire dynamics.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Дмитрий Григорьевич, аспирант, мл. научн. сотр.

Отдела географии и эволюции почв Института географии РАН,
e-mail: pd437807@mail.ru

Гольева Александра Амурьевна, докт. геогр. наук, гл. научн. сотр.

Отдела географии и эволюции почв Института географии РАН,
e-mail: golyeva@igras.ru