

УДК 550.461

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И СОСТАВ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ТЕРМАЛЬНЫХ ВОДАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Н.А. Мухортина, Е.В. Зиппа

*Томский филиал Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, д. 4, Россия*

Получены новые данные о составе и распределении полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в термальных водах и водовмещающих породах Байкальской рифтовой зоны. Показано, что суммарное содержание всех идентифицированных индивидуальных соединений в термах составляет 0,17-1,15 мкг/л, во вмещающих породах 0,021-1,19 мкг/кг. В горячих источниках преобладают нафталин, фенантрен и дибенз(а,h)антрацен. В породах преобладающими являются фенантрен, флуорантен и дибенз(а,h)антрацен. Установлены корреляционные зависимости, отражающие рост суммарного содержания ПАУ по мере роста величины общей минерализации вода и концентраций азота и гелия в составе выделяющихся газов. Рассчитанные коэффициенты техногенной нагрузки показали низкий уровень загрязнения для всех исследуемых источников. Согласно индикаторным соотношениям определен генезис ПАУ. С одной стороны, ПАУ природного петрогенного происхождения образуются в термах в результате геохимических преобразований органического вещества в условиях высоких температур и давлений и микробальной активности, и поступают с миграцией водного и газоконденсатного раствора по разломам и трещинам. С другой стороны, некоторые соединения имеют природный пирогенный генезис, в результате которого продукты пиролиза попадают в термы в приповерхностных условиях или при смешении терм с холодными водами. Результаты исследования позволили более детально охарактеризовать состав терм, определить генезис органических соединений и в дальнейшем послужат основой для детального описания концептуальной модели формирования состава термальных вод исследуемого региона.

*Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, термальные воды, генезис ПАУ, техногенная нагрузка, система вода-порода*

## DISTRIBUTION AND COMPOSITION OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN THERMAL WATERS OF THE CENTRAL PART OF THE BAIKAL RIFT ZONE

N.A. Mukhortina, E. V. Zippa

*<sup>1</sup>Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, Akademicheskii ave 4*

New data on the composition and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHC) in thermal waters and host rocks in Baikal Rift Zone were obtained. It was shown that the total content of all identified individual compounds is 0.17-1.15 µg/L in the thermal springs and is 0.021-1.19 µg/kg in the rock. Naphthalene, phenanthrene, and dibenzo[a,h]anthracene dominate in the water. Phenanthrene, fluoranthene, and dibenzo[a,h]anthracene are predominant in the rock. The total PAHC content increased with TDS of water and with N<sub>2</sub> and He growth in escaped gases. The calculated coefficients of technogenic load showed a low level of pollution for all studied sources. According to indicator ratios, the PAHC origin was determined. On the one hand, PAHC in thermal waters had petrogenic origin and were formed due to geochemical transformations of organic matter under high temperatures and pressures and microbial activity, entered with aqueous and gas along faults and fractures. On the other hand, some compounds have a natural pyrogenic origin, where pyrolysis products enter springs either at near-surface conditions or when mixing. The results let to characterize the composition of thermal waters in more detail and to describe a conceptual model the thermal waters composition formation in the studied region.

*Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons, thermal waters, genesis of PAHs, technogenic load, water-rock system*

## ВВЕДЕНИЕ

Органическое вещество является одним из основных компонентов природных вод и неотъемлемой частью при описании процессов взаимодействия в системе вода-порода-газ-органическое вещество. Содержащиеся в термальных водах углеводороды и их производные в той или иной степени участвуют в био- и геохимических процессах, играя важную роль в образовании органических миграционных форм химических элементов и комплексных соединений. Этот процесс оказывает влияние на перевод химических элементов из породы в водный раствор, изменяет миграционную способность химических элементов и, в итоге, влияет на формирование состава термальных вод [Конторович и др., 2000, Крайнов и др. 2012; Потурай и др., 2025].

Кроме этого, присутствие углеводородов в лечебных термоминеральных водах может оказывать влияние на бальнеологические свойства используемых вод, усиливая их действие за счет терапевтически значимых компонентов или, наоборот, оказывая вред в результате присутствия опасных для здоровья соединений [Потурай и др., 2025]. Предполагается, что источники термальных вод содержат большое количество органических компонентов с возможным биологическим эффектом, которые могут способствовать лечебному воздействию [Швец, Кирюхин, 1974; Шпейзер и др., 2012; González-Barreiro et al., 2009; Fekete et al., 2012; Szabo, Varga, 2019]. Учитывая значимость вклада органических соединений в формирование состава термальных вод и их бальнеологических свойств, актуальными являются вопросы количества, состава и генезиса органического вещества в горячих источниках.

Происхождение органического вещества в термальных водах обусловлено комплексом различных процессов, связанных как с жизнедеятельностью термофильных организмов, так и с химическими превращениями, а также со структурными изменениями и распадом сложных органических соединений на более простые под действием высоких температур и давлений. В результате этих процессов образуются различные соединения, являющиеся представителями таких групп как нормальные алканы, ароматические углеводороды, спирты, кислоты, эфиры [Потурай, 2023].

С экологической точки зрения, особое внимание уделяется стойким и токсичным органическим веществам, которые способны к миграции, сорбции и накоплению, оказывая вредное воздействие на живые организмы даже в невысоких концентрациях [Ширапова и др., 2018]. Представителями таких веществ, в частности, являются индивидуальные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), структуру которых образуют два и более бензольных кольца [Волкова и др., 2023]. Они относятся к опасным и стойким загрязнителям, проявляющим канцерогенные и мутагенные свойства, и могут быть как природного, так и антропогенного происхождения. Источниками ПАУ в природной среде служат углеводородные потоки литогенного происхождения и биогеохимические процессы. Также ПАУ могут образовываться в результате высокотемпературного воздействия на органическое вещество [Кошовский и др., 2017].

Большинство ароматических углеводородов не относятся к числу типичных биогенных компонентов живых организмов из-за их канцерогенных и токсичных

свойств. Поэтому, вероятно, их образование связано с термогенными процессами в условиях высоких температур (деструкция более сложных органических веществ). Актуальность исследования обусловлена необходимостью получения фактических данных по составу органических соединений, представляющих интерес как с точки зрения фундаментальной науки, позволяющий оценить влияние органической составляющей на формирование состава терм, так и с экологической точки зрения. В рамках настоящего исследования наибольший интерес представляет количественный состав ПАУ, их генезис и роль в процессах формирования состава термальных вод и во взаимодействии в системе вода-порода. Полученные данные позволят описать распределение ПАУ в системе термы-порода-органическое вещество и детализировать концептуальную модель формирования состава низко-минерализованных термальных вод центральной части Байкальской рифтовой зоны. В этой связи целью исследования является получение новых данных о составе и генезисе полициклических ароматических углеводородов не только в термальных водах центральной части Байкальской рифтовой зоны, но и во вмещающих горных породах.

## **ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Район исследований приурочен к Байкальской рифтовой зоне (БРЗ), которая относится к одному из крупнейших элементов земной коры – Центрально-Азиатскому подвижному поясу. Формирование Байкальской рифтовой зоны началось в период верхнего мела и продолжается в настоящее время. Кроме этого, территория характеризуется проявлением неоген-четвертичного вулканизма [Лунина, 2015].

Источники термальных вод центральной части БРЗ, являющиеся объектом исследования, в основном приурочены к Баргузинской долине (рис. 1). Выходы терм приурочены к протерозойским и палеозойским интрузивным породам, которые представлены крупно- и среднезернистыми порфирировидными, нередко гнейсовидными, биотитовыми, биотит-роговообманковыми, роговообманковыми гранитами, граносиенитами, гранодиоритами, сиенитами и диоритами. Также встречаются гранитоидные разности архейского, протерозойского, палеозойского и мезокайнозойского этапов развития, которые представлены гнейсогранитами, гранитами, сиенитами, диоритами. Разности основного состава представлены габбровыми массивами, чаще всего выходящими на дневную поверхность в виде небольших штокообразных тел [Лунина, 2015; Плюснин и др., 2013].



**Рис. 1.** Схема расположения исследуемых термальных источников центральной части Байкальской рифтовой зоны

Отбор проб термальных вод проводили в сентябре 2024 года в стеклянную емкость с последующей консервацией *n*-гексаном. По требованиям аналитических испытаний было отобрано по 3 пробы с каждой точки отбора [ГОСТ Р 59024, 2020]. Определение содержания полициклических ароматических углеводородов в водном образце проводили в соответствии с действующей методикой государственного экологического контроля ПНД Ф 14.1:2:4.70-96 в лаборатории физико-химических исследований керн и пластовых флюидов Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (г. Томск). Полициклические ароматические углеводороды выделяли 3-х кратной экстракцией *n*-гексаном из 1 литра пробы, полученный экстракт упаривали на ротормном испарителе при температуре водяной бани 40 °С до следовых количеств гексана, доводили объем пробы до 1 мл ацетонитрилом.

Отбор образцов пород осуществляли в местах непосредственной разгрузки термальных вод с помощью геологического молотка. Выделение ПАУ из породы проводили по методике РД 52.24.537–2019. Навеску пробы (10 г) трижды экстрагировали смесью гексана и ацетонитрила, взятых в соотношении 10:1, экстракты фильтровали через бумажный фильтр для последующего концентрирования в ротормном испарителе до объема 0,5 мл. Далее очищали методом тонкослойной хроматографии на оксиде алюминия и доводили объем исследуемого образца до 1 мл ацетонитрилом для последующего анализа.

Содержание ПАУ определяли с использованием метода высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), на хроматографе Shimadzu LC-20 (Shimadzu, Япония) с одновременным диодноматричным и флуоресцентным детектированием, на обращенно-фазовой колонке 150\*4.6 мм SupelcoSil LC-PAH, фаза C<sub>18</sub>, размер частиц 5 мкм. В качестве элюента использовали смесь ацетонитрила (1 сорт) и бидистиллированной воды. Хроматографирование проводили в градиентном режиме, скорость потока растворителя составляла 1 мл/мин, объем пробы 20 мкл, рабочая температура колонки – 40 °С, время анализа 30 минут, диапазон длин волн 190–500 нм. Калибровку прибора проводили с использованием государственных стандартных образцов индивидуальных полициклических ароматических углеводородов («Экросхим») и их смесей. Для идентификации и расчета концентраций ПАУ в исследуемых пробах использовали программное обеспечение LC Solution. Все пробы были проанализированы не менее трех раз и в результатах приведены средние значения.

Выявление взаимосвязей между концентрациями химических элементов, физико-химическими параметрами, компонентами газовой составляющей и выделенными ПАУ в исследуемых термальных водах проводили посредством расчёта коэффициента корреляции Пирсона [Pearson, 1896]. Предварительно гидрогеохимические данные были логарифмически преобразованы для нормализации переменных и стандартизированы с использованием средних значений z-баллов для устранения влияния различных единиц измерения, соответствующих переменным. Коэффициент корреляции (обозначаемый r) и p-значение представляют собой степень корреляции и ее значимость соответственно. Значения коэффициента корреляции составляют от -1 до 1. Знак коэффициента корреляции определяет направление взаимосвязи, тогда как его величина определяет степень связи. Следовательно, чем больше величина, тем сильнее взаимосвязь. В данном исследовании значения  $r > 0,7$ ,  $0,7 > r > 0,5$  и  $r < 0,5$  считались признаками сильной, умеренной и слабой корреляции соответственно. Значение p варьируется от 0 до 1, где малое значение p указывает на высокую степень значимости корреляции [Hotelling, 1935; Barzegar et al., 2020]. Статистический анализ проводился с использованием программного пакета STATISTICA 13.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты анализа химического состава вод, подробно описанного нами ранее в статье [Zirra et al., 2025] показали, что исследуемые термальные воды в основном являются ультрапресными, щелочными, с переменчивой окислительно-восстановительной обстановкой. Величина общей минерализации вод не превышает 1 г/л и варьирует от 273 до 941 мг/л. При этом величина рН составляет 8,14-9,43, за исключением одного родника (7), где среда является близкой к нейтральной, рН составляет 7,4. По величине E<sub>h</sub> термальные воды характеризуются как восстановительной (E<sub>h</sub> от -438 до -60 мВ), так и переменной окислительно-восстановительной обстановкой (E<sub>h</sub> 57-113 мВ). Измеренная на поверхности температура воды в горячих источниках составляет 19,8-75,6 °С. По химическому

составу воды преимущественно относятся к SO<sub>4</sub>-Na типу, в меньшей степени к HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>-Na, и лишь в единичном случае к SO<sub>4</sub>-Ca-Na типам.

Концентрации доминирующих анионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> составляют соответственно 70-489 мг/л и 98-586 мг/л. Хлор-иона содержится несколько меньше, интервал концентраций составляет от 9,04 до 48,83 мг/л. Среди катионов преобладает Na<sup>+</sup>, концентрации которого изменяются от 77 до 263 мг/л. Содержания Ca<sup>2+</sup> (4,7-44,9 мг/л), Mg<sup>2+</sup> (0,01-0,93 мг/л) и K<sup>+</sup> (0,87-8,35 мг/л) достаточно низкие. Кроме этого, для исследуемых вод характерны повышенные концентрации фтора и кремния. Концентрации F<sup>-</sup> составляют 3,4-19,9 мг/л, содержание SiO<sub>2</sub> находится в диапазоне 54-118 мг/л. Фосфаты содержатся в небольших количествах, концентрации PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> варьируют от 0,01 до 0,07 мг/л. Содержание органического углерода не превышает 4 мг/л (C<sub>орг.</sub> 0,05-3,94 мг/л), а соотношение ФК/ГК изменяется от 1,93 до 4,55.

В предыдущих наших исследованиях [Poturay et al., 2026] идентифицировано 211 соединение углеводов и их производных, которые были отнесены к 18 гомологическим рядам. К гомологическим рядам с максимальными относительными концентрациями относятся нормальные и изо- алканы, занимающие в среднем 40 % от состава ОВ, а также ароматические углеводороды (21 %) и эфиры карбоновых кислот (17 %). В меньшей степени содержится алкенов, альдегидов, спиртов, терпенов, фталатов и кетонов, занимающие в сумме 20 % от состава органического вещества. Кроме этого, установлены циклоалканы, диметоксиалканы, карбоновые кислоты, N-содержащие соединения, стероиды, а также циклическая молекулярная сера, среднее относительное содержание которых незначительно и колеблется в районе 2 % [Poturay et al., 2026].

Используемая нами методика позволила идентифицировать следующий набор индивидуальных ПАУ в исследуемых термах: 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,һ)антрацен (DBA). К группе низкомолекулярных соединений (НМ) были отнесены нафталин, 2-метилнафталин, флуорен, фенантрен и антрацен; остальные ПАУ – к высокомолекулярным (ВМ).

#### *Содержание ПАУ в термальных водах*

Суммарное содержание полициклических ароматических углеводородов в термальных водах варьирует от 0,17 до 1,15 мкг/л, результаты представлены в таблице 1. Максимальная концентрация определена в источниках Гусихинском (1,15 мкг/л) и Умхейском (1,05 мкг/л), минимальная зафиксирована в Кулиных болотах (0,17 мкг/л) (Рис. 2).

**Таблица 1.** Содержание полициклических ароматических углеводородов в термальных водах, мкг/л

Источники	Горячинский	Зологой ключ	Кулиные болота	Зменный	Гусихинский	Толстухинский	Алгинский	Уринский	Гаргинский	Аллинский-1	Аллинский-2	Кучигерский	Умхейский	Сетойский
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Naph	0,005	-	-	0,027	0,016	0,006	0,014	0,008	0,013	0,012	0,038	0,014	0,029	0,032
2-MNaph	0,018	0,012	-	0,022	0,045	0,028	0,022	0,013	0,016	0,018	0,030	0,025	0,040	0,028
Flu	-	-	-	-	0,174	-	-	-	-	-	0,005	-	0,375	0,001
Phen	0,025	0,017	0,021	0,048	0,247	0,033	0,037	0,011	0,036	0,031	0,043	0,065	0,095	0,052
Antr	0,007	0,003	-	0,020	0,013	0,006	0,008	-	0,006	0,002	0,016	0,026	0,029	0,022
Flt	0,021	0,021	-	0,029	0,170	0,023	0,017	0,013	0,022	0,018	0,060	0,014	0,050	0,037
Pyr	0,015	0,007	0,005	0,034	0,407	0,043	0,014	0,010	0,010	0,019	0,040	0,022	0,045	0,037
BaA	0,009	0,001	0,002	0,022	0,022	-	0,025	0,013	0,012	0,011	0,024	0,015	0,024	0,027
Chr	0,024	0,008	0,002	0,034	0,021	0,012	0,019	0,030	0,034	0,015	0,034	0,019	0,057	0,039
BbF	0,045	-	0,019	-	-	0,010	-	0,029	0,031	0,002	-	0,020	-	0,019
BkF	0,030	0,002	0,011	-	-	-	-	0,018	0,016	0,006	-	0,016	-	0,009
BaP	0,042	-	0,004	0,011	-	0,001	-	-	-	-	-	0,017	0,028	0,009
DBA	0,216	0,139	0,108	0,152	0,041	0,083	0,140	0,112	0,213	0,120	0,161	0,146	0,273	0,124
$\Sigma$ ПАУ	<b>0,456</b>	<b>0,212</b>	<b>0,173</b>	<b>0,399</b>	<b>1,154</b>	<b>0,245</b>	<b>0,295</b>	<b>0,257</b>	<b>0,407</b>	<b>0,251</b>	<b>0,452</b>	<b>0,401</b>	<b>1,045</b>	<b>0,437</b>
$\Sigma$ НМ	<b>0,054</b>	<b>0,033</b>	<b>0,021</b>	<b>0,117</b>	<b>0,494</b>	<b>0,073</b>	<b>0,081</b>	<b>0,032</b>	<b>0,070</b>	<b>0,063</b>	<b>0,132</b>	<b>0,130</b>	<b>0,568</b>	<b>0,136</b>
$\Sigma$ ВМ	<b>0,402</b>	<b>0,179</b>	<b>0,152</b>	<b>0,282</b>	<b>0,660</b>	<b>0,172</b>	<b>0,214</b>	<b>0,225</b>	<b>0,337</b>	<b>0,189</b>	<b>0,320</b>	<b>0,270</b>	<b>0,477</b>	<b>0,301</b>

Примечание. «-» - соединение не обнаружено

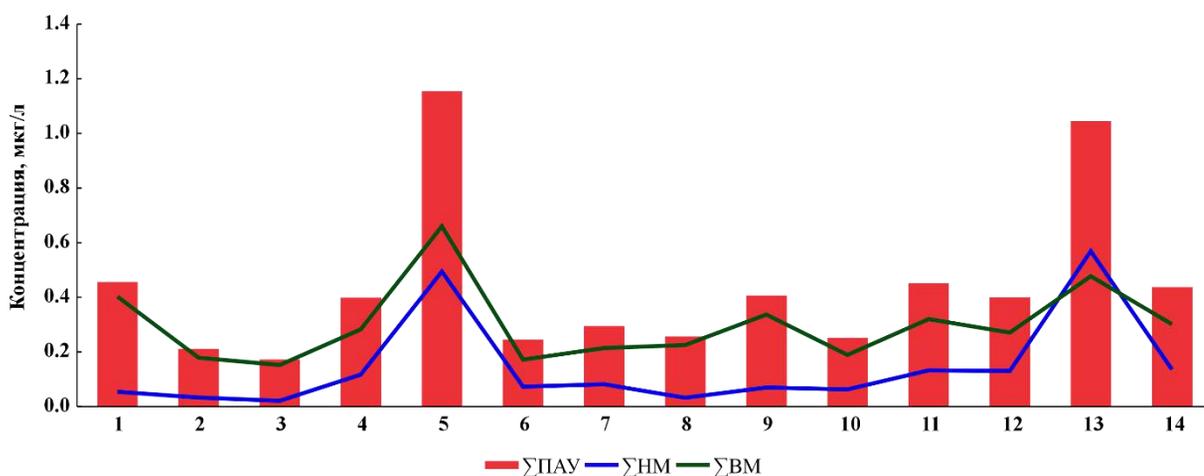
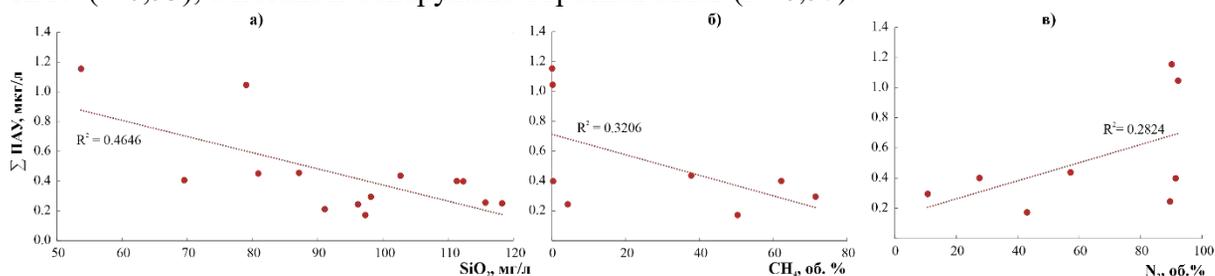


Рис. 2. Суммарное содержание ПАУ в термальных водах Центральной части Байкальской рифтовой зоны

В индивидуальном составе ПАУ в термах идентифицированы низкомолекулярные 2-3-ядерные соединения, концентрация которых варьирует от 0,02 до 0,57 мкг/л, а доля от суммарного содержания ПАУ составляет от 12 до 54 %, в среднем 27%. Низкомолекулярные ПАУ преимущественно представлены фенантреном, среднее содержание которого 0,06 мкг/л. Наряду с ним присутствуют в водах нафталин и 2-метилнафталин, концентрации которых соответственно составляют от 0,0004 до 0,0379 мкг/л и от 0,012 до 0,045 мкг/л. В отличие от флуорена, редко встречающегося в водах, антрацен определен в большинстве образцов, за исключением, Кулиных болот и Уринского источника. Его содержание составляет от 0,002 до 0,029 мкг/л. В исследуемых термальных водах суммарное содержание низкомолекулярных ПАУ не превышает суммарной концентрации высокомолекулярных соединений. Исключение составляет источник Умхэйский, где низкомолекулярных ПАУ идентифицировано суммарно больше, чем высокомолекулярных (Рис. 2).

Доля высокомолекулярных (ВМ) ПАУ в исследуемых термальных источниках составляет от 46 до 88 % отн. Суммарное содержание ВМ ПАУ в термах изменяется от 0,15 до 0,66 мкг/л. Высокое суммарное содержание ВМ ПАУ отмечается в Горячинском (0,40 мкг/л), Гусихинском (0,66 мкг/л), Умхейском (0,48 мкг/л). Значительный вклад в состав ПАУ вносит дибенз(а,һ)антрацен, что является отличительной особенностью исследуемых термальных вод. Его концентрация в образцах варьирует от 0,04 до 0,27 мкг/л. Флуорантен содержится в количестве от 0,013 мкг/л (Уринский источник) до 0,060 мкг/л (Аллинский источник). Пирен и хризен идентифицированы во всех исследуемых водах, среднее содержание которых составляет 0,051 мкг/л и 0,025 мкг/л, соответственно. Бенз(б)флуорантен и бенз(к)флуорантен обнаружены только в половине образцов, их содержание не превышает 0,040 мкг/л. Концентрации бенз(а)пирена составляют от 0,0013 до 0,04203 мкг/л. Максимальная концентрация идентифицирована в Горячинском источнике.

Наиболее сильные корреляционные зависимости между элементами общего химического состава, физико-химическими характеристиками, температурой воды и концентрациями ПАУ в термальных водах обнаружены для кремния, азота и метана. Так, наблюдается тенденция к уменьшению суммарного содержания ПАУ с увеличением содержания  $\text{SiO}_2$  (Рис. 3), что возможно связано с сорбционными свойствами диоксида кремния. Кроме этого, выявлены корреляционные связи между суммарной концентрацией ПАУ и газовым составом, который описан ранее [Zippa et al., 2025]. Так, увеличение концентраций азота в газовом составе сопровождается ростом содержания ПАУ ( $r=0,53$ ), с метаном обнаружена обратная связь ( $r=-0,57$ ).



**Рис. 3.** Парная корреляционная связь между величиной суммарного содержания ПАУ и содержанием: а)  $\text{SiO}_2$  б)  $\text{N}_2$  в)  $\text{CH}_4$  в термальных водах центральной части Байкальской рифтовой зоны

Данный факт свидетельствует о существовании взаимосвязи между органической и неорганической составляющими и требует дальнейшего детального изучения механизмов взаимодействия компонентов водной системы.

#### *Содержание ПАУ во вмещающих породах.*

Согласно проведенному комплексному минералого-геохимическому исследованию, было определено, что образцы пород представлены в основном биотитовыми гранитами, пегматитами и, в случае Гаргинского источника – гранитами и известковыми травертинами. Основными пороодообразующими минералами являются кварц, полевые шпаты натриевого и калиевого рядов, глинистые минералы, биотит.

В образцах водовмещающих горных пород содержание ПАУ установлено в диапазоне от 0,021 до 1,19 мкг/кг. Высокие концентрации выявлены в Кучигерском

(1,190 мкг/л), Уринском (1,176 мкг/л) и Гаргинском источниках (1,162 мкг/л) (Рис. 3).  
 Результаты анализа экстрактов пород представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** Содержание полициклических ароматических углеводородов во водовмещающих породах, мкг/кг

Источники	Гусихинский	Толстихинский	Уринский	Гаргинский	Аллинский-1	Аллинский-2	Кучигерский	Кучигерский (глина)	Умхэйский
	5	6	8	9	10	11	12	12-1	13
Naph	0,006	0,001	0,002	0,002	0,001	0,006	0,001	0,002	0,002
2-MNaph	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001
Phen	0,003	0,006	0,007	0,005	0,012	0,003	0,006	0,007	0,005
Antr	0,001	0,002	0,002	0,003	0,000	0,001	0,002	0,002	0,003
Flt	0,001	0,003	0,005	0,003	0,013	0,001	0,003	0,005	0,003
Pyr	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002
BaA	-	0,001	0,004	0,001	0,002	0,000	0,001	0,004	0,001
Chr	-	0,001	0,003	-	0,005	0,000	0,001	0,003	0,000
BaP	0,001	0,001	-	-	-	0,001	0,001	-	-
DBA	0,041	0,008	0,007	0,002	0,003	0,005	0,008	0,007	0,002
$\Sigma$ ПАУ	<b>0,021</b>	<b>0,027</b>	<b>1,176</b>	<b>1,162</b>	<b>0,675</b>	<b>0,700</b>	<b>1,190</b>	<b>0,638</b>	<b>0,853</b>
$\Sigma$ НМ	<b>0,012</b>	<b>0,011</b>	<b>0,334</b>	<b>0,436</b>	<b>0,240</b>	<b>0,282</b>	<b>0,739</b>	<b>0,238</b>	<b>0,268</b>
$\Sigma$ ВМ	<b>0,009</b>	<b>0,016</b>	<b>0,842</b>	<b>0,726</b>	<b>0,435</b>	<b>0,417</b>	<b>0,450</b>	<b>0,399</b>	<b>0,585</b>

Суммарное содержание низкомолекулярных ПАУ в исследуемых породах определено в диапазоне от 0,0109 до 0,0142 мкг/л, что составляет 37-58% от суммарного содержания ПАУ. Высокомолекулярные соединения идентифицированы в количестве от 0,009 до 0,024 мкг/л, что составляет 42-63% от суммы ПАУ. В целом ВМ соединения во вмещающих породах преобладают над НМ ПАУ, как и в термальных водах. Однако, в Гусихинском, Гаргинском, Аллинском (диком) и Умхэйском источниках выявлено преобладание НМ над ВМ (Рис. 4).

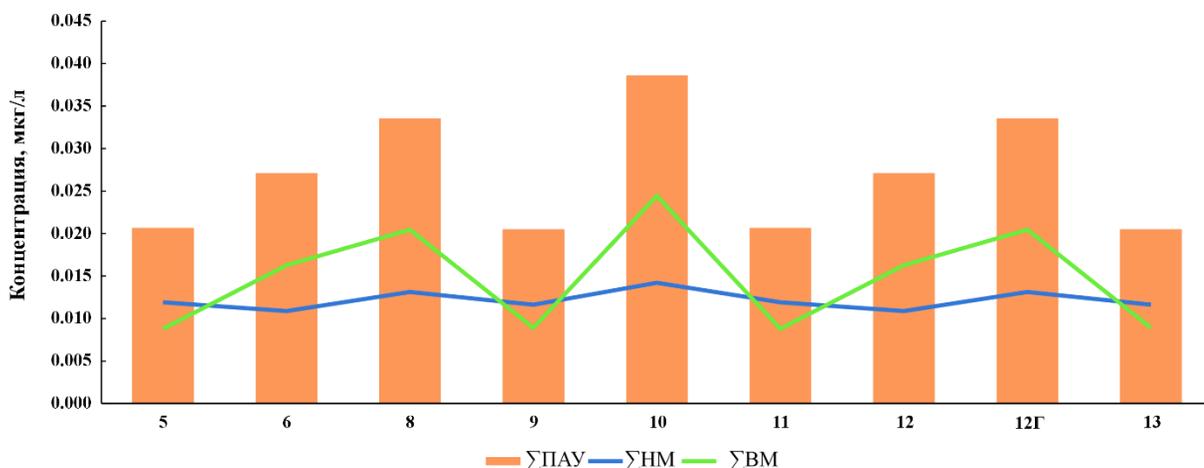


Рис.4. Суммарное содержание ПАУ во вмещающих породах

Среди НМ ПАУ в горных породах преобладает фенантрен, его содержание варьирует от 0,003 до 0,012 мкг/кг, максимальная концентрация обнаружена в Аллинском источнике. Нафталин содержится в количестве от 0,0009 до 0,0057 мкг/л. Концентрации 2-метилнафталина изменяются от 0,0005 до 0,0024 мкг/л, а антрацена составляют 0,005-0,0033 мкг/л.

Значительный вклад в суммарное содержание высокомолекулярных ПАУ в во вмещающих породах также, как и в термах, вносит дибенз(а,h)антрацен, что является отличительной особенностью. Его концентрация составляет от 0,002 до 0,008 мкг/кг. Бенз(б)флуорантен и бенз(к)флуорантен не были обнаружены в исследуемых породах. Пирен и хризен, которые указывают на пиролитические процессы, происходящие в недрах земли [Пиковский и др., 2021], во всех образцах по содержанию не превышают 0,005 мкг/кг. Концентрации флуорантена составляют от 0,0011 до 0,0129 мкг/л, бензо(а)антрацена – от 0,0001 до 0,0054, бенз(а)пирена от 0,0012 до 0,0013 мкг/л. Последний идентифицирован только в 4 источниках термальных вод (Гусихинский, Толстихинский, Кучигерский и Аллинский).

Рассмотренное соотношение концентраций ПАУ в термальных водах и водовмещающих горных породах показало, что в целом суммарное содержание ПАУ, и, в частности, концентрации низко- и высокомолекулярных соединений значительно выше в термальных водах, чем во вмещающих их породах (Рис. 5).

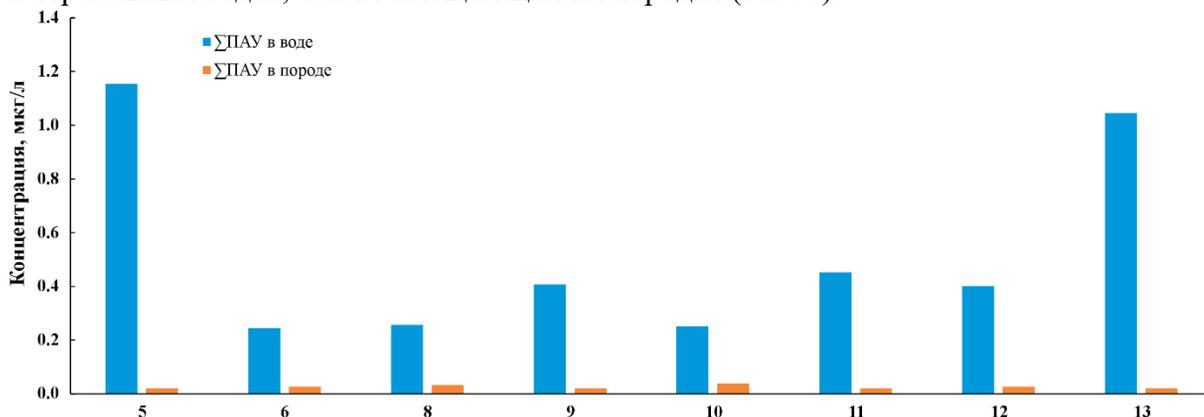


Рис. 5. Соотношение концентраций ПАУ в термальных водах и во вмещающих породах

## ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты анализа количественного состава полициклических ароматических углеводородов в термальных водах и во вмещающих их горных породах в центральной части Байкальской рифтовой зоны позволяют рассуждать об особенностях терм, их загрязнении, генезисе органических соединений и некоторых процессах, протекающих в системе вода-порода-газ-органическое вещество.

В исследуемых термальных водах идентифицированы преимущественно высокомолекулярные полициклические ароматические углеводороды. Последним уделяется особое внимание, в связи с проявлением ими канцерогенных и мутагенных свойств и их достаточно низкой растворимостью в водных растворах, а соответственно, высокой степенью сорбции и накопления как во вмещающей породе, так и в воде [Волкова и др., 2023]. Значительный вклад в состав ПАУ вносит дибенз(a,h)антрацен, что является отличительной особенностью терм центральной части Байкальской рифтовой зоны. Присутствие дибенз(a,h)антрацена связывают с эндогенными геологическими процессами, происходящими в недрах Земли за счет энергии, выделяемой в процессе преобразования сложных органических веществ [Король и др., 2024]. Флуорантен обычно является преобладающим компонентом систем, связанный с пиролизом органического вещества и приоритетным углеводородом при анализе не только природных вод, но и атмосферного воздуха. Наличие флуорантена в исследуемых термах может быть связано с процессами превращения углеводородного сырья под воздействием высоких температур [Король и др., 2024].

Одним из наиболее канцерогенных соединений принято считать бенз(a)пирен, для которого установлены нормы ПДК. Концентрации бенз(a)пирена в питьевых водах не должны превышать 0,01 мкг/л [СанПиН 1.2.3685-21]. Однако, превышение ПДК обнаружено в 4 источниках термальных вод (Горячинском, Змеином, Кучигерском и Умхэйском) (Рис. 6). Присутствие бенз(a)пирена в термальных водах и его превышение ПДК может быть связано с природными пиролитическими процессами [Темердашев и др. 2021], в результате которых продукты горения попадают в природные воды. В случае термальных вод продукты горения могут поступать в приповерхностных условиях, в зоне разгрузки или при их смешении с холодными водами.

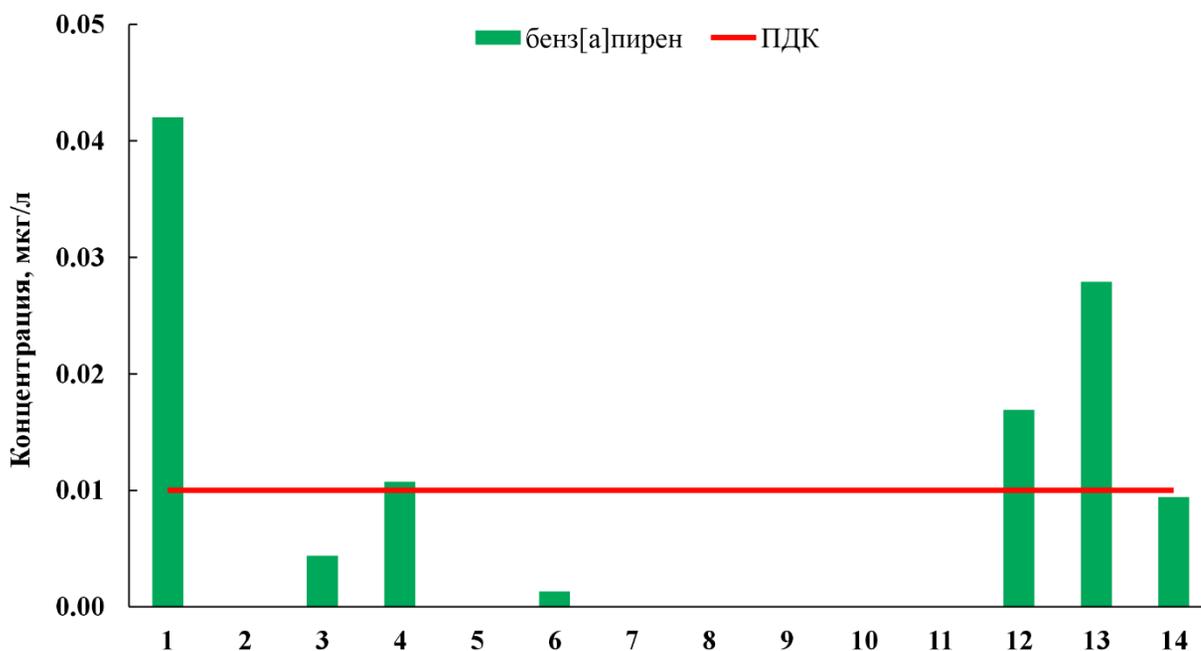


Рис. 6. Распределение бенз(а)пирена в термальных водах.

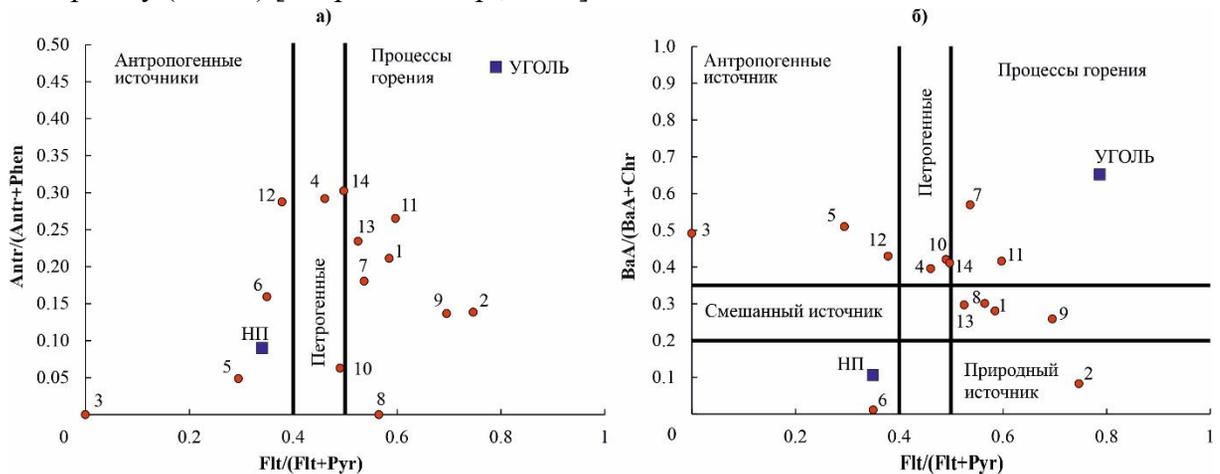
Присутствие фенантрена, нафталина и 2-метилнафталина среди низкомолекулярных полициклических ароматических соединений может быть обосновано, как результат миграции водного или газоконденсатного раствора по разломам и трещинам. В ходе миграции эти соединения меняются, переходя из одного агрегатного состояния в другое, в зависимости от изменения термобарических условий и поступают в термальные воды [Пиковский и др., 2021]. Генезис фенантрена, нафталина и 2-метилнафталина относят к природному петрогенному происхождению, связанному с естественным подтоком нефтяных флюидов из глубин по трещинам в горных породах. Наличие нафталинов в исследуемых термальных водах, вероятно, связано с процессами превращения углеводородного сырья под воздействием температур и микробиальной активности. Фенантрен, который превалирует в исследуемых образцах, хорошо растворим в воде и может диффундировать с потоком органических веществ, характерных для нефтяных залежей [Халиков, 2018]. О возможных подтоках нефтяных флюидов также свидетельствует преобладание НМ над ВМ соединениями в Гусихинском, Гаргинском, Аллинском (диком) и Умхэйскм источниках (Рис.3). Поступление таких флюидов может осуществляться также по разломам и трещинам с помощью воды или газа с последующей адсорбцией на поверхности пород. Нафталин, как один из показателей нефтяной составляющей, преобладает в Гусихинском термальном источнике (0,006 мкг/кг), что также указывает на вероятность миграции и адсорбции компонентов. Кроме этого, для нафталинов также установлен уровень ПДК, составляющий 10 мкг/л в питьевой воде [СанПиН 1.2.3685-21]. В исследуемых термальных водах превышение не зафиксировано, а максимальная концентрация, обнаруженная в Аллинском источнике, составляет 0,038 мкг/л.

Выявленные зависимости распределения ПАУ от состава выделяющихся газов в термальных водах, отражающие увеличение содержания ПАУ в термах по мере роста концентраций  $N_2$  и уменьшения количества  $CH_4$ , можно объяснить преобразованием

ароматических углеводов в результате химических процессов в более простые соединения из сложных органических компонентов, таких как каротиноиды, аминокислоты, фульвовые и гуминовые вещества, хлорофиллы [Потурай, 2023].

Источники поступления полициклических ароматических углеводов в термальные воды представляется весьма дискуссионным вопросом. Проблема идентификации источников осложняется тем, что данные соединения являются распространенными веществами, которые формируются во многих природных и техногенных процессах. Использование маркеров и молекулярных соотношений индивидуальных ПАУ позволяет идентифицировать их генезис [Халиков, 2018]. Однако необходимо учитывать, что анализ распределения органических веществ в природных средах должен осуществляться с учётом фонового биогеохимического состояния экосистем. Обнаруженные высокие концентрации ПАУ не всегда однозначно указывают на техногенный источник поступления [Халиков, 2018].

Наиболее широко распространены следующие соотношения:  $Flt/(Flt+Pyr)$ ,  $Antr/(Antr+Phen)$  и  $BaA/(BaA+Chr)$ . Для проверки применимости предложенных соотношений, в лабораторных условиях были проведены эксперименты по поступлению в дистиллированную воду ПАУ из нефтепродуктов и угля, которые описаны в работе [Мухортина, 2024]. На основании данных полученных данных о содержании индивидуальных ПАУ рассчитаны индикаторные соотношения и нанесены на диаграмму (Рис. 7) [Ширапова и др., 2013].



**Рис. 7.** Диаграммы соотношений приоритетных ПАУ в термальных водах центральной части Байкальской рифтовой зоны

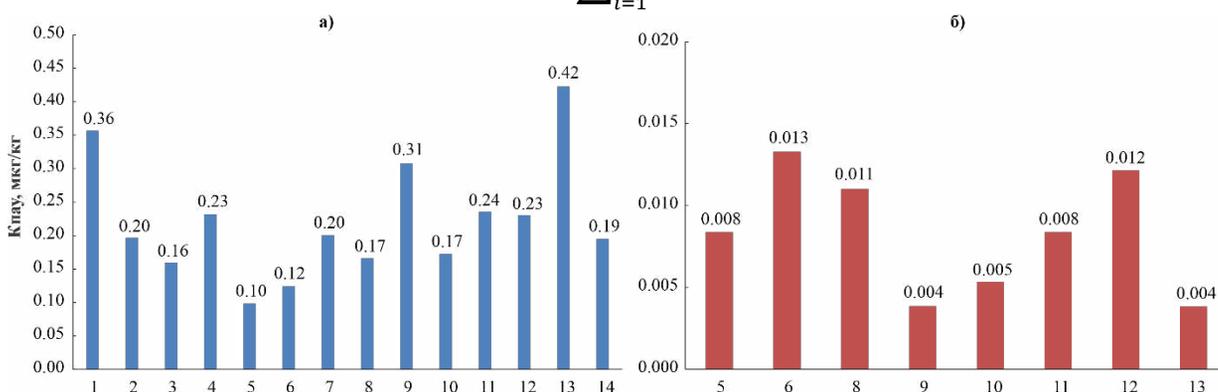
Индикаторные соотношения (Рис. 7) показали, что вероятным источником происхождения ПАУ в термальных водах являются пирогенные процессы. Однако встречаются воды, в которых ПАУ имеют петрогенное происхождение, включающее такие процессы, как сгорание нефтепродуктов (воды Змеинового, Аллинского и Сеюйского источников) и естественный подток нефтяных флюидов (воды Кулиных болот, Гусихинского, Толстихинского и Кучигерского источников).

В водовмещающих породах концентрация полициклических ароматических углеводов невысокая. Вероятно, это связано с особенностью структуры пород, в

составе которой небольшое количество пор, где могло бы быть сосредоточено органическое вещество. Однако, это также может быть связано и с процессами взаимодействия в системе вода-порода-газ-органическое вещество. Сорбция поверхностным слоем незначительна, поэтому и содержание невысокое. Однако в отличие от термальной воды, в составе четырех образцов преобладают в основном низкомолекулярные соединения, представленные фенантrenom и антраценом. Значительный вклад в состав высокомолекулярных ПАУ вносят флуорантен и дибенз(a,h)антрацен. Вероятно, источник поступления этих элементов связан с преобразованием сложных органических веществ под действием различных условий. Исходя из полученных данных, поступление полициклических ароматических углеводородов может быть также связано с подтоком нефтяных флюидов по трещинам с водой или газом, с последующей адсорбцией на поверхности пород.

В связи с тем, что в составе термальных вод и пород были идентифицированы ПАУ как природного, так и техногенного характера, это осложняет оценку степени загрязнения природных объектов. Поэтому для упрощения оценки используется коэффициент опасности ( $K_{ПАУ}$ ), который позволяет сгруппировать полученные данные для определения техногенной нагрузки [Опекунов и др., 2015]. Рассчитывается с учетом индекса токсичности ( $I_i$ ) и концентрации индивидуальных полициклических ароматических углеводородов ( $C_i$ ) в исследуемых образцах: (формула 1)

$$K_{ПАУ} = \sum_{i=1}^n (I_i \times C_i), \quad (1)$$



**Рис.8.** Значение коэффициентов опасности для а) термальных вод и б) вмещающих пород

Рассчитанный коэффициент в породах не превышает 0,013, а термах 0,42, что указывает на низкий уровень техногенной нагрузки. Также для оценки загрязненности природных вод можно использовать коэффициент донной аккумуляции (КДА). Он основан на отношении содержания ПАУ в породе к содержанию в воде. Для исследованных термальных источников КДА не превышает 0,1, что показывает низкую степень аккумуляции в породе и природный источник поступления ПАУ как в термальные воды, так и во вмещающие породы.

Поступление полициклических ароматических углеводородов в систему вода-порода-газ-органическое вещество в той или иной степени влияет на протекающие в этой системе процессы или наоборот, формирующаяся геохимическая обстановка и геохимический облик термальных вод оказывает влияние на поступающие из природных

источников ПАУ, их накопление в водном растворе и вмещающей породе, миграционную способность, участие в протекающих реакциях и т.д. Преобладание содержания ПАУ в термах над ПАУ вмещающих пород может быть также объяснено процессами непрерывного растворения последних водой в ходе взаимодействия вода-порода. Этот процесс соответственно сопровождается переходом ПАУ из горных пород и их накоплением в растворе. Оценить миграционную способности полициклических ароматических углеводородов или их геохимическую подвижность в системе вода-порода можно посредством расчета коэффициента водной миграции Перельмана ( $K_x$ ) и коэффициента геохимической подвижности, предложенного Шварцевым С.Л. [Шварцев, 1998]. Коэффициент миграции ПАУ в термальных водах исследуемого региона изменяется от 0,00045 до 0,021 (Рис. 9). Рассмотренные корреляционные зависимости показали, с одной стороны, отрицательную связь коэффициента миграции ПАУ с рН (-0,63), щелочностью (-0,79) и концентрациями метана в составе выделяющихся газов. С другой стороны, выявлена положительная корреляция  $K_x$  с величиной общей минерализации терм, концентрациями  $Ca^{2+}$  (0,44),  $Na^+$  (0,48),  $K^+$  (0,58),  $HCO_3^-$  (0,46),  $SO_4^{2-}$  (0,55), а также с содержаниями гелия (0,94) и азота (0,90) в составе газа. Корреляция ПАУ с основными катионами, от части, служит подтверждением предположения о поступлении ПАУ в термы в результате растворения горных пород. Примечательной также представляется картина, полученная для Кучигерского источника (12 и 12Г), для которого был рассчитан не только коэффициент миграции Перельмана, но и коэффициент геохимической подвижности, отражающий интенсивность миграции химического элемента в природных водах с учётом процессов растворения-осаждения в системе вода-порода.

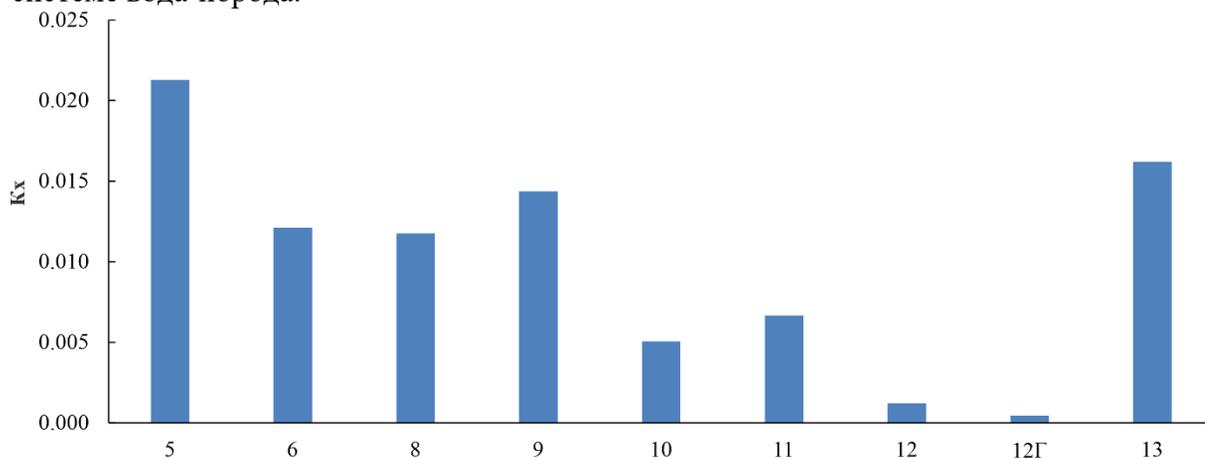


Рис.9. Значения коэффициента геохимической подвижности химических элементов

В глинистых породах (12Г) наблюдается снижение геохимической подвижности полициклических ароматических углеводородов, что обусловлено, вероятно, высокой сорбционной активностью данных пород или процессами вторичного минералообразования, в ходе которого связываются не только основные катионы, но и частично ПАУ. Поэтому геохимическая подвижность ПАУ в глинах (12Г) ниже, чем в гранитах (12). Этот факт находится в согласии с выводом об уменьшении геохимической подвижности (миграционной способности) химических элементов по мере развития процессов взаимодействия воды с горными породами [Шварцев, 1998], и ПАУ в термальных водах центральной части Байкальской рифтовой зоны не исключение.

Выводы о миграционной способности ПАУ в источниках термальных вод послужат дополнительной основой при детальном рассмотрении механизмов взаимодействия воды с горными породами и протекающих в этой системе процессов и в целом эволюционного развития системы термальные воды-горные породы.

## **ВЫВОДЫ**

В ходе проведенного исследования были получены новые данные о составе полициклических ароматических углеводородов в термальных водах и во вмещающих породах центральной части Байкальской рифтовой зоны. Выявлено, что основными компонентами в термальных водах являются нафталин, фенантрен и дибенз(а,һ)антрацен, во вмещающих породах – фенантрен, флуорантен и дибенз(а,һ)антрацен.

Проведенная оценка техногенной нагрузки, основанная на расчете коэффициента опасности и донной аккумуляции, показала низкий уровень техногенности. Источники поступления полициклических ароматических углеводородов связаны с природными пирогенными и петрогенными процессами. С одной стороны, флуорантен и бенз(а)пирен имеют пирогенное происхождение и являются результатом пиролиза органического вещества или попадают в термы в приповерхностных условиях, или при смешении с холодными водами. С другой стороны, дибенз(а,һ)антрацен, фенантрен, нафталин и 2-метилнафталин имеют петрогенное происхождение и являются результатом эндогенных процессов преобразования органического вещества в условиях высоких температур, давлений и микробимальной активности и результатом миграции водного и газоконденсатного раствора по разломам и трещинам.

Кроме этого, источником ПАУ в термах могут выступать вмещающие породы, которые непрерывно растворяются водой в ходе их взаимодействия и способствуют переходу ПАУ в раствор. Об этом косвенно свидетельствует превышение содержания ПАУ в воде над концентрациями в породе, прямая корреляция ПАУ с основными катионами и снижение геохимической подвижности ПАУ во вторичных минералах.

Полученные данные расширяют представление об распределении и индивидуальном составе органической составляющей термальных источников и требуют дальнейшего исследования для выявления закономерностей.

## **БЛАГОДАРНОСТИ И ФИНАНСИРОВАНИЕ**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-77-10035, <https://rscf.ru/project/24-77-10035/>

## **ЛИТЕРАТУРА**

**Волкова, Н. А., Иванова И. С., Соколов Д. А., Колубаева Ю. В., Чуйкина Д. И. (2023).** Концентрации и источники полициклических ароматических углеводородов в воде и донных отложениях рек северных нефтегазодобывающих территорий Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, т. 334, № 4, с. 135–148.

**ГОСТ Р 59024-2020 Вода.** Общие требования к отбору проб (Издание с Изменением №1, применяется с 01.01.2023 взамен ГОСТ 31861-2012)).

**Конторович А.Э., Шварцев С.Л., Зуев В.А., Рассказов Н.М., Туров Ю.П. (2000).** Органические микропримеси в пресных природных водах бассейнов Томи и верхней Оби // *Геохимия*, № 5, с. 533–544.

**Король И.С., Чуйкина Д.И., Мухортина Н.А., Домрочева Е.В., Тимшанов Р.И., Сальникова Ю.И. (2024).** Особенности состава полиароматических углеводородов в подземных водах на добывающих территориях угольного (Кузбасс) и нефтяного (Западная Сибирь, Ханты-Мансийский автономный округ) регионов // *Успехи современного естествознания*, № 10, с. 79–87, DOI: 10.17513/use.38322.

**Кошовский, Т.С., Ткаченко О. В., Ткаченко А. Н., Цибарт А. С., Лычагин М. Ю. (2017).** Полициклические ароматические углеводороды в аквальных ландшафтах дельты реки Дон в зимний период // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*, № 2, с. 118–127. DOI: 10.23683/0321-3005-2017-2-118-127.

**Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. (2012).** *Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты.* Москва. ЦентрЛитНефтеГаз, 672 с.

**Лунина О.В. (2015).** Разломы плиоцен-четвертичной активизации юга Восточной Сибири и их роль в развитии сейсмически индуцированных геологических процессов: дис. ... док. геол.-минерал. наук. Иркутск, 359 с.

**Мухортина Н. А. (2024).** 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, 114 с.

**Опекунов, А. Ю., Митрофанова Е. С., Санни С., Коммедал Р., Опекунова М. Г., Баги А. (2015).** Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях рек и каналов Санкт-Петербурга // *Вестник Санкт-Петербургского Университета*, № 4, с. 98–109.

**Пиковский Ю. И., Хлынина Н. И., Кучеров В. Г. (2021).** Полициклические ароматические углеводороды в горных породах и почвах импактного кратера Сильян (Швеция) // *Литология и полезные ископаемые*, № 3, с. 243–256, DOI: 10.31857/S0024497X2103006X.

**Плюснин А.М., Замана Л.В., Шварцев С.Л., Токаренко О.Г., Чернявский М.К. (2013).** Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны // *Геология и геофизика*. т. 54, № 5, с. 647–664.

**Потурай В.А. (2023).** Органическое вещество в термальных водах Паратунского геотермального района (Камчатка) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, т. 334, № 8, с. 98–109, DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4069.

**Потурай В.А., Компаниченко В.Н., Редин А.А. (2025).** Органическое вещество в термальных водах Белокурихи // *Геология и геофизика*, т. 66, № 9, с. 1177–1194, DOI: 10.15372/GiG2025130, EDN: RZRWHN.

**Санитарные правила и нормы 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 15.08.2022).

**Темердашев З.А., Мусорина Т.Н., Червонная Т.А., Арутюнян Ж.В. (2021).** Возможности и ограничения методов твердофазной и жидкостной экстракции при определении полициклических ароматических углеводородов в объектах окружающей среды // Журнал аналитической химии, т. 76, № 12, с. 1059–1076, DOI: 10.31857/S0044450221120136.

**Халиков И.С. (2018).** Идентификация источников загрязнения объектов природной среды полициклическими ароматическими углеводородами с использованием молекулярных соотношений // Экологическая химия, т. 27, № 2, с. 76–85.

**Шварцев С.Л. (1998).** Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М., Недра, 1998, 366 с.

**Швец В.М., Кирюхин В.К. (1974).** Органические вещества в минеральных лечебных водах // Бюл. МОИП. Отделение геологии, т. 6, с. 83–96.

**Ширапова, Г. С., Утюжникова Н. С., Рабина О. А., Вялков А. И., Вялков С. В., Морозов С. В., Батоев В. Б. (2013).** Загрязнение полиароматическими углеводородами бассейна озера Байкал: озеро Гусиное // Химия в интересах устойчивого развития, № 21, с. 189–195.

**Шпейзер Г.М., Макаров А.А., Родионова В.А., Минеева Л.М. (2012).** Шумакские минеральные воды // Известия Иркут. гос.ун-та, т. 5, № 1, с. 293–309.

**Barzegar, R., Moghaddam, A. A., Tziritis, E., Adamowski, J., Nassar, J. B., Noori, M., Aalami, M. T., Kazemian, N. (2020).** Exploring the hydrogeochemical evolution of cold and thermal waters in the Sarein-Nir area, Iran using stable isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$ ), geothermometry and multivariate statistical approaches // Geothermics, v. 85, 101815 <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101815>.

**Fekete J., Sajgó C., Kramarics Á., Eke Z., Kovács K., Kárpáti Z. (2012).** Aquathermolysis of humic and fulvic acids: simulation of organic matter maturation in hot thermal waters // Org. Geochem., v. 53, p. 109–118, DOI: 10.1016/j.orggeochem.2012.07.005.

**González-Barreiro C., Cancho-Grande B., Araujo-Nespereira P., Cid-Fernández J.A., Simal-Gándara J. (2009).** Occurrence of soluble organic compounds in thermal waters by ion trap mass detection // Chemosphere, v. 75 (1), p. 34–47, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.11.067.

**Hotelling, H. (1935).** The most predictable criterion. // J. Educ. Psychol. 26 (2), 139.

**Pearson, K. (1896).** VII. Mathematical contributions to the theory of evolution. III. Regression, heredity, and panmixia // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. containing papers mathematical physical character, 187, 253–318.

**Poturay V.A., Zippa E.V., Ukraintsev A.V., Fedorov I.A., Toropov A.S. (2026).** Organic matter in thermal springs, the Central part of the Baikal Rift Zone. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5417880> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5417880>

препринт

**Szabó I., Varga C. (2019).** Finding possible pharmacological effects of identified organic compounds in medicinal waters (BTEX and phenolic compounds) // Int. J. Biometeorol., v. 64 (6), p. 989–995, DOI: 10.1007/s00484-019-01808-9.

**Zippa E.V., Ukraintsev A.V., Chernyavskii M.K., Fedorov I.A., Poturay V.A., Domrocheva E.V., Mukhortina N.A. (2025).** Thermal waters in the central part of Baikal Rift Zone: Hydrogeochemistry and geothermometry (Republic of Buryatia, Russia) // *Geothermics*, v. 130.