
ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.417.1

ИЗМЕНЕНИЕ ВЕРХНИХ ГОРИЗОНТОВ ПОЧВ И ЛИЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВОД В ПЕРВЫЕ ГОДЫ ПОСЛЕ НИЗОВОГО ПОЖАРА В СОСНЯКЕ ЛИШАЙНИКОВОМ РЕСПУБЛИКИ КОМИ

© 2024 г. И. В. Паюсова^{a,*} (<https://orcid.org/0000-0002-7169-3727>),
Д. Н. Габов^a (<https://orcid.org/0000-0002-3786-9872>),
И. В. Груздев^a (<https://orcid.org/0000-0002-6693-3925>),
А. А. Дымов^a (<http://orcid.org/0000-0002-1284-082X>)

^aИнститут биологии ФИЦ Коми научного центра УрО РАН, ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, 167982 Россия

*e-mail: rajusova@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 25.03.2024 г.

После доработки 10.07.2024 г.

Принята к публикации 11.07.2024 г.

Изучено изменение химического состава верхних горизонтов подзолов иллювиально-железистых (Albic Podzol) сосняков лишайниковых, пройденных беглым низовым пожаром на территории средней тайги Республики Коми. Выявлено, что через 2 сут после пожара общее содержание углерода в пирогенном горизонте ($Q_{\text{пир}}$) возрастает в 1.3 раза по сравнению с подстилкой условно-фонового участка. В ходе дальнейшей постпирогенной сукцессии общее содержание углерода в верхнем пирогенном горизонте уменьшается. Непосредственно после пожара выявлено возрастание содержания бензолполикарбоновых кислот в пирогенном горизонте в 14.5 раз по сравнению с подстилкой условно-фонового участка. Концентрация полициклических ароматических углеводородов в 7 раз превышает их содержание в подстилке исходного леса. Показано, что в первые 10 сут после пожара из-под пирогенного горизонта происходит “заповедный” вынос углерода – 4 г/м² и ПАУ – 11.5 мкг/м². Повышенный по сравнению с условно-фоновым участком вынос прослеживается в первые три месяца. В ходе дальнейшей эволюции происходит приближение химического состава лизиметрических вод к условно-фоновым значениям, и через два года концентрация как углерода, так и ПАУ близка к условно-фоновым показателям.

Ключевые слова: boreальные леса, углерод пирогенного происхождения, полициклические ароматические углеводороды, углерод лизиметрических вод, бензолполикарбоновые кислоты, лизиметры

DOI: 10.31857/S0032180X24120175, **EDN:** JCCCFA

ВВЕДЕНИЕ

Лесные пожары являются одним из наиболее важных экологических факторов изменения наземных ландшафтов и экосистем планеты. Как естественный фактор [17, 18, 29] они оказывают комплексное воздействие на окружающую среду. Сосновые леса, развивающиеся на песчаных иллювиально-железистых подзолах, наиболее часто подвергаются пирогенному воздействию [9, 19]. Для таких лесов число пожаров может изменяться от трех до девяти раз в течение 200 лет. С начала тысячелетия в связи с климатическими изменениями наблюдается увеличение, как числа пожаров, так и площадей лесов, пройденных пожарами [23, 26].

В настоящее время особый интерес вызывает оценка пирогенного воздействия как на boreальные леса, так и на качественный и количественный состав почвенного органического вещества (**ОВ**). В составе ОВ почв boreальных ландшафтов практически всегда обнаруживается влияние пожаров. Вклад углерода пирогенного происхождения (РуС) принято оценивать по концентрации бензолполикарбоновых кислот (**БПКК**), содержанию ароматических структур в составе ОВ [20], часто РуС определяют последовательным окислением ОВ [4]. Полициклические ароматические углеводороды (**ПАУ**) широко используются в качестве биомаркеров пирогенного воздействия [30]. Особый интерес к РуС связан с его большей устойчивостью к разложению и потенциалом длительного захоронения

в почвах. К настоящему времени показано, что пожары влияют на состав ОВ [14, 15]. В почвах постпирогенных ландшафтов происходит трансформация ОВ, возрастает концентрация ПАУ, БПКК, обеднение водорастворимым ОВ [24, 32]. Несмотря на значительное число работ по оценке пирогенного воздействия на состав почв [22, 28], в большинстве из них отсутствует анализ самых первых изменений системы ОВ после пирогенного воздействия. Кроме этого, практически не встречаются работы по оценке миграции пирогенно-модифицированных соединений в минеральные горизонты.

Цель работы – оценка влияния пожара на органическое вещество лесных почв, его миграцию и трансформацию в первые годы в ходе постпирогенной сукцессии.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в сосняке лишайниковом, пройденном низовым пожаром антропогенного происхождения в июле 2021 г. Площадь пожара составила 0.8 га. В окрестностях горельника подобран условно-фоновый участок. Координаты: 61°57'29.9" N, 50°29'27.2" E. Согласно почвенно-географическому районированию, данная территория находится в Вымь-Вычегодском округе типичных подзолистых, иллювиально-железистых подзолов, торфянисто-глеевых иллювиально-гумусовых почв. Количество осадков 500–600 мм. Средняя годовая температура 0.5°C. Типы почв определяли согласно Полевому определителю почв [11]. Условно фоновая почва представлена подзолом иллювиально-железистым (Albic Podzol). На территории горельника формируется подзол иллювиально-железистый пирогенный (Albic Podzol), отличающийся высокой долей углистых включений в верхних горизонтах по сравнению с исходной почвой. Для оценки пирогенных изменений анализировали верхние органогенные (пирогенные) и минеральные горизонты. Образцы почв отбирали на следующий день после пожара из пирогенных органогенных горизонтов (Q_{pyr}) и верхних минеральных горизонтов (E_{pyr}). Повторный отбор образцов почв проводили через один год и два месяца после пожара и через два года и три месяца. Сразу после пожара отбирали образцы из почвы условно-фонового участка, прилегающего к территории горельника. Отдельные горизонты в каждый период опробования отбирали в трехкратной повторности. Повторности располагались случайным образом. На следующий день после пожара были установлены лизиметры конструкции Шиловой под органогенные (пирогенные) горизонты в почву горельника и на условно-фоновом участке. Площадь лизиметра составила 0.0961 м². Дожди в период с момента пожара до установки лизиметров отсутствовали. В период наблюдений лизиметрические воды откачивали

через 10 сут после пожара и далее ежемесячно в течение вегетационных периодов 2021 и 2022 гг.

Химические анализы почв проводил в аккредитованной Экоаналитической лаборатории и отделе почвоведения Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. Общее содержание органического углерода и азота в почвах определяли на анализаторе EA-1100 (Carlo Erba, Италия). Измерение pH в водной вытяжке, а также в лизиметрических водах проводили с помощью Edge HI2002-02 pH-метра (Hanna Instruments, Румыния) с цифровым электродом (± 0.01 ед. pH). При оценке pH почв использовали соотношение почва : раствор для подстилок/пирогенных горизонтов 1 : 25, для минеральных горизонтов – 1 : 2.5. Содержание БПКК определяли согласно методике [25]. Всего проанализировали содержание восьми кислот. Концентрации общего органического и неорганического углерода в лизиметрических водах определяли на анализаторе TOC-VCN (Shimadzu, Япония), предварительно профильтровав через мембранные фильтры, с размером пор 0.45 мкм. Содержание ПАУ определяли в ЦКП “Хроматография” ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Методики определения ПАУ в почвах описаны ранее [21]. Для определения ПАУ в лизиметрических водах их фильтровали через мембранные фильтры Владивосток МФЦС-КС с размером пор 0.45 мкм. Содержание ПАУ определяли как сумму в образцах отфильтрованной воды и твердом остатке после ее фильтрования. Экстракцию ПАУ с фильтров проводили при температуре 25°C хлористым метиленом (квалификация “ос. ч.”) с УЗ-обработкой экстракционной системы на УЗ-ванне Branson 5510 (США). Из отфильтрованных лизиметрических вод ПАУ экстрагировали *n*-гексаном с помощью механического экстрактора ЭЛ-1 (Сибэксприбор, Россия). Полученные экстракты объединяли и упаривали на концентраторе Кудерна–Даниша (Supelco, США). Вынос веществ в составе лизиметрических вод рассчитывали с учетом объема почвенных вод и площади поддона лизиметра. Статистическую обработку результатов провели с использованием программного пакета Statistica 6.1 и программы MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пожар в сухих сосновых лесах с невысоким количеством горючего материала оказывает непосредственное влияние на состав ОВ верхних горизонтов почв обычно до глубины не более 20 см [9]. Сразу после пожара наблюдается увеличение частично обугленных частей горевшей биомассы на поверхности почв. Можно предположить, что при послепожарном восстановлении почв особенности состава ОВ будут приближаться к условно-фоновым значениям [5], что, в целом, подтверждается

настоящими исследованиями: согласно полученным результатам выявлено, что содержание общего углерода в верхнем пирогенном горизонте ($Q_{\text{пир}}$) почв возрастает до $57.8 \pm 2.0\%$ по сравнению с $42.3 \pm 1.5\%$, характерном для исходной подстилки (рис. 1a). Через год и два месяца содержание углерода в пирогенном горизонте снизилось и статистически не отличалось от содержания в подстилке условно-фонового участка. Кроме этого, на содержание углерода в верхних горизонтах почв может оказывать влияние увеличение количества корней в минеральных горизонтах при развитии травяных растений (за счет прижизненных выделений и ежегодного разложения корней) [1].

В минеральных горизонтах ($E_{\text{пир}}$) существенных изменений содержания углерода не выявлено, в них концентрация изменяется от 1.3 ± 0.3

до $2.1 \pm 0.3\%$. Это можно объяснить тем, что минеральные горизонты слабо подвержены влиянию пожара. Через один год после пожара произошло уменьшение содержания $C_{\text{общ}}$ в подзолистом горизонте до $1.6 \pm 0.3\%$. Если сравнивать результаты условно-фонового горизонта и данные через один год после пожара, то можно отметить лишь частичное уменьшение содержания $C_{\text{общ}}$ на 0.24% (рис. 1b).

Подзолы иллювиально-железистые характеризуются низким содержанием общего азота и его аккумулированием в органогенном горизонте. В результате беглого низового пожара происходит сгорание мохово-лишайникового покрова, приводящее к трансформации азотсодержащих соединений. Непосредственно после пожара происходит потеря азота в виде легколетучих соединений,

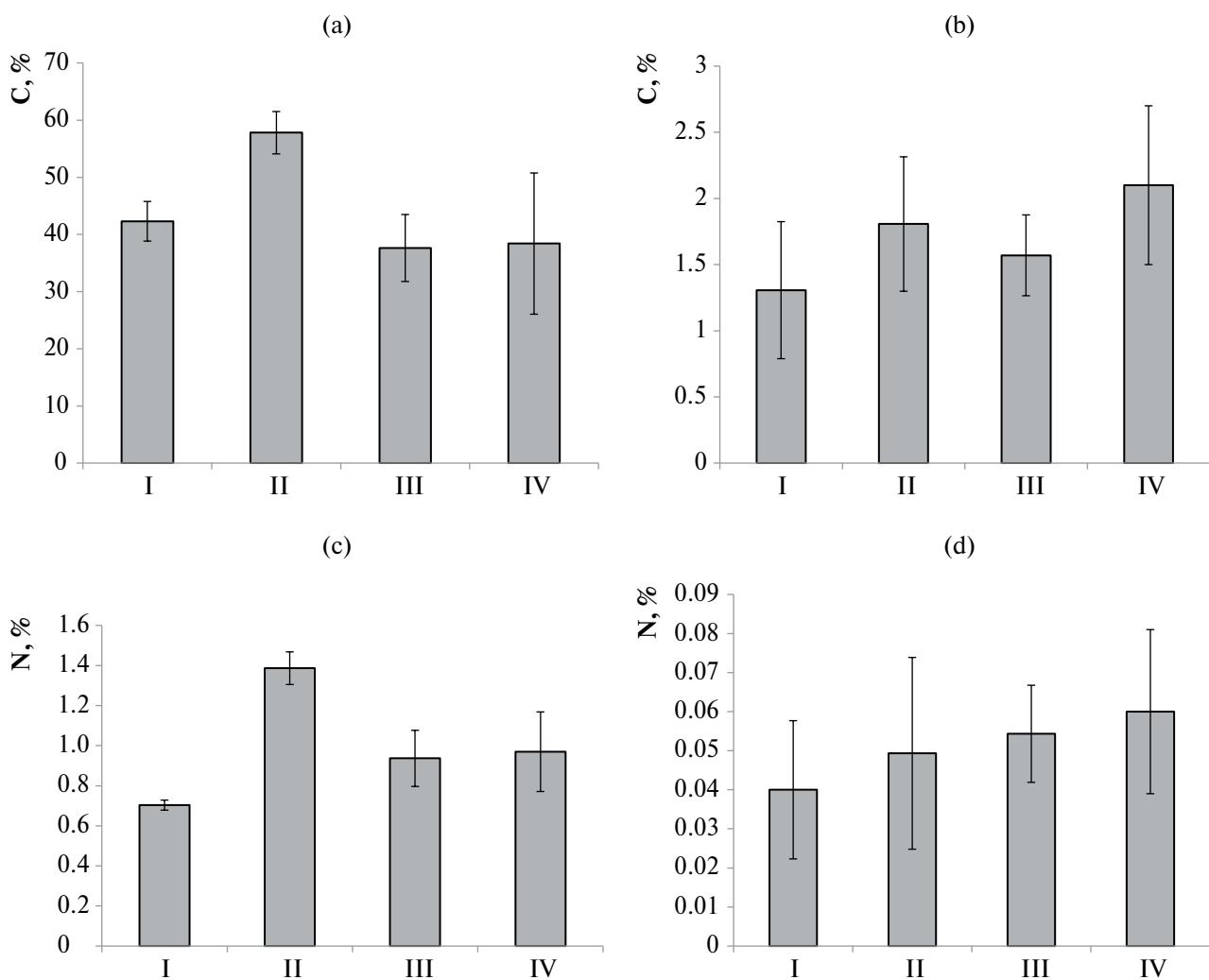


Рис. 1. Общее содержание углерода в верхнем органогенном (а) и минеральном (б) горизонтах и азота в верхнем органогенном (с) и минеральном (д) горизонтах исследуемых почв ($n = 3$, погрешность – ошибка среднего). Обозначения: I – условно-фоновый участок, II – почва горельника через 2 сут после пожара, III – через год и 2 мес после пожара, IV – через 2 года и 3 мес.

уходящих в атмосферу. В то же время азот, находящийся в составе белковых структур растений, минерализуется и попадает в почву [2]. Более того, поступающий дополнительный опад хвои, инициируемый воздействием пожара, приводит к резкому увеличению азота в первые дни после пожара практически в 2 раза (рис. 1c). В минеральном горизонте (E_{pyr}) содержание азота практически не изменилось (рис. 1d). Через один год наблюдается уменьшение общей концентрации азота в органогенном и верхнем минеральном горизонте. Значения приближаются к данным с условно-фонового участка.

Чувствительным показателем пирогенного воздействия на состав ОВ является соотношение C/N (рис. 2). Наблюдаются статистически значимое сужение отношения C/N в верхних органогенных горизонтах после пожара, которое сохраняется в течение первых двух лет после пирогенного воздействия. При этом статистически значимых отличий C/N в горизонтах E_{pyr} не выявлено.

Более реалистичную картину по содержанию РуС в почвах позволяет выявить метод определения бензолполикарбоновых кислот. Благодаря жесткому кислотному гидролизу происходит полное разложение ОВ, и суммарное содержание устойчивых ароматических структур более полно отражает концентрации РуС [16]. Для количественных оценок по определению углерода пирогенного происхождения обозначенный метод более применим. Наибольшее содержание пирогенного углерода выявлено в образцах, подверженных пиролизу во время беглого низового пожара. По полученным данным в исследуемой почве изменение суммарного содержания БПКК

органогенного горизонта до и после пожара составило от 0.57 (подстилка условно-фонового участка) до 8.33% (пирогенный горизонт) от массы образца. Увеличение содержания БПКК в верхних минеральных горизонтах (E_{pyr}) непосредственно после пожара не выявлено (оно составляет от 0.07 до 0.11%). В пересчете на углерод, который содержится в молекулах кислот, для органогенного горизонта до и после пожара изменения составили от 0.26 до 3.76%, а для минерального горизонта до и после пожара – от 0.03 до 0.04%. Через один год и два месяца суммарное содержание БПКК в верхнем пирогенном горизонте уменьшилось в 2 раза. По полученным результатам можно сказать, что из-за пожара произошло увеличение содержания кислот в 14.5 раза в верхнем пирогенном горизонте по сравнению с условно-фоновым участком. В основном преобладают меллитовая и бензолпентакарбоновая кислота, поскольку в процессе пожара формируются сложные ароматические полициклические структуры, которые при жестком окислении соответствуют 5- и 6-замещенным кислотам (рис. 3). Полученные данные подтверждаются исследованиями [27].

Часто низовые пожары являются активным фактором образования ПАУ. Эти соединения специфически дополняют почвообразовательный процесс таежной зоны лесов, обуславливая кратковременные стадии трансформации почв, когда напочвенный покров частично или полностью отсутствует. Обычно ПАУ накапливаются в органогенных горизонтах, концентрация в минеральных горизонтах существенно ниже [6, 7]. В ходе после пожарных сукцессий происходит перераспределение ПАУ между горизонтами и увеличение их концентраций в минеральных горизонтах [22]. Так, сразу

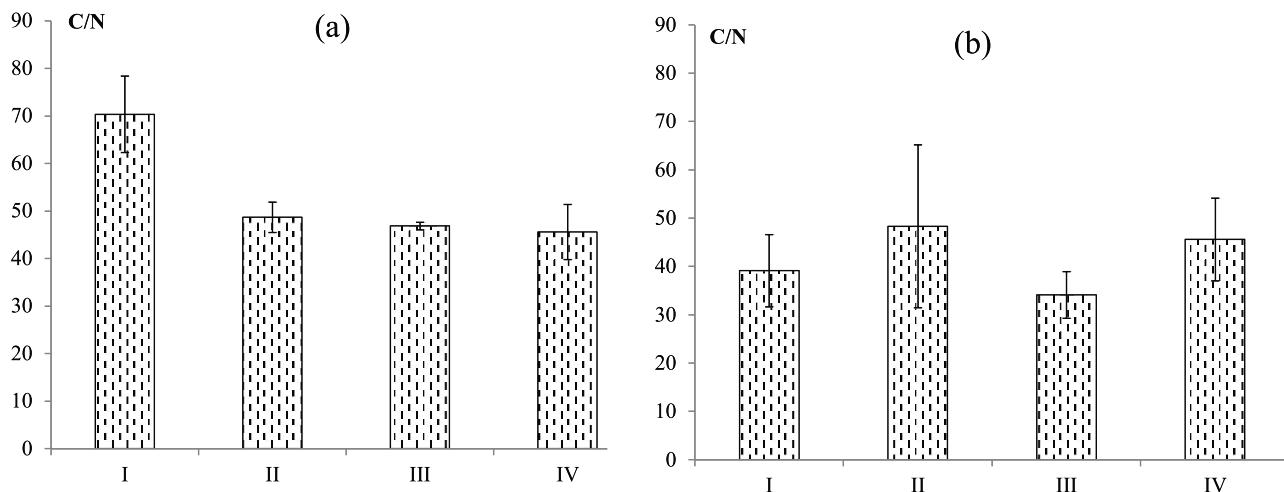


Рис. 2. Соотношение углерода и азота в органогенном (а) и минеральном (б) горизонтах ($n = 3$, погрешность – ошибка среднего): I – условно-фоновый участок, II – почва горельника через 2 сут, III – через год и 2 мес после пожара, IV – через 2 года и 3 мес.

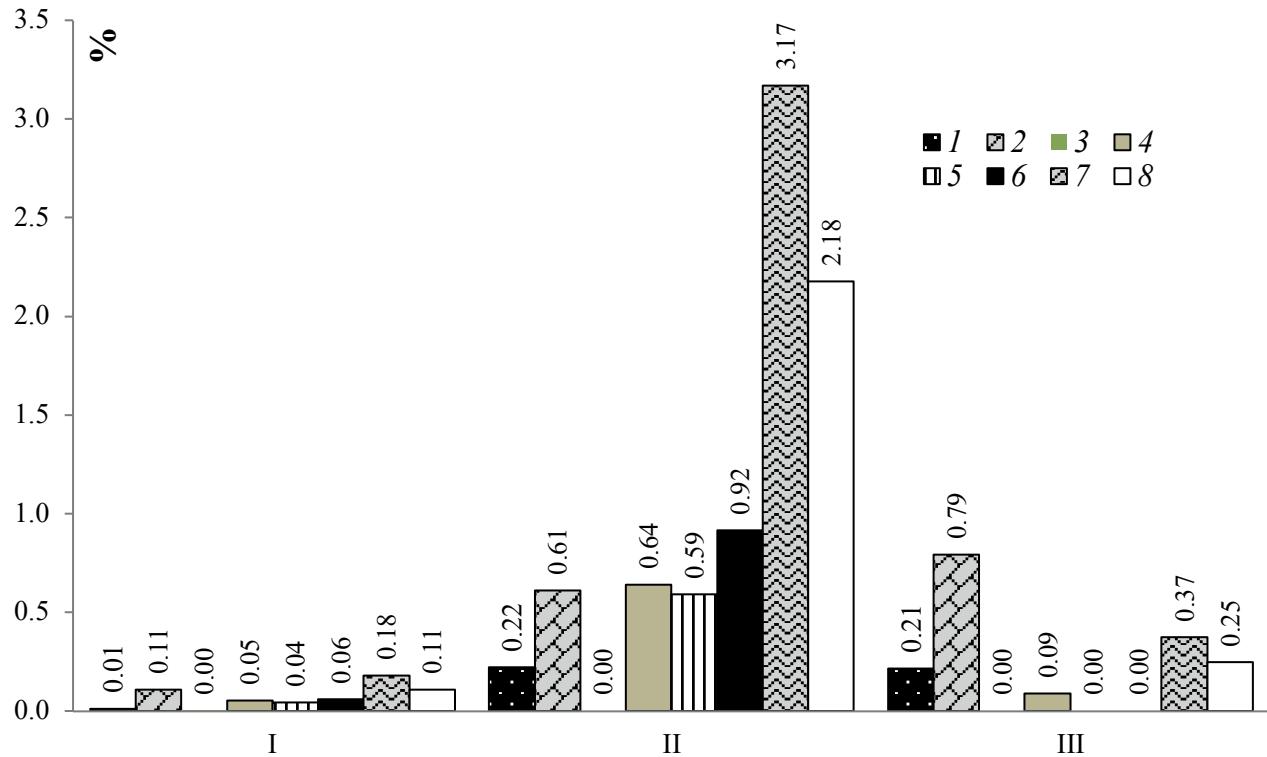


Рис. 3. Содержание индивидуальных БПК в органогенных горизонтах почв: I – почва условно-фонового участка; почва горельника через 2 сут после пожара (II) и через 1 год и 2 мес (III) после пожара подзолов иллювиально-железистых. Обозначения: 1 – гемимеллитовая кислота (бензол-1,2,3-трикарбоновая), 2 – тримеллитовая кислота (бензол-1,2,4-трикарбоновая), 3 – тримезиновая кислота (бензол-1,3,5-трикарбоновая), 4 – пиromеллитовая кислота (бензол-1,2,4,5-тетракарбоновая), 5 – меллофаниковая кислота (бензол-1,2,3,5-тетракарбоновая), 6 – пренитовая кислота (бензол-1,2,3,4-тетракарбоновая), 7 – бензолпентакарбоновая кислота (бензол-1,2,3,4,5-пентакарбоновая), 8 – меллитовая кислота (бензол-1,2,3,4,5,6-гексакарбоновая).

после пожара происходит резкое возрастание суммарной концентрации ПАУ в верхнем органогенном горизонте (рис. 4а). По сравнению с условно-фоновым органогенным горизонтом, сразу после пожара концентрация ПАУ достигла 1840 нг/г, что в 7 раз больше исходных показателей (260 нг/г). Через год суммарная концентрация ПАУ в верхнем пирогенном органогенном горизонте уменьшилась практически в 2 раза и сохранила данную концентрацию и на следующий год. Однако через год происходит накопление ПАУ в верхнем минеральном горизонте, и сумма ПАУ увеличивается в 1.5 раза (80.2 нг/г). Еще через год ПАУ практически вымываются из горизонта, но при этом статистически значения отличаются от соответствующего горизонта условно-фонового участка (рис. 4б). Концентрация ПАУ в пирогенном горизонте увеличивается преимущественно за счет низкомолекулярных ПАУ (нафтилина и фенантрена) (табл. 1), что в целом совпадает некоторыми полученными ранее данными [10]. По сравнению с условно-фоновым участком, после пожара резко увеличилось количество двух-, трех- и четырехъядерных ПАУ в почве.

В результате пожара образуются продукты горения. Как правило, ими являются зола, угли и сажа, формирующиеся на поверхности почв. Элементы, входящие в состав золы, такие как Ca, Mg, K, Na – очень подвижны и хорошо растворимы, поэтому атмосферные осадки способствуют их растворению и передвижению вниз по профилю почв. Они обеспечивают интенсивное выщелачивание подвижных веществ, их биогенную аккумуляцию и сорбцию горелым детритом и углами. В то же время поступление данных элементов в почву является важной причиной изменений физико-химических показателей и содержания доступных форм микро- и макроэлементов [3]. Они повышают pH почвы за счет увеличения суммы поглощенных оснований и их степени насыщенности. При этом наиболее сильно изменения проявляются в первый послепожарный год с последующим трендом приближения показателей к значениям условно-фонового участка. Следует отметить наличие изменений некоторых пирогенных показателей иллювиально-железистых песчаных подзолов, таких как кислотность органогенного горизонта. Так, непосредственно после

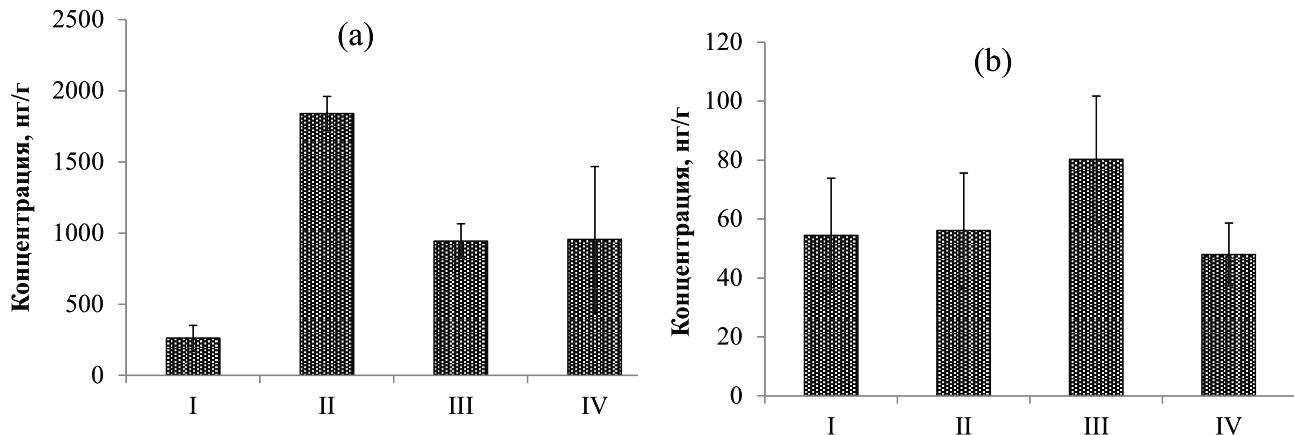


Рис. 4. Суммарная концентрация ПАУ в почвах в органогенных (а) и минеральных (б) горизонтах ($n = 3$, погрешность – ошибка среднего): I – условно-фоновый участок, II – почва горельника через 2 сут после пожара, III – через год и 2 мес после пожара, IV – через 2 года и 3 мес.

пожара рН водной вытяжки верхнего пирогенного горизонта составлял 4.66, что достаточно близко к показателям условно-фонового участка (рН 4.58). Повышение рН водной вытяжки почв характерно и для верхних минеральных горизонтов: для условно-фонового участка рН 4.24, а для гари рН 4.40. Через год значения рН на гари отличаются от результатов с условно-фоновым участком: для условно-фонового органогенного горизонта значение рН водной вытяжки составило 4.65, а для подзолистого горизонта рН 5.59.

Послепожарное изменение содержания углерода связано с миграцией водорастворимого органического вещества и мелкоразмерных продуктов горения по профилю почвы [6]. Анализ лизиметрических вод за год, прошедший с момента установки лизиметров под верхний органогенный горизонт, показал, что в результате вымывания с верхних горизонтов почвы миграционно-способных частей пирогенно-модифицированных соединений биомассы в лизиметрических водах возросла концентрация общего органического и неорганического углерода, а также азота. За весь летне-осенний период отбора (за четыре месяца с момента пожара) в 2021 г. на условно-фоновом участке не было воды в лизиметрах, что говорит об активном потреблении поступающей воды в почву мохово-лишайниковым покровом. В первые три месяца на участке горельника произошел залповый вынос, как общего, так и органического углерода (табл. 2). Максимальные концентрации общего и органического углерода были выявлены в первые 10 сут после пожара и составили 186.0 и 181.5 мг/дм³ соответственно. Через месяц после пожара концентрация снизилась практически в 3 раза. Уже на четвертый месяц отбора проб было обнаружено, что практически весь общий углерод был вымыт из верхнего горизонта почв

(16.9 мг/дм³). Больше чем за полгода происходило постепенное вымывание образовавшихся пирогенных частиц, при этом, непосредственно за первые 10 сут после пожара выносится около 75% всего органического углерода за исследуемый период. Проведение лизиметрических исследований позволило выявить, что в первые 10 сут после пожара происходит залповое вымывание углерода из сгоревшей подстилки в размере 4 г/м². За последующие два месяца происходит вынос лишь 1.3 г/м². Следует отметить резкое увеличение концентрации общего углерода и азота в июне 2022 г. практически в 3.5 раза по сравнению с данными за зимний период. Это можно объяснить тем, что объем собранных вод за весенне-летний период (за 35 сут) в 1.5 раза меньше, чем объем воды за зимний период (за 196 сут).

Наиболее высокие концентрации ПАУ в лизиметрических водах в течение 10 сут после пожара выявлены для двух- и трехъядерных полиаренов (табл. 3). В дальнейшем происходит вымывание пяти- и шестиядерных ПАУ, что сопоставимо с ранее проведенными исследованиями [31]. Состав лизиметрических вод первых 10 сут после пожара характеризуется высокими концентрациями ПАУ. В них максимальная массовая концентрация ПАУ составляла 527.5 нг/дм³. В образцах за этот период были выявлены высокие концентрации двух- и трехъядерных соединений: фенантрена (215.4 нг/дм³), нафталина (93.8 нг/дм³), флуарен-тена (121.3 нг/дм³) и аценафтена (38.3 нг/дм³). Через три месяца концентрация ПАУ уменьшилась в 11 раз и достигла 47.4 нг/дм³. Через один год и три месяца концентрации ПАУ были ниже предела определения.

Вынос ПАУ с учетом площади лизиметра через 10 сут составил 11.53 мкг/м² (рис. 5). Через 35 сут (т.е. период отбора лизиметрических вод

Таблица 1. Концентрация отдельных ПАУ в почвах условно-фонового и постпирогенного участков, нг/г ($n = 3$, погрешность — ошибка среднего)

ПАУ		I		II		III		IV	
		О	Е	Q _{пыр}	E _{пыр}	Q _{пыр}	E _{пыр}	Q _{пыр}	E _{пыр}
2-ядерные	НАФГ	32.7 ± 8.1	20.0 ± 6.2	1092.5 ± 99.6	28.3 ± 11.8	306.9 ± 45.2	28.0 ± 12.6	338.9 ± 105.0	21.7 ± 9.5
	АЦЕ	—	—	—	—	—	—	—	—
3-ядерные	ФЛУ	3.9 ± 0.7	2.5 ± 0.7	77.2 ± 12.1	2.3 ± 0.8	52.7 ± 8.7	5.6 ± 1.5	49.2 ± 21.8	2.0 ± 0.4
	ФЕН	171.4 ± 71.1	17.0 ± 7.6	326.0 ± 86.7	13.8 ± 3.8	304.1 ± 45.8	28.9 ± 2.8	272.4 ± 158.9	12.0 ± 1.7
4-ядерные	АНТ	4.1 ± 0.9	0.9 ± 0.4	78.4 ± 34.7	1.0 ± 0.3	78.6 ± 33.3	1.5 ± 0.7	45.9 ± 31.0	0.9 ± 0.2
	ФЛА	27.1 ± 7.3	5.0 ± 3.5	87.8 ± 11.3	4.6 ± 1.1	73.1 ± 13.6	5.9 ± 1.8	114.7 ± 11.6	4.0 ± 0.3
ПИР	ПИР	9.5 ± 1.1	2.6 ± 1.5	78.0 ± 29.3	2.5 ± 0.8	75.3 ± 15.3	4.2 ± 1.0	63.0 ± 6.07	2.2 ± 0.4
	БААНТ	2.3 ± 1.0	1.5 ± 1.7	10.5 ± 18.1	1.4 ± 2.5	—	0.6 ± 1.0	18.9 ± 8.1	1.5 ± 1.3
ХРИ	ХРИ	—	—	—	—	—	0.6 ± 1.1	—	—
	БбФЛА	2.4 ± 0.7	2.8 ± 0.9	32.5 ± 14.5	1.1 ± 2.0	15.8 ± 13.4	2.6 ± 1.7	15.4 ± 11.6	1.9 ± 0.4
5-ядерные	БкФЛА	1.1 ± 0.3	0.3 ± 0.2	5.2 ± 2.2	0.4 ± 0.2	6.3 ± 1.2	0.7 ± 0.2	4.5 ± 4.1	0.7 ± 0.4
	БАИР	1.7 ± 0.6	0.7 ± 0.3	29.4 ± 13.8	0.4 ± 0.4	15.7 ± 3.8	0.9 ± 0.4	17.0 ± 5.8	0.7 ± 0.1
6-ядерные	ДБанАНТ	0.3 ± 0.3	0.1 ± 7.4	7.4 ± 5.9	—	2.1 ± 1.2	—	1.5 ± 0.7	—
	БгнiПЕР	3.3 ± 1.1	0.9 ± 0.4	14.7 ± 1.4	0.2 ± 0.4	13.2 ± 1.6	0.7 ± 1.3	14.2 ± 8.5	0.3 ± 0.5

Примечание. НАФГ — нафтилин, АЦЕ — аценафтен, ФЛУ — флуорен, ФЕН — фенантрен, АНТ — антрацен, ФЛА — флуорантен, ПИР — пирен, БААНТ — бенз[а]антрацен, БгнiПЕР — бенз[гнi]перилен, ХРИ — хризен, БкФЛА — бенз[б]флуорантен, БАИР — бенз[а]флуорантен, ДБанАНТ — дипиридан, БгнiПЕР — бенз[гнi]перилен, I — условно-фоновый участок, II — почва горельника через два дня после пожара, III — через год и два месяца после пожара, IV — через два года и три месяца, прочерк — не обнаружено.

Таблица 2. Состав и некоторые химические свойства лизиметрических вод верхнего органогенного горизонта

Дата отбора проб	День после пожара*	TC, мг/дм ³			TOC, мг/дм ³			IC, мг/дм ³			TN, мг/дм ³			рН			α, мкСм/см		
		Г	Ф	Г	Г	Ф	Г	Г	Ф	Г	Г	Ф	Г	Г	Ф	Г	Ф		
04.08.2021	10 (10)	186.0	н	181.5	н	4.5	н	2.5	н	5.8	н	72.6	н						
26.08.2021	35 (25)	67.0	н	64.0	н	3.1	н	2.8	н	5.0	н	48.9	н						
28.09.2021	68 (33)	32.0	н	31.0	н	0.9	н	1.3	н	5.7	н	22.3	н						
04.11.2021	106 (38)	16.9	н	16.2	н	0.7	н	0.8	н	5.9	н	20.9	н						
19.05.2022	302 (196)	11.0	18.1	10.2	17.9	0.5	0.3	1.0	0.5	5.8	5.3	17.7	14.7						
23.06.2022	337 (35)	35.0	48.0	35.0	48.0	0.5	0.6	7.0	8.2	4.9	5.4	19.2	25.1						
28.07.2022	1 год и 10 сут (38)	29.0	н	27.0	н	2.1	н	5.0	н	5.5	н	25.5	н						
25.08.2022	1 год и 28 сут (29)	26.0	53.0	25.0	52.0	1.7	0.5	0.6	0.6	4.8	4.7	17.7	28.9						
29.09.2022	1 год и 74 сут (36)	14.3	93.0	13.7	90.0	0.6	2.9	0.9	0.7	5.6	4.6	15.0	33.0						
19.10.2022	1 год и 93 сут (21)	54.0	112.0	21.0	111.0	34.0	0.9	0.6	0.6	4.6	4.5	33.8	34.7						

Примечание. Total Carbon (TC) – общий углерод, Total Organic Carbon (TOC) – общий органический углерод, Inorganic Carbon (IC) – неорганический углерод, Total Nitro (TN) – общий азот, pH – водородный показатель, α – удельная электропроводность, Г – горельник, Ф – фон.

* В скобках указано число дней аккумулирования лизиметрических вод, н – воды не было.

Таблица 3. Концентрации отдельных ПАУ в лизиметрических водах постприогенного (I) и условно-фонового (II) участков, нг/дм³

Период отбора*	2-ядерные						3-ядерные			4-ядерные			5-ядерные			6-ядерные		
	НАФГ	АЦЕ	ФЛУ	ФЕН	АНТ	ФЛА	ПИР	БААНТ	ХРИ	БбФЛА	БкФЛА	БАПИР	ДБанАНТ	БгнПЕР	ИТИР			
I																		
10 сут (10)	93.8	38.3	121.3	215.4	19.3	12.3	19.0	1.8	4.1	—	0.8	1.3	—	—	—	—	—	—
35 сут (25)	54.0	45.7	38.4	71.0	5.8	14.6	23.4	46.7	6.3	56.9	19.9	23.4	4.9	5.8	—	—	—	—
68 сут (33)	17.1	3.4	7.5	0.2	6.1	5.9	1.2	0.8	2.3	0.5	0.6	—	—	—	—	—	—	—
106 сут (38)	25.3	32.5	24.1	26.8	1.3	3.8	8.6	0.7	1.4	0.5	0.4	—	—	—	—	—	—	—
302 сут (196)	13.3	23.7	27.1	18.6	2.1	5.1	7.4	0.2	0.2	—	0.2	—	—	—	—	—	—	—
337 сут (35)	3.5	14.6	10.0	10.7	2.6	4.5	2.9	6.0	3.0	—	—	1.0	6.0	6.0	—	—	—	—
1 год и 10 сут (38)	8.0	22.5	21.5	24.5	1.5	3.3	2.3	6.0	3.0	2.4	1.6	1.2	6.0	6.0	20.0	20.0	20.0	20.0
1 год и 28 сут (29)	6.7	12.6	14.9	23.5	1.3	4.2	2.2	—	0.7	—	0.1	0.1	—	—	—	—	—	—
1 год и 74 сут (36)	2.8	13.6	12.0	11.0	1.4	1.5	2.3	1.2	0.1	0.4	0.2	0.2	6.0	0.4	20.0	20.0	20.0	20.0
1 год и 93 сут (21)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
II																		
10 сут (10)	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
35 сут (25)	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
68 сут (33)	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
106 сут (38)	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
302 сут (196)	20.0	27.6	27.6	18.4	2.0	20.0	20.0	6.0	3.0	6.0	1.0	1.0	6.0	6.0	20.0	20.0	20.0	20.0
337 сут (35)	11.2	10.4	6.9	16.6	1.5	5.5	4.9	6.0	3.0	2.4	0.9	1.0	6.0	6.0	—	—	—	—
1 год и 10 сут (38)	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
1 год и 28 сут (29)	19.3	1.2	2.5	15.3	1.1	4.6	3.2	—	0.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1 год и 74 сут (36)	2.5	7.3	7.3	16.2	1.2	2.0	1.9	1.7	0.3	0.5	0.2	0.2	6.0	0.4	20.0	20.0	20.0	20.0
1 год и 93 сут (21)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. НАФГ – нафтилин, АЦЕ – ацнафтен, ФЛУ – флуорен, ФЕН – фенантрен, АНТ – антрацен, ФЛА – флуорантен, ПИР – пирен, БААНТ – бенз[а]антрацен, ХРИ – хризен, БбФЛА – бенз[б]флуорантен, БкФЛА – бенз[к]флуорантен, БАПИР – бенз[ал]пирен, ДБанАНТ – дibenз[а,г]антрацен, БгнПЕР – бенз[гн]пиролен, ИТИР – инден[1,2,3-сд]пирен.

* В скобках указано количество суток накопления ПАУ в лизиметрических водах между отборами проб, н – воды не было, прочерк – не обнаружено.

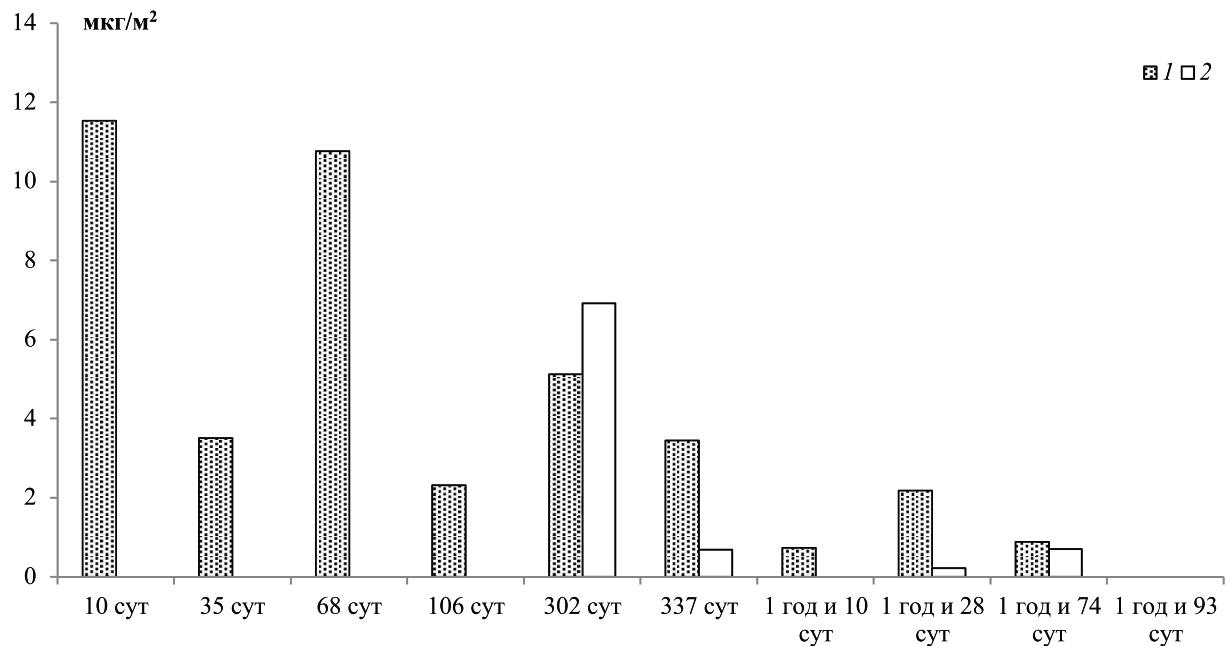


Рис. 5. Вынос ПАУ из верхнего органогенного горизонта почвы горельника (1) и условно-фонового участка (2).

составил 15 суток) после пожара вынос соединений составил 3.31 мкг/м². С августа по сентябрь 2021 г. (за 33 сут) вынос ПАУ составил 10.76 мкг/м², что в три раза больше, чем было обнаружено за прошлый месяц. В период с сентября по октябрь 2021 года (т.е. в течение 38 сут), концентрация значительно снизилась до 2.31 мкг/м². В мае, в период снеготаяния (т.е. за 196 сут), концентрация выноса составила 5.12 мкг/м², что в 2 раза больше, чем результаты, полученные в ноябре 2021 г. и меньше, чем показатели условно-фонового участка (6.91 мкг/м²). Подобный скачок можно объяснить активным снеготаянием за длительный период между отборами (196 сут), когда вместе с атмосферным переносом соединений в почву поступает большое количество воды [12]. С мая по июнь 2022 г. (т.е. за 35 сут), вынос ПАУ составил 3.45 мкг/м², что в три раза больше по сравнению с условно-фоновым участком (0.69 мкг/м²). С июня по август концентрация выноса с пирогенного участка уменьшилась еще в 3 раза и составила 0.73 мкг/м². Для условно-фонового участка за этот период ПАУ не были обнаружены. С июля по август (т.е. за 29 сут) вынос ПАУ составил 2.19 мкг/м², что в два раза больше по сравнению с данными условно-фонового участка за этот же период (0.21 мкг/м²). С августа по сентябрь 2022 года (за 35 сут) концентрация выноса составила 0.87 мкг/м², что говорит о том, что значительная часть пирогенно-модифицированных соединений была вымыта из почвы в первые месяцы после воздействия. Таким образом, выявлено, что уже через четыре месяца после пожара была

вымыта большая часть миграционно-способных ПАУ из сгоревшей подстилки. После этого, на протяжении года, суммарная массовая концентрация ПАУ в лизиметрических водах оставалась практически неизменной и не отличалась от содержания в лизиметрических водах условно-фонового участка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований обнаружено, что пожары могут приводить к увеличению общего содержания углерода и азота в верхнем органогенном горизонте. Через год после пожара их содержание в почвах горельника начинает уменьшаться, а значения приближаются к показателям условно-фонового участка. Беглые низовые пожары приводят к увеличению суммарного содержания РуС в органогенных горизонтах. Установлено распределение РуС между органическим слоем и верхним минеральным горизонтом для иллювиально-железистых подзолов. Концентрация ПАУ в верхнем органогенном горизонте достигает наибольшего значения непосредственно после пожара. Выявлен залповий вынос пирогенных частиц, органического и неорганического водорастворимого углерода из пирогенного горизонта в первые сутки после пожара. Через три месяца концентрация этих соединений в лизиметрических водах резко сокращается. Уже на второй год после пожара состав лизиметрических вод приближается к условно-фоновым значениям.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках Госбюджетной темы “Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и бореальных экосистем европейского Северо-Востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов” (№ 122040600023-8).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / Под ред. Н.В. Лукиной. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2018. 232 с.
2. Бескоровайная И.Н., Иванова Г.А., Тарасов П.А., Сорокин Н.Д., Богородская А.В., Иванов В.А., Конард С.Т., Макаре Д.Дж., Пирогенная трансформация почв сосняков средней тайги Красноярского края // Сибирский экологический журнал. Т. 1. 2005. С. 143–152.
3. Брянин С.В. Миграция и аккумуляция зольных элементов в лесных ландшафтах под влиянием периодических пожаров на Амуро-Зейской равнине // Фундаментальные исследования. 2014. № 8-4. С. 859–863.
4. Брянин С.В., Данилов А.В., Суслопарова Е.С., Иванов А.В. Пулы пирогенного углерода лесных почв Верхнего Приамурья // Лесоведение. 2022. № 3. С. 285–296.
<https://doi.org/10.31857/S0024114822030044>
5. Ведрова Э.Ф., Евдокименко М.Д., Безкоровайная И.Н., Мухортова Л.В., Чередникова Ю.С. Запасы углерода в органическом веществе послепожарных сосняков Юго-Западного Прибайкалья // Лесоведение. 2012. № 1. С. 3–13.
6. Ведрова Э.Ф., Корсунов В.М. Миграция водорастворимых продуктов в почвах сосновых лесов // Почвы сосновых лесов Сибири. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР, 1986. С. 24–33.
7. Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенок Б.М., Полициклические ароматические углеводороды в подзолистых и торфянисто-подзолисто-глеевых почвах фоновых ландшафтов // Почвоведение. 2007. № 3. С. 282–291.
8. Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенок Б.М., Яковлева Е.В., Закономерности формирования полициклических ароматических углеводородов в почвах северной и средней тайги // Почвоведение. 2008. № 9. С. 66–74.
9. Дымов А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. М.: ГЕОС, 2020. 336 с.
<https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828>
10. Максимова Е.Ю., Цибарт А.С., Абакумов Е.В. Полициклические ароматические углеводороды в почвах, пройденных верховым и низовым пожаром // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 3. С. 63–68.
11. Полевой определитель почв России. М., 2008. 182 с.
12. Робакидзе Е.А., Торлопова Н.В., Бобкова К.С. Химический состав жидких атмосферных осадков в старовозрастных ельниках средней тайги // Геохимия. 2013. № 1. С. 72.
<https://doi.org/10.7868/S001675251211009X>
13. Тарасов П.А., Иванов В.А., Иванова Г.А., Безкоровайная И.Н., Постпирогенная динамика агротехнических показателей песчаных подзолов в сосняках Южной тайги // Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. XLI. № 2. С. 162–175.
<https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-2-162-175>
14. Baldock J.A., Preston C.M. Chemistry of carbon decomposition processes in forests as revealed by solid-state carbon-13 nuclear magnetic resonance // Carbon Forms and Functions in Forest Soils. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, 1995. P. 89–117.
15. Bento-Goncalves A., Vieira A., Ubeda X., Martin D. Fire and soils: Key concepts and recent advances // Geoderma. 2012. V. 191. P. 3–13.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.004>
16. Brodowski S., Rodionov A., Haumaier L., Glaser B. and Amelung W. Revised black carbon assessment using benzene polycarboxylic acids // Organic Geochemistry 2005. V. 36. P. 1299–1310.
<https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2005.03.011>
17. Certini G. Fire as a soil-forming factor // Ambio. 2014. V. 43. P. 191–195.
<https://doi.org/10.1007/s13280-013-0418-2>
18. Chebykina E.Y., Abakumov E.V., Kimeklis A.K., Gladkov G.V., Andronov E.E., Dymov A.A. Wildfires' Effect on Soil Properties and Bacterial Biodiversity of Post-pyrogenic Histic Podzols (Middle Taiga, Komi Republic) // Forests. 2024. 15. 145.
<https://doi.org/10.3390/f15010145>
19. Czimczik C.I., Schmidt M.W.I., Schulze E.D. Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests // Eur. J. Soil Sci. 2005. V. 56. P. 417–428.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00665.x>

20. Dymov A.A., Abakumov E.V., Bezkorovaynaya I.N., Prokushkin A.S., Kuzyakov Y.V., Milanovsky Y.E. Impact of forest fire on soil properties (review) // Theor. Appl. Ecol. 2018. V. 4. P. 13–23.
<https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-4-013-023>
21. Dymov A.A., Gorbach N.M., Goncharova N.N., Gabov D.N., Kutyavin I.N., Startsev V.V., Karpenko L.V., Mazur A.S., Grodnitskaya I.D. Holocene and recent fires influence on soil organic matter, microbiological and physico-chemical properties of peats in the European North-East of Russia // Catena. 2022. V. 217. P. 106449.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106449>
22. Dymov A.A., Startsev V.V., Yakovleva E.V., Dubrovskiy Y.A., Milanovsky E.Y., Severgina D.A., Panov A.V., Prokushkin A.S. Fire-induced alterations of soil properties in Albic Podzols developed under pine forests (middle taiga, Krasnoyarsky Kray) // Fire. 2023. V. 6. P. 67.
<https://doi.org/10.3390/fire6020067>
23. Egli M., Mastrolonardo G., Seiler R., Raimondi S., Favilli F., Crimi V., Krebs R., Cherubini P., Certini G. Charcoal and stable soil organic matter as indicators of fire frequency, climate and past vegetation in volcanic soils of Mt. Etna, Sicily // Catena. 2012. V. 88. P. 14–26.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.08.006>
24. Forbes M.S., Raison R.J., Skjemstad J.O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems // Sci. Total Environ. 2006. V. 370. P. 190–206.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.06.007>
25. Glaser B., Haumaier L., Guggenberger G. and Zech W. Black carbon in soils: The use of benzenecarboxylic acids as specific markers // Organic Geochemistry. 1998. V. 29. P. 811– 819.
26. Ponomarev E.I., Zabrodin A.N., Shvetsov E.G., Ponomareva T.V. Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia // Fire. 2023. V. 6. P. 246.
<https://doi.org/10.3390/fire6070246>
27. Preston C.M., Schmidt M.W.I. Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions // Biogeosciences 2006. V. 3. P. 397–420.
28. Reisser M., Purves R.S., Schmidt M.W.I., Abiven S. Pyrogenic carbon in soils: a literature-based inventory and a global estimation of its content in soil organic carbon and stocks // Frontiers of Earth Science. 2016. V. 4. P. 1–14.
<https://doi.org/10.3389/feart.2016.00080>
29. Startsev V., Gorbach N., Mazur A., Prokushkin A., Karpenko L., Dymov A. Macrocharcoal Signals in Histosols Reveal Wildfire History of Vast Western Siberian Forest-Peatland Complexes // Plants. 2022. V. 11. P. 3478.
<https://doi.org/10.3390/plants11243478>
30. Sushkova S.N., Minkina T. M., Dudnikova T. S. et al. Reduced plant uptake of PAHs from soil amended with sunflower husk bio // Eurasian J. Soil Sci. 2021. V. 10. P. 269–277.
<https://doi.org/10.18393/ejss.935397>
31. Vergnoux A., Malleret L., Asia L., Doumenq P., Theraulaz F. Impact of forest fires on PAH level and distribution in soils // Environmental Research. 2011. V. 111. P. 193–198.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2010.01.008>
32. Wiedemeier D.B., Brodowski S., Wiesenberg G.L.B. Pyrogenic molecular markers: Linking PAH with BPCA analysis // Chemosphere. 2015. V. 119. P. 432–437.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.046>

Changes in the Composition of Upper Soil Horizons and Lysimetric Waters in the First Years after a Surface Fire in a Lichen Pine Forest in the Komi Republic

I. V. Payusova¹, * D. N. Gabov¹, I. V. Gruzdev¹, and A. A. Dymov¹

¹*Institute of Biology, Federal Research Center of the Komi Scientific Center,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar, 167982 Russia*

**e-mail: pajusova@ib.komisc.ru*

The change in the chemical composition of the upper soil horizons (*Albic Podzol*) of lichen pine forests affected by a runaway ground fire in the middle taiga of the Komi Republic was studied. It was revealed that two days after the fire, the total carbon content in the pyrogenic horizon (Q_{pyr}) increases by 1.3 times compared to the litter of the conditionally background area. During further post-pyrogeic succession, the total carbon content in the upper pyrogenic horizon decreases. Immediately after the fire, an increase in the content of benzenepolycarboxylic acids in the pyrogenic horizon was revealed

by 14.5 times compared with the litter of the conditionally background area. The concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons is 7 times higher than their content in the litter of the original forest. It has been shown that in the first 10 days after a fire, a “volley” removal of carbon—4 g/m² and PAHs—11.5 µg/m²—occurs from under the pyrogenic horizon. Increased removal compared to the conventionally background area can be observed in the first three months. In the course of further evolution, the chemical composition of lysimetric waters approaches conditionally background values, and after two years the concentration of both carbon and PAHs is close to conditionally background values.

Keywords: boreal forests, pyrogenic carbon of the pyrogenic horizon, polycyclic aromatic hydrocarbons, carbon of lysimetric waters, benzenopolycarboxylic acids, lysimeters