

УДК 631.41

## СОСТАВ И ГЕНЕЗИС ПОЛИАРЕНОВ В ПОЧВАХ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ГАРЕЙ БАЙКАЛЬСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

© 2024 г. Т. С. Кошовский<sup>a, \*</sup>, А. Н. Геннадиев<sup>a</sup>, Н. С. Гамова<sup>a, b</sup><sup>a</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1 Москва, 119991 Россия<sup>b</sup>Байкальский государственный природный биосферный заповедник,  
ул. Красногвардейская, 34, п. Танхой, 671220 Россия

\*e-mail: tkzv@ya.ru

Поступила в редакцию 21.11.2023 г.

После доработки 10.02.2024 г.

Принята к публикации 12.02.2024 г.

Приведены данные по содержанию одиннадцати полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в почвах под гарями различного возраста, однократных и повторных, в таежных ландшафтах среднегорий хребта Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье, Бурятия). Выявлены морфологические признаки почв, унаследованные от пожара: слои углей (руг), золы (Сруг), обугленная лесная подстилка (Оруг) и пирогенный гумусовый горизонт (Аруг). Охарактеризована послепожарная вариабельность почвенного покрова, формирующаяся из-за наличия внутри гари участков с шестью степенями прогорания опадо-подстилочного материала. Показано уменьшение содержания ПАУ при увеличении интенсивности пожара, а также в случае повторного прохождения огня по существующей гари. Фоновые почвы лесов, не нарушенных пожаром, имеют большее содержание ПАУ в сравнении с гарями 42-летнего возраста и участками интенсивного горения на гари однолетнего возраста. Путем факторного анализа выделены четыре группы ПАУ, различающиеся по происхождению: полиарены пирогенного автохтонного происхождения, формирующиеся *in situ*, – нафталин, тетрафен, пирен, хризен, антрацен, нафталин, в меньшей степени бенз(а)пирен и бенз(ghi)перилен; группа полиаренов пирогенного аллохтонного происхождения, накапливающихся в почвах из-за атмосферного переноса пепла, – бенз(а)пирен и бенз(ghi)перилен; группа полиаренов биохимического происхождения – флуорен и дифенил; полиарены – биохимического и петрогенного происхождения, накапливающиеся в глубине почвы, – фенантрен.

*Ключевые слова:* лесные пожары, повторные гари, полициклические ароматические углеводороды, пирогенные сукцессии, дерново-подбуры, Albic Skeletic Podzols

DOI: 10.31857/S0032180X24070049, EDN: XVGQWC

### ВВЕДЕНИЕ

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ, полиарены) относятся к числу наиболее опасных поллютантов в окружающей среде, даже в нанокolicествах некоторые из них могут оказывать на живые организмы канцерогенное, мутагенное и другое токсичное воздействие [41, 42]. ПАУ представляют собой сложные органические соединения, основной структурной единицей которых является ароматическое бензольное кольцо. По числу колец в молекулах ПАУ принято подразделять на низкомолекулярные (2–3-кольчатые нафталин, фенантрен, антрацен, флуорен и др.) и высокомолекулярные (4–6-кольчатые бенз(а)пирен, тетрафен, хризен, перилен, коронен, флуорантен и др.).

Полиарены обладают определенным диагностическим потенциалом по выявлению ряда процессов в почвах, в частности, связанных с воздействием огня [27, 36].

Общепризнанной является полигенетичность ПАУ, находящихся в составе почв [4, 18, 22]. По происхождению выделяют следующие типы полиаренов в окружающей среде: биогеохимические, петрогенные, т.е. унаследованные от почвообразующих пород, пирогенные – как природные, так и обусловленные деятельностью человека, а также космогенные и вулканогенные [16, 26, 41]. Полиарены антропогенного происхождения в различных средах изучены сравнительно широко и основательно [22, 24, 29]; природные ПАУ также

становятся объектами исследования, но значительно реже [2, 42]. Для изучения последних обычно используются заповедные участки, находящиеся на значительном удалении от поселений и индустриальных объектов. На подобных территориях одним из крупных естественных источников ПАУ являются лесные пожары естественного происхождения, возникшие от молний при грозах.

Цель работы – выявление факторов и процессов накопления, трансформации и миграции ПАУ в почвах, испытавших воздействие природного лесного пожара, для чего проводилось сопоставление склоновых почвенных сопряжений на разновозрастных гарях Байкальского заповедника.

### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в Кабанском районе Республики Бурятия в пределах Байкальского государственного природного биосферного заповедника и его буферной охранной зоны. Точки описаний находятся в межгорной котловине северного макросклона хребта Хамар-Дабан в верховьях бассейна р. Левая Мишиха. Образцы почв отбирали в августе 2016 г.

Исследовали три катены (по 3–4 точки описаний в каждой), расположенные на холмах в котловине верховий р. Левая Мишиха, и четыре отдельные точки на террасе реки (рис. 1). Катены находятся под гарями различного возраста: однолетнего, 42-летнего, и катена, дважды пройденная пожаром: 42 года назад и один год назад (табл. 1). Точки на речной террасе испытали воздействие пожара только в 2015 г., но с различной интенсивностью. Фоновая позиция (точка Р–0), не затронутая пожаром как минимум в течение последних 100 лет, находится на речной террасе и является ландшафтным аналогом точек Р–1, Р–2 и Р–3 (рис. 1, табл. 1).

Точки обследования в пределах катен располагали на вершине холма (автономная позиция), на верхней и средней частях склона и у подножия. В каждой точке опробования почвы изучали в трех повторностях. Во всех почвенных разрезах пробы почв отбирали по глубинам 0–5, 5–10, 10–20 см и в случаях достаточного количества мелкозема с глубины 20–30 см.

Литологическая основа почв представлена дериватами гранодиаритов и гранитов [15]. Рельеф котловины среднегорный, днище котловины находится на высоте 1200 м над ур. м., окружающие котловину склоны возвышаются до 1400–1800 м. По окраинам котловины расположены отдельные каменные холмы с относительной высотой от 30 до 80 м, с выположенными вершинами и покатыми склонами. Были описаны почвы на склонах трех холмов: К-1974 – катена холма на участке гари 1974 г. (склон юго-восточной экспозиции, относительная высота 70 м); К-2015 – катена холма на гари 2015 г. (склон южной экспозиции, относительная высота 50 м); К-74+15 – катена холма на двукратной гари, 1974 и 2015 гг. (склон юго-восточной экспозиции, относительная высота 60 м). На террасе р. Левая Мишиха описано три позиции: фоновый участок, участок с низовым пожаром 2015 г., участок с верховым пожаром (в сопровождении низового) 2015 г. Фоновый участок находится на расстоянии 200 м от гари (рис. 1).

Климат данной территории, в отличие от смежных регионов юга Восточной Сибири, относится к умеренно-, а не резкоконтинентальному, что обусловлено смягчающим воздействием озера Байкал. Среднегодовые температуры в среднегорье составляют  $-3.4^{\circ}\text{C}$ , средние температуры июля и января  $+12.7$  и  $-17.9^{\circ}\text{C}$  соответственно. Сумма осадков достигает 1100–1200 мм при летнем (дождевом) максимуме в июле–августе. Мощность снежного покрова достигает 1.5–2 м [9, 12].

**Таблица 1.** Объем собранного полевого материала

Тип объекта	Индекс участка	Участки исследования, год прохождения пожара	Число точек	Число разрезов	Число образцов
Катены	К-1974	Катена на холме, пожар 1974 г.	4	12	15
	К-2015	Катена на холме, пожар 2015 г.	3	9	12
	К-74+15	Катена на холме, пожар 1974 и 2015 гг.	4	12	37
Точки описаний и опробования	Р–1	Пожар 2015 г., низовой	1	3	10
	Р–2	Пожар 2015 г.: низовой и верховой, средней интенсивности	1	4	16
	Р–3	Пожар 2015 г.: низовой и верховой, высокой интенсивности	1	3	12
	Р–0	Фоновая точка, более 100 лет без пожара	1	2	8

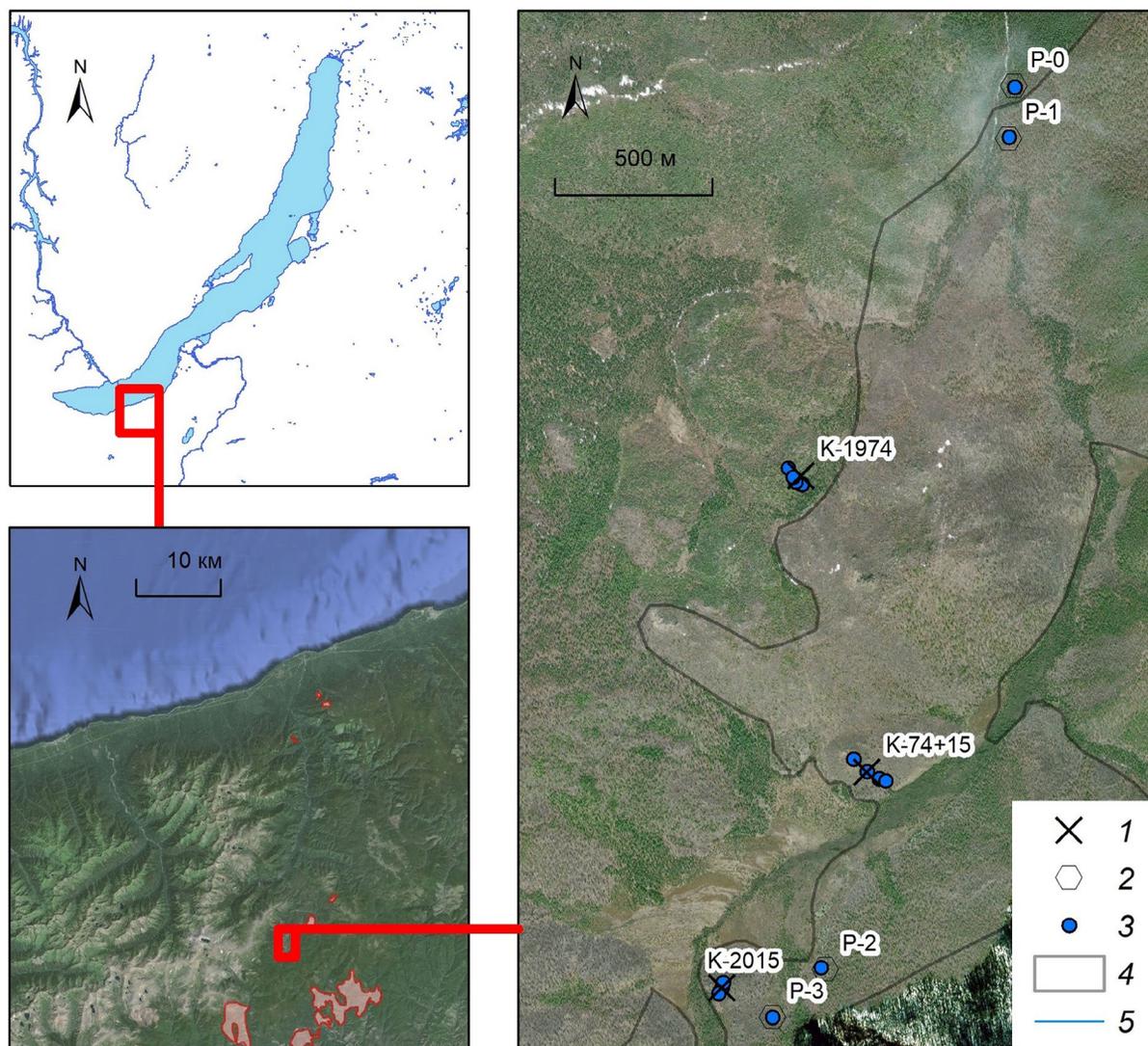


Рис. 1. Карта фактического материала. 1 – месторасположение почвенных катен; 2 – точки на речной террасе, 3 – почвенные разрезы, 4 – территория гари 2015 г., 5 – ручьи и реки.

Наряду с типичными влажными годами здесь бывают более засушливые, с меньшим количеством осадков, в которые пожарная опасность возрастает в силу подсыхания опада и лесной подстилки [8]. Также пожарную опасность усиливает известная в байкальской котловине инверсия, при которой в летнее время температуры в среднегорье оказываются выше, чем на побережье, а влажность воздуха ниже [15]. Сочетание предшествующей относительно менее снежной зимы, более сухого начала лета и проявления инверсии может вызвать развитие лесного пожара при возгорании во время сухой грозы, типичной для гор Южной Сибири [7, 8]. Оба пожара, 1974 и 2015 гг., имеют природное (грозовое) происхождение.

Растительность в днище котловины верховий Левой Мишихи представлена болотами и ерника-

ми, которые сохраняют достаточную влажность в любых условиях и пожарам не подвержены. Пологие окраины заняты смешанно-хвойными лесами (с участием сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., кедра сибирского *Pinus sibirica* DuTour, ели сибирской *Picea obovata* Ledeb., реже примесью лиственницы сибирской *Larix sibirica* Ledeb.) кустарничково-беломошной группы. Леса на участках каменистых холмов представлены в основном сосняками и кедрачами мелкоотравно-зеленомошной, кустарничково-беломошной, бадановой и каменистой групп [13]. В этих типах леса и развивались исследуемые нами пожары. Участок гари 1974 г., не нарушенный повторным пожаром в 2015 г., представляет собой смешанно-хвойные с березой пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) молодняки, в основном кустарничковой, бадановой и каменистой

групп. Гарь 2015 г. на участках однократного нарушения, как и фрагменты гарей с двукратным нарушением (1974 и 2015 гг.), на момент обследования в 2016 г. находилась на самых ранних стадиях послепожарного возобновления. Часть из них, наиболее сильно нарушенные пожаром, представляли собой “черную гарь” – полностью выгоревшую растительность [3], но уже с плодовыми телами грибов. В менее нарушенных участках отмечены элементы допожарных растительных сообществ разной степени сохранности.

Почвенный покров представлен альфегумусовыми почвами, преимущественно дерново-подбурами (Entic Podzols (Humic)), реже – серогумусовыми ожелезненными почвами (Entic Umbric Podzols) (табл. S1). На вершинных поверхностях холмов сформированы литоземы грубогумусовые ожелезненные и подбуры оподзоленные с мощным подстильно-торфяным горизонтом (Albic Skeletic Podzols (Loamic)). На склоне в верхней части сформированы дерново-подбуры легкосуглинистые, реже литоземы серогумусовые ожелезненные, как правило, без признаков оподзоленности и с более выраженным серогумусовым горизонтом (Entic Podzols (Loamic, Someriumbric)). На склонах в средней части формируются оподзоленные дерново-подбуры (Albic Podzols (Loamic, Someriumbric)). Нижние части склонов, вогнутые в плане, характеризуются накоплением принесенных минеральных частиц почвы, на них формируются серогумусовые ожелезненные почвы (Entic Umbric Podzols (Loamic), Someric Umbrisols (Colluvic, Loamic, Protospodic)) или дерново-подбуры оподзоленные гумусово-стратифицированные (Albic Umbric Podzols (Colluvic, Loamic)). Гранулометрический состав почв, как правило, легкосуглинистый. Каменистость в вершинных позициях очень высокая, колеблется в пределах 40–65%, в верхних частях склонов – 30–40%, в средних частях – 10–25%, у подножия – 8–10%.

Почвы на речной террасе представлены также альфегумусовыми разностями (табл. S2): преобладают дерново-подбуры грубогумусированные оподзоленные пирогенные (Albic Podzols (Someriumbric, Loamic)), периодически сменяющиеся подбурами оподзоленными (Albic Podzols (Humic, Loamic)), торфяно-подбурами (Entic Folic Podzols (Loamic)) и реже подзолами грубогумусированными пирогенными (Albic Podzols (Loamic)). В фоновых почвах сформированы подстильно-торфяной горизонт (средняя мощность 12.5 см, разброс от 10 до 17 см), грубогумусированный подгоризонт (нижняя граница от 10 до 21 см, среднее 15 см), подзолистый потечно-гумусовый горизонт (в среднем до 25 см, фрагментарен), альфегумусовый горизонт (до 43 см).

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лабораторная обработка данных включала определение концентрации органического углерода методом И.В. Тюрина (в модификации Б.А. Никитина, Д.С. Орлова и Н.М. Гриндель), использовали двухлучевой спектрофотометр (Specord M40). Определение содержания индивидуальных ПАУ проводили методами спектроскопии Шпольского [1]. Метод основан на регистрации спектров флуоресценции, фосфоресценции и возбуждения люминесценции индивидуальных молекул полиаренов, растворенных в *n*-гексане. Измерения проходят при температуре образца –196°C. В этих условиях спектры отдельных молекул, включая изомерные, индивидуальны и хорошо различимы. При соблюдении стандартных условий кристаллизации раствора спектры воспроизводимы. Структура спектра соединения в однокомпонентном растворе и сложном растворе в присутствии других веществ идентична. Расчет концентраций полиаренов в растворе проводился по интенсивности характеристических линий спектров полиаренов с использованием сертифицированных стандартов.

Анализ полиаренов проводили на спектрофлуориметрическом комплексе, созданном на базе прибора Флюорат Панорама (Люмэкс, Санкт Петербург), дополненного монохроматором ЛМ-3 и криогенной приставкой КРИО-1. Метод включает этапы: 1) экстрагирование *n*-гексаном при комнатной температуре, 2) замораживание гексанового экстракта в жидком азоте (температура –196°C), 3) возбуждение люминесценции раствора и регистрация спектров люминесценции индивидуальных ПАУ и групп гомологов, 4) идентификация и расчет уровней концентрации индивидуальных соединений.

В данной работе изучали концентрации одиннадцати индивидуальных соединений ПАУ: с двумя кольцами в молекуле – дифенил и нафталин с гомологами; соединения с тремя кольцами – флуорен, фенантрен, антрацен; соединения с четырьмя кольцами – хризен, пирен, тетрафен; с пятью кольцами – перилен, бенз(а)пирен; с шестью кольцами – бенз(ghi)перилен. Содержание ПАУ определялось в образце в трехкратной повторности. Всего было проведено 2926 индивидуальных измерений. Статистическая обработка включала методы описательной статистики, кластерный и факторный анализы в пакете Statistica 10.0.

## МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОСЛЕПОЖАРНЫХ ПОЧВ ИЗУЧЕННЫХ КАТЕН

Воздействие пожаров на почвы приводит к изменению их свойств, в частности – к трансформации материала почвенных горизонтов за счет повышения температур в момент пожара, изменению

строения почвенного профиля за счет выгорания органического материала, появлению новых включений углей и золы, модификации свойств, обусловленных пирогенной сукцессией растительности, усилению эрозионных процессов [5, 19, 20, 25]. Выделены следующие сформированные или модифицированные в результате пожара почвенные горизонты. Подгоризонт слоя углей, опавших на поверхность почвы и оставшихся там, обозначен индексом руг. Слой золы обозначается индексом Сруг [37], на исследуемом участке встречается очень редко. Обугленная часть подстилки диагностируется как пирогенный подстилочно-торфяной подгоризонт Оруг, который часто имеет тонко-слоеватую структуру. При обугливания верхней части органоминеральных серо- или грубо-гумусового горизонтов формируется пирогенный гумусовый горизонт Аруг, отличающийся более темным оттенком и порошистой структурой, а также повышенной гидрофобностью.

#### *Послепожарная микровариабельность почвенного покрова*

Важной особенностью воздействия пожара на почвенный покров является неоднородность его последствий на микромасштабном уровне (порядка нескольких метров) [5]. На изученной территории на гаях в пределах одного ключевого участка с единым типом пожара (верховой, низовой или комбинированный) поверхность почвы сильно дифференцируется по степени выгорания, что вызывает неоднородность распределения многих химических, физических, физико-химических и иных свойств. В изученных подбурках и подзолах было выделено 6 степеней пирогенного изменения поверхностных горизонтов:

Степень 1. Полное выгорание органогенных почвенных горизонтов (опада и почвенной подстилки) с последующим смывом продуктов горения и обугленных частей почвы;

Степень 2. Полное выгорание опада и почвенной подстилки, но с сохранением на поверхности почвы слоя углей руг и обугленного органо-минерального серогумусового горизонта Аруг;

Степень 3. Частичное сгорание подстилки и ее полное обугливание, выгорание опада: горизонты Оруг, на поверхности может выделяться слой углей руг. Верхняя часть серогумусового горизонта также может быть преобразована в Аруг;

Степень 4. Частичное обугливание лесной подстилки (Оруг) с сохранением необугленной допочвенной части О. На поверхности возможен слой углей руг;

Степень 5. Почвенная подстилка О полностью сохранилась, сгорели надподстилочные органогенные образования (опад, отпад, очес); на

поверхности не обугленной подстилки может сохраняться тонкий слой углей руг;

Степень 6. Почвенная подстилка О и напочвенные органогенные образования (мох, очес, опад) не затронуты огнем.

В зависимости от типа поверхности почвы, ее предпожарного состояния (влажности, плотности) и силы пожара, на участке гарей формируются разные типы послепожарных локаций и их различное соотношение [34].

#### *Последствия пожара на ключевых участках*

На участке гари 2015 г. под холмом (К-2015) влияние пожара заметно на всей поверхности почвы, однако выгорание подстилки неоднородно: степень выгорания 1–2 отмечена на 50% площади поверхности, степень 3–4 – на 40% площади, степень 5 – на 10% площади. За счет выгорания подстилочно-торфяных аккумуляций становятся хорошо заметными крупные корни деревьев, которые на момент обследования в 2016 г. нависали над современной поверхностью почвы на 2–4 см, а местами до 20–30 см.

На участке гари 1974 г. (К-1974) пирогенные горизонты встречены преимущественно в 80% почв, представлены они были гумусовыми аккумуляциями с большим количеством углей. Горизонты золы не были обнаружены.

На участке повторной гари 1974 и 2015 гг. воздействие пожара было весьма значительным, горению в 2015 г. подвергались сухой (горельник) и стволы деревьев, выпавших после гари 1974 г. Степень выгорания 1 встречена на 20% площади, 2 – на 30%, остальное – 3–4 степени. В почвах выявлены пирогенные горизонты, они представлены гумусовыми аккумуляциями с высокими содержаниями углистых образований.

Исследованные участки на террасе р. Левая Мишиха имеют следующие пирогенные характеристики: а) фоновая площадка (точка Р-0), не испытывавшая пожарное воздействие в течение как минимум 100 лет, что подтверждается наличием темнохвойного леса, погибающего при пожаре; б) участок низового пожара (точка Р-1), где преобладают четвертая и пятая степени выгорания; в) участок комбинированного верхового и низового пожара средней интенсивности (точка Р-2) с преобладанием третьей и четвертой степеней выгорания; г) участок комбинированного верхового и низового пожара высокой интенсивности (точка Р-3) с преобладанием второй и третьей степеней выгорания.

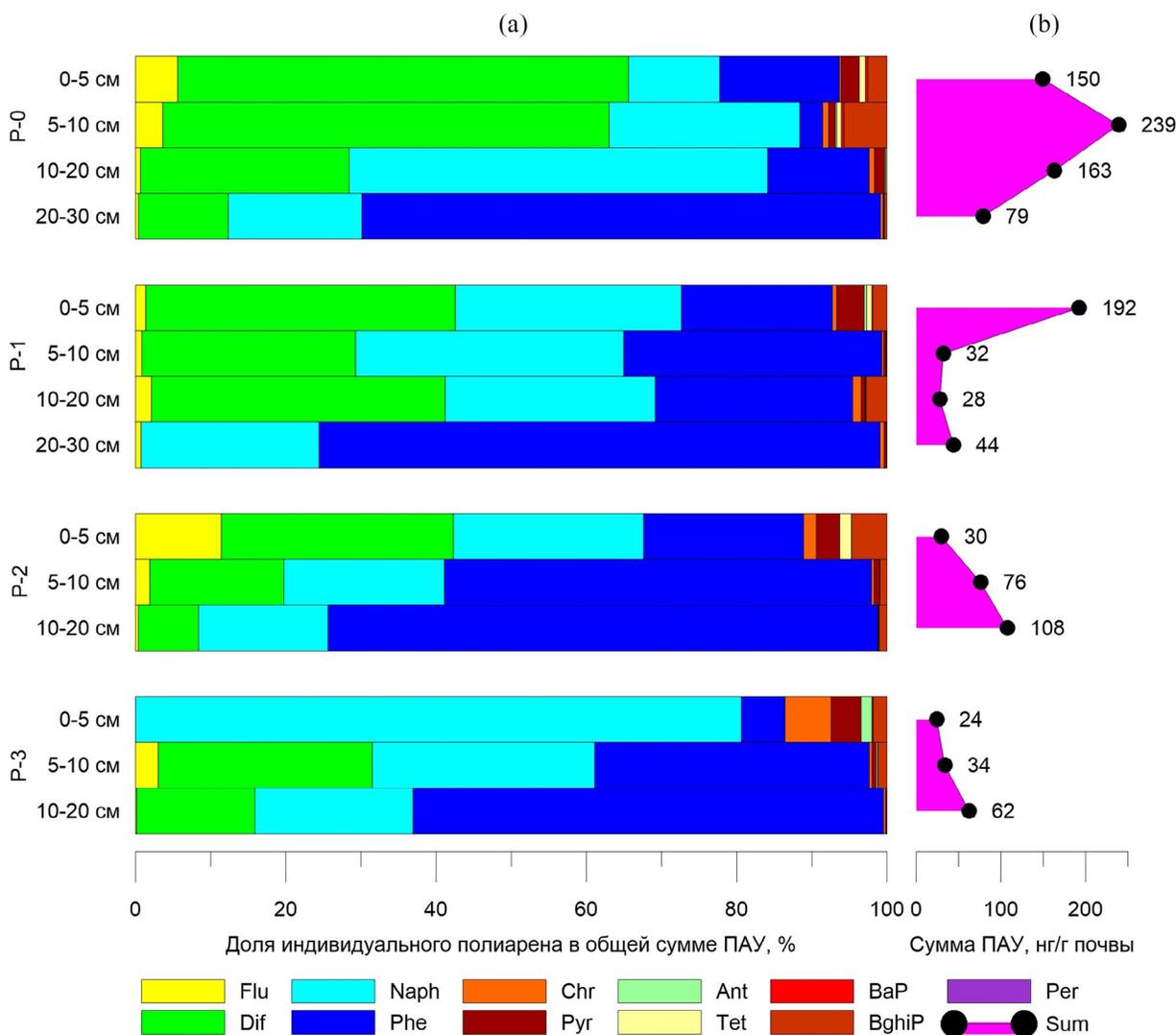
## ВЛИЯНИЕ ПОЖАРА НА СОДЕРЖАНИЕ ПОЛИАРЕНОВ

### Среднее содержание и состав ПАУ в пирогенных почвах

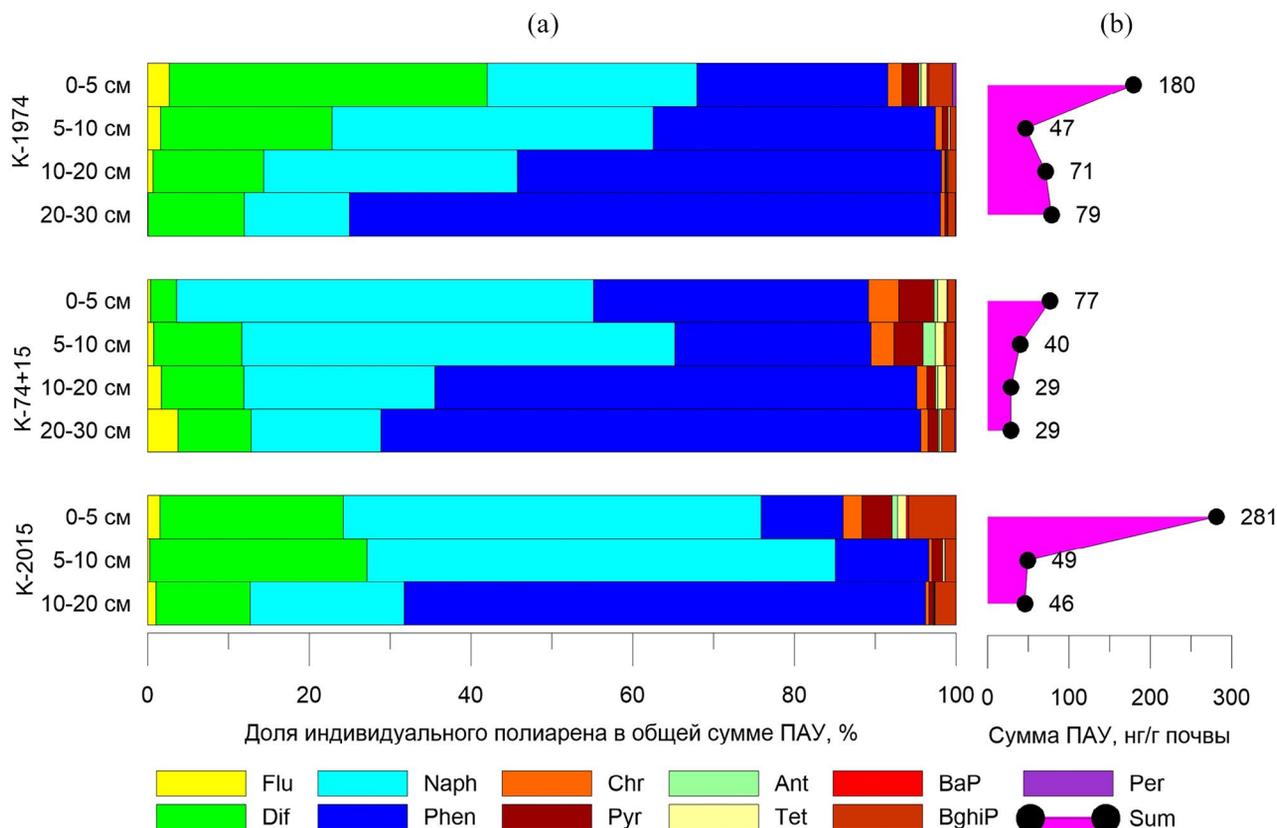
Среднее содержание суммы ПАУ в мелкоземистой части изученных пирогенных почв составляет 70 нг/г при медиане в 45 нг/г, разброс 1.2–540 нг/г. В каменистых включениях содержание ПАУ очень низкое: 4.1 нг/г при медиане в 3.8 нг/г. Данные значения в целом характерны для природных территорий, находящихся вдали от антропогенных источников углеводородов [2, 14] и испытавших воздействие природных пожаров [10, 16, 25]. В составе осредненной по всем образцам

ассоциации полиаренов преобладают легкие ПАУ: нафталин (39.1%), фенантрен (25.5%), дифенил (23.3%); высокомолекулярные ПАУ содержатся в значительно меньших количествах: бенз(ghi)перилен (3,2%), бенз(а)пирен (0.3%). Также присутствуют пирен (3.3%), хризен (2.0%), флуорен (1.7%), тетрафен (1.0%), антрацен (0.5%), перилен (0.16%).

В среднем по изученным почвам, в радиальном распределении выявлена приуроченность повышенных концентраций ПАУ к приповерхностному горизонту. Глубже 5 см изменение общей суммы незначительно (общее среднее  $\pm$  ошибка среднего составляет 124 $\pm$ 25 нг/г в верхнем слое 0–5 см, 54 $\pm$ 12 нг/г в слое 5–10 см, 52 $\pm$ 10 нг/г



**Рис. 2.** Состав полиаренов (а) и сумма ПАУ (б) в фоновой почве (P–0) и в почвах гарей годичного возраста, испытавших воздействие низового пожара (P–1), верхового в сопровождении низового средней (P–2) и высокой (P–3) интенсивности на террасе р. Левая Мишиха. Для каждой глубины показаны осредненные по трем измерениям значения. Полиарены: Flu – флуорен, Dif – дифенил, Naph – нафталин, Phe – фенантрен, Chr – хризен, Pyr – пирен, Ant – антрацен, Tet – тетрафен, BaP – бенза(а)пирен, BghiP – бенз(ghi)перилен, Per – перилен.



**Рис. 3.** Ассоциации полиаренов (а) и сумма ПАУ (б) в почвах гарей и фона по глубинам. Показаны осредненные значения по всем точкам катены. Обозначение участков: К-1974 – катена холма под гарью 1974 г., К-74+15 – катена холма под повторной гарью, 1974 и 2015 гг., К-2015 – катена холма под гарью 2015 г. Расшифровка обозначения индивидуальных полиаренов приведена в подписях к рис. 2.

в слое 10–20 см,  $52 \pm 15$  нг/г в слое 20–30 см). Это обусловлено как обогащенностью органическим веществом верхнего слоя ( $6.1 \pm 1.1$  % органического углерода в слое 0–5 см, глубже по слоям соответственно  $2.6 \pm 0.3\%$ ,  $1.5 \pm 0.2\%$ ,  $0.7 \pm 0.2\%$ ), так и поступлением ПАУ на поверхность почвы из атмосферы [21, 38, 40] и формированием пиро-генных ПАУ при пожаре.

Средний состав ассоциации ПАУ с глубиной изменяется: для поверхностных горизонтов характерна нафталин–дифенил–фенантроновая ассоциация, для глубоких горизонтов – фенантрен–нафталин–дифениловая (рис. 2, 3). Снижение содержания с глубиной наблюдается для всех ПАУ, исключая фенантрен и флуорен. Содержание фенантрена с глубиной в большинстве случаев возрастает, содержание флуорена ненаправленно колеблется. Наличие в верхних горизонтах повышенного количества высокомолекулярных полиаренов приводит к возрастанию соотношения суммы легких ПАУ к сумме тяжелых вниз по профилю.

#### *Влияние интенсивности пожара на количество и состав ПАУ в почвах*

На участках гари годовичного возраста Р–1, Р–2 и Р–3, расположенных на террасе р. Левая Мишиха, обнаружена тенденция снижения содержания полиаренов на гаях с более интенсивным пожаром (рис. 2b). Наибольшие значения обнаружены на участке низового пожара Р–1, наименьшие – на участке комбинированного верхового и низового пожара высокой интенсивности Р–3. Доля высокомолекулярных ПАУ в этом ряду направленно возрастает, составляя 6, 7, 11 и 14% для верхних горизонтов фоновых почв участка Р–0, почв участков низового пожара Р–1, комбинированного пожара средней интенсивности Р–2 и комбинированного пожара высокой интенсивности Р–3 соответственно (рис. 2a). Причины потерь полиаренов на участках высокоинтенсивных пожаров, вероятно, связаны с выгоранием подстильно-торфяных горизонтов почв, где сорбируется большая часть ПАУ [33]. Возрастание доли тяжелых полиаренов, вероятно, обусловлено более длительным воздействием высоких температур на органическое вещество почв [20].

*Влияние возраста пожара и частоты горения на количество и состав ПАУ в почвах*

Максимальные средние содержания ПАУ среди почв гари 281 нг/г встречены в верхних горизонтах почв, расположенных на гари однолетнего возраста (К-2015, гарь 2015 г. на холме), испытавшей однократное воздействие пожара. Содержание ПАУ в гарях годовичного возраста превосходят фоновые значения. Разброс значений достаточно велик — от 24 до 535 нг/г, что связано с упомянутой выше высокой неоднородностью сгорания подстилочных горизонтов. С глубиной содержание ПАУ резко падает. В почвенных горизонтах на глубине 5–10 см средняя концентрация на гари однолетнего возраста составляет 49 нг/г (осреднение по девяти пробам), при разбросе от 15 до 105 нг/г. Повышенные содержания ПАУ в почвах гари однолетнего возраста (после пожара 2015 г.) свидетельствуют о пирогенном образовании данных полиаренов.

На гари 42-летнего возраста обнаружено существенное убывание содержания полиаренов в сравнении с гарью однолетнего возраста. Так, среднее содержание в верхнем горизонте составляет 180 нг/г, при разбросе от 56 до 254 нг/г (табл. S3). Вероятно, со временем происходит деградация образованных во время пожара полиаренов. Снижение содержания наблюдается только для верхних 5 см почвы, глубже содержания ПАУ принципиально не отличаются в почвах гарей 2015 и 1974 гг. (рис. 3).

Анализ почв с двукратной гари (1974 и 2015 гг.) выявил самые низкие содержания среди почв изученных катенарных сопряжений. Здесь средние значения в верхних 5 см составляют 77 нг/г (осреднение по 37 анализам), при разбросе от 12 до 384 нг/г. Уменьшение содержания ПАУ в почвах с двойным горением, вероятно, связано с более интенсивным сгоранием органического вещества [23] в силу накопления материала из сухостойных стволов, отмерших после первого пожара, но сохранивших свою горючесть из-за вертикального положения.

*Сравнение содержания ПАУ в почвах фона и гарей*

Почва, не испытывавшая непосредственно воздействия огня как минимум 100 последних лет, имеет содержание полиаренов в пределах 150–240 нг/г для органогенных горизонтов и 80–160 нг/г для органо-минеральных и минеральных горизонтов. Эти значения оказываются несколько больше, чем средние содержания по всем изученным пирогенным почвам: на глубине 0–5 см — в 1.2 раза, 5–10 см — в 5 раз, 10–20 см — в 3 раза, 20–30 см — в 1.5 раза. Наиболее обогащенный ПАУ слой 5–10 см отличается большим возрастом накопленного в нем органического

вещества по сравнению с верхним слоем 0–5 см. Состав ПАУ фоновых почв отличается повышенными долями дифенила и флуорена (в среднем в 6–7 раз), а также бенз(а)пирена и бенз(ghi)перилена (в 2–5 раз); пониженными значениями — хризена и антрацена (табл. S3).

Вероятно, в лесной подстилке сорбируются полиарены различного генезиса: как автохтонные биохимического происхождения, так и аллохтонные пирогенного происхождения, привносящиеся на поверхность почвы из очагов пожаров с сопредельных территорий [28], что может приводить к накоплению в фоновых почвах полиаренов относительно некоторых пирогенных почв. При пожарах определенная часть полиаренов сгорает при выгорании лесной подстилки, часть — улетучивается с восходящими прогретыми токами воздуха и переносится на некоторое расстояние [16, 30, 37]. Таким образом, в фоновой почве выявлено большее содержание ПАУ по сравнению с пирогенными почвами, пройденными пожарами высокой интенсивности (Р–2, Р–3), и с почвами под двойной гарью (К–74+15). Напротив, почвы после пожаров годовичного возраста средней интенсивности (Р–1, К–2015) характеризуются повышенными содержаниями суммы полиаренов относительно изученной фоновой почвы.

*Факторы формирования ассоциаций ПАУ*

Выявление причин распределения индивидуальных ПАУ в почвах гарей различного возраста по глубинам и по положению в катене проводилось на основе факторного анализа в пакете Statistica 10.0; использован метод главных компонент, варимакс нормализованных данных. Анализ выявил три основных ортогональных фактора, собственные значения которых превышают единицу (рис. 4а). Первый фактор контролирует основную часть варируемости данных (54% от общей дисперсии), второй и третий факторы — 17 и 10% от общей дисперсии соответственно. Факторные нагрузки индивидуальных полиаренов, соответствующие коэффициентам корреляции между содержаниями ПАУ и значениями факторов, представлены на рис. 4б.

**Первым фактором** контролируется содержание нафталина, хризена, пирена, антрацена и тетрафена (коэффициент корреляции фактора с концентрацией данных ПАУ превышает 0.7), в несколько меньшей степени — бенз(а)пирена и бенз(ghi)перилена (коэффициент корреляции более 0.6). Значения данного фактора последовательно снижаются с глубиной взятия образца, максимальные значения приурочены к верхнему горизонту (рис. S1). Наблюдается прямая зависимость от степени пирогенности почвенного образца: средние значения

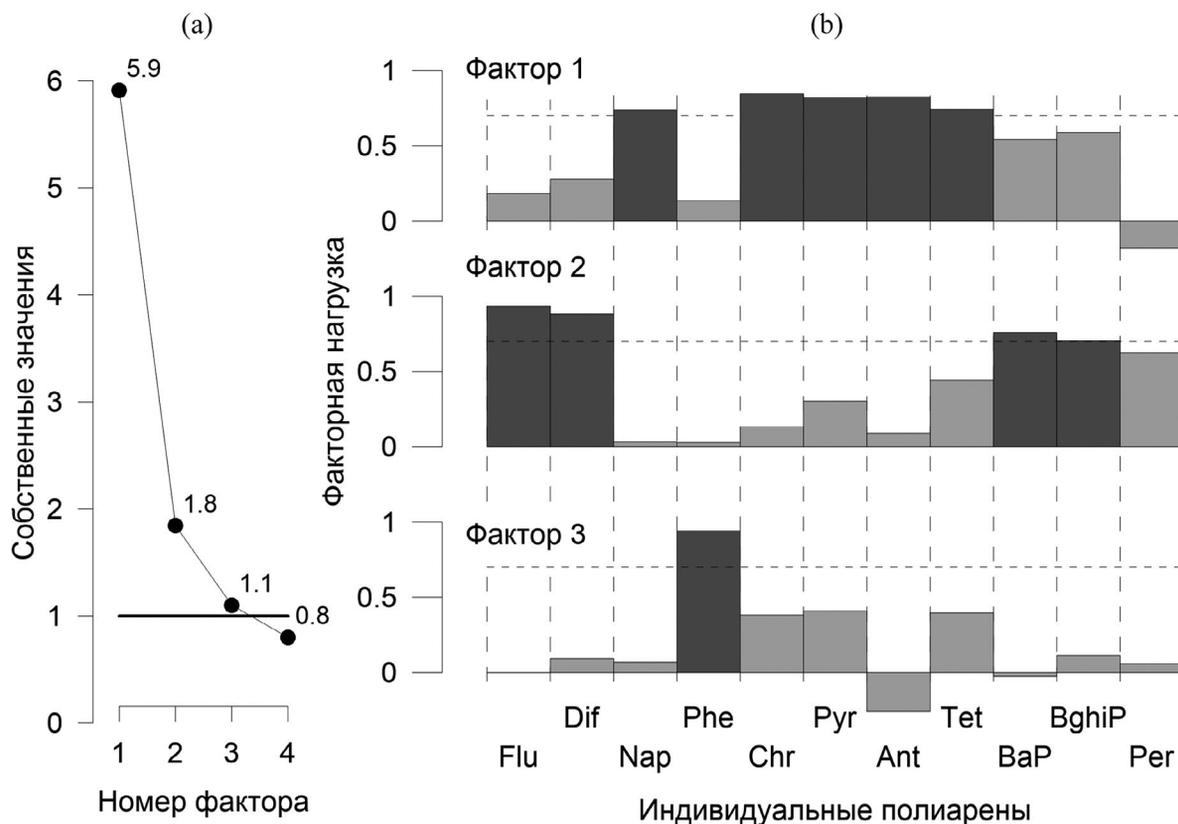


Рис. 4. Результат факторного анализа: (а) – собственные значения факторов, (б) – факторные нагрузки. Более темным цветом выделены ПАУ с факторной нагрузкой более 0.7. Расшифровка обозначения индивидуальных полиаренов приведена в подписях к рис. 2.

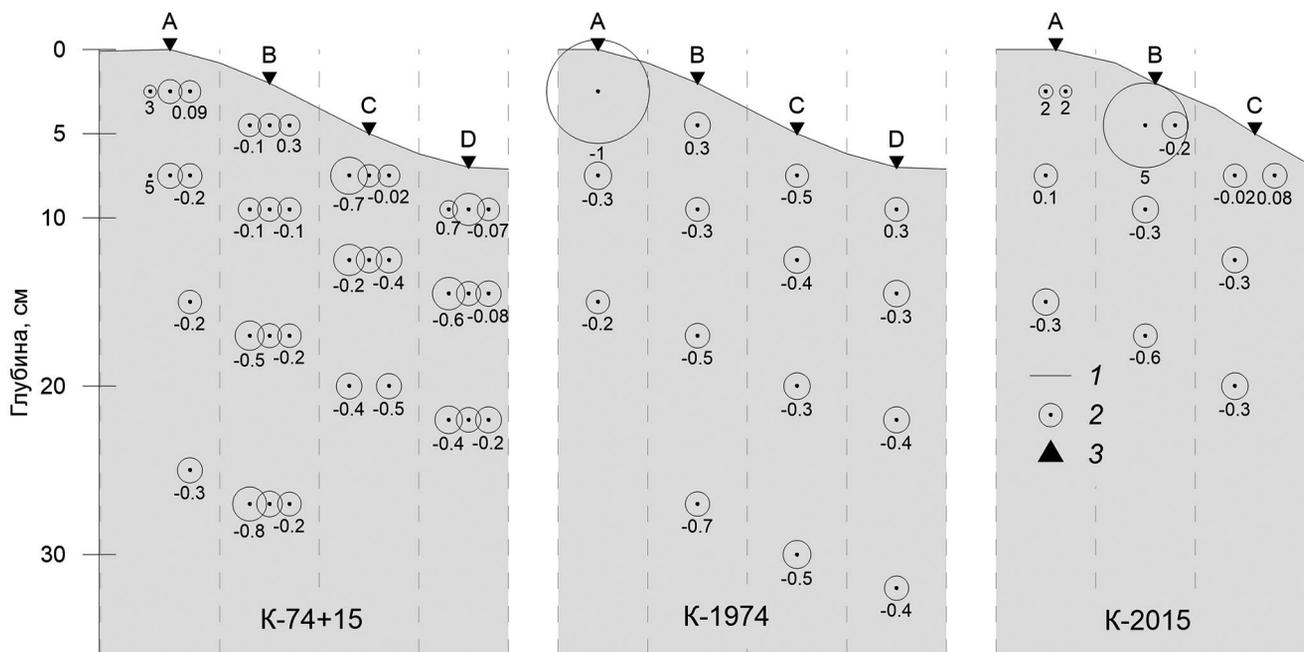


Рис. 5. 1 – линия рельефа (показана условно, вне масштаба), 2 – пунсон с диаметром, обозначающим значение фактора, показан в месте отбора образца с учетом позиции в катене и глубины взятия образца, подписано значение фактора; 3 – место точки отбора в катене. Позиции в катене: А – вершина холма, В – верхняя часть склона; С – средняя часть склона; D – подножие.

минимальны для фоновых почв, максимальны в почвах гарей годичного возраста (рис. S2).

Данный фактор может быть охарактеризован как содержание в почвах ПАУ, сформированных в результате непосредственного воздействия высоких температур лесного пожара на органическое вещество почвы. Данные ПАУ могут быть отнесены к группе *автохтонных пирогенных полиаренов*. Этим объясняется встречаемость высоких значений фактора в верхних горизонтах почв, непосредственно испытывающих воздействие огня и высоких температур; на глубинах более 5 см температура почвы при пожарах повышается не столь значительно [8]. С течением времени после пожара значения фактора должны снижаться из-за процессов деструкции пирогенных ПАУ, что отражается в уменьшении фактора в почвах 42-летней гари (рис. 5).

ПАУ данной группы в почвах ассоциированы, вероятно, с обугленными частями почвенного органического вещества – горизонтами Труг, Оруг и Аруг. Пирогенное происхождение указанных ПАУ подтверждается рядом исследований и наблюдений [31, 39]. Проникновение полиаренов данной группы в более глубокие горизонты, не подвергнутые воздействию высоких температур при пожаре, может быть объяснено радиальной миграцией новообразованных полиаренов в сорбированном на тонких частицах виде, что возможно при легком гранулометрическом составе изученных почв [10, 35].

Внутри катенарных сопряжений, подвергнутых пожарному воздействию, существенно повышенные значения первого фактора наблюдаются для привершинных позиций. Вероятно, это связано с большей прогреваемостью верхних позиций в момент пожара в сравнении с нижними. Вариабельность фактора внутри одной позиции ключевого участка определяется неоднородностью прогорания напочвенной подстилки, упоминаемой выше.

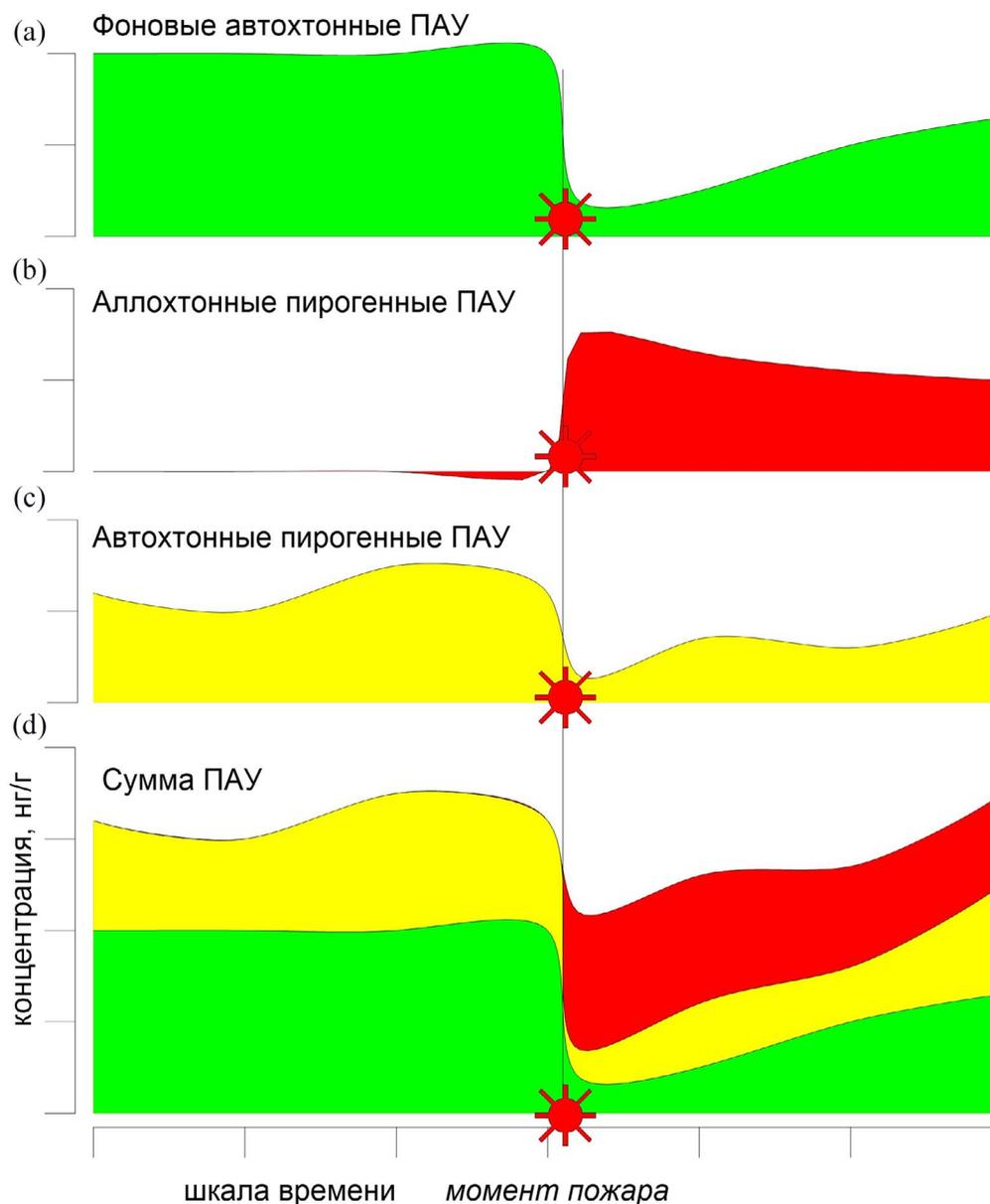
**Второй фактор**, с влиянием на общую дисперсию около 17%, контролирует содержание флуорена и дифенила, бенз(ghi)перилена и бенз(а)пирена (рис. S2). Наибольшие значения фактора характерны для не испытывавших воздействия пожара почв (рис S2, фон), а также для почв с наибольшей длительностью послепожарного периода (рис. S2, гарь 1974 г.). В недавних гарях, годичного возраста, значения фактора резко снижены и минимальны в позициях интенсивного горения (рис. S2, гарь 1974 и 2015 гг.). Предположительно, фактор указывает на содержание полиаренов, которые постепенно накапливаются в верхних горизонтах почв. Выгорание горизонтов лесной подстилки в момент пожара резко снижает их запасы, а длительность послепожарного периода, напротив, увеличивает.

Происхождение постепенно накапливающихся в верхних почвенных горизонтах полиаренов может быть различным: возможно как выпадение из атмосферы вместе с аэрозолями, так и формирование на месте в процессе ферментации лесной подстилки. Легкие флуорен и дифенил, согласно ряду исследований, могут быть сформированы как при пирогенезе [21, 30], так и биохимическим путем непосредственно в почве [11, 17]. Пяти- и шестикольчатые бенз(а)пирен и бенз(ghi)перилен могут иметь только пирогенное происхождение [18]. Для исследуемой территории, находящейся в существенном отдалении от антропогенных источников поступления полиаренов, можно утверждать об их *аллохтонном пирогенном происхождении* – продуцировании при лесных пожарах на участках вблизи исследуемого.

Отметим, что состав аллохтонных пирогенных соединений, привносимых от соседних пожаров, отличается от состава автохтонных, формирующихся на месте горения, углеводородных соединений. Полагаем, что здесь возможно действие своего рода “атмосферно-миграционного фильтра”. Полиарены, подверженные интенсивной фотохимической деструкции, будут разрушаться во время аэрозольной миграции и, как следствие, будут иметь меньшее содержание в выпадающей пыли по сравнению с более устойчивыми соединениями. К соединениям с повышенной устойчивостью относятся бенз(а)пирен и бенз(ghi)перилен [38], а нафталин, хризен, антрацен более подвержены фотохимической деструкции [21]. Также на различие состава авто- и аллохтонных ПАУ будет влиять специфичность их формирования: некоторые соединения будут больше приурочены к обугливающимся остаткам, другие – к выносимым через горячую часть пламени пепловым частицам [30].

Таким образом, второй фактор объединяет полиарены различного происхождения, но при этом обладающие сходством по типу закрепления в почвах: в органических компонентах лесной подстилки, грубогумусового и серогумусового горизонтов.

**Третий фактор** контролирует в первую очередь содержание фенантрена (рис. 3с). Значения фактора направленно возрастают с глубиной (рис. S1). Увеличение концентрации фенантрена в почвах с глубиной фиксировалось неоднократно [6, 10]. Одной из причин возрастания содержания фенантрена в глубоких горизонтах может быть его активное разрушение и захват корнями растений в верхних слоях почвы, наиболее густо пронизанных корневой массой [43]. Значение фактора не обнаруживает зависимости от пирогенности.



**Рис. 6.** Гипотетическая схема изменения содержания различных по происхождению групп ПАУ в верхних горизонтах почв до и после пожара; (а) – фоновые автохтонные ПАУ, (б) – аллохтонные пирогенные ПАУ, (с) – автохтонные пирогенные ПАУ, (д) – сумма ПАУ; красным пунсоном на шкале времени показан момент пожара.

#### *Генетические группы ПАУ в пирогенных и фоновых почвах*

Исходя из приведенного выше анализа, возможно следующее обобщение. В комплексе полиаренов послепожарных почв на изученной территории Байкальского заповедника могут быть выделены следующие группы ПАУ по их происхождению и особенностям закрепления в почвах: 1) *пирогенные полиарены*, формирующиеся в момент пожара из-за высокотемпературного воздействия на органическое вещество почвы; 2) *пирогенные полиарены*,

привносящиеся из соседних очагов пожаров с аэрозолями; 3) *фоновые полиарены*, которые по последствиям от пожаров могут быть разделены на две группы: 3а) накопленные в органических горизонтах почв и потому сильно зависимые от пирогенных событий, и 3б) накопленные в минеральной части почвы и в меньшей степени зависящие от пожара. На рис. 6 показана гипотетическая схема изменения во времени содержания выделенных групп полиаренов в почвах.

Содержание фоновых автохтонных ПАУ (рис. 6а) в климаксовых сообществах, предположительно,

существенно не меняется во времени, поскольку является балансом между интенсивностями процессов формирования и деградации ПАУ. Большая их часть накапливается в поверхностных органических аккумуляциях почв – в ферментированной лесной подстилке в данном случае; меньшие содержания наблюдаются в минеральной части почвы. В момент пожара большая часть органического вещества сгорает, и вместе с нею сгорают и сорбированные ПАУ. Пониженные содержания ПАУ на участках с более интенсивными пожарами, приводящими к сгоранию лесной подстилки до уровня золы, наблюдались в других исследованиях [20]. После пожара должно происходить постепенное восстановление уровня содержания фоновых автохтонных ПАУ.

Содержание *автохтонных пирогенных полиаренов* будет максимально на молодых гаях, где они сформировались в момент пожара при обугливания и неполном сгорании органических остатков. После пожара запасы таких углеводов будут, напротив, снижаться в результате действия различных процессов деструкции (рис. 6b) [20].

Группа *аллохтонных пирогенных углеводов*, формирующихся при пожарах и выносящихся от своего источника с пеплом и дымом, будет постепенно накапливаться и в фоновых, и в гаяевых почвах, оседая вместе с аэрозолями пирогенного происхождения [28]. Интенсивность их накопления будет неоднородна во времени, в зависимости от интенсивности пожаров в окружающих ландшафтах [32]. В момент прохождения пожара через участок исследуемой почвы должно произойти уменьшение запаса полиаренов данной группы из-за сгорания органического вещества, сорбирующего ПАУ аэрозолей (рис. 6с).

Сумма ПАУ, в зависимости от соотношения указанных групп, будет в ряде случаев возрастать после прохождения пожара, а в ряде случаев – снижаться. На схеме (рис. 6d) показана ситуация, более распространенная на исследованном участке, когда почвы гаяей имеют меньшее содержание суммы ПАУ в сравнении с фоновыми почвами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В почвах межгорной котловины в верховьях р. Левая Мишиха Байкальского заповедника природные лесные пожары привели к формированию пирогенных горизонтов: слоя опавших углей руг, слоя золы Сруг, подстилочно-торфяного подгоризонта Оруг из обугленной лесной подстилки, пирогенного гумусового горизонта Аруг. Почвенный покров на участках гаяи осложняется вариабельностью, унаследованной от неоднородного прогорания лесной подстилки. Степень прогорания может в пределах нескольких метров меняться от полного выгорания до слабой затронутости огнем.

Содержание суммы ПАУ в фоновой почве исследованного участка оказалось выше средних значений в почвах гаяей. Это может быть обусловлено потерей полиаренов при выгорании лесной подстилки, в которой сорбируются и накапливаются ПАУ, а также испарением ряда углеводов при нагревании почвы во время пожара.

С течением времени после пожара содержания новообразованных при пожаре ПАУ в почвах снижаются. В гаяи сорокадвухлетнего возраста, в сравнении с гаяей однолетнего возраста, содержание бензперилена, антрацена, тетрафена снижено в 3 раза, пирена – в 2 раза, что может быть связано с процессами деструкции пирогенных углеводов.

Повторные пожары, проходящие по участкам леса с сохранившимися на корню горельниками древесных пород, погибших в предыдущие пожары, приводят к более интенсивным потерям полициклических углеводов. Содержание ПАУ в них становится существенно ниже как фоновых значений, так и однократных гаяей. Вероятно, это связано с более интенсивным горением за счет повышенного количества подверженного горению материала.

В составе ПАУ пирогенных почв на основе факторного статистического анализа были выделены четыре группы полиаренов, различные по генезису. К группе полиаренов пирогенного автохтонного происхождения, формирующихся *in situ* при высокотемпературном воздействии на органическое вещество, относятся нафталин, тетрафен, пирен, хризен, антрацен, нафталин, в меньшей степени – бенз(а)пирен и бенз(ghi)перилен. К группе полиаренов пирогенного аллохтонного происхождения, накапливающихся в фоновых почвах за счет привноса с атмосферными аэрозолями от соседних пожаров, относятся бенз(а)пирен и бенз(ghi)перилен. К группе полиаренов биохимического происхождения, накапливающихся в органическом веществе фоновых почв, отнесены флуорен и дифенил. С влиянием пожара содержание этих полиаренов имеет отрицательную корреляцию из-за выгорания несущего их органического материала. К группе полиаренов биохимического и петрогенного происхождения, интенсивнее накапливающихся в минеральной части почвы глубже 5 см и не откликающихся на пирогенное воздействие, отнесен фенантрен.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Анализ полученных данных Т.С. Кошовским и А.Н. Геннадиевым проведен в рамках госбюджетной темы “Антропогенная геохимическая трансформация компонентов ландшафта”. Работы Н.С. Гамовой выполнены в рамках госбюджетной темы “Таксономическое разнообразие

региональных флор России и сопредельных государств. Научная обработка коллекций Гербария МГУ как основа изучения региональных флор”.

### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X24070049>

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеева Т.А., Теплицкая Т.А.* Спектрофлуориметрические методы анализа полициклических ароматических углеводородов в природных и техногенных средах. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 215 с.
2. *Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М.* Полициклические ароматические углеводороды в подзолистых и торфянисто-подзолисто-глееватых почвах фоновых ландшафтов // Почвоведение. 2007. № 3. С. 282–291.
3. *Гамова Н.С., Фаронова Е.А., Коротков Ю.Н., Кошовский Т.С., Язрикова Т.Е.* Ранние стадии пирогенной сукцессии в пихтовых лесах Южного Прибайкалья (Байкальский заповедник) // Экосистемы: экология и динамика. 2023. Т. 7. № 2. С. 88–112.
4. *Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А.* Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1195–1209.
5. *Гонгальский К.Б.* Лесные пожары как фактор формирования сообществ почвенных животных // Журнал общей биологии. 2006. Т. 67. № 2. С. 127–138.
6. *Жидкин А.П., Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С.* Поступление и поведение полициклических ароматических углеводородов в пахотных, залежных и лесных почвах таежной зоны (Тверская область) // Почвоведение. 2017. № 3. С. 311–320.
7. *Иванов В.А., Иванова Г.А.* Пожары от гроз в лесах Сибири. Новосибирск: Наука, 2010. 164 с.
8. *Иванова Г.А.* Зонально-экологические особенности лесных пожаров в сосняках Средней Сибири. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Красноярск, 2005. 42 с.
9. *Картушин В.М.* Агроклиматические ресурсы юга Восточной Сибири (пояснительный текст к серии агроклиматических карт Иркутской, Читинской областей и Бурятской АССР). Иркутск, ВСКНИ, 1969. 100 с.
10. *Кошовский Т.С., Геннадиев А.Н., Гамова Н.С., Язрикова Т.Е.* Послепожарное состояние таежных почв хребта Хамар-Дабан (Прибайкалье) // Почвоведение. 2022. № 9. С. 1098–1111.
11. *Краснопеева А.А., Пузанова Т.А.* Геохимический углеводородный фон в почвах южной тайги // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2012. № 3. С. 33–40.
12. *Ладейщиков Н.П., Филиппов А.Н., Зедгендзе Е.П., Оболкин В.А., Резникова С.А.* Осадки и режим увлажнения. Структура и ресурсы климата Байкала и сопредельных пространств. Новосибирск: Наука, 1977. С. 98–125.
13. *Моложников В.Н.* Растительность Прибайкалья. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 612 с.
14. *Пиковский Ю.И., Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Завгородняя Ю.А., Жидкин А.П., Ковач Р.Г., Кошовский Т.С.* Параметры нативного углеводородного состояния почв различных биоклиматических зон // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1307–1321.
15. Предбайкалье и Забайкалье. М.: Наука, 1965. 492 с.
16. *Цибарт А.С., Геннадиев А.Н.* Влияние пожаров на свойства лесных почв Приамурья (Норский заповедник) // Почвоведение. 2008. № 7. С. 783–792.
17. *Чернянский С.С., Волосатова Ю.В., Краснопеева А.А.* Особенности формирования аномалий полиароматических углеводородов в почвенном покрове // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2007. № 2. С. 31–37.
18. *Atanassova I., Brümmer G.W.* Polycyclic aromatic hydrocarbons of anthropogenic and biopedogenic origin in a colluviated hydromorphic soil of Western Europe // Geoderma. 2004. V. 120. № 1–2. P. 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.08.007>
19. *Certini G.* Fire as a soil-forming factor // Ambio. 2014. V. 43. № 2. P. 191–195. <https://doi.org/10.1007/s13280-013-0418-2>
20. *Chen H., Chow A.T., Li X.W., Ni H.G., Dahlgren R., Zeng H., Wang J.J.* Wildfire burn intensity affects the quantity and speciation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils // ACS Earth Space Chem. 2018. V. 2. № 12. P. 1262–1270. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.8b00101>
21. *Choi S.D.* Time trends in the levels and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in pine bark, litter, and soil after a forest fire // Sci. Total Environ. 2014. V. 470. P. 1441–1449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.100>
22. *Chunhui W., Shaohua W., Shenglu Z., Yaxing S., Jing S.* Characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils:

- a review // *Pedosphere*. 2017. V. 27. № 1. P. 17–26. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60293-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60293-5)
23. *Devi P., Saroha A.K.* Effect of pyrolysis temperature on polycyclic aromatic hydrocarbons toxicity and sorption behaviour of biochars prepared by pyrolysis of paper mill effluent treatment plant sludge // *Bioresource Technology*. 2015. V. 192. P. 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.084>
  24. *Du J., Jing C.* Anthropogenic PAHs in lake sediments: a literature review (2002–2018) // *Environ. Sci.: Processes Impacts*. 2018. V. 20. № 12. P. 1649–1666.
  25. *Dymov A.A., Startsev V.V., Milanovsky E.Y., Valdes-Korovkin I.A., Farkhodov Y.R., Yudina A.V., Donnerhack O., Guggenberger G.* Soils and soil organic matter transformations during the two years after a low-intensity surface fire (Subpolar Ural, Russia) // *Geoderma*. 2021. V. 404. P. 115278.
  26. *Edwards N.T.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH's) in the terrestrial environment a review // *J. Environ. Quality*. 1983. V. 12. № 4. P. 427–441. <https://doi.org/10.2134/jeq1983.00472425001200040001x>
  27. *Gao P., Li H., Wilson C.P., Townsend T.G., Xiang P., Liu Y., Ma L.Q.* Source identification of PAHs in soils based on stable carbon isotopic signatures // *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.* 2018. V. 48. № 13–15. P. 923–948. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1495983>
  28. *Gorshkov A.G., Izosimova O.N., Kustova O.V., Marinaite I.I., Galachyants Y.P., Sinyukovich V.N., Khodzher T.V.* Wildfires as a source of PAHs in surface waters of background areas (Lake Baikal, Russia) // *Water*. 2021. V. 13. № 19. P. 2636.
  29. *Guo Y., Wu K., Huo X., Xu X.* International perspectives: sources, distribution, and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons // *J. Environ. Health*. 2011. V. 73. № 9. P. 22–25.
  30. *Kim E.J., Choi S.D., Chang Y.S.* Levels and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils after forest fires in South Korea // *Environ. Sci. Poll. Res*. 2011. V. 18. P. 1508–1517. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0515-3>
  31. *Kim E.J., Oh J.E., Chang Y.S.* Effects of forest fire on the level and distribution of PCDD/Fs and PAHs in soil // *Sci. Total Environ*. 2003. V. 311. № 1–3. P. 177–189. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00095-0)
  32. *Makkonen U., Hellén H., Anttila P., Ferm M.* Size distribution and chemical composition of airborne particles in south–eastern Finland during different seasons and wildfire episodes in 2006 // *Sci. Total Environ*. 2010. V. 408. № 3. P. 644–651. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.050>
  33. *Nam J.J., Thomas G.O., Jaward F.M., Steinnes E., Gustafsson O., Jones K.C.* PAHs in background soils from Western Europe: influence of atmospheric deposition and soil organic matter // *Chemosphere*. 2008. V. 70. № 9. P. 1596–1602. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.08.010>
  34. *Nelson A.R., Narrowe A.B., Rhoades C.C., Fegel T.S., Daly R.A., Roth H.K., et al.* Wildfire–dependent changes in soil microbiome diversity and function // *Nature microbiology*. 2022. V. 7. № 9. P. 1419–1430.
  35. *Simon E., Choi S.D., Park M.K.* Understanding the fate of polycyclic aromatic hydrocarbons at a forest fire site using a conceptual model based on field monitoring // *J. Hazardous Mater*. 2016. V. 317. P. 632–639. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.06.030>
  36. *Tobiszewski M., Namieśnik J.* PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources // *Environ. Poll*. 2012. V. 162. P. 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.10.025>
  37. *Tsibart A., Gennadiev A., Koshovskii T., Watts A.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in post–fire soils of drained peatlands in Western Meshchera (Moscow region, Russia) // *Solid Earth*. 2014. V. 5. № 2. P. 1305–1317.
  38. *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. № 2. P. 193–198. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2010.01.008>
  39. *Vila-Escalé M., Vegas-Vilarrúbia T., Prat N.* Release of polycyclic aromatic compounds into a Mediterranean creek (Catalonia, NE Spain) after a forest fire // *Water Research*. 2007. V. 41. № 10. P. 2171–2179. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.029>
  40. *Wang T., Xiang K., Zeng Y., Gu H., Guan Y., Chen S.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air, foliage, and litter in a subtropical forest: Spatioseasonal variations, partitioning, and litter–PAH degradation // *Environ. Poll*. 2023. V. 328. P. 121587. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121587>
  41. *Wilcke W.* Synopsis polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil a review // *J. Plant Nutrition Soil Sci*. 2000. V. 163. № 3. P. 229–248. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200006\)163:3](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200006)163:3)
  42. *Wiłkomirski B., Jabbarov Z.A., Abdrakhmanov T.A., Vokhidova M.B., Jabbarov B.T., Fakhrudinova M.F. et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in natural and anthropogenically modified soils (a review) // *Biogeosystem Technique*. 2018. № 5. P. 229–243. <https://doi.org/10.13187/bgt.2018.2.229>
  43. *Zhan X., Liang X., Xu G., Zhou L.* Influence of plant root morphology and tissue composition on phenanthrene uptake: stepwise multiple linear regression analysis // *Environ. Poll*. 2013. V. 179. P. 294–300. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.04.033>

## Composition and Genesis of Polyarenes in Soils of Various Aged Burnt Areas in the Baikal Nature Reserve

T. S. Koshovskii<sup>1, \*</sup>, A. N. Gennadiyev<sup>1</sup>, and N. S. Gamova<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>2</sup>*Baikalsky State Nature Biosphere Reserve, Tankhoy, 671220 Russia*

*\*e-mail: tkzv@ya.ru*

The article presents data on the content of eleven polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils under burnt areas of various ages, single and repeated, in the taiga landscapes of the middle mountains of the Khamar-Daban ridge. Morphological features of soils inherited from the fire were identified, such as: layers of coals (пыр), ashes (Спыр), charred forest litter (Опыр) and pyrogenic humus horizon (Апыр). The post-fire variability of the soil cover, formed due to the presence of areas inside the burnt area with six degrees of burning of forest litter material, is characterised. A decrease in the content of PAHs has been shown with an increase in the intensity of the fire, as well as in the case of repeated fire on the already burnt area. Background soils have a higher content of PAHs compared to 42-year-old burnt areas and to areas of intense burning in one-year-old burnt areas. By factor analysis, four groups of PAHs were identified, differing in origin: polyarenes of pyrogenic autochthonous origin, formed in situ – naphthalene, tetraphene, pyrene, chrysene, anthracene, naphthalene, and to a lesser extent benzo(a)pyrene, and benzo(ghi)perylene; a group of polyarenes of pyrogenic allochthonous origin that accumulate in soils due to atmospheric transport of ash – benzo(a)pyrene and benzo(ghi)perylene; a group of polyarenes of biochemical origin – fluorene and biphenyl; polyarenes of biochemical and petrogenic origin, accumulating at the depth of the soil – phenanthrene.

*Keywords:* wildfire, multiple fires, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), post-fire soil and vegetation changes, Albic Skeletic Podzols