

УДК 556.314
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5109
Шифр специальности ВАК: 1.6.6, 1.4.12
Научная статья



Особенности состава полиароматических углеводов в природных водах Кузбасса: закономерности распространения и их взаимосвязь с типом вод для техногенных и природных систем

Е.В. Домрочева[✉], И.С. Король, Н.А. Мухортина

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

[✉]DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Актуальность. Техногенные сбросы, включая полициклические ароматические углеводороды, изменяют химический состав водных систем, негативно влияя на экосистемы и здоровье человека. Несмотря на региональную специфику Кузбасса, заключающуюся в наличии развитой угольной промышленности, а также развитии смежных отраслей (металлургия, энергетика и химическая промышленность), взаимодействие органических веществ в различных гидрогеологических условиях и под влиянием различных антропогенных факторов остаётся малоизученным. Все это требует комплексного анализа источников загрязнения, закономерностей распределения загрязнителей и их экологических последствий. **Цель.** Изучить особенности состава и распространения полициклических ароматических углеводов в природных водах Кузбасса, оценить влияние угольной промышленности на качество вод, идентифицировать маркеры загрязнения с последующим использованием полученных данных для реконструкции условий формирования данных вод в естественных и техногенно-нарушенных условиях. **Объекты.** Подземные воды преимущественно юрских и верхнепермских терригенно-угленосных отложений тайлуганской свиты Ерунаковской подсерии Кольчугинской серии Кузнецкого бассейна, а также поверхностные воды территории. **Методы.** Аттестованные методики: титрования, фотометрии, капиллярного электрофореза и высокоэффективной жидкостной хроматографией в лаборатории Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. **Результаты и выводы.** Авторами выполнены исследования химического состава природных вод в нарушенных и природных обстановках на территории Кузбасса. Отмечено, что угольная промышленность существенно влияет на химический состав природных вод Кузбасса, повышая минерализацию и концентрацию органических загрязнителей. Накопление полициклических ароматических углеводов в глубоких водоносных горизонтах подчёркивает долгосрочные экологические риски. В работе показано, что поверхностные воды вблизи промышленных зон имеют повышенную минерализацию (до 1,83 г/л), высокие концентрации Na^+ , SO_4^{2-} и полициклических ароматических углеводов (ΣПАУ до 0,88 мкг/л). Подземные воды демонстрируют вертикальную зональность: в зоне активного водообмена ΣПАУ ~0,59 мкг/л, тогда как в глубоких слоях замедленного водообмена выявлены максимальные значения $C_{\text{орг}}$ и ΣПАУ. Фенантрен и флуорантен идентифицированы как устойчивые маркеры техногенного воздействия во всех зонах водообмена. Результаты подтверждают необходимость системного мониторинга, ужесточения контроля промышленных сбросов и разработки стратегий восстановления водных ресурсов. Исследование определяет рамки методологической основы для анализа органического загрязнения в угольных регионах, акцентируя взаимосвязь гидрогеологических процессов и антропогенного воздействия.

Ключевые слова: поверхностные и подземные воды, водообмен, антропогенное загрязнение, полиароматические углеводороды, растворенное органическое вещество, Кузбасс

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00170, <https://rscf.ru/project/25-27-00170/>

Для цитирования: Домрочева Е.В., Король И.С., Мухортина Н.А. Особенности состава полиароматических углеводов в природных водах Кузбасса: закономерности распространения и их взаимосвязь с типом вод для техногенных и природных систем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 10. – С. 141–155. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5109

UDC 556.314
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5109
Scientific paper



Features of the composition of polyaromatic hydrocarbons in natural waters of Kuzbass: patterns of distribution and their relationship with the type of water for technogenic and natural systems

E.V. Domrocheva[✉], I.S. Korol, N.A. Mukhortina

Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, Tomsk, Russian Federation

[✉]DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. Man-made discharges, including polycyclic aromatic hydrocarbons, change the chemical composition of water systems, negatively affecting ecosystems and human health. Despite the regional specificity of Kuzbass, consisting in the presence of a developed coal industry, as well as the development of related industries (metallurgy, energy and chemical industry), the interaction of organic matter in various hydrogeological conditions and under the effect of various anthropogenic factors remains poorly understood. All this requires a comprehensive analysis of pollution sources, patterns of pollutant distribution and their environmental consequences. **Aim.** To study the features of the composition and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in natural waters of Kuzbass. To assess the impact of the coal industry on water quality, to identify pollution markers with subsequent use of the obtained data to reconstruct the conditions of formation of these waters in natural and man-made conditions. **Objects.** Groundwater, mainly Jurassic and Upper Permian terrigenous-carbonaceous deposits of the Taylugan suite of the Yerunakovskaya subseries of the Kolchuginskaya series of the Kuznetsk basin, as well as surface waters of the territory. **Methods.** Certified methods: titration, photometry, capillary electrophoresis and high-performance liquid chromatography in the laboratory of the Tomsk branch of the A.A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics. **Results and conclusions.** The authors conducted a study of the chemical composition of natural waters in disturbed and natural environments in the territory of Kuzbass. It was noted that the coal industry significantly affects the chemical composition of natural waters of Kuzbass, increasing mineralization and concentration of organic pollutants. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in deep aquifers emphasizes long-term environmental risks. The work shows that surface waters near industrial zones have increased mineralization (up to 1.83 g/l), high concentrations of Na⁺, SO₄²⁻ and polycyclic aromatic hydrocarbons (ΣПАУ up to 0.88 µg/l). Groundwater demonstrates vertical zonality: in the zone of active water exchange ΣПАУ ~0.59 µg/l, while in the deep layers of slow water exchange maximum values of C_{org} and ΣПАУ were found. Phenanthrene and fluoranthene were identified as stable markers of technogenic impact in all water exchange zones. The results confirm the need for systemic monitoring, tightening of industrial discharge standards and development of water resource restoration strategies. The study defines the framework of the methodological basis for the analysis of organic pollution in coal regions, emphasizing the relationship between hydrogeological processes and anthropogenic impact.

Keywords: surface and groundwater, water exchange, anthropogenic pollution, polyaromatic hydrocarbons, dissolved organic matter, Kuzbass

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation [grant no. 25-27-00170, <https://rscf.ru/project/25-27-00170/>].

For citation: Domrocheva E.V., Korol I.S., Mukhortina N.A. Features of the composition of polyaromatic hydrocarbons in natural waters of Kuzbass: patterns of distribution and their relationship with the type of water for technogenic and natural systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 10, pp. 141–155. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5109

Введение

Проблема загрязнения природных вод вследствие техногенной деятельности приобрела глобальный масштаб, однако остается недостаточно изученной. Наличие в Кузнецком бассейне угольных отложений и объектов промышленного угольного комплекса обуславливает региональную специфику техногенных нагрузок на водные системы. Это делает крайне важным изучение особенностей

состава и распространения органических веществ (включая полициклические ароматические углеводороды – ПАУ) в поверхностных и подземных водах Кузбасса, проведение оценки влияния угольной промышленности на качество вод, а также идентификацию маркеров загрязнения с последующим использованием полученных данных для реконструкции условий формирования данных вод в естественных и техногенно-нарушенных условиях.

Кроме того, изучение влияния органических веществ на химический состав поверхностных, а при наличии гидравлической связи, и на состав подземных водных систем является нерешенной научной задачей, но активно обсуждаемой [1, 2].

Угольная промышленность (добыча угля, обогащение, хранение и переработка, сжигание отходов) может приводить к загрязнению природных вод органическими соединениями, такими как азотсодержащие соединения, фенолы и углеводороды, включая ПАВ. Присутствие этих веществ в химическом составе воды ведет к серьезным нарушениям в природных экосистемах, а также негативно сказывается на здоровье человека. Органические вещества влияют на химический состав природных вод, изменяя уровень pH, содержание растворенного кислорода, и способствуют накоплению токсичных соединений. Они также могут служить источником питательных веществ для микроорганизмов, что приводит к биологическим процессам, изменяющим состав и качество вод. Исследование роли органических веществ в формировании состава природных вод требует комплексного подхода, учитывающего химические, биологические и гидрогеологические аспекты, а также воздействие угольной промышленности на окружающую среду. Геолого-гидрогеологические и физико-географические условия имеют решающее значение для формирования состава, концентрации и распределения растворенного органического вещества (РОВ) в природных водах [3]. В настоящее время концентрация органического углерода ($C_{\text{орг}}$), биохимическое потребление кислорода (БПК), химическое потребление кислорода (ХПК) и перманганатная окисляемость (ПО) являются основными характеристиками для оценки состава РОВ в различных водах, включая подземные [4].

ПАУ представляют собой группу органических соединений, которые широко распространены в окружающей среде и обладают высокой токсичностью. Их присутствие в природных водах может быть связано как с естественными процессами, такими как природные пожары или вулканическая активность, так и с антропогенными источниками, включая промышленные сбросы, добычу полезных ископаемых и транспорт. Кузбасс, как один из крупнейших угледобывающих регионов России, является важным объектом для изучения распространения ПАУ в природных водах.

Обычно РОВ в подземных водах представляет собой группу устойчивых биологических и энергетических соединений, таких как фенолы, углеводороды и гумусовые вещества. Однако в этой сложной природной системе, где постоянно происходят физико-химические и биохимические преобразования, могут образовываться и другие органические структуры, включая кислоты и эфиры [5–8].

Важно отметить, что взаимодействие подземных вод с вмещающими породами и угольными пластами сопровождается сложными физическими и физико-химическими процессами, такими как сорбция, ионный обмен, диализ и диффузия органических веществ [9]. В реальных системах на протекание этих процессов влияют множество факторов, что делает изучение органического вещества в подземных водах сложной задачей. Качественный состав РОВ в подземных водах весьма разнообразен. Среди наиболее изученных соединений можно выделить фенолы (включая замещенные), нафтен-овые и карбоновые кислоты с числом атомов углерода не более четырех. Исследования содержания алкилбензолов и их гомологов для подземных вод Кузбасса все еще недостаточно, не говоря об исследованиях состава и концентраций таких групп соединений, как карбонильные (эфиры, спирты), азотсодержащие вещества (амины, аминокислоты), высокомолекулярные соединения (масла, смолы, гуминовые и фульвокислоты) и полиароматические углеводороды [10].

Помимо активного обсуждаемого экологического аспекта и вопросов, связанных с образованием органо-минеральных комплексов, интерес к РОВ также обусловлен его ключевой ролью в формировании химического состава вод [11–13]. Известно, что органическое вещество способствует образованию основного аниона, который играет важную роль в зонах активного и замедленного водообмена – HCO_3^- . В этом процессе происходит регулирование уровня pH среды за счет нейтрализации щелочности, возникающей в результате гидролиза горных пород [14].

На уровень концентрации РОВ оказывают влияние такие факторы, как химический состав воды, минерализация, pH, пластовое давление, температура, окислительная или восстановительная среда, а также затрудненный водообмен и наличие угольных или нефтяных залежей. Исходная насыщенность пород органическим веществом также играет важную роль.

Органические соединения в водной среде могут подвергаться аэробному биохимическому окислению под воздействием микроорганизмов. При наличии окислителей или в определенных условиях среды могут происходить процессы гидролиза жиров, в результате которых образуются глицерин и жирные кислоты, а также гидролиза белков, приводящего к образованию аминокислот и сложных эфиров. Эти реакции могут способствовать образованию фенолов, спиртов и органических кислот. Процессы декарбоксилирования карбоновых кислот могут привести к образованию углеводов с различной структурой, начиная от высокомолекулярных соединений и заканчивая низшими метановыми углеводородами [15].

Для исследования компонентного состава органических соединений в природных водах активно используются различные хроматографические методы, такие как газовая, жидкостная, высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) и газожидкостная хроматография с масс-спектрометрией (ГХ-МС), а также их комбинации. В практической исследовательской деятельности изучение органических веществ применяется значительно реже, что связано с трудоемкостью аналитических процедур и иногда с невозможностью их выделения из-за низких концентраций. Кроме того, вопросы практической значимости результатов, а также разработка четких критериев и индикаторов их применения остаются предметом обсуждения. На основе обширного фактического материала, авторы предприняли попытку изучить особенности формирования различных по составу типов вод в различных геохимических условиях, как природных, так и нарушенных. Также было проведено исследование влияния угольной промышленности на качество природных вод в Кузнецком бассейне, с целью выявления факторов загрязнения как макрокомпонентами, так и органическими веществами, при этом особое внимание уделено роли органического вещества, которая часто недооценивается.

Целью данного исследования является: изучить особенности состава и распространения органических веществ (включая ПАУ) в поверхностных и подземных водах Кузбасса, оценить влияние угольной промышленности на качество вод, идентифицировать маркеры загрязнения с последующим использованием полученной информации для реконструкции условий формирования состава вод в естественных и техногенно-нарушенных условиях.

Объекты и методы исследования

Территория Кузбасса расположена на юге Западной Сибири и характеризуется сложным геологическим строением. Основными горными породами являются осадочные породы, которые формировались в течение миллионов лет. Природные, геологические и гидрогеологические условия детально рассмотрены в работах [16–21]. Отметим лишь, что в геологическом строении рассматриваемой территории принимают участие угленосно-терригенные отложения, представленные песчаниками, алевролитами и аргиллитами с включением угольных пластов пермо-карбонового, а также юрского возраста преимущественно на юге. Гидрографическая сеть относится преимущественно к системе р. Томи. Наиболее крупные притоки – р. Абашево, р. Мрассу, р. Ольжерас и другие. Гидрогеологические условия и химический состав подземных вод детально были представлены в работах [22–24]. В целом рассматриваемый район представляет со-

бой сложную синклиналиную структуру, для подземных вод которой характерен преимущественно трещинный тип движения воды и приуроченность подземных вод к верхней зоне трещиноватости.

Подземные воды изученного района подчиняются нормальной вертикальной гидродинамической и гидрогеохимической зональности. В связи с этим выделяются три зоны водообмена: активного, замедленного и весьма замедленного. Последняя зона выделяется исключительно по литературным данным и в данной работе не рассматривается.

В основу работы положены результаты исследования природных вод, полученные в период отбора проб в 2024–2025 гг., а также накопленные за последние годы данные по геохимии вод Кузнецкого угольного бассейна сотрудниками Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН [25]. Всего в работе проанализированы результаты исследований состава 89 проб воды, из которых 25 отобраны из поверхностных водотоков и 64 – из подземных вод. Пробоотбор проводился не только из рек, озер, родников, скважин, но и из прудов-отстойников, а также шахтных вод. Карта фактического материала представлена на рис. 1.

Исследования в данной работе сосредоточены на центральном и южном районах Кузбасса, где располагаются площади с большими оцененными запасами угольного метана [26, 27]. На некоторых из них в настоящее время идет добыча угольного метана (Нарыкско-Осташкинская, Талдинская), какие-то площади не подверглись антропогенному воздействию (Тутуясская). Тем не менее все они в разной степени граничат с действующими угольными разрезами (Таежный, Распадский и др.), а также подвержены влиянию хозяйственной деятельности человека.

Результаты химического анализа природных вод представлены для разных типов водных объектов: 1) речных и озерных вод, которые в свою очередь были разделены на природные и природные смежные с промышленными территориями; 2) подземных вод активного водообмена; 3) подземных вод верхней и 4) нижней части замедленного водообмена. Вместе с тем проведено сравнение и анализ гидрогеохимической ситуации для разных территорий (нарушенные и не нарушенные, т. е. природные). Работа по изучению содержаний фульво- и гуминовых и кислот (ФК и ГК) в природных водах Кузбасса была проведена в [28] и показывает наличие высоких их содержаний до 115 мг/л ФК и ГК.

Помимо изучения химического состава вод и входящих в него органических соединений, которые являются ключевыми аспектами данного исследования, оценивались такие параметры, как температура, pH, Eh, общая минерализация и уровни биогенных веществ.

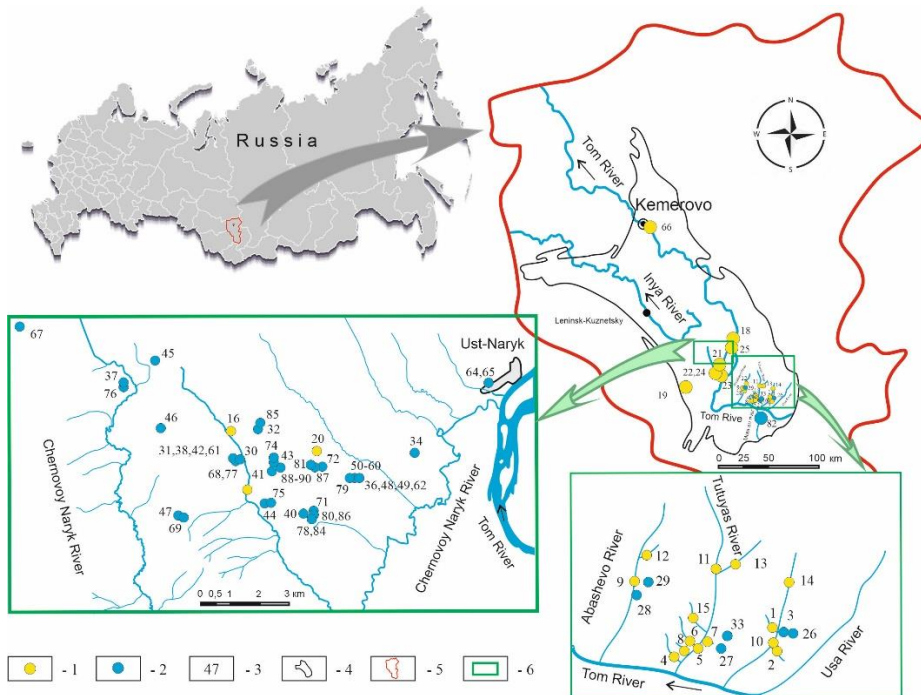


Рис. 1. Карта точек отбора проб: 1 – точка отбора поверхностных вод, 2 – точка отбора подземных вод, 3 – номер пробы, 4 – граница Кузбасса, 5 – граница Кемеровской области, 6 – участки детального исследования
Fig. 1. Scheme of sampling points: 1 – surface water sampling point, 2 – groundwater sampling point, 3 – sample number, 4 – Kuzbass border, 5 – border of Kemerovo region, 6 – areas of detailed research

Аналитические исследования проводились в Проблемной научно-исследовательской гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета по аттестованным методикам.

Определение содержания в водных образцах ПАУ проводилось в Лаборатории физико-химических исследований керна и пластовых флюидов Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (г. Томск) в соответствии с действующей методикой ПНД Ф 14.1:2:4.70-96. Подобные методики описаны в литературе [29–33]. Измерение массовых концентраций ПАУ в природных водах проводились методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. ПАУ экстрагировались с использованием н-гексана. Экстракты фильтровались через бумажный фильтр для последующего концентрирования на вакуумном концентраторе до объема 0,5 см³. Очищение проводилось методом тонкослойной хроматографии на оксиде алюминия III степени активности, довели объем исследуемого образца до 1 мл ацетонитрилом. Содержание индивидуальных ПАУ в природных водах определялось методом ВЭЖХ на приборе Shimadzu LC-20 с диодноматричным и флуоресцентным детектором. Разделение проводилось на обращенно-фазовой колонке 150*4,6 мм SupelcoSil LC-PAH, фаза C₁₈, размер частиц 5 мкм. В качестве элюента использовали ацетонитрил (1 сорт) и бидистиллированную воду. Хроматографирование

проводили в градиентном режиме: ацетонитрил/вода=(50:50)–(100:0) первые 20 минут, 100 % ацетонитрила с 20-й по 40-ю минуту анализа. Скорость потока растворителя – 1 мл/мин, объем пробы составлял 20 мкл, рабочая температура колонки – 40 °С. Время анализа в выбранных условиях составляло 40 минут. Спектры снимались в интервале 190–500 нм для количественного определения сигнал регистрировался на длине волны 254 нм. В пробах природных вод были количественно определены в порядке выхода на хроматограммах следующие индивидуальные ПАУ: нафталин (Naph), 2-метилнафталин (2-MeNaph), флуорен (Flu), фенантрен (Phe), флуорантен (Flt), пирен (Pyr), антрацен (Antr), бенз[а]антрацен (B[a]A), хризен (Chr), бенз[б]флуорантен (B[b]F), бенз[к]флуорантен (B[k]F), бенз[а]пирен (B[a]P), дибенз[а,h]антрацен (D[a,h]A). Из представленных компонентов к низкомолекулярным (НМ) соединениям относятся нафталин 2-метилнафталин, флуорен, фенантрен и антрацен; остальные ПАУ относятся к высокомолекулярным (ВМ) компонентам.

Результаты исследования и их обсуждение

При анализе ранее известной информации и полученного нового материала по гидрогеохимии в 2024 и 2025 гг. можно отметить, что подземные воды подчиняются прямой вертикальной гидродинамической зональности, в соответствии с которой

подземные воды можно отнести к зоне активного водообмена (глубина распространения от 30 до 200, реже 300–400 м) и замедленного (верхняя часть зоны замедленного водообмена до 600–700 м и нижняя часть зоны замедленного водообмена до 1200 м). Нижняя граница зоны замедленного водообмена определена нами по имеющимся максимальным глубинам опробования. Зона весьма замедленного водообмена определяется только по результатам опробования Абашевской глубокой скважины из литературных источников (глубина

более 2000 м). Это воды Cl^- , HCO_3^- типа (содержание Cl^- до 11,0 г/л, HCO_3^- до 10,9 г/л) с преобладающим катионом Na^+ (до 12,0 г/л) [20].

Каждая из этих зон характеризуется специфическими особенностями химического состава, обусловленными гидрогеологическими условиями, антропогенным воздействием и природными процессами. Результаты изученного нами химического состава и показателей органического вещества природных вод исследуемой территории приведены в таблице.

Таблица. Химический состав природных вод Кузбасса
Table. Chemical composition of Kuzbass natural waters

Элемент Element	Ед. изм. Unit of meas.	Поверхностные воды Surface waters		Подземные воды Groundwater		
		Реки и озера Rivers and lakes	Реки и озера, смежные с промышленными территориями Rivers and lakes adjacent to industrial areas	Активный водообмен Active water exchange	Верхняя часть зоны замедленного водообмена Upper part of the slow water exchange zone	Нижняя часть замедленного водообмена Lower part of the slow water exchange
Ca^{2+}	мг/л mg/l	<u>6-54</u> 20	<u>30-102</u> 56	<u>5-120</u> 63	<u>0,2-74</u> 43	<u>2,4-143</u> 29
Mg^{2+}		<u>1,8-12,5</u> 5,1	<u>17,1-64,0</u> 32,3	<u>1,2-30,5</u> 13,6	<u>1,2-16,5</u> 11,2	<u>1,6-79,3</u> 29,2
Na^+		<u>1,8-33</u> 7	<u>16-420</u> 182	<u>6,6-137</u> 52	<u>105-426</u> 229	<u>341-7230</u> 3741
K^+		<u>0,1-3,6</u> 0,7	<u>1,6-5,4</u> 2,8	<u>0,3-2,9</u> 1,0	<u>0,6-9,6</u> 4,4	<u>5,4-2016</u> 298,0
HCO_3^-		<u>22-273</u> 88	<u>268-1062</u> 614	<u>114-580</u> 365	<u>570-950</u> 774	<u>788-15494</u> 8035
SO_4^{2-}		<u>2,5-12,4</u> 6,7	<u>40,3-291,8</u> 124,4	<u>0,1-16,9</u> 6,4	<u>2,0-12,7</u> 6,4	<u>0,9-36,8</u> 6,8
Cl^-		<u>0,4-9,9</u> 2,2	<u>3,1-10,9</u> 5,6	<u>0,5-35,7</u> 4,9	<u>2,5-88,0</u> 26,3	<u>241-5 494</u> 1333
TDS		<u>37,2-371</u> 136	<u>420-1833</u> 1 055	<u>171-769</u> 506	<u>780-1499</u> 1 116	<u>3 272-26602</u> 14 499
$C_{\text{орг}} / \text{DOC}$		<u>2,1-16,1</u> 5,9	<u>2,4-3,5</u> 2,8	<u>0,7-8,3</u> 3,5	<u>0,2-19,1</u> 9,5	<u>3,9-326</u> 123
pH			<u>6,8-9,9</u> 8,1	<u>8,0-8,5</u> 8,3	<u>7,0-9,0</u> 7,9	<u>7,1-8,3</u> 7,6
ОЖ	мг-э/л mg-e/l	<u>0,5-3,6</u> 1,5	<u>3,7-10,4</u> 5,4	<u>0,4-7,8</u> 4,1	<u>0,1-4,8</u> 3,0	<u>0,3-8,1</u> 3,3
ПО/РО	мг O_2 /л mg O_2 /l	<u>0,6-16,4</u> 4,2	<u>3,8-15,3</u> 8,3	<u>0,2-4,6</u> 1,0	<u>0,3-1,2</u> 0,7	<u>1,3-19,2</u> 5,2
ХПК/COD		<u>3,9-28,8</u> 10,4	<u>8,4-54,1</u> 31,3	<u>3,5-11,7</u> 6,7	<u>4,9-19,0</u> 10,4	<u>5,0-161</u> 43,3
ΣПАУ/ΣРАН	мкг/л μg/l	<u>0,054-0,885</u> 0,346	<u>0,237-0,885</u> 0,381	<u>0,565-0,612</u> 0,589	<u>0,691-2,433</u> 1,562	<u>0,119-18,940</u> 1,923
ΣНМ/ΣЛМ		<u>0,014-0,506</u> 0,176	<u>0,102-0,506</u> 0,183	<u>0,204-0,282</u> 0,243	<u>0,206-1,612</u> 0,909	<u>0,001-10,540</u> 1,179
ΣВМ/ΣНМ		<u>0,041-0,378</u> 0,171	<u>0,116-0,404</u> 0,198	<u>0,330-0,361</u> 0,345	<u>0,484-0,821</u> 0,653	<u>0,038-8,399</u> 0,765
Количество анализов Number of analyses	шт./th.	19	6	36	5	23

Примечание: в числителе – минимальное/максимальное значение, в знаменателе – среднее, ПО – перманганатная окисляемость, ХПК – химическое потребление кислорода, $C_{\text{орг}}$ – органический углерод, ΣПАУ – сумма ПАУ, ΣНМ – сумма НМ соединений, ΣВМ – сумма ВМ соединений.

Note: the minimum/maximum value is in the numerator, the average is in the denominator, PO – permanganate oxidizability, COD – chemical oxygen demand, DOC – organic carbon, ΣРАН – sum of polyaromatic hydrocarbons (PAH), ΣЛМ – sum of low molecular (LM) weight compounds, ΣНМ – sum of high-molecular (HM) compounds.

Речные и озерные воды. В пределах изученной территории исследован химический состав 25 проб поверхностных вод. Из них 19 проб природных (условно не нарушенных) водотоков разного порядка (реки, озера), а также 6 проб из поверхностных водотоков, расположенных на территориях смежных с областями, на которых идет промышленная разработка угольных месторождений или отмечено другое антропогенное воздействие (рис. 1). Как правило, природные поверхностные воды слабощелочные и щелочные с достаточно большим разбросом значений pH от 7,6 (единично 6,8) до 9,9 гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией в основном 100–420 мг/л. Однако среди анализов поверхностных вод выделяется часть проб, расположенных рядом с промышленными территориями – № 20–25 (рис. 1). Эти воды характеризуются более высоким значением минерализации (от 0,48 до 1,80 г/л) и более узким разбросом значений pH 8,0–8,5. График зависимости общей жесткости от минерализации природных вод показывает, что наблюдаемая положительная корреляция поверхностных вод при минерализации более 0,5 г/л пропадает (рис. 2). Как видно из анализа химического состава, в росте значений минерализации существенную роль начинают играть не только Ca^{2+} и Mg^{2+} , но и Na^+ , SO_4^{2-} (таблица).

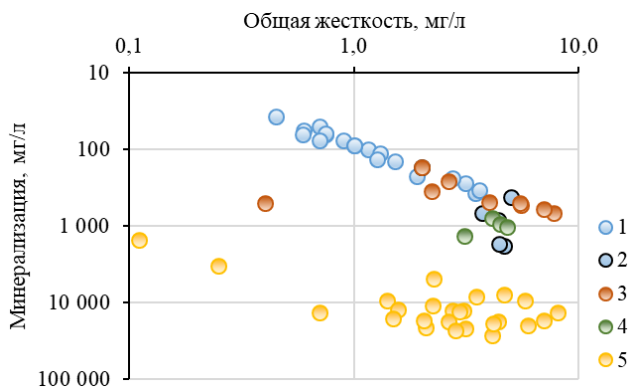


Рис. 2. Зависимость содержания общей жесткости природных вод от минерализации (1 – реки и озера, 2 – реки и озера, смежные с промышленными территориями, 3 – подземные воды зоны активного водообмена, 4 – подземные воды верхней части зоны замедленного водообмена, 5 – подземные воды нижней части зоны замедленного водообмена)

Fig. 2. Dependence of the total hardness content of natural waters on mineralization (1 – rivers and lakes, 2 – rivers and lakes adjacent to industrial areas, 3 – groundwater of the active water exchange zone, 4 – groundwater of the upper part of the slow water exchange zone, 5 – groundwater of the lower part of the slow water exchange zone)

Средние содержания Ca^{2+} увеличиваются с 20 до 56 мг/л, Mg^{2+} – с 5,1 до 32,3 мг/л, Na^+ – с 7 до 182 мг/л, K^+ – с 0,7 до 2,8 мг/л, HCO_3^{2-} – с 88 до 614 мг/л, SO_4^{2-} – с 6,7 до 124,4 мг/л. Кроме этого, группа поверхностных вод, смежная с промышленными территориями, характеризуется повышенным, по сравнению с ними, содержанием всех макрокомпонентов. Концентрации микроэлементов Zn, Cd, Pb, Cu, Hg не превышают ПДК для питьевых вод, что свидетельствует об относительно низком уровне загрязнения тяжелыми металлами [21, 22].

Изучаемые поверхностные воды обогащены органическим веществом. Так, количество $\text{C}_{\text{орг}}$ варьируется от 2,1 до 16,1 мг/л, величина перманганатной окисляемости находится в интервале от 4,2 до 8,3 мг O_2 /л, а показатель химического потребления кислорода – от 10,4 до 31,3 мг O_2 /л. Все это указывает на наличие в поверхностных водах органических веществ различного строения и происхождения (естественного и антропогенного). Одним из изучаемых показателей, относящихся к стойким экотоксикантам и входящих в состав органической массы углей, являются полиароматические углеводороды [34, 35]. Эмиссия ПАУ в окружающую среду возможна на любых этапах от добычи до переработки угля. Рядом авторов [36] показано, что удобными трассерами для оценки загрязнения атмосферы, почв и поверхностных вод являются: фенантрен–флуорантен–пирен–хризен. Большинство исследователей связывают содержание фенантрена в различных природных образцах (водах, почвах, донных осадках) со степенью техногенной нагрузки на территорию [37–39].

Так, Н.В. Журавлевой с соавторами проведен цикл работ по оценке влияния процессов добычи и переработки углей Кузнецкого бассейна на экологическое состояние природной среды, в которых доказано, что трех-четырёхядерные структуры – фенантрен, флуорантен, пирен, как вещества, обладающие химической устойчивостью во внешней среде, являются маркерами для изучения степени загрязненности территорий [36, 40].

Состав индивидуальных ПАУ в поверхностных водах изучаемой территории Кузбасса представлен в виде профиля ПАУ в относительных значениях, выраженных в процентах от суммы (рис. 3). Из рисунка видно, что доминирующими представителями данного класса углеводородов в экстрактах являются нафталин, 2-метилнафталин, фенантрен, флуорантен, пирен, дибензантрацен.

В Российской Федерации нормируются только два соединения для ПАУ. В питьевых водах уровень ПДК для нафталина составляет 10 мкг/л и для бенз(а)пирена – 0,01 мкг/л [34]. Содержание нафталинов (биароматических углеводов) в экстрактах поверхностных вод изучаемой территории ко-

леблется от 1,40 до 78,08 отн. %, что соответствует 0,002–0,570 мкг/л, с повышенным содержанием в пробах № 19 – 15,93 отн. % и № 16 – 17,93 отн. %, а для проб № 21, 22 установлено их максимальные содержания – 78,08 и 74,98 отн. %, соответственно. В пробе № 16 обнаружен 2-метилнафталин до 19,32 отн. %, для остальных проб его содержание находится в интервале от 3,22 до 9,94 отн. %. По сумме нафталинов (пробы 21, 22, 16) зафиксировано превышение ПДК от 3 до 7 раз.

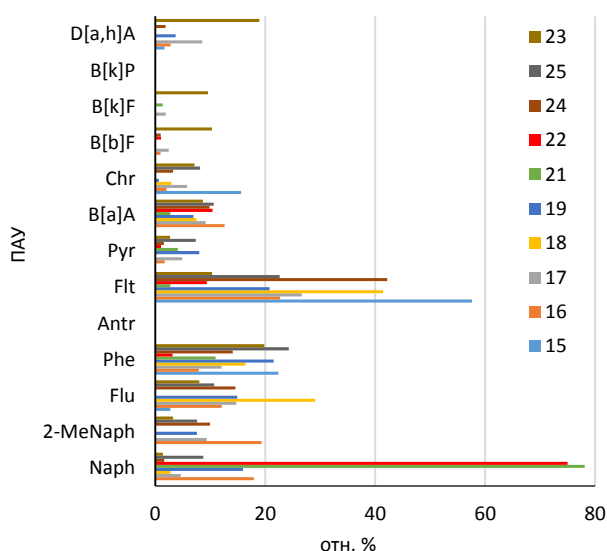


Рис. 3. Профиль ПАУ в пробах поверхностных вод Кузбасса, отн. %

Fig. 3. PAH profile in surface water samples of Kuzbass, rel. %

Во всех экстрактах отобранных проб воды определено содержание фенантрена (углеводорода $C_{14}H_{10}$ с тремя ароматическими кольцами) от 3,12 до 24,27 отн. % и содержание это находится в интервале значений от 0,012 до 0,058 мкг/л. Наибольшие концентрации зафиксированы в пробах, соответствующих точкам отбора № 23 – 19,82 отн. %, № 19 – 21,53 отн. %, № 15 – 22,39 отн. %, № 25 – 24,27 отн. %.

Содержание хризена – ПАУ состава $C_{18}H_{12}$, молекула которого содержит 4 конденсированных бензольных кольца, основного компонента каменноугольной смолы, в пробах изменяется от 0,66 до 15,6 отн. %, что соответствует интервалу от 0,001 до 0,009 мкг/л, максимальное значение установлено в пробе воды № 15 – 15,6 отн. %.

В поверхностных водах изучаемой территории Кузбасса установлено наличие флуорантена ($C_{16}H_{10}$ – это ПАУ, молекула которого состоит из нафталина и бензола, соединённых пятичленным кольцом, является структурным изомером и в высоких количествах присутствует в каменноуголь-

ной смоле) от 0,020 до 0,031 мкг/л, что соответствует 2,74–57,59 отн. %. Наиболее высокие значения флуорантена для поверхностных вод установлены в точках отбора № 15 – 57,59 отн. %, № 24 – 42,17 отн. % и № 18 – 41,41 отн. %.

Дибензантрацен ($C_{22}H_{14}$ – ПАУ, состоящий из пяти конденсированных бензольных колец) определен в пробе № 23 – 18,91 отн. % (0,048 мкг/л) Для остальных проб его содержание не превышает 8,57 отн. %.

Известно, что наиболее канцерогенным веществом считается бенз(а)пирен, в пробах поверхностных вод Кузбасса его присутствие не обнаружено. Однако в единичном случае (проба № 22) определено – 0,0002 мкг/л, что не превышает регламентированного значения ПДК.

Водные системы, расположенные в зонах повышенной антропогенной нагрузки, как правило, характеризуются более высокими значениями содержания ПАУ. Важно отметить, что распределение индивидуальных ПАУ по изучаемым водным объектам Кузбасса неравномерно, некоторые пробы обогащены одним, двумя или несколькими компонентами, другие представлены низкими концентрациями или следовыми количествами, которые фиксируются используемым нами методом ВЭЖХ.

Подземные воды зоны активного водообмена распространены в верхней части разреза, сложенной рыхлыми мезо-кайнозойскими отложениями (преимущественно четвертичными) отложениями, и в зоне интенсивной трещиноватости юрских и триасовых отложений [22, 28]. Минерализация колеблется от 0,2 до 0,8 г/л, рН – от 7,0 до 9,0, по составу гидрокарбонатные кальциевые, в редких случаях с повышенным содержанием Na^+ . Для вод характерны более высокие содержания макрокомпонентов по сравнению с реками и озерами, но не такие высокие, как концентрации в реках и озерах, смежных с промышленными территориями (таблица). Содержания Cl^- и SO_4^{2-} также невысоки. Подземные воды характеризуются в основном как нейтральные, реже слабощелочные.

Подземные воды этой зоны имеют более низкие концентрации органических веществ, чем поверхностные (таблица, рис. 4, а). В результате проведенного анализа установлены значения для $C_{орг}$ 0,7–8,3 мг/л (в среднем 3,5), ПО 0,2–4,6 мг/л (в среднем 1,0 мг/л) и ХПК 3,5–11,7 мг O_2 /л (в среднем 6,7 мг O_2 /л). Для подземных вод активного водообмена определена Σ ПАУ от 0,565 до 0,612 мкг/л при среднем значении 0,589 мкг/л.

В составе индивидуальных ПАУ вод зоны активного водообмена в экстрактах доминируют фенантрен, флуорантен, дибензантрацен над остальными компонентами.

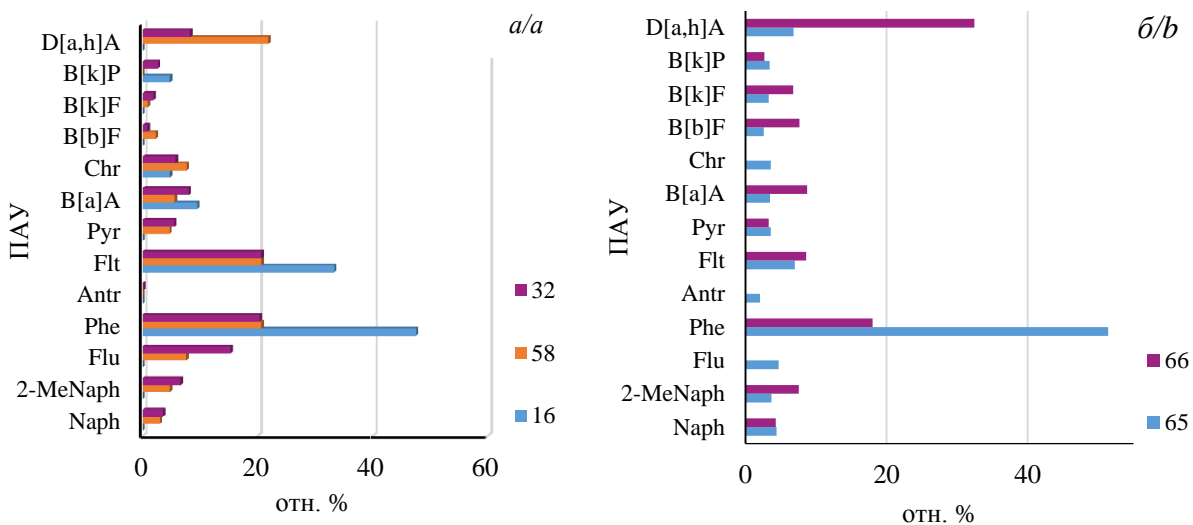


Рис. 4. Профиль ПАУ в пробах подземных вод зоны активного водообмена (а) и верхней части замедленного водообмена (б), отн. %

Fig. 4. PAH profile in groundwater samples from the active water exchange zone (a) and the upper part of the slow water exchange (b), rel. %

Содержание нафталина в пробах колеблется от 3,03 до 3,58 отн. %, для 2-метилнафталина – от 4,79–6,65 отн. %. Триароматические ПАУ представлены фенантреном в количестве от 20,40 до 47,60 отн. % и флуореном от 7,63 до 15,30 отн. %. ПАУ, содержащие четыре ароматических кольца, представлены пиреном от 0,05 до 5,56 отн. % и хризеном от 4,76 до 7,68 отн. % в исследуемых экстрактах. Установлено содержание флуорантена и дибензантрацена от 20,67 до 33,32 и от 8,33 до 21,9 отн. %, соответственно. Содержание бенз(а)пирена в основном не превышает значений ПДК и находится в интервале 2,71–4,76 отн. %, что соответствует 0,01 мкг/л, единично достигая 0,016 мкг/л на участках, сопряженных с техногенными зонами.

Подземные воды верхней части зоны замедленного водообмена (с интенсивно трещиноватыми породами) распространены в песчаных пермских угленосных отложениях, частично в эффузивно-осадочных безугольных отложениях триаса. Воды этой зоны отличаются более высокой минерализацией (780–1499 мг/л), что указывает на солоноватый характер вод и щелочной характер среды (рН от 7,1 до 8,3), гидрокарбонатным натриевым (содовым) составом. В ионном составе преобладают: HCO_3^- (570–950 мг/л), Na^+ (105–426 мг/л), содержания Ca^{2+} от 0,2 до 74,0 мг/л и Mg^{2+} от 1,2 до 16,5 мг/л, что в среднем немного ниже, чем в зоне активного водообмена, но выше, чем в поверхностных водах (природных, не нарушенных). Показатель $S_{\text{орг}}$ в среднем увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с вышележающими водами. Значения ПО изменяется от 0,3 до 1,2 (в среднем

0,7) $\text{мгO}_2/\text{л}$, а ХПК от 4,9 до 19,0 (в среднем 10,4) $\text{мгO}_2/\text{л}$, что указывает на увеличение доли трудно-окисляемых органических соединений. СПАУ изменяется от 0,691 до 2,433 мкг/л (в среднем 1,562).

Состав индивидуальных ПАУ в экстрактах воды верхней части зоны замедленного водообмена представлен всеми 13 соединениями с доминированием фенантрена в пробе № 65, дибензантрацена в № 66 (рис. 4, б). Сумма биароматических ПАУ (нафталин+2-метилнафталин) в отобранных пробах воды изменяется от 8,09 до 11,85 отн. %, а фенантрена – от 18,0 до 51,4 отн. %.

Четырехядерные ПАУ – пирен и хризен – не превышают значения 3,59 отн. %. Установлено содержание для флуорантена от 6,99 до 8,59 отн. % и бензантрацена от 3,48 до 8,73 отн. %. Величины значений для бензпирена находятся в интервале 0,018–0,083 мкг/л и соответствуют 2,68–3,43 отн. %, что не превышает предельно допустимых значений. На сумму бензфлуорантенов, полиароматических структур с пятью кольцами, приходится от 5,86 до 14,41 отн. % в изучаемом экстракте, что соответствует 0,143 и 0,099 мкг/л. Содержание дибензантрацена изменяется от 6,81 до 32,45 отн. %.

Подземные воды нижней части зоны замедленного водообмена (в породах затухающей трещиноватости) распространены в пермских угленосных отложениях. Минерализация этих вод достигает 3272–26602 мг/л, что указывает на умеренно солоноватый и слабосоленый тип вод. Ее изменение происходит за счет продолжающегося увеличения с глубиной содержания HCO_3^- , Na^+ , а также Cl^- . При этом доля SO_4^{2-} незначительна. Наибольшие значения наблюдаются в скважинах с глубиной залега-

ния более 1000 м. Воды в основном характеризуются слабощелочной и щелочной средой pH 7,2–8,9, содовым составом и высокими концентрациями органических веществ $C_{орг}$ от 3,9 до 326 мг/л (в среднем 123 мг/л). Увеличиваются и значения перманганатной окисляемости от 1,3 до 19,2 мгO₂/л (в среднем 5,2), а химическое потребление кислорода в подземных водах возрастает до 161,0 мгO₂/л (в среднем до 43,3). Таким образом, для подземных вод нижней части зоны замедленного водообмена установлено увеличение коэффициента степени обогащенности водорастворенного органического вещества от 3,85 до 8,39, что указывает на их положение рядом с зонами, содержащими углеводороды. ΣПАУ изменяется от 0,119 до 18,940 мкг/л (в среднем 1,923).

Состав индивидуальных ПАУ для подземных вод, приуроченных к нижней части зоны замедленного водообмена, смещен в сторону соединений, содержащих в своем составе от двух до четырех ароматических колец: нафталин, 2-метилнафталин, флуорен, фенантрен, флуорантен, бенз[а]антрацен (рис. 5). В данной группе исследуемых проб воды (проба № 88) обнаружено высокое содержание флуорантена – до 85,5 отн. % (151,58 мкг/л) и 2-метилнафталина – до 5,48 отн. % (9,684 мкг/л), остальные индивидуальные соединения представлены незначительно – от 0,17 до 1,88 отн. % и находятся в интервале концентраций от 0,29–3,00 мкг/л.

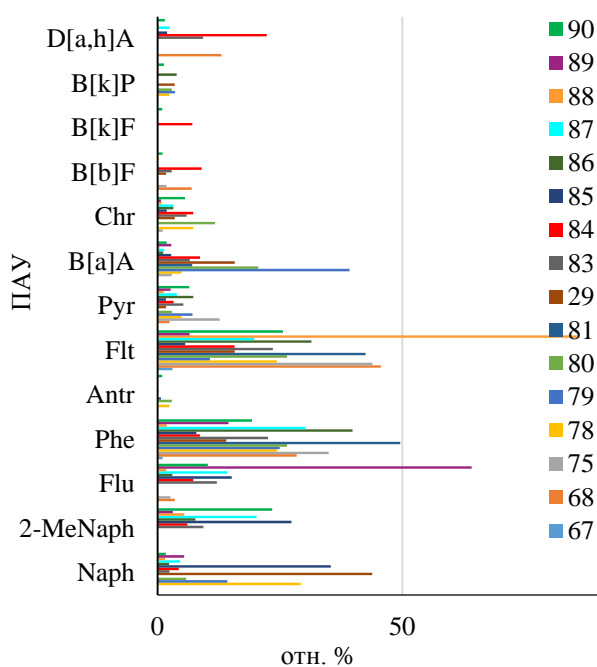


Рис. 5. Профиль ПАУ в пробах подземных вод нижней части замедленного водообмена, отн. %

Fig. 5. PAH profile in groundwater samples from the lower part of the slow water exchange zone, rel. %

Содержание нафталинов в остальных пробах воды, относящихся к этой зоне, колеблется от 1,52 до 43,86 отн. %. Наибольшая концентрация установлена в пробе № 29 – 43,86 отн. %, а также в пробе № 85 – 35,40 отн. %, № 78 – 29,26 отн. %. Для 2-метилнафталина установлен интервал от 3,12 до 7,74 отн. % и в трех пробах зафиксированы повышенные значения: до 20,22 отн. % в пробе № 87, 23,43 отн. % – в пробе № 90, и 27,36 отн. % – в пробе № 85. Сумма нафталинов в водах нижней части замедленного водообмена находится в границах от 0,003 до 2,682 мкг/л. Зафиксированное максимальное значение в пробе № 88 не превышает ПДК – 10 мкг/л, установленную нормативами РФ [34].

Триароматические углеводороды в исследуемых пробах представлены антраценом, фенантеном и флуореном. Из 16 исследуемых проб воды, приуроченных к этой зоне, антрацен присутствует только в 6 и в незначительных количествах: от 0,16 до 2,94 отн. %. Фенантен обнаружен во всех пробах этой зоны в интервале концентраций от 0,033 до 0,443 мкг/л. Максимальное содержание зарегистрировано в пробе № 90 – 3,656 мкг/л.

Интервал значений флуорена колеблется от 2,64 до 15,17 отн. %, и только проба воды № 89 на 64,18 отн. % обогащена им.

Тетраароматические углеводороды хризен и пирен не превышают максимальных концентраций 11,76 отн. % для проб № 80 (хризен) и 12,69 отн. % для № 75 (пирен), для всех остальных проб находятся в границах от 0,07 до 7,32 отн. %.

Содержание бенз(а)пирена изменяется от 0,003 до 0,01 мкг/л, что не превышает ПДК, кроме проб № 88 – 0,379 и № 90 – 0,247 мкг/л, где установлено превышение нормированного значения.

Полиароматический углеводород флуорантен в водах нижней зоны замедленного водообмена обнаружен во всех пробах в количестве от 3,04 до 85,82 отн. %, повышенные значения установлены в пробах: № 81 – 42,49 отн. %, № 75 – 43,89 отн. %, № 68 – 45,62 отн. % и № 88 – 85,82 отн. %.

Дибензантрацен (C₂₂H₁₄), состоящий из 5 бензольных колец, был идентифицирован не во всех пробах, а содержание варьируется от 0,25 до 22,35 отн. %.

Таким образом, химический состав вод в различных зонах водообмена отражает влияние как природных факторов (геохимические процессы, взаимодействие с горными породами), так и антропогенного воздействия. Поверхностные воды характеризуются низкой минерализацией и преобладанием HCO₃⁻, Ca²⁺ и Mg²⁺. С увеличением глубины залегания вод наблюдается рост минерализации, изменение ионного состава и увеличение концентраций Na⁺ и K⁺. Воды нижней части замедлен-

ного водообмена имеют высокую минерализацию и специфический ионный состав, что связано с их глубоким залеганием и длительным контактом с горными породами.

Величина общей жесткости подземных вод часто коррелирует с минерализацией, которая представляет собой общее количество растворённых солей в воде. Повышенная минерализация обычно сопряжена с высокой концентрацией Ca^{2+} и Mg^{2+} , которые приводят к большей жесткости. Однако важно отметить, что не все макрокомпоненты способствуют повышению жесткости. Например, Na^+ и Cl^- могут увеличивать минерализацию, но не влияют на жесткость. Высокая минерализация может указывать на высокую концентрацию других ионов, таких как натрий (Na^+), калий (K^+), сульфаты (SO_4^{2-}), хлориды (Cl^-) и карбонаты (HCO_3^-). Это может происходить из-за различных геохимических процессов или антропогенного воздействия (например, сельскохозяйственное использование удобрений, сброс сточных вод, влияние промышленной деятельности).

Детальный анализ содержания ПАУ в природных водах Кузбасса показал, что состав из 13 определяемых нами стойких органических загрязняющих веществ в природных объектах неоднороден. ПАУ в экстрактах представлены неравномерно: то обогащены одним, двумя или несколькими компонентами от 40 до 50 отн. % и выше, то находятся в следовых количествах. Для изучаемых природных вод территории Кузбасса только два ПАУ идентифицируются во всех проанализированных пробах – фенантрен и флуорантен – в концентрациях от 3 до 60 отн. %. Следует отметить, что и характер распределения для обоих соединений аналогичен. Важно, что распространение ПАУ имеет четкую зависимость от близости к источникам техногенного загрязнения. Наибольшие концентрации ПАУ наблюдаются в поверхностных водах, расположенных вблизи угледобывающих предприятий, а также в шахтных водах и водах из отстойников. В подземных водах концентрации ПАУ ниже, что связано с естественной фильтрацией через породы. Таким образом, они являются для данного промышленного региона надежными трассерами для оценки загрязнения природных вод.

ПАУ в природных водах Кузбасса взаимодействуют с другими компонентами, такими как металлы и органические вещества. Высокие концентрации железа и алюминия в шахтных водах могут способствовать образованию комплексов с ПАУ, что может усиливать их токсичность [3, 8]. Кроме того, наличие органических веществ в водах может влиять на растворимость и миграцию ПАУ, что необходимо учитывать при оценке их воздействия на окружающую среду.

Техногенные факторы, такие как добыча угля и промышленные выбросы, играют ключевую роль в распространении ПАУ в природных водах Кузбасса. Однако нельзя исключать и влияние природных факторов, таких как лесные пожары и естественное выветривание угольных пластов. Влияние этих факторов необходимо учитывать при разработке мер по снижению загрязнения природных вод.

Выводы

На основе проведенного анализа собранного и изученного фактического материала по геохимии природных вод Кузбасса:

- получены новые данные по содержанию индивидуальных ПАУ для природных вод (поверхностные и подземные) в нарушенных и не нарушенных условиях;
- установлено, что подземные воды юрских и верхнепермских терригенно-угленосных отложений тайлуганской свиты Ерунаковской подсерии Кольчугинской серии Кузнецкого бассейна подчиняются вертикальной гидродинамической зональности. Выделяются зоны: активного, верхняя и нижняя части замедленного водообмена. Каждая из зон характеризуется специфическими химическими составами, которые зависят от гидрогеологических условий и в разной степени подвержены антропогенному воздействию;
- установлено, что поверхностные воды, особенно вблизи промышленных территорий, имеют повышенные уровни минерализации и концентрации макрокомпонентов, таких как Na^+ и SO_4^{2-} . Содержание бенз(а)пирена в пробах поверхностных вод не превышает предельно допустимых концентраций, что свидетельствует о контролируемом уровне загрязнения, однако в некоторых пробах наблюдаются превышения для других соединений. В подземных водах наблюдается увеличение содержания органических веществ и ПАУ с глубиной отбора (залегания). В нижней части зоны замедленного водообмена суммарное содержание ПАУ может достигать 18,940 мкг/л, что указывает на присутствие в системе процессов, способствующих их аккумуляции в водной среде;
- определено, что содержание индивидуальных ПАУ в водах распределено неравномерно. Часть проб обогащены определенными соединениями, в то время как другие показывают их низкие концентрации. Это указывает на влияние антропогенной нагрузки на качество вод;
- выявлено, что фенантрен и флуорантен для данного промышленного региона могут являться надежными трассерами для оценки загрязнения природных вод.

Таким образом, проведенное исследование показало, что антропогенное воздействие на водные ресурсы Кузбасса приводит к изменению химического состава вод, увеличению минерализации и концентрации органических загрязнителей, что требует дальнейшего мониторинга и оценки экологического состояния водоемов.

Важно исследовать систему вода–порода–органическое вещество, особенно в контексте

угольных отложений Кузнецкого бассейна, с применением комплексного подхода. Понимание процессов, происходящих при формировании природных вод, может помочь разработать стратегии по улучшению качества водных ресурсов, а также способствовать предотвращению негативного воздействия угольной промышленности на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Unveiling polycyclic aromatic hydrocarbon pollution dynamics in river-lake sediments: insights for energy transition / Y. Ma, C. Chen, Ch. Yang, Q. Yao, X. Zhou, Q. Huang, L. Chen // *Journal of Environmental Management*. – 2025. – Vol. 378. – № 4. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124737.
2. Distribution, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from the Yellow Sea coast, China / D. Zhang, Yao Wang, Xu. Jiang, K. Cao, P. Yin, Z. Zhao, Yi. Fan, Na Liu // *Marine Pollution Bulletin*. – 2023. – Vol. 192. – № 5. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115001.
3. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Изд-во «ЦентрЛитНефтеГаз», 2012. – 672 с.
4. Барс Е.А., Коган С.С. Методическое руководство по исследованию органических веществ подземных вод нефтегазоносных областей. – М.: Недра, 1973. – 298 с.
5. Distribution, fate and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmosphere and surface water of multiple coral reef regions from the South China Sea: a case study in spring-summer / R. Zhang, M. Han, K. Yu, Ya. Kang, Yi. Wang, Xu. Huang, Ju. Li, Yi. Yang // *Journal of Hazardous Materials*. – 2021. – Vol. 412. – № 6. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125214.
6. Occurrence, distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives in the effluents of wastewater treatment plants / Q. Liu, Xi. Xu, L. Lin, D. Wang // *Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 789. – № 10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147911.
7. Regulation of slow-release performance of high-sugar biomass waste filter mud and sugarcane bagasse by co-hydrothermal carbonization and potential evaluation of hydrochar-based slow-release fertilizers (article) / S. Chen, X. Tang, J. Chen, Y. Xue, Y. Wang, D. Xu // *Biomass and Bioenergy*. – 2025. – Vol. 193. – № 2. DOI: 10.1016/j.biombioe.2024.107557.
8. Кирюхин В.К., Мелькановицкая С.Г., Швец В.М. Определение органических веществ в подземных водах нефтегазоносных областей. – М.: Недра, 1973. – 189 с.
9. Li X., Wang Y., Zhang C. Hydrogeochemical processes controlling groundwater composition in coal-bearing strata: Insights from ion exchange, sorption, and organic-inorganic interactions // *Journal of Hydrology*. – 2022. – Vol. 615 (Part A). DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128456.
10. Organic trace contaminants in fresh natural waters from the drainage basins of Tom' and upper Ob' rivers / A.E. Kontorovich, S.L. Shvartsev, N.M. Rasskazov, V.A. Zuev, Yu.P. Turov // *Geochemistry International*. – 2000. – Vol. 38. – № 5. – P. 480–490.
11. PAHs in sediments and shrimps: levels, sources, and risk estimation in a tropical coastal lagoon system near oil industry / P.E. Namihira-Santillán, H.F. Olivares-Rubio, L.B. Velandia-Aquino, G. Ponce-Vélez // *Marine Pollution Bulletin*. – 2025. – Vol. 214. – № 5. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2025.117812.
12. Ecological and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediment core of Phayao Lake, Thailand / W. Deelaman, C. Choochuay, S. Pongpiachan, Yo.M. Han // *Journal of Environmental Exposure Assessment*. 2023. – Vol. 2. – № 1. DOI: 10.20517/jeea.2022.29/
13. Berrios-Rolón P.J., Cotto M., Márquez F. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in freshwater systems: a comprehensive review of sources // *Distribution and Impacts*. – 2024. – Vol. 1. – № 4. DOI: 10.20944/preprints202404.1983.v1.
14. Король И.С., Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Органические микропримеси в высокоминерализованных подземных водах угольных отложений // *Подземная гидросфера: материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам Востока России с международным участием*. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. – С. 483–488.
15. Швец В.М. Водорастворенные органические вещества и оценка их влияния на качество питьевых подземных вод // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. – 2016. – № 1. – С. 43–49.
16. Аномальный состав изотопов углерода в подземных щелочных водах Кузбасса / С.Л. Шварцев, О.Е. Лепокурова, Е.В. Домрочева, В.А. Пономарчук, Д.А. Сизиков // *Доклады академии наук*. – 2016. – Т. 469. – № 6. – С. 724–728.
17. Лепокурова О.Е., Пыряев А.Н., Шварцев С.Л. Стабильные изотопы углерода водорастворенных газов угленосных отложений Нарыско-Осташкинской площади (Кузбасс) // *Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы Второй Всероссийской конф. с междун. участием*. – Владивосток: Изд-во «Дальнаука», 2015. – С. 393–396.
18. Лепокурова О.Е. Содовые подземные воды юга Кузбасса: изотопно-химические особенности и условия формирования // *Геохимия*. – 2018. – № 9. – С. 904–919.
19. Покровский Д.С. К вопросу режима подземных вод Ерунаковского района Кузбасса // *Известия Томского политехнического института*. – 1967. – Т. 167. – С. 32–35.
20. *Гидрогеология СССР. Т. XVII. Кемеровская область и Алтайский край* / под ред. М.А. Кузнецова, О.В. Постникова. – М.: Недра, 1972. – 398 с.
21. Рогов Г.М. *Гидрогеология и геоэкология Кузнецкого угольного бассейна*. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2000. – 166 с.
22. Домрочева Е.В. Геохимическое состояние природных вод юга Кузбасса на примере Тутуянской площади // *Международный научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»*. – Новосибирск: СГУГиТ, 2019. – Т. 2. – № 3. – С. 239–245.

23. Шварцев С.Л., Домрочева Е.В., Рассказов Н.М. Геохимия и формирование содовых вод Кузбасса // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 128–134.
24. Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Изотопный состав природных вод Кузбасса на площадях добычи угольного метана // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 71–86. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4775/
25. Лепокурова О.Е., Трифонов Н.С., Домрочева Е.В. Миграционные формы основных ионов подземных вод угленосных отложений Кузбасса с акцентом на соединения с гумусовыми кислотами (по результатам моделирования) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 76–89.
26. Основные направления стратегии развития ОАО «Газпром» промышленной добычи метана из угольных пластов / А.М. Карасевич, Н.М. Сторонский, В.Т. Хрюкин, Е.В. Швачко // Спецвыпуск журнала «Газовая промышленность» – Метан угольных пластов. – 2012. – № 672. – С. 125–137.
27. Кудинов Е.В. Промысловая добыча метана угольных пластов в Кузбассе как метод снижения угроз экосистеме // Актуальные проблемы нефти и газа: Труды Международн. конф. «Дегазация Земли: геология и экология-2018». – 2018. – Вып. 4 (23). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art84.
28. Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Гуминовые вещества в природных водах Нарыкско-Осташкинской площади (Кузбасс) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 3. – С. 197–206.
29. МУК 4.1. 663-97. Методические указания. Определение массовой концентрации органических соединений в воде методом хромато-масс-спектрометрии. – М.: Минздрав России, 1997. – 41 с.
30. Soursou V., Campo Ju., Picó Yo. Revisiting the analytical determination of PAHs in environmental samples: AN update on recent advances // Trends in Environmental Analytical Chemistry. – 2023. – Vol. 37. – № 3. DOI: 10.1016/j.teac.2023.e00195.
31. Direct quantification of PAHs and nitro-PAHs in atmospheric PM by thermal desorption gas chromatography with electron ionization mass spectroscopic detection / I. Drventic, M. Sala, K. Vidovic, A. Kroflic // Talanta. – 2023. – Vol. 251. – № 1. DOI: 10.1016/j.talanta.2022.123761.
32. A systematic review of polycyclic aromatic hydrocarbon pollution: a combined bibliometric and mechanistic analysis of research trend toward an environmentally friendly solution / O.M. Yemele, Z. Zhao, J. Nkoh, E. Yemele, M. Usman // Science of The Total Environment. – 2024. – Vol. 926. – № 5. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171577.
33. Environmental contamination with polycyclic aromatic hydrocarbons and contribution from biomonitoring studies to the surveillance of global health / J. Teixeira, C. Delerue-Matos, S. Morais, M. Oliveira // Environmental Science and Pollution Research. – 2024. – Vol. 31. – № 8. – P. 54339–54362. DOI: 10.1007/s11356-024-34727-3.
34. 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).
35. Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклоароматических углеводородов. – Л.: Гидрометеониздат, 1988. – 233 с.
36. Экологические проблемы Кузнецкого угольного бассейна. Научные подходы и технологии для снижения загрязнений окружающей среды / З.Р. Исмагилов, Н.В. Журавлева, М.А. Керженцев, С.А. Яшник, Е.В. Матус, О.Ю. Подъячева, С.Р. Хайрулин, Н.В. Шикина, И.З. Исмагилов, А.П. Козлов, В.Г. Смирнов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2018. – Т. 26. – № 3. – С. 241–260. DOI: 10.15372/KhUR20180302.
37. Spatial variation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from rivers in hilly regions of Southern China in the wet and dry seasons / X. Gong, L. Xiao, Z. Zhao, Q. Li, F. Feng, L. Zhang, Z. Deng // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2018. – Vol. 156. – № 7. – P. 322–329. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.03.004.
38. Concentrations, sources profiles and potential risk / G. Hu, X. Luo, F. Li, J. Dai // Journal of Environmental Sciences. – 2010. – Vol. 22. – № 2. – P. 176–183.
39. Pollution control of wastewater from the coal chemical industry in China: environmental management policy and technical standards / J. Shi, W. Huang, H. Han, C. Xu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 143. – № 6. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110883.
40. Журавлева Н.В. Методы оценки влияния процессов добычи и переработки углей Кузнецкого угольного бассейна на экологическое состояние природной среды // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 4. – С. 102–112. EDN XQTOJN.

Информация об авторах

Евгения Витальевна Домрочева, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4; DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9515-4296>

Ирина Степановна Король, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4; irinakorol@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

Наталья Андреевна Мухортина, кандидат химических наук, научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4; volkovana@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

Поступила в редакцию: 16.04.2025

Поступила после рецензирования: 22.04.2025

Принята к публикации: 04.09.2025

REFERENCES

1. Ma Y., Chen C., Yang Ch., Yao Q., Zhou X., Huang Q., Chen L. Unveiling polycyclic aromatic hydrocarbon pollution dynamics in river-lake sediments: insights for energy transition. *Journal of Environmental Management*, 2025, vol. 378, no. 4. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124737.
2. Zhang D., Wang Yao, Jiang Xu., Cao K., Yin P., Zhao Z., Fan Yi., Liu Na. Distribution, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from the Yellow Sea coast, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, vol. 192, no. 5. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115001.
3. Krainov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets B.N. *Geochemistry of Groundwaters. Theoretical, applied and ecological aspects*. Moscow, CentrLitNefteGas Publ., 2012. 672 p. (In Russ.)
4. Bars E.A., Kogan S.S. *Methodological guide for the study of organic substances in groundwater in oil and gas regions*. Moscow, Nedra Publ., 1973. 298 p. (In Russ.)
5. Zhang R., Han M., Yu K., Kang Ya., Wang Yi., Huang Xu., Li Ju., Yang Yi. Distribution, fate and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmosphere and surface water of multiple coral reef regions from the South China Sea: a case study in spring-summer. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 412, no. 6. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125214.
6. Liu Q., Xu Xi., Lin L., Wang D. Occurrence, distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives in the effluents of wastewater treatment plants. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 789, no. 10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147911.
7. Chen S., Tang X., Chen J., Xue Y., Wang Y., Xu D. Regulation of slow-release performance of high-sugar biomass waste filter mud and sugarcane bagasse by co-hydrothermal carbonization and potential evaluation of hydrochar-based slow-release fertilizers (article). *Biomass and Bioenergy*, 2025, vol. 193, no. 2. DOI: 10.1016/j.biombioe.2024.107557.
8. Kiryukhin V.K., Melkanovitskaya S.G., Shvets V.M. *Determination of organic matter in groundwater of oil and gas bearing areas*. Moscow, Nedra Publ., 1973. 189 p. (In Russ.)
9. Li X., Wang Y., Zhang C. Hydrogeochemical processes controlling groundwater composition in coal-bearing strata: Insights from ion exchange, sorption, and organic-inorganic interactions. *Journal of Hydrology*, 2022, vol. 615 (Part A). DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128456.
10. Kontorovich A.E., Shvartsev S.L., Rasskazov N.M., Zuev V.A., Turov Yu.P. Organic trace contaminants in fresh natural waters from the drainage basins of Tom' and upper Ob' rivers. *Geochemistry International*, 2000, vol. 38, no. 5, pp. 480–490.
11. Namihira-Santillán P.E., Olivares-Rubio H.F., Velandia-Aquino L.B., Ponce-Vélez G. PAHs in sediments and shrimps: Levels, sources, and risk estimation in a tropical coastal lagoon system near oil industry. *Marine Pollution Bulletin*, 2025, vol. 214, no. 5. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2025.117812.
12. Deelman W., Choochuay C., Pongpiachan S., Han Yo.M. Ecological and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediment core of Phayao Lake, Thailand. *Journal of Environmental Exposure Assessment*, 2023, vol. 2, no. 1. DOI: 10.20517/jeea.2022.29/.
13. Berrios-Rolón P.J., Cotto M., Márquez F. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in freshwater systems: a comprehensive review of sources. *Distribution and Impacts*, 2024, vol. 1, no. 4. DOI: 10.20944/preprints202404.1983.v1.
14. Korol I.S., Lepokurova O.E., Domrocheva E.V. Organic microimpurities in highly mineralized groundwater of coal deposits. *Underground hydrosphere. Materials of the XXIII All-Russian conference on groundwater of the East of Russia with international participation*. Irkutsk, Institute of the Earth's Crust SB RAS Publ., 2021. pp. 483–488. (In Russ.)
15. Shvets V.M. Water-dissolved organic substances and assessment of their impact on the quality of drinking groundwater. *Geocology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2016, no. 1, pp. 43–49. (In Russ.)
16. Shvartsev S.L., Lepokurova O.E., Domrocheva E.V., Ponomarchuk V.A., Sizikov D.A. Anomalous composition of carbon isotopes in underground alkaline waters of Kuzbass. *Reports of the Academy of Sciences*, 2016, vol. 469, no. 6, pp. 724–728. (In Russ.)
17. Lepokurova O.E., Pyryaev A.N., Shvartsev S.L. Stable carbon isotopes of water-dissolved gases of coal-bearing deposits of the Naryk-Ostashkinskaya area (Kuzbass). *Geological evolution of the interaction of water with rocks: Proceedings of the Second All-Russian conf. with international participation*. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2015. pp. 393–396. (In Russ.)
18. Lepokurova O.E. Soda groundwater in the south of Kuzbass: isotope-chemical features and formation conditions. *Geochemistry*, 2018, no. 9, pp. 904–919. (In Russ.)
19. Pokrovskii D.S. On the issue of groundwater regime in the Yerunakovsky district of Kuzbass. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1967, vol. 167, pp. 32–35. (In Russ.)
20. Postnikova O.V. *Hydrogeology of the USSR. Vol. XVII. Kemerovo region and Altai region*. Moscow, Nedra Publ., 1972. 398 p. (In Russ.)
21. Rogov G.M. *Hydrogeology and geoecology of the Kuznetsk coal basin*. Tomsk, TGASU Publ., 2000. 166 p. (In Russ.)
22. Domrocheva E.V. Geochemical state of natural waters in the south of Kuzbass on the example of Tutuyasskaya area. *International scientific congress «Interexpo GEO-Siberia»*, Novosibirsk, SGUGiT Publ., 2019, vol. 2, no. 3, pp. 239–245. (In Russ.)
23. Shvartsev S.L., Domrocheva E.V., Rasskazov N.M. Geochemistry and formation of soda waters of Kuzbass. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 1, pp. 128–134. (In Russ.)
24. Lepokurova O.E., Domrocheva E.V. Isotopic composition of natural waters of Kuzbass in coalbed methane mining areas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 71–86. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4775
25. Lepokurova O.E., Trifonov N.S., Domrocheva E.V. Migration forms of the main ions of groundwater in coal-bearing sediments of Kuzbass with an emphasis on compounds with humic acids (based on modeling results). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 76–89. (In Russ.)

26. Karasevich A.M., Storonskii N.M., Khryukin V.T., Shvachko E.V. The main directions of the development strategy of OJSC Gazprom for the industrial production of methane from coal seams. *Spetsvyпуск zhurnala «Gazovaya promyshlennost» – Metan ugolnykh plastov*, 2012, no. 672, pp. 125–137. (In Russ.)
27. Kudinov E.V. Commercial extraction of coalbed methane in Kuzbass as a method of reducing threats to the ecosystem. *Relevant issues of oil and gas. Proc. of International conference. Earth degassing: geology and ecology*, 2018, vol. 4 (23). (In Russ.) DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art84.
28. Lepokurova O.E., Domrocheva E.V. Humic substances in natural waters of the Naryksko-Ostashkinskaya area (Kuzbass). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 3, pp. 197–206. (In Russ.)
29. MUK 4.1. 663-97. *Guidelines. Determination of mass concentration of organic compounds in water by chromatograph mass spectrometry*. Moscow, Ministry of Health of Russia Publ., 1997. 47 p. (In Russ.)
30. Soursou V., Campo Ju., Picó Yo. Revisiting the analytical determination of PAHs in environmental samples: An update on recent advances. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 2023, vol. 37, no. 3. DOI: 10.1016/j.teac.2023.e00195.
31. Drventic I., Sala M., Vidovic K., Kroflic A. Direct quantification of PAHs and nitro-PAHs in atmospheric PM by thermal desorption gas chromatography with electron ionization mass spectroscopic detection. *Talanta*, 2023, vol. 251, no. 1. DOI: 10.1016/j.talanta.2022.123761.
32. Yemele O.M., Zhao Z., Nkoh J., Ymele E., Usman M. A systematic review of polycyclic aromatic hydrocarbon pollution: a combined bibliometric and mechanistic analysis of research trend toward an environmentally friendly solution. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 926, no. 5. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171577.
33. Teixeira J., Delerue Matos C., Morais S., Oliveira M. Environmental contamination with polycyclic aromatic hydrocarbons and contribution from biomonitoring studies to the surveillance of global health. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, vol. 31, no. 8, pp. 54339–54362. DOI: 10.1007/s11356-024-34727-3.
34. SP 1.2.3685-21. *Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans*. (In Russ.) Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (accessed 15 August 2022).
35. Rovinsky F.Ya., Teplitskaya T.A., Alekseeva T.A. *Background monitoring of polycycloaromatic hydrocarbons*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988. 233 p. (In Russ.)
36. Ismagilov Z.R., Zhuravleva N.V., Kerzhentsev M.A., Yashnik S.A., Matus E.V., Podyacheva O.Yu., Khairulin S.R., Shikina N.V., Ismagilov I.Z., Kozlov A.P., Smirnov V.G. Environmental problems of the Kuznetsk coal basin. Scientific approaches and technologies for reducing environmental pollution. *Chemistry for Sustainable Development*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 241–260. (In Russ.) DOI: 10.15372/KhUR20180302.
37. Gong X., Xiao L., Zhao Z., Li Q., Feng F., Zhang L., Deng Z. Spatial variation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from rivers in hilly regions of Southern China in the wet and dry seasons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, vol. 156, no. 7, pp. 322–329. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.03.004.
38. Hu G., Luo X., Li F., Dai J. Concentrations, sources profiles and potential risk. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, vol. 22, no. 2, pp. 176–183.
39. Shi J., Huang W., Han H., Xu C. Pollution control of wastewater from the coal chemical industry in China: Environmental management policy and technical standards. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 143, no. 6. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110883.
40. Zhuravleva N.V. Methods for assessing the impact of coal mining and processing processes in the Kuznetsk coal basin on the ecological state of the natural environment. *Bulletin of the Scientific Center for Work Safety in the Coal Industry*, 2016, no. 4, pp. 102–112. (In Russ.)

Information about the authors

Evgeniya V. Domrocheva, Cand. Sc., Researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, 4, Akademichesky avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9515-4296>

Irina S. Korol, Cand. Sc., Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences, Tomsk Department, 4, Akademichesky avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; irinakorol@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

Natalia A. Mukhortina, Cand. Sc., Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences, Tomsk Department, 4, Akademichesky avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; volkovana@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

Received: 16.04.2025

Revised: 22.04.2025

Accepted: 04.09.2025