

## Извлечение полициклических ароматических углеводородов из природных систем для установления источника их поступления

Н. А. Мухортина

Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Томск, Россия;

e-mail: [volkovana@ipgg.sbras.ru](mailto:volkovana@ipgg.sbras.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

Информация о статье Реферат

Поступила  
в редакцию  
16.12.2025;  
получена  
после доработки  
19.02.2026;  
принята  
к публикации  
02.03.2026

Ключевые слова:

полициклические  
ароматические  
углеводороды,  
экстракция,  
поверхностные воды,  
антропогенная нагрузка,  
индикаторные  
соотношения

Полициклические ароматические углеводороды обладают маркерными свойствами и служат индикаторами источников загрязнения, связанных с природными или техногенными процессами. В ходе экстракции ПАУ из модельных смесей с помощью различных растворителей выявлено, что применение *n*-гексана обеспечивает высокую эффективность извлечения соединений из проб поверхностных вод, взятых на территориях с разной антропогенной нагрузкой (масса экстракта 400–1900 мкг/л). Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии выполнена идентификация индивидуальных ПАУ и определено их суммарное содержание в пробах. Воды с участка, пострадавшего от разлива нефтепродуктов, содержат 0,25–0,37 мкг/л ПАУ; из них 78 % приходится на долю низкомолекулярных соединений (нафталин, флуорен, фенантрен). В водах с территории, где расположены нефтедобывающие предприятия, суммарное содержание определено в диапазоне 0,40–1,10 мкг/л; основной вклад (77 %) вносят высокомолекулярные соединения [флуорантен, пирен, хризен и бенз(а)пирен]. Поверхностные воды с угледобывающей территории содержат ПАУ в количестве 0,24–0,88 мкг/л; в них отмечено присутствие дибенз(а,һ)антрацена (0,01–0,05 мкг/л). При расчете индикаторных соотношений определено, что источники поступления ПАУ в поверхностные воды с территорий разлива нефтепродуктов и добычи угля носят в основном природный петрогенный и пирогенный характер. На территориях с нагрузкой от деятельности нефтедобывающих предприятий поступление ПАУ обусловлено как петрогенными (подток флюидов из толщ), так и антропогенными (разлив или сжигание нефтепродуктов) процессами.

Для цитирования

Мухортина Н. А. Извлечение полициклических ароматических углеводородов из природных систем для установления источника их поступления. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 2. С. 299–311. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-299-311>.

## Extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from natural systems to establish the source of their supply

Natalia A. Mukhortina

Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics  
of Siberian Branch RAS, Tomsk, Russia;

e-mail: [volkovana@ipgg.sbras.ru](mailto:volkovana@ipgg.sbras.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

Article info

Received  
16.12.2025;

received  
in revised  
19.02.2026;

accepted  
02.03.2026

Key words:

polycyclic aromatic  
hydrocarbons,  
extraction,  
surface waters,  
anthropogenic load,  
indicator ratios

Abstract

Polycyclic aromatic hydrocarbons have marker properties and serve as indicators of pollution sources associated with natural or man-made processes. During the extraction of PAHs from model mixtures using various solvents, it has been found that the use of *n*-hexane ensures high efficiency of compound extraction from surface water samples taken in areas with different anthropogenic loads (extract weight of 400–1900 µg/L). Using high-performance liquid chromatography, individual PAHs have been identified and their total content in the samples has been determined. Water from the area affected by the oil spill contains 0.25–0.37 µg/L PAHs, 78 % of which are low-molecular compounds (naphthalene, fluorene, phenanthrene). In waters from the area where oil production facilities are located, the total content is determined in the range of 0.40–1.10 µg/L; the main contribution (77 %) is made by high-molecular compounds [fluoranthene, pyrene, chrysene and benzo(a)pyrene]. Surface waters from coal mining areas contain PAHs in amounts of 0.24–0.88 µg/l; the presence of dibenz(a,h)anthracene (0.01–0.05 µg/l) has been noted in them. When calculating indicator ratios, it has been determined that the sources of PAH entry into surface waters from oil spill and coal mining areas are mainly natural, petrogenic and pyrogenic in nature. In areas with a load from the activities of oil producing enterprises, the entry of PAHs is caused by both petrogenic (fluid influx from strata) and anthropogenic (spill or combustion of oil products) processes.

For citation

Mukhortina, N. A. 2026. Extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from natural systems to establish the source of their supply. *Vestnik of MSTU*, 29(2), pp. 299–311. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-299-311>.

## Введение

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) относятся к опасным и стойким загрязнителям, обладающим канцерогенными и мутагенными свойствами (Халиков, 2018; Хаустов и др., 2017), и являются информативными показателями степени и характера антропогенной нагрузки на различные объекты окружающей среды. Содержание ПАУ в водах не регламентируется российским законодательством, за исключением концентраций двух индивидуальных соединений: бенз(а)пирена и нафталина. Согласно рекомендациям СанПиН 1.2.3685–21<sup>1</sup> содержание нафталина в воде не должно превышать 10 мкг/л, а бенз(а)пирена – 0,01 мкг/л.

Актуальность исследований содержания и состава полициклических ароматических углеводородов обусловлена не только их токсичностью, но и устойчивостью к химической и биологической трансформации, высокой миграционной активностью и способностью к накоплению в природных средах (Соколов и др., 2022). Поведение данных соединений в природных средах связано с их химическими свойствами. В воде ПАУ малорастворимы; растворимость уменьшается по мере увеличения молекулярного веса (Цибарт и др., 2013). Низкомолекулярные соединения (2–3 ароматических кольца) обладают летучестью и могут находиться в атмосфере в газовой форме; высокомолекулярные вещества характеризуются низкой летучестью и преимущественно связываются с твердыми частицами (пыль, сажа, почва, донные отложения) (Шамиливили и др., 2016).

В процессе количественного определения полициклических ароматических углеводородов в сложных природных матрицах применяются методики, где основной стадией является пробоподготовка. Данный этап гарантирует максимально эффективную экстракцию аналитов и их последующее концентрирование. Выбор конкретных методов пробоподготовки определяется такими факторами, как степень сложности органической матрицы исследуемых образцов и уровень содержания в них полициклических ароматических углеводородов (Темердашев и др., 2021; Хаустов и др., 2017). Разработка наиболее адекватных методов исследований – важнейшая задача при организации мониторинга состояния окружающей среды (Кукушкин и др., 2025). Для ее решения реализуются различные способы пробоподготовки с применением жидкостной экстракции, микроэкстракции (Дмитриенко и др., 2020) и твердофазной экстракции (Плотникова, 2021; Хаустов и др., 2017; Другов и др., 2005). В работе (Халиков, 2015) показано, что метод твердофазной экстракции позволяет обрабатывать пробы большого объема через сорбционные картриджи и диски с помощью сравнительно малых количеств сорбента, т. е. данный вид экстракции требует меньшего расхода растворителей для последующей десорбции сконцентрированных соединений. Однако этот метод не нашел широкого применения в ходе серийного анализа при мониторинговых исследованиях. В настоящее время широкое распространение в аналитической практике получила жидкостная экстракция с использованием органических растворителей (Горшков и др., 2019).

Полиароматические соединения повсеместно встречаются в окружающей среде. В природные воды ПАУ поступают с атмосферными осадками в период таяния снега и льда, а также с поверхностным стоком и сточными водами. Как правило, накопление загрязняющих веществ в водных объектах происходит в донных осадках, которые могут являться основой ПАУ в трофической цепи и вторично загрязнять водоемы и водотоки (Волкова и др., 2023; Пастухов и др., 2017). Согласно литературным данным (Хаустов и др., 2017; Халиков, 2018; Пиковский и др., 2021; Басова и др., 2011) источники поступления ПАУ делятся на петрогенные, пирогенные и биогенные. К петрогенным источникам относятся естественные подтоки нефтяных флюидов через толщи и горные породы, техногенные разливы нефтепродуктов и нефти. Полиароматические соединения входят в состав нефтей, поэтому при попадании нефтепродуктов в природные объекты такие соединения, как нафталины, фенантроны, хризен, бенз(а)пирен (Цибарт и др., 2013), частично растворяются в водной среде с последующей сорбцией на взвешенных частицах, донных отложениях, почве и породе (Халиков, 2018). Преобладающая часть ПАУ, обнаруженных в природных объектах, образуется в результате пирогенных процессов: лесных пожаров, сжигания древесины и травянистой растительности, горения торфа и угля, извержений вулканов, выбросов геотермальных источников, сжигания нефти и нефтепродуктов, выбросов промышленности (Шашков и др., 2022).

ПАУ входят в состав воска листьев растений и древесины некоторых видов лесов (Krauss et al., 2005), что относит их к биогенным источникам. В научной литературе ряд авторов допускает возможность эндогенного биосинтеза ПАУ представителями различных таксономических групп, включая водоросли, высшие растения и бактерии. Однако есть противоположное мнение, заключающееся в том, что обнаружение ПАУ в живых организмах обусловлено преимущественно аккумуляцией аллохтонных (поступающих извне) соединений, а не их биологическим синтезом (Belis et al., 2011; Цибарт и др., 2013).

<sup>1</sup> СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 10.11.2025).

ПАУ обладают маркерными свойствами, выявление которых в исследуемых средах служит индикатором определенного источника поступления, связанного с природными или техногенными процессами (*Хаустов и др., 2025*). Цель исследования состоит в определении содержания и закономерностей распределения полициклических ароматических углеводородов в водных объектах, расположенных на участках с различной техногенной нагрузкой, с последующим установлением вероятного источника их поступления.

## Материалы и методы

### Объекты исследования

Для уточнения и детализации процессов перехода полициклических ароматических углеводородов в водную среду проведен модельный эксперимент в лабораторных условиях по дифференциации состава дизельного топлива (ДТ) и угля в системах "ДТ – дистиллированная вода" (система 1), "древесный уголь – дистиллированная вода" (система 2).

В стеклянные емкости с дистиллированной водой (3 л) помещали 15 мл дизельного топлива (система 1) и 15 г древесного угля (система 2). Эксперименты проводились при температуре 25 °С (без перемешивания и попадания прямых солнечных лучей) на протяжении месяца. Затем вода была проанализирована методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) (*Мухортина, 2024*).

Для подтверждения и сопоставления результатов модельного эксперимента изучены ПАУ, выделенные из природных поверхностных вод с территорий, подвергавшихся различной техногенной нагрузке (табл. 1).

Таблица 1. Краткие сведения по опробованным водопунктам  
Table 1. Brief information on the tested water points

Участок	Территория отбора проб	Техногенная нагрузка	Место отбора проб	Количество проб
1	Север Красноярского края, вблизи г. Норильска	Разовый разлив дизельного топлива	руч. Надеждинский	3
			р. Далдыкан	2
			р. Амбарная	3
			р. Амбарная, район впадения в оз. Пясино	3
2	Ямало-Ненецкий автономный округ, бассейн р. Пур	Ежедневная работа предприятий нефтедобывающей отрасли	р. Ям-совей	3
			р. Пур	3
			р. Апоху-яха	3
			р. Панкитьяха	3
3	Кемеровская область, Кузбасс, бассейн р. Иня	Ежедневная работа угледобывающих предприятий	р. Иня (с. Пермяки)	3
			р. Иня (с. Каракан)	3
			р. Иня (д. Новодубровка)	2
			р. Иня (д. Сидаренково)	2

Выбранные водопункты имеют аналогичную гидрогеологическую структуру, которая включает реки, представленные на рис. 1. Отбор проб воды проводили с глубины 0,4–0,6 м от поверхности в стеклянную емкость с последующей консервацией *n*-гексаном. В соответствии с требованиями к аналитическим испытаниям (ГОСТ Р 59024-2020<sup>2</sup>) отобрано по три пробы с каждого участка.

### Методика испытаний

Для идентификации индивидуальных ПАУ из водных образцов выбрана жидкостная экстракция. В ходе анализа использовали несколько растворителей: *n*-гексан (согласно действующей методике государственного экологического контроля ПНД Ф 14.1:2:4.70-96<sup>3</sup>); *n*-гексан и дихлорметан в соотношении 10:1; дихлорметан. Дифференцированный выбор растворителей обусловлен различиями их физико-химических свойств, которые в совокупности обеспечивают эффективное извлечение органического вещества из водной фазы (*Темердашев и др., 2021*). Гексан – неполярный растворитель, проявляющий сродство к полициклическим ароматическим углеводородам. Дихлорметан полярен и способен эффективно растворять как неполярные, так и слабополярные вещества. В совокупности гексан и дихлорметан хорошо растворяют органические вещества, в том числе ПАУ (*Котова и др., 2019*). При этом в воде образуется отдельный слой экстракта с растворителем, что позволяет эффективно разделять фазы и извлекать органические компоненты (*Басова и др., 2011*).

<sup>2</sup> ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. URL: [https:// docs.cntd.ru/document/1200175475](https://docs.cntd.ru/document/1200175475) (дата обращения: 21.07.2025).

<sup>3</sup> ПНД Ф 14.1:2:4.70-96. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций полициклических ароматических углеводородов в питьевых, природных и сточных водах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293788/4293788735.htm> (дата обращения: 08.09.2025).

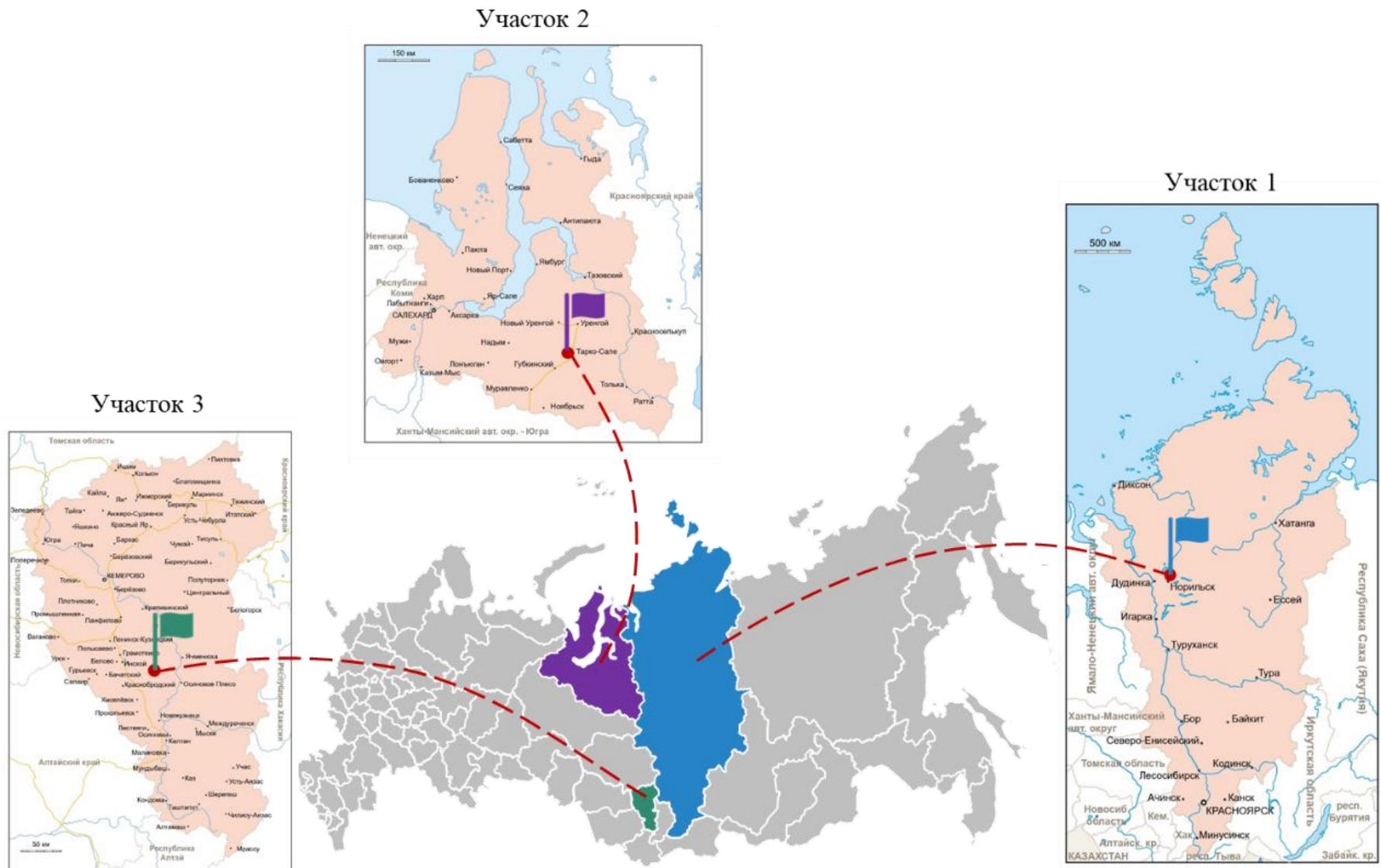


Рис. 1. Схема отбора проб поверхностной воды  
 Fig. 1. Surface water sampling scheme

В процессе экспериментов проведено извлечение полициклических ароматических углеводородов из водной части модельных систем с помощью растворителей с целью сравнения массы экстракта и количественного выхода ПАУ. Анализ показал, что при экстракции *n*-гексаном масса выделенного экстракта и суммарное содержание ПАУ в нем выше, чем при экстракции другими растворителями (*n*-гексаном и дихлорметаном в соотношении 10 : 1; 100%-м дихлорметаном). Таким образом, экспериментально было обосновано решение об использовании в качестве экстрагента *n*-гексана для исследования проб поверхностных вод.

При получении экстрактов водные пробы объемом 1 л трижды экстрагировали посредством механического перемешивания с последовательным добавлением порций органических растворителей объемом 10 мл. Полученные экстракты отфильтровывали на мембранном фильтре (0,45 мкм), концентрировали на роторном испарителе и доводили до 1 мл с помощью ацетонитрила.

#### Аппаратура и оборудование

При определении ПАУ в исследуемых образцах использовали метод высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе Shimadzu LC-20 (Япония) с диодно-матричным и флуоресцентным детектированием (в сочетании с колонкой SupelcoSil LC-PAH, фаза C<sub>18</sub>, размер частиц 5 мкм). Спектры фиксировали в интервале 190–500 нм с регистрацией сигнала на длине волны 254 нм для количественного определения изучаемых компонентов. Пробы проанализированы в трехкратной повторности; в качестве результатов указаны средние значения по месту отбора проб. Параметры и условия анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2. Условия высокоэффективного жидкостного определения ПАУ в экстрактах вод  
Table 2. Conditions for high-performance PAHs liquid determination in water extracts

Параметр	Условия
Объем вкола	20 мкл
Характеристики колонки	Фаза C <sub>18</sub>
Температура колонки	40 °С
Элюент	CH <sub>3</sub> CN : H <sub>2</sub> O (бидистиллированная)
Скорость потока растворителя	1 мл/мин
Градиентный режим: CH <sub>3</sub> CN : H <sub>2</sub> O	До 20 мин: соотношение 50 : 50. С 20-й по 40-ю мин: 100%-й CH <sub>3</sub> CN
Детектирование	Диодно-матричное и флуоресцентное
Диапазон длин волн	190–500 нм

Идентификацию и определение содержания проводили с помощью программного обеспечения LC Solution.

#### Стандарты и реактивы

Предварительно были проведены калибровка хроматографа Shimadzu LC-20 и построение градуировочной кривой с использованием государственных стандартных образцов индивидуальных ПАУ производства "Экротхим" (Россия), в состав которых входили нафталин (Naph), 2-метилнафталин (2-MeNaph), флуорен (Flu), фенантрен (Phen), антрацен (Antr), флуорантен (Flt), пирен (Pyr), бенз(а)антрацен (BaA), хризен (Chr), бенз(б)флуорантен (BbF), бенз(к)флуорантен (BkF), бенз(а)пирен (BaP), дибенз(а, h)антрацен (DBA). В ходе работы использовались органические растворители отечественного производства квалификации ОСЧ (гексан, дихлорметан, ацетонитрил).

#### Результаты и обсуждение

В процессе исследования получены экстракты полициклических ароматических углеводородов из модельных смесей и природных поверхностных вод. Для модельных систем установлено распределение ПАУ, представленное на рис. 2.

В водную часть (система 1) переходят ПАУ, обнаруженные в исходном составе дизельного топлива (Мухорткина, 2024). Преобладающими компонентами являются нафталин и фенантрен, в небольших количествах найдены флуорантен и пирен. При контакте воды с древесным углем (система 2) в течение одного месяца происходит перераспределение компонентов: в водную часть переходят флуорантен, пирен и хризен; отмечается невысокое содержание бенз(а)пирена, нафталина, фенантрена. Таким образом, проведенные эксперименты показали, что присутствующие в ДТ и угле ПАУ переходят в водную часть уже спустя месяц контакта с водной фазой.

Ввиду существенного упрощения моделей "ПАУ из дизельного топлива и уголь в водной фазе" по сравнению с реальными природными условиями, целесообразно провести исследование природных

водных объектов, характеризующихся различной степенью техногенной нагрузки, с целью детального изучения качественного и количественного состава ПАУ.

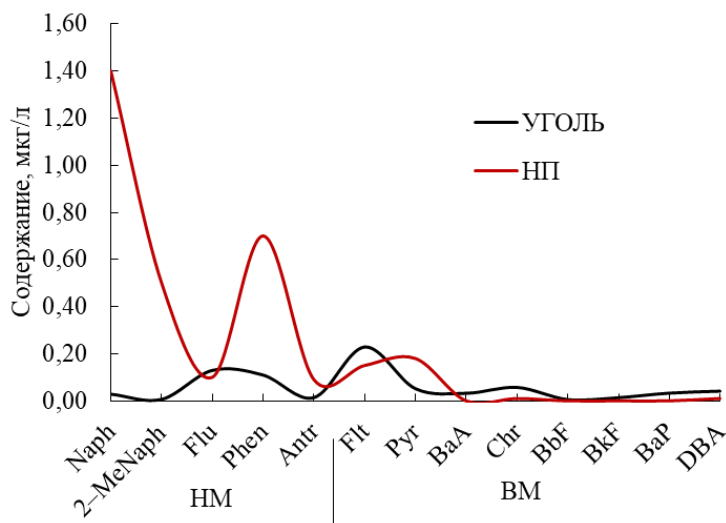


Рис. 2. Распределение ПАУ в модельных смесях  
Fig. 2. Distribution of PAHs in model mixtures

Из проб поверхностных вод, отобранных с участков 1–3 (рис. 1), в результате пробоподготовки получены гексановые экстракты. Установлено, что масса полученного экстракта варьируется в диапазоне от 400 до 1 900 мкг/л. Дальнейший анализ методом высокоэффективной жидкостной хроматографии позволил идентифицировать индивидуальные соединения и определить суммарное содержание ПАУ в исследуемых пробах поверхностных вод.

На рис. 3 представлена типичная хроматограмма образца поверхностной воды с участка 1 и показан порядок выхода следующих индивидуальных ПАУ: нафталин (Naph), 2-метилнафталин (2-MeNaph), флуорен (Flu), фенантрен (Phen), антрацен (Antr), флуорантен (Flt), пирен (Pyr), бенз(а)антрацен (BaA), хризен (Chr), бенз(б)флуорантен (BbF), бенз(к)флуорантен (BkF), бенз(а)пирен (BaP), дибенз(а, h)антрацен (DBA).

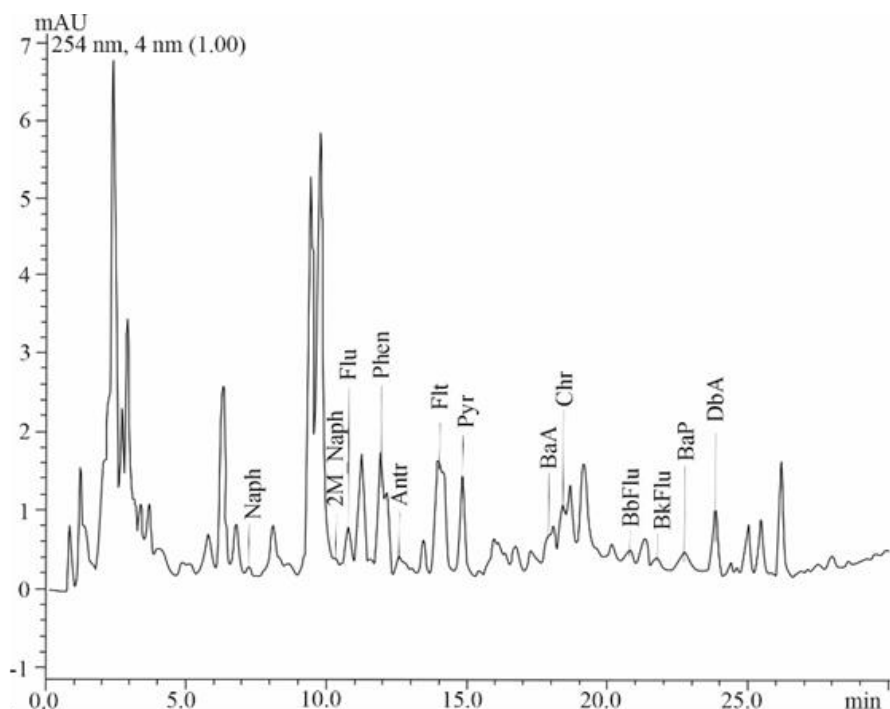


Рис. 3. Типичная хроматограмма экстракта ПАУ в поверхностной воде с участка 1  
Fig. 3. Typical chromatogram of PAH extract from surface water, site 1

В водах с участка 1, пострадавшего от разлива дизельного топлива, суммарное содержание ПАУ составляет 0,25–0,37 мкг/л, водах с участка 2 – 0,40–1,10 мкг/л; поверхностные воды с участка 3 содержат в своем составе 0,24–0,88 мкг/л ПАУ (рис. 4).

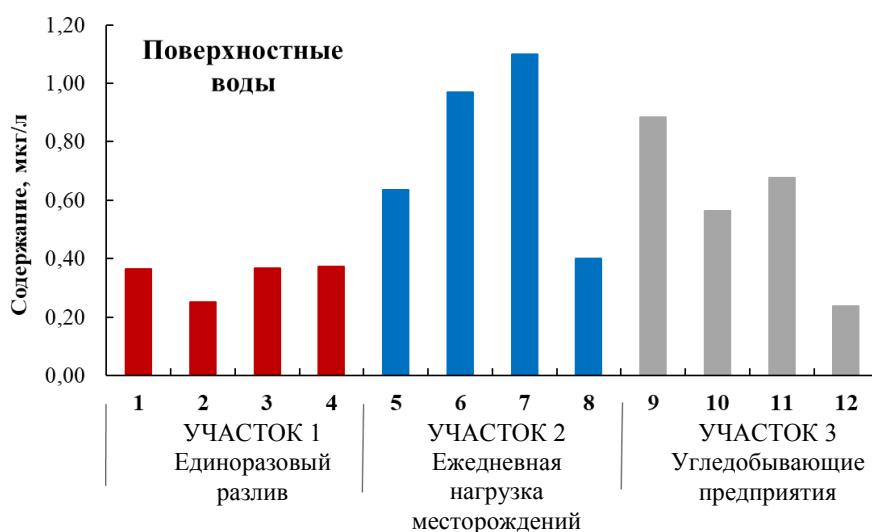


Рис. 4. Содержание ПАУ в поверхностных водах  
Fig. 4. PAH content in surface waters

В поверхностной воде с участка 1, где пробы отобраны через два месяца после работ по ликвидации разлива нефтепродуктов, преобладают низкомолекулярные соединения (НМ). На их долю в среднем приходится 78 % от всех идентифицированных ПАУ, что указывает на вклад преимущественно нефтяной составляющей (Цибарт и др., 2013). НМ-соединения растворимы в воде, содержатся во многих нефтях, могут мигрировать с газом и потоком жидкости через толщи (Халиков, 2018). Среди НМ ПАУ преобладают нафталин, флуорен и фенантрен, среднее содержание которых в поверхностной воде составляет 0,02, 0,08 и 0,12 мкг/л соответственно. Данные соединения также преобладают в составе исходного дизельного топлива и экстракте модельной системы 1 (рис. 5).

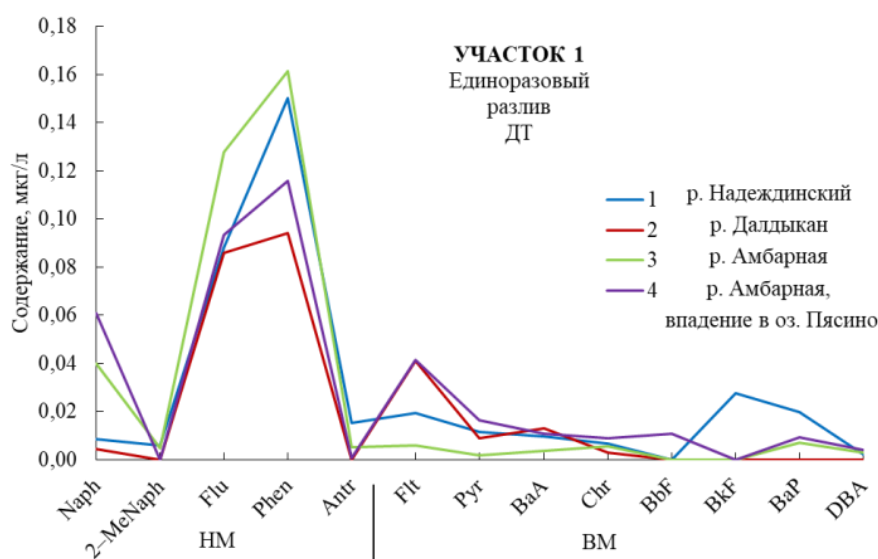


Рис. 5. Распределение ПАУ в поверхностных водах с участка 1  
Fig. 5. PAH distribution in the surface waters, site 1

Флуорантен, который в основном образуется при пиролизических процессах и выбросах автотранспорта, преобладает среди высокомолекулярных соединений (ВМ) в составе поверхностной воды с участка 1, его содержание варьируется от 0,005 до 0,04 мкг/л (Халиков, 2018). Пирен и хризен, которые могут поступать в результате процессов горения, обнаружены в концентрациях 0,008–0,01 мкг/л. Содержание бенз(а)антрацена, бенз(б)флуорантена, бенз(к)флуорантена и дибенз(а, h)антрацена во всех образцах изменяется от 0,002 до 0,009 мкг/л, что может быть связано с выбросами автотранспорта (Халиков, 2018; Мухортин, 2024).

Суммарное содержание ПАУ в поверхностных водах с участка 2 превышает этот же показатель для водоемов участка 1 в 2,5 раза, что свидетельствует о загрязнении водных объектов, находящихся в районе непрерывной эксплуатации объектов нефтегазового комплекса, ПАУ с числом колец более 3. Распределение индивидуальных ПАУ в поверхностной воде с участка 2 представлено на рис. 6.

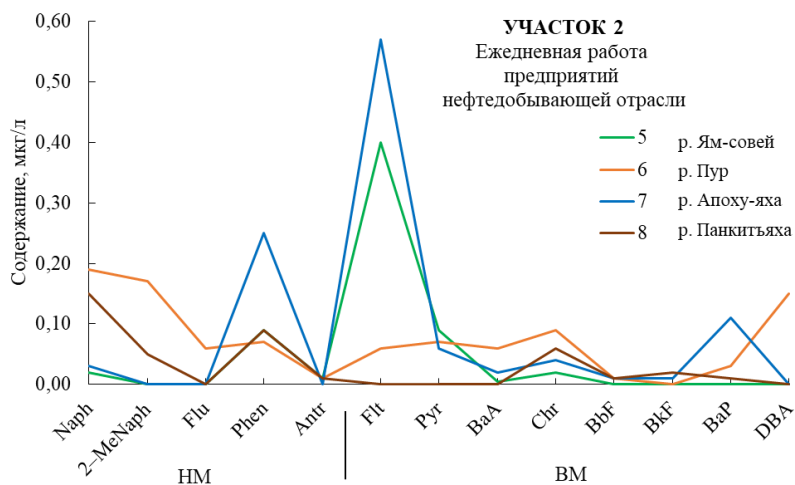


Рис. 6. Распределение ПАУ в поверхностных водах с участка 2  
 Fig. 6. PAH distribution in surface waters of Yamalo-Nenets Autonomous District (YaNAO), site 2

Распределение ПАУ с участка 2 отличается от их распределения в водах с участков 1 и 3; преобладают нафталин, 2-метилнафталин, фенантрен и флуорентен; максимальная концентрация определена для флуорантена (0,57 мкг/л). Содержание остальных высокомолекулярных соединений в поверхностных водах с участка 2 [бенз(а)антрацен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен и дибенз(а,h)антрацен] колеблется в интервале 0,01–0,15 мкг/л.

В поверхностной воде, отобранной с территории, где происходит ежедневная добыча угля (участок 3), распределение характеризуется незначительным преобладанием высокомолекулярных ПАУ, их доля составляет в среднем 52 % (рис. 7). Среди BM ПАУ доминирует флуорантен (0,05–0,29 мкг/л), являющийся распространенным соединением в природных объектах наряду с фенантеном, бенз(а)пиреном и обладающий высокой стабильностью (Король и др., 2024; Опекунов и др., 2015). Бенз(а)антрацен (канцерогенное соединение, вносимое со сточными водами коксо- и нефтехимической промышленности) содержится также в выхлопных газах (Плотникова и др., 2021). Его присутствие в рассматриваемом типе вод указывает на техногенный пирогенный источник поступления, что характерно для данной территории. Среднее содержание бенз(а)антрацена в пробах составляет 0,06 мкг/л. Воды с участка 3 отличаются присутствием в составе дибенз(а,h)антрацена концентрацией 0,01–0,05 мкг/л, источник поступления которого связывают с эндогенными геологическими процессами, происходящими внутри Земли за счет энергии, выделяемой в процессе преобразования сложных органических веществ (Король и др., 2024).

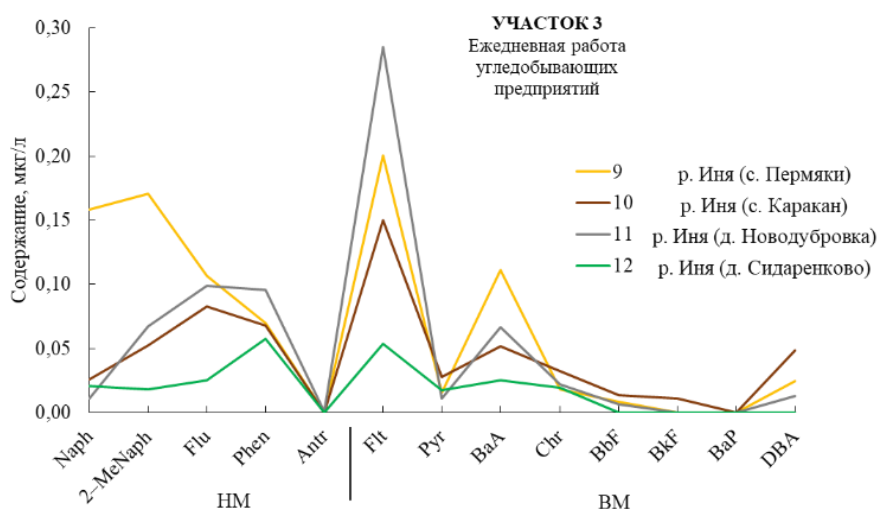


Рис. 7. Распределение ПАУ в поверхностных водах с участка 3  
 Fig. 7. PAH distribution in surface waters of Kemerovo region, site 3

При этом в поверхностных водах доля низкомолекулярных соединений (число ароматических колец до 4) составляет около 48 %. Антрацен, как возможный показатель пирогенности (Светашиева и др., 2023), зафиксирован только на одном участке данной территории и имеет низкую концентрацию (0,0006 мкг/л). В пробах отмечены нафталин и 2-метилнафталин концентрацией 0,05 и 0,08 мкг/л соответственно. Фенантрена обнаружено примерно в два раза меньше, чем в водах с других участков; его среднее содержание в образцах равно 0,07 мкг/л.

На участке 2 зафиксировано содержание бенз(а)пирена, превышающее норму ПДК (0,01 мкг/л). Его поступление в объекты окружающей среды обычно связывают с техногенными процессами (продукты горения, пожары, выбросы промышленности и др.).

Для определения вероятного источника поступления загрязняющих веществ в природные объекты вычисляются индикаторные соотношения исходя из содержания индивидуальных ПАУ. В основном вычисления основаны на отношениях сумм гомологов, близких по молекулярной массе: Flt / (Flt + Pyr), Antr / (Antr + Phen), BaA / (BaA + Chr), HM / VM (Халиков, 2018; Мухортина, 2024; Ширапова и др., 2013). При этом у каждого соотношения есть свои граничные значения, представленные в табл. 3 (Хаустов и др., 2017). Существующие пороговые значения индикаторных соотношений не всегда позволяют однозначно идентифицировать источник загрязнения; информативность соотношений зависит от конкретных условий среды и природных факторов (Хаустов и др., 2025).

Таблица 3. Литературные данные по индикаторным соотношениям концентраций ПАУ  
 Table 3. Literature data on indicator ratios of PAH concentrations

Соотношение концентраций ПАУ	Значение	Происхождение
Antr / (Antr + Phen)	<0,1 >0,1	Петрогенное Пирогенное
Flt / (Flt + Pyr)	0,4 0,4–0,5 >0,5	Петрогенное Сжигание нефти и ее производных Сжигание древесины и угля
BaA / (BaA + Chr)	<0,2 >0,35	Петрогенное Все типы сжигания
$\sum HM / \sum VM$	<1 >1	Пирогенное Петрогенное
Phen / Antr	<10 >10	Пирогенное Петрогенное
Flt / Pyr	>1 <1	Пирогенное Петрогенное

Для получения результатов по модельному эксперименту (системы 1 и 2), определения содержания индивидуальных ПАУ в исследуемых объектах рассчитаны индикаторные соотношения. Значения нанесены на диаграммы, при этом положение модельных точек (уголь, нефтепродукты) показало согласованность с соответствующими областями (рис. 8). Для построения диаграмм использовали соотношения: C1 – отношение Flt / (Flt + Pyr) к Antr / (Antr + Phen); C2 – отношение Flt / (Flt + Pyr) к BaA / (BaA + Chr).

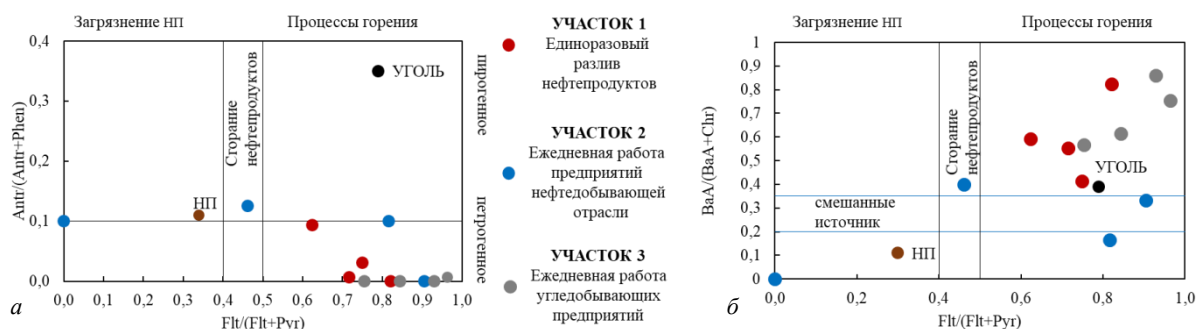


Рис. 8. Диаграммы индикаторных соотношений C1 (а) и C2 (б) для исследуемых участков (Ширапова и др., 2013)

Fig. 8. Diagrams of indicator ratios C1 (a) and C2 (b) for the studied areas (Shirapova et al., 2013)

Согласно результатам расчета соотношения Flt / (Flt + Pyr) и Antr / (Antr + Phen), основной источник поступления ПАУ в исследуемые объекты имеет петрогенное природное происхождение (процессы преобразования углеводородного сырья под воздействием температур, дальнейший контакт с газом или

водами, миграция по толщам и попадание в водные объекты) (Король и др., 2024). Однако в объекты с участка 2, где происходит ежедневная эксплуатация предприятий нефтедобывающей отрасли, поступление ПАУ связано с техногенными и петрогенными процессами (рис. 8, а).

При расчете соотношения  $Flt/(Flt + Pyr)$  и  $BaA/(BaA + Chr)$  зафиксировано, что вероятный источник поступления носит пирогенный характер (рис. 8, б). Возможно, такой результат для объектов с участка 1 обусловлен тем, что высокомолекулярные соединения могут поступать в результате различных процессов, не связанных с разливом дизельного топлива. При этом характер поступления ПАУ в воды с участка 2 петрогенный, связанный как с природными (подток флюидов из толщ), так и с антропогенными (разлив или сжигание нефтепродуктов) факторами.

Результаты исследования расширяют представления о распределении и вероятных источниках поступления полициклических ароматических углеводородов в водные объекты, расположенные на территориях с техногенной нагрузкой.

### Заключение

В ходе проведенных модельных экспериментов, направленных на уточнение и детализацию процессов перехода полициклических ароматических углеводородов из дизельного топлива и древесного угля в водную среду, установлено, что уже через месяц контакта их содержание возрастает в водной среде до 5,16 мкг/л.

Анализ экстрактов поверхностных вод на участках с различной техногенной нагрузкой показал, что максимально высокие концентрации полициклических ароматических углеводородов определены в зоне ежедневной эксплуатации предприятий нефтедобывающей отрасли (участок 2), что свидетельствует о хроническом характере загрязнения этих водных объектов. Характерный набор соединений для участка 2 включает нафталин, фенантрен, хризен и бенз(а)пирен, при этом максимальная концентрация установлена для флуорантена. Особенностью участка 3, где ежедневно ведется эксплуатация угледобывающих предприятий, является присутствие в составе полициклических ароматических углеводородов дибенз(а,һ)антрацена. В то время как на участке 1, подвергшемся антропогенному разливу дизельного топлива, установлено преобладание нафталина, флуорена и фенантрена.

Согласно результатам расчета соотношений  $Flt/(Flt + Pyr)$  и  $Antr/(Antr + Phen)$ , основной источник поступления ПАУ в исследуемые объекты имеет петрогенное природное происхождение. При анализе соотношений  $Flt/(Flt + Pyr)$  и  $BaA/(BaA + Chr)$  выяснено, что основной вклад вносят высокомолекулярные соединения, свидетельствующие о вероятном пирогенном источнике поступления, т. е. соединения могут поступать в результате смешанных процессов, в том числе связанных с разливом нефтепродуктов. Полученные расчетные данные демонстрируют приемлемую степень согласованности с предполагаемыми источниками поступления полициклических ароматических углеводородов в исследуемые объекты.

Применение комплекса индикаторных соотношений в ходе анализа образцов позволяет сгруппировать результаты и провести оценку по источнику поступления. Полученные расчетные данные демонстрируют приемлемую степень согласованности с предполагаемыми источниками поступления полициклических ароматических углеводородов в исследуемые объекты. Однако существует ряд проблем, связанных с расчетами и последующей интерпретацией результатов, таких как наложение диапазонов значений для различных источников, влияние процессов трансформации и миграции соединений. В процессе дальнейших исследований целесообразно применять методы статистического анализа при выборе более информативных индикаторных соотношений.

### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-00052; URL: <https://rscf.ru/project/25-77-00052/>.

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Басова Е. М., Иванов В. М. Современное состояние высокоэффективной жидкостной хроматографии полициклических ароматических углеводородов // Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия. 2011. Т. 52, № 3. С. 163–174. EDN: OGJYPV.
- Волкова Н. А., Иванова И. С., Соколов Д. А., Колубаева Ю. В. [и др.]. Концентрации и источники полициклических ароматических углеводородов в воде и донных отложениях рек северных нефтегазодобывающих территорий Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 4. С. 135–148. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3924>. EDN: NQCUTR.
- Горшков А. Г., Изосимова О. Н., Кустова О. В. Определение приоритетных полициклических ароматических углеводородов в воде на следовом уровне концентраций // Журнал аналитической химии. 2019. Т. 74, № 8. С. 580–587. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0044450219080085>. EDN: IYLLMS.

- Дмитриенко С. Г., Апяри В. В., Горбунова М. В., Толмачева В. В. [и др.]. Гомогенная жидкостная микроэкстракция органических соединений // Журнал аналитической химии. 2020. Т. 75, № 11. С. 963–979. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0044450220110055>. EDN: RLGKEB.
- Другов Ю. С., Родин А. А. Пробоподготовка в экологическом анализе : практическое руководство. М. : Лабпресс, 2005. 755 с.
- Король И. С., Чуйкина Д. И., Мухортина Н. А., Домрочева Е. В. [и др.]. Особенности состава полиароматических углеводородов в подземных водах на добывающих территориях угольного (Кузбасс) и нефтяного (Западная Сибирь, Ханты-Мансийский автономный округ) регионов // Успехи современного естествознания. 2024. № 10. С. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.38322>. EDN: MGFDPQ.
- Котова В. Е., Андреев Ю. А. Изучение условий извлечения ПАУ из донных отложений при определении методом ВЭЖХ со спектрофлуориметрическим детектированием // Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т. 19, № 4. С. 407–417. DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/779>. EDN: WUCCXO.
- Кукушкин С. Ю., Опекунова М. Г., Опекунов А. Ю. Проблемы организации и проведения экологического мониторинга // Экологические проблемы природопользования : труды XX Междунар. молодежной науч. конф. "Геоэкология – 2025" памяти профессора В. В. Куриленко, Санкт-Петербург, 6–8 октября 2025 г. СПб. : Изд-во ВВМ, 2025. Т. XX. С. 55–63. EDN: KTDEOI.
- Мухортина Н. А. Особенности состава и распределения нефтяных компонентов в почвах и водных объектах северных районов Красноярского края и Западной Сибири в связи с источниками загрязнения : дис. ... канд. хим. наук. Томск, 2024. 114 с.
- Опекунов А. Ю., Митрофанова Е. С., Санни С., Коммедал Р. [и др.]. Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях рек и каналов Санкт-Петербурга // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2015. № 4. С. 98–109. EDN: VHLPXR.
- Пастухов А. В., Каверин Д. А., Габов Д. Н. Полициклические ароматические углеводороды в мерзлотных бугристых торфяниках на европейском Северо-Востоке // Почвоведение. 2017. № 7. С. 814–823. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X17070097>. EDN: YTMBAD.
- Пиковский Ю. И., Хлынина Н. И., Кучеров В. Г. Полициклические ароматические углеводороды в горных породах и почвах импактного кратера Сильян (Швеция) // Литология и полезные ископаемые. 2021. № 3. С. 243–256. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0024497x2103006x>. EDN: LXCZPZ.
- Плотникова О. А. Усовершенствование флуориметрического метода для определения полициклических ароматических углеводородов в объектах окружающей среды // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-044-048>. EDN: MQBSOA.
- Плотникова О. А., Мельников Г. В., Тихомирова Е. И. Полициклические ароматические углеводороды: характеристики, источники, нормирование, спектроскопические методы определения (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 12–19. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-012-019>. EDN: GYUUMJ.
- Светашева Д. Р., Татарников В. О., Очеретный М. А., Бакун О. И. Полиароматические углеводороды в донных отложениях Каспийского моря // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2023. Т. 165, кн. 2. С. 263–280. DOI: <https://doi.org/10.26907/2542-064x.2023.2.263-280>. EDN: YXCHNV.
- Соколов Д. А., Иванова И. С., Морозов С. В., Пчельникова Т. Г. [и др.]. Полициклические ароматические углеводороды в торфяных олиготрофных почвах северных территорий Западной Сибири // Почвоведение. 2022. № 10. С. 1228–1240. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0032180x22100148>. EDN: WLPWJH.
- Темердашев З. А., Мусорина Т. Н., Червоная Т. А., Арутюнян Ж. В. Возможности и ограничения методов твердофазной и жидкостной экстракции при определении полициклических ароматических углеводородов в объектах окружающей среды // Журнал аналитической химии. 2021. Т. 76, № 12. С. 1059–1076. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0044450221120136>. EDN: OHBSKO.
- Халиков И. С. Идентификация источников загрязнения объектов природной среды полициклическими ароматическими углеводородами с использованием молекулярных соотношений // Экологическая химия. 2018. Т. 27, № 2. С. 76–85. EDN: XOSDGH.
- Халиков И. С. Модификация метода твердофазной экстракции ПАУ с помощью дисков ENVI-18 DSK // Образование и наука : современное состояние и перспективы развития: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 31 августа 2015 г. Тамбов, 2015. Том 3. С. 171–172. EDN: UIJHPZ.
- Хаустов А. П., Редина М. М. "Экологическое детектирование" продуктов сгорания отходов на основе концентраций полициклических ароматических углеводородов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 494–510. DOI: <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-494-510>. EDN: IORKRU.
- Хаустов А. П., Редина М. М. Геохимические маркеры на основе соотношений концентрации ПАУ в нефти и нефтезагрязненных объектах // Геохимия. 2017. № 1. С. 57–67. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0016752516120049>. EDN: XHMMNH.

- Цибарт А. С., Геннадиев А. Н. Полициклические ароматические углеводороды в почвах: источники, поведение, индикационное значение (обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 788–802. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0032180x13070125>. EDN: QСМТОВ.
- Шамилишвили Г. А., Абакумов Е. В., Габов Д. Н., Алексеев И. И. Особенности фракционного состава полициклических ароматических углеводородов и полиэлементного загрязнения почв урбанизированных территорий и их гигиеническая характеристика (на примере почв функциональных зон Санкт-Петербурга) // Гигиена и санитария. 2016. Т. 95, № 9. С. 827–837. DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-9-827-837>. EDN: WWULIL.
- Шашков М. В., Сидельников В. Н. Определение источников эмиссии полициклических ароматических углеводородов в атмосферном воздухе // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26, № 10. С. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-29-35>. EDN: QBVHXR.
- Ширапова Г. С., Утюжникова Н. С., Рабина О. А., Вялков А. И. [и др.]. Загрязнение полиароматическими углеводородами бассейна озера Байкал: озеро Гусиное // Химия в интересах устойчивого развития. 2013. Т. 21, № 2. С. 189–195. EDN: SZUODJ.
- Belis C. A., Offenthaler I., Weiss P. Semivolatiles in the forest environment: The case of PAHs // *Organic Xenobiotics and Plants* / eds.: P. Schröder, C. Collins. Springer, Dordrecht, 2011. P. 47–73. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9852-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9852-8_3). (Plant Ecophysiology. Vol. 8)
- Krauss A., Wilcke W., Martius C., Bandeira A. G. [et al.]. Atmospheric versus biological sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a tropical rain forest environment // *Environmental Pollution*. 2005. Vol. 135, Iss. 1. P. 143–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.09.012>.

## References

- Basova, E. M., Ivanov, V. M. 2011. The current state of high-performance liquid chromatography of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Moscow University Chemistry Bulletin*, 52(3), pp. 163–174. EDN: OGYJYV. (In Russ.)
- Volkova, N. A., Ivanova, I. S., Sokolov, D. A., Kolubaeva, Yu. V. et al. 2023. Concentrations and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and bottom sediments of rivers in the northern oil and gas producing territories of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering*, 334(4), pp. 135–148. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3924>. EDN: NQCUTR. (In Russ.)
- Gorshkov, A. G., Izosimova, O. N., Kustova, O. V. 2019. Determination of priority polycyclic aromatic hydrocarbons in water at trace concentrations. *Journal of Analytical Chemistry*, 74(8), pp. 580–587. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0044450219080085>. EDN: IYLLMS. (In Russ.)
- Dmitrienko, S. G., Apyari, V. V., Gorbunova, M. V., Tolmacheva, V. V. et al. 2020. Homogeneous liquid microextraction of organic compounds. *Journal of Analytical Chemistry*, 75(11), pp. 963–979. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0044450220110055>. EDN: RLGKEB. (In Russ.)
- Drugov, Yu. S., Rodin, A. A. 2005. Sample preparation in ecological analysis – A practical guide. Moscow. (In Russ.)
- Korol, I. S., Chuikina, D. I., Mukhortina, N. A., Domrocheva, E. V. et al. 2024. Features of the composition of polyaromatic hydrocarbons in groundwater in the mining territories of the coal (Kuzbass) and oil (Western Siberia, Khanty-Mansi Autonomous Okrug) regions. *Advances in Current Natural Sciences*, 10, pp. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.38322>. EDN: MGFDPQ. (In Russ.)
- Kotova, V. E., Andreev, Yu. A. 2019. Study of the conditions for extracting PAHs from bottom sediments using HPLC with spectrofluorimetric detection. *Sorption and Chromatography Processes*, 19(4), pp. 407–417. DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/779>. EDN: WUCCXO. (In Russ.)
- Kukushkin, S. Yu., Opekunova, M. G., Opekunov, A. Yu. 2025. Problems of organizing and conducting environmental monitoring. Proceedings of the International Youth Scientific Conference in Memory of Professor V. V. Kurilenko. Environmental Problems of Nature Management. *Geoecology – 2025*, St. Petersburg, pp. 55–63. EDN: KTDEOI. (In Russ.)
- Mukhortina, N. A. 2024. Features of the composition and distribution of petroleum components in soils and water bodies of the northern regions of the Krasnoyarsk Territory and Western Siberia in connection with sources of pollution. Ph.D. Thesis. Tomsk. (In Russ.)
- Opekunov, A. Yu., Mitrofanova, E. S., Sunny, S., Kommedal, R. et al. 2015. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the bottom sediments of the rivers and canals of St. Petersburg. *Bulletin of St. Petersburg University*, 4, pp. 98–109. EDN: VHLPXR. (In Russ.)
- Pastukhov, A. V., Kaverin, D. A., Gabov, D. N. 2017. Polycyclic aromatic hydrocarbons in permafrost hummocky peat bogs in the European Northeast. *Soil Science*, 7, pp. 814–823. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X17070097>. EDN: YTMBAD. (In Russ.)
- Pikovskiy, Yu. I., Khlynina, N. I., Kucherov, V. G. 2021. Polycyclic aromatic hydrocarbons in rocks and soils of the Siljan impact crater (Sweden). *Lithology and Minerals*, 3, pp. 243–256. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0024497x2103006x>. EDN: LXCZPZ. (In Russ.)

- Plotnikova, O. A. 2021. Improvement of the fluorimetric method for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in environmental objects. *Theoretical and Applied Ecology*, 2, pp. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-044-048>. EDN: MQBSOA. (In Russ.)
- Plotnikova, O. A., Melnikov, G. V., Tikhomirova, E. I. 2021. Polycyclic aromatic hydrocarbons: characteristics, sources, rationing, spectroscopic methods of determination (review). *Theoretical and Applied Ecology*, 4, pp. 12–19. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-012-019>. EDN: GYUJUM. (In Russ.)
- Svetasheva, D. R., Tatarnikov, V. O., Ocheretny, M. A., Bakun, O. I. 2023. Polyaromatic hydrocarbons in the bottom sediments of the Caspian Sea. *Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*, 165, Book 2, pp. 263–280. DOI: <https://doi.org/10.26907/2542-064x.2023.2.263-280>. EDN: YXCHNV. (In Russ.)
- Sokolov, D. A., Ivanova, I. S., Morozov, S. V., Pchelnikova, T. G. et al. 2022. Polycyclic aromatic hydrocarbons in peat oligotrophic soils of the northern territories of Western Siberia. *Soil Science*, 10, pp. 1228–1240. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0032180x22100148>. EDN: WLPWJH. (In Russ.)
- Temerdashev, Z. A., Musorina, T. N., Chervonnaya, T. A., Arutyunyan, Zh. V. 2021. Opportunities and limitations of solid-phase and liquid extraction methods for determining polycyclic aromatic hydrocarbons in environmental samples. *Journal of Analytical Chemistry*, 76(12), pp. 1059–1076. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0044450221120136>. EDN: OHBSKO. (In Russ.)
- Khalikov, I. S. 2018. Identification of sources of pollution of environmental objects by polycyclic aromatic hydrocarbons using molecular ratios. *Environmental Chemistry*, 27(2), pp. 76–85. EDN: XOSDGH. (In Russ.)
- Khalikov, I. S. 2015. Modification of the method of solid-phase PAH extraction using ENVI-18 DSK discs. Coll. of scientific papers based on the materials of the international scientific and practical conference *Education and science: current state and development prospects*, Tambov, August 31, 2015. Tambov, pp. 171–172. EDN: UIJHPZ. (In Russ.)
- Khaustov, A. P., Redina, M. M. 2025. "Ecological detection" of waste incineration products based on polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 33(4), pp. 494–510. DOI: <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-494-510>. EDN: IORKRU. (In Russ.)
- Khaustov, A. P., Redina, M. M. 2017. Geochemical markers based on PAH concentration ratios in oil and oil-contaminated sites. *Geochemistry*, 1, pp. 57–67. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0016752516120049>. EDN: XHMMHX. (In Russ.)
- Tsibart, A. S., Gennadiev, A. N. 2013. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils: Sources, behavior, indicative value (review). *Soil Science*, 7, pp. 788–802. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0032180x13070125>. EDN: QCMTOB. (In Russ.)
- Shamilishvili, G. A., Abakumov, E. V., Gabov, D. N., Alekseev, I. I. 2016. Features of the fractional composition of polycyclic aromatic hydrocarbons and polyelement contamination of soils of urbanized territories and their hygienic characteristics (on the example of soils of functional zones of St. Petersburg). *Hygiene and Sanitation*, 95(9), pp. 827–837. DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-9-827-837>. EDN: WWULIL. (In Russ.)
- Shashkov, M. V., Sidelnikov, V. N. 2022. Determination of emission sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric air. *Ecology and Industry of Russia*, 26(10), pp. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-29-35>. EDN: QBVHXR. (In Russ.)
- Shirapova, G. S., Irons, N. S., Rabina, O. A., Vyalkov, A. I. et al. 2013. Pollution by polyaromatic hydrocarbons of Lake Baikal basin: Lake Gusinoe. *Chemistry for Sustainable Development*, 21(2), pp. 189–195. EDN: SZUODJ. (In Russ.)
- Belis, C. A., Offenthaler, I., Weiss, P. 2011. Semivolatiles in the forest environment: The case of PAHs. In *Organic Xenobiotics and Plants*. Eds.: P. Schröder, C. Collins. Springer, Dordrecht, pp. 47–73. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9852-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9852-8_3). (Plant Ecophysiology. Vol. 8)
- Krauss, A., Wilcke, W., Martius, C., Bandeira, A. G. et al. 2005. Atmospheric versus biological sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a tropical rain forest environment. *Environmental Pollution*, 135(1), pp. 143–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.09.012>.

#### Сведения об авторе

**Мухортина Наталья Андреевна** – пр. Академический, 4, г. Томск, Россия, 63405;  
Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
канд. хим. наук, науч. сотрудник;  
e-mail: [volkovana@ipgg.sbras.ru](mailto:volkovana@ipgg.sbras.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

**Natalia A. Mukhortina** – 4 Akademichesky Ave., Tomsk, Russia, 634055;  
Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology  
and Geophysics of Siberian Branch RAS, Cand. Sci. (Chemistry), Researcher;  
e-mail: [volkovana@ipgg.sbras.ru](mailto:volkovana@ipgg.sbras.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>