

УДК 622.5:543.3

DOI: 10.46698/VNC.2024.36.66.002

Оригинальная статья

Микроэлементы в водах действующих шахт Восточного Донбасса

А.В. Мохов 

Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344006,
г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: mochov@ssc-ras.ru, mokhov_av@mail.ru

Статья поступила: 18.10.2024, доработана: 02.12.2024, принята к публикации: 04.12.2024

Резюме: Статья посвящена выявлению распространения и причин накопления в водах действующих угольных шахт Восточного Донбасса микроэлементов. **Актуальность исследований** определяется необходимостью ослабления вредного влияния химического состава шахтных вод на природные воды и экологическую в целом обстановку региона. **Цель исследований.** Совершенствование научных основ прогнозирования химического состава вод угольных шахт. **Методы исследований.** Данные о химическом составе шахтных вод Восточного Донбасса, условия его формирования исследованы известными статистическими методами. **Результаты исследований.** Шахтные воды региона отличаются от подземных и поверхностных вод повышенным содержанием ряда макро- и микрокомпонентов химического состава. Распределение концентраций микроэлементов сильно дифференцировано в пределах региона. Выявлено распределение 17 микроэлементов (*Ag, Pb, Cd, Ni, Co, Sr, Be, F, Mo, V, Bi, Ba, Mn, Zn, Ti, Cu, Cr*) в регионе в целом и его геолого-промышленных районах. Повсеместно распространены в относительно больших концентрациях *Mo, Sr, Cd, Mn*. Выявлены статистические связи содержаний *Sr, Zn, Mn* и макрокомпонентов состава воды, их связи с содержанием серы общей в углях, корреляция содержаний *Sr, Zn, Mn*. Характер и степень корреляции указывают на формирование макрокомпонентов и микроэлементов состава в рамках единого макропроцесса – выщелачивания и растворения водовмещающих пород. Источником микроэлементов является вещество угольных пластов и их боковые породы, в частности, *Sr* – карбонатный материал, *Mn* – материал окружавших Донбасс палеообластей сноса, *Zn* – связанный с посткаменноугольным полиметаллическим оруденением. Триггером накопления микроэлементов служит окисление сульфидов, прежде всего, пирита как фактора запуска серии параллельных и цепи последовательных физико-химических реакций. В ходе них происходит как поступление в воду и накопление отдельных химических компонентов, так и уход их из воды. Различие микроэлементного состава вод объясняется разнообразием преимущественно минералогических факторов: присутствием сульфидов и карбонатов, содержанием углекислого и углеводородных газов в горном массиве.

Ключевые слова: шахтные воды, химический состав, микроэлементы, распространение, генезис, Восточный Донбасс.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания ЮНЦ РАН, № гос. регистрации 122020100345-8.

Для цитирования: Мохов А.В. Микроэлементы в водах действующих шахт Восточного Донбасса. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 6-15. DOI: 10.46698/VNC.2024.36.66.002

DOI: 10.46698/VNC.2024.36.66.002

Original paper

Microelements in the waters of operating mines in the Eastern Donbass

A.V. Mokhov 

Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation, e-mail: mochov@ssc-ras.ru, mokhov_av@mail.ru

Received: 18.10.2024, revised: 02.12.2024, accepted: 04.12.2024

Abstract: The article is devoted to identifying the distribution and causes of microelements accumulation in the waters of operating coal mines in the Eastern Donbass. **Relevance.** The relevance of the research is determined by the need to reduce the harmful effects of the chemical composition of mine waters on natural waters and the overall environmental situation in the region. **Aim.** Improving the scientific basis for predicting the chemical composition of coal mine waters. **Research methods.** Data on the chemical composition of mine waters in the Eastern Donbass and the conditions of its formation were studied using well-known methods. **Research results.** Mine waters in the region differ from groundwater and surface waters by their increased content of a number of macro- and microcomponents of chemical composition. The distribution of trace element concentrations is highly differentiated within the region. The distribution of 17 microelements (Ag, Pb, Cd, Ni, Co, Sr, Be, F, Mo, V, Bi, Ba, Mn, Zn, Ti, Cu, Cr) in the region as a whole and its geological and industrial areas was revealed. Mo, Sr, Cd, and Mn are widely distributed in relatively high concentrations. Statistical relationships between the content of Sr, Zn, Mn and macrocomponents of water composition, their relationships with the content of total sulfur in coals, and the correlation of the contents of Sr, Zn, Mn were revealed. The nature and degree of correlation indicate the formation of macrocomponents and microelements of the composition within the framework of a single macroprocess – leaching and dissolution of water-bearing rocks. The source of microelements is the substance of coal seams and their wall rocks, in particular, Sr is a carbonate material, Mn is a material of paleo-demolition areas surrounding Donbass, Zn is associated with post-Carboniferous polymetallic mineralization. The trigger for the microelements accumulation is the oxidation of sulfides, primarily pyrite, as a factor in launching a series of parallel and a chain of sequential physicochemical reactions. During these processes, individual chemical components enter the water and accumulate, as well as leave the water. The difference in the microelement composition of the waters is explained by the diversity of predominantly mineralogical factors: the presence of sulphides and carbonates, the content of carbon dioxide and hydrocarbon gases in the mountain range.

Keywords: mine waters, chemical composition, microelements, distribution, genesis, Eastern Donbass.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the implementation of the state assignment of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, state registration No. 122020100345-8.

For citation: Mokhov A.V. Microelements in the waters of operating mines in the Eastern Donbass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 6-15. DOI: 10.46698/VNC.2024.36.66.002

Введение

Разработка угольных залежей сопровождается формированием значительных объемов попутных вод. Их потоки и скопления рассматриваются как потенциальный крупный ресурс для улучшения обеспеченности техническими водами терри-

торий, в число которых входят также шахтерские районы Восточного Донбасса. Использование шахтных вод открывает возможность ослабления техногенного пресса на окружающую среду.

Сведения о химическом составе и минерализации шахтных вод, определяющих во многом перспективы их использования в хозяйственных целях, представляют также интерес для решения геологических, геоэкологических и иных задач. Выявление процессов формирования состава вод создает возможности для прогнозирования и регулирования их характеристик.

Механизмы насыщения вод теми или иными компонентами являются предметом обширных исследований [Докукин, Докукина, 1950; Назарова, 1968; Кравцов, 1968; Гавришин, 2020; Rybnikova, Rybnikov, 2020; Парада и др., 2022 (464 с.); Мохов, 2023]. Потенциально и фактически они являются многофакторными.

Формирование химического типа подземных, включая шахтные, вод традиционно связывают с составом водовмещающих пород, растворимостью, подверженностью выщелачиванию твердых компонентов горного массива, обменными процессами и проч. [Посохов, 1975].

Значительное влияние имеет газоносность недр [Кравцов, 1968; Мохов, 2023], деятельность микроорганизмов [Кизильштейн, 2002], состав минеральной компоненты угольных пластов [Докукин, Докукина, 1950]. В многочисленных публикациях в России и за рубежом готовится база для решения ряда вопросов формирования химического состава шахтных вод с учетом последнего фактора с акцентом на геоэкологические последствия отведения (стока) шахтных вод [Kursun, Terzi, 2018; Finkelman et al., 2018; Han et al., 2019; Dai et al., 2019; Rybnikova, Rybnikov, 2020; Cao et al., 2020; 2023; Sun et al., 2020; Zhu et al., 2024].

Предлагаются различные схемы формирования компонентного состава воды региона, однако этот вопрос остается недостаточно исследованным в отношении макрокомпонентов и, особенно, микроэлементов. Определенность имеется с генезисом сульфат-ионов и железа – окисление сульфидов горного массива.

Настоящая публикация посвящена исследованию микроэлементного состава вод шахт Восточного Донбасса на пике угледобычи (начало-середина 1980-х гг.) для геолого-промышленных районов: Каменско-Гундоровский (КГГПР), Гуково-Зверевский (ГЗГПР), Шахтинско-Несветаевский (с выделением его Шахтинской (ШГПР) и Новошахтинской (НГПР) частей).

К началу данного этапа углеразработок обнаружено присутствие в шахтных водах Донбасса не менее 30 микроэлементов [Горшков, 1981]. Обобщение данных о микроэлементном составе шахтных (и подземных) вод региона к настоящему времени отсутствует.

Материал и методы исследований

Использованы результаты 850 анализов химического состава шахтных вод 43 угольных шахт из отчетов и публикаций института ВНИИОСуголь и других специализированных организаций и материалы автора. Использованы методы корреляционного анализа и другие способы обработки информации.

Результаты исследований и их обсуждение

Шахтные воды региона образуются материнскими подземными, шахтными, поверхностными и техническими водами.

Обобщение результатов анализов проб шахтных вод на 17 микроэлементов состава (*Ag, Pb, Cd, Ni, Co, Sr, Be, F, Mo, V, Bi, Ba, Mn, Zn, Ti, Cu, Cr*), отобранных преимущественно в первой половине 1980-х гг., показало в целом регулярное наличие большинства из них в водах обследованных шахт.

Содержание элементов варьировалось в следующих диапазонах (от-до, здесь и далее в мг/дм³): *Ag* (0-0,01), *Pb* (0-0,030), *Cd* (0-0,045), *Ni* (0-0,274), *Co* (0-0,200), *Sr* (0,40-12,10), *Be* (0-свыше 0,016), *F* (0,04-1,29), *Mo* (0-0,070), *V* (0-0,018), *Bi* (0-0,007), *Ba* (0-0,546), *Mn* (до 0,020-13,800), *Zn* (0,01-4,50), *Ti* (0-0,350), *Cu* (0-свыше 0,2), *Cr* (до 0,01-0,182).

Повышенными содержаниями отдельных микроэлементов выделяются воды шахт следующих районов (в скобках – максимум содержания микроэлемента): *Pb* – ГЗГПР (0,03), КГГПР (0,021); *Cd* – НГПР (0,045), ШГПР (0,022); *Ni* – НГПР (свыше 0,274), ГЗГПР (0,227); *Sr* – ГЗГПР (10,1), НГПР (12,10), ШГПР (11,00); *Be* и *Zn* – ГЗГПР (свыше 0,016 и 8,10); *Mn* – ГЗГПР (13,80); *Ti* – ШГПР (0,350); *Cu* и *Cr* – НГПР (0,102 и 0,182).

Величины коэффициентов парной корреляции массовых содержаний *Sr*, гидрокарбонат-ионов и сульфат-ионов в рассматриваемой части региона составляли 0,38 (диапазон – от -0,50 в КГГПР до 0,53 в ШГПР) и -0,18 (диапазон – от -0,21 в ШГПР до 0,83 в КГГПР).

Коэффициент корреляции содержаний *Zn* и сульфат-ионов составляет 0,25 (колеблется от 0,08 в ШГПР до 0,54 в НГПР), *Zn* и гидрокарбонат-ионов – -0,04 (от -0,62 в КГГПР до 0,09 в ГЗГПР), *Mn* с ними: 0,60 (от -0,21 в КГГПР до 0,81 в НГПР) и -0,18 (от -0,14 НГПР до 0,34 в КГГПР).

Во всех районах прослеживается сильная обратная зависимость содержаний сульфат-ионов и гидрокарбонат-ионов: в ШГПР (-0,76), НГПР (-0,61), КГГПР (-0,60).

Корреляция содержаний кальция и *Sr*, магния и *Sr* измеряется коэффициентами 0,25 (от -0,07 в КГГПР до 0,49 в ГЗГПР) и 0,26 (от -0,07 в НГПР до 0,91 в КГГПР).

Как видно из приведенных данных, оценки связей для отдельных геолого-промышленных районов отклоняются от усредненных.

Довольно существенны значения коэффициентов корреляции между содержанием *Sr* и сульфат-ионов в ШГПР (0,53) и КГГПР (-0,50), *Sr* и гидрокарбонат-ионов в КГГПР (0,83), *Sr* и магния в КГГПР (0,91) и ШГПР (0,42), *Sr* и кальция в ГЗГПР (0,49).

Содержания *Zn* и сульфат-ионов имеют заметную корреляцию в НГПР (0,54), *Zn* и гидрокарбонат-ионов – в КГГПР (-0,62) и НГПР (-0,58).

Связь *Mn* и гидрокарбонат-ионов слаба повсеместно, *Mn* и сульфат-ионов высока в НГПР (0,81), заметна в ШГПР (0,48) и ГЗГПР (0,43). Связь с магнием существенна только в КГГПР (0,65), с кальцием – в НГПР (0,59).

Корреляция содержаний *Mn* и *Sr*, как правило, высока (в КГГПР 0,87, ГЗГПР 0,76) и заметна в НГПР (0,60); *Mn* и *Zn* – высока только в КГГПР (-0,72); *Zn* и *Sr* – заметна только в КГГПР (-0,42).

В КГГПР корреляция содержания сульфат-ионов заметно отличается и равна со *Sr* -0,50, с *Zn* 0,25, *Mn* -0,21.

Степень корреляции микроэлементов с серой общей углей ($S_t^d, \%$) характеризуется, как правило, сильно отличающимися, часто, низкими или противоположной направленности значениями: ГЗГПР (*Sr* -0,16; *Zn* 0,1; *Mn* 0,01), ШГПР (*Sr* 0,17;

Zn 0,84; *Mn* 0,14), НГПР (*Sr* -0,15; *Zn* 0,71; *Mn* 0,43), КГПР (*Sr* -0,31; *Zn* 0, 67; *Mn* 0,02).

Эти расчеты указывают на широту диапазона силы связей (могут быть близки к функциональной зависимости), часто отсутствие или слабость связи для большинства пар компонентов в регионе в целом и отдельных районах.

Районы (их части) ГЗПР, НГПР и ШПР, выделяющиеся формированием потоков кислых (анализы проб из водосборников и выпусков на поверхности) высокоагрессивных шахтных вод, характеризуются повышенным содержанием многих микроэлементов, включая *Sr*, *Zn* и *Mn*. Величина коэффициента парной корреляции содержания сульфат-ионов с серой составляет в: ГЗПР 0,64, ШПР 0,27, НГПР 0,59.

Совпадение связей для отдельных макрокомпонентов и микроэлементов дает основание заключить о насыщении ими вод в большинстве ситуаций в рамках общего макропроцесса в ходе валового растворения кислой средой и выноса содержащих их пород.

Эти данные указывают на исключительное значение в формировании состава шахтных вод окисления сульфидов недр.

Потенциально близкая к функциональной связь содержаний сульфат-ионов и ряда компонентов состава воды с серой общей углей преобразуется (ослабляется) разнонаправленными химическими процессами. Аномально низкое значение коэффициента парной корреляции содержания сульфат-ионов с серой в КГПР (0,03) является результатом весьма сильного проявления вторичных процессов вывода этих ионов из раствора. Отклонения от функциональности говорят о неоднородности формирования химического состава воды.

Потенциальными источниками микрокомпонентов являются материнские воды, горные породы, газы недр и шахтной атмосферы, техногенные потоки воды, конструкционные материалы.

По сравнению с природными подземными водами угленосных каменноугольных отложений объекты на поверхности воды шахт имеют существенно большую минерализацию и повышенное содержание многих компонентов [Гидрогеология ..., 1971]. Они регулярно превосходят по концентрации ряда микроэлементов значения ПДК для естественного фона.

Превышение ПДК для наиболее распространенных природных вод потребительского и экологического эталона (согласно «Предельно допустимые концентрации (ПДК) в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы.», 2003) шахтными водами на протяжении рассматриваемого промежутка времени установлено в рассматриваемой выборке для химических элементов (в скобках: диапазон изменчивости содержаний в рассматриваемой части региона и величина ПДК, мг/дм³): *Pb* (0-0,030 и 0,01), *Cd* (0-0,04 и 0,001), *Ni* (0-0,274 и 0,02), *Co* (0-0,20 и 0,1), *Sr* (0,40-12,10 и 7,0), *Be* (0-свыше 0,016 и 0,0002), *F* (0,04-1,29 и 1,2), *Mn* (до 0,020-13,80 и 0,1), *Zn* (0,01-4,50 и 1,0), *Ti* (0-0,350 и 0,1), *Cr* (до 0,01-0,182 и 0,05) и имеет широкий размах. Превышения ПДК для *F*, *Zn*, *Cr* единичны, для остальных элементов не обнаружены.

Таким образом, особенности состава материнских подземных вод не являются главной причиной появления в шахтных водах высоких содержаний рассматриваемых микроэлементов. Напротив, влияние действующих шахт служит основным генератором появления многих компонентов в их избыточных (по отношению к фоновым) содержаниях в подземных водах.

Рассматриваемые микрокомпоненты находятся в виде акцессорных минералов и рассеянных примесей в угленосной толще.

Эти ингредиенты появились здесь в ходе ее накопления и последующей трансформации. Формирование толщи (песчаники кварцевые, реже аркозовые, алевролиты, аргиллиты в приблизительно равных пропорциях, известняки, угли) происходило в результате доставки разнообразного по вещественному составу материала с юга и севера [Гамов и др., 2016]. Известны небольшие интрузии посткаменноугольных магматических пород различного состава и проявления руд преимущественно полиметаллов [Парада и др., 2022 (464 с.)]. Среди углевмещающих пород высоким содержанием многих элементов (*V, Mn, Ni, Cu, Cd, Cr, Pb* и других) выделяются компоненты глинистого состава [Кизильштейн, 2002].

Угольная масса содержит ряд перечисленных и других элементов и является их концентратором. Концентрирование зависит от исходного биохимического состава, характера и результатов его преобразования. Возможна вторичная минерализация угольных пластов [Кизильштейн, 2002].

Отметим характерное присутствие часто в высоких концентрациях десятков микроэлементов в угольных пластах различных регионов мира, что показано в приведенных выше литературных источниках, включая публикации зарубежных исследователей [Finkelman et al., 2018 и др.].

Антрациты Восточного Донбасса могут содержать заметное количество (в г/т) *Ti* (около 246), *Ba* (76), *Mn* (80), *Zn* (7), *V* (6), *Ag* (8), *Cu* (5), *Ni* (4), *Pb* (2), *Mo* (0,2), *Be* (0,15). В составе углей региона, сжигаемых на Новочеркасской ГРЭС, средняя концентрация микроэлементов может быть еще более высокой. Выделяются в данном отношении *Mn* (129), *Ni* (50,4), *Cu* (32,4), *V* (23,9), в меньшей степени *Co* (14,9), *Cr* (14,6), *Be* (2,5), *Cd* (0,8) [Гамов, Левченко, 2009].

Материал угольных пластов в естественном залегании, как правило, весьма сухой, является благоприятной для консервации многих элементов средой после прекращения элизионного процесса. В ходе литогенеза происходит замещение свободной и связанной воды газами, потоки которых осуществляют непрерывный вынос отсюда различных веществ. Важным для раскрытия миграции металлов и минерализации может считаться присутствие самородных элементов, например, висмута, микроскопически установленное [Гамов и др., 2016] наличие которого указывает на сохранность и пассивность этого (и ряда других) металла в сухом угле на протяжении геологического времени.

Высокие концентрация пирита и марказита в угольной массе, насыщенность железом сульфидного происхождения шахтных вод, особенности движения воды в горных выработках дают основание для вывода о том, что основное количество минеральных веществ извлекается из остатков угольной массы разрабатываемого пласта, пород ложа и сечения водного потока. Эти контактирующие с водой среды являются также основным поставщиком микроэлементов, выводимых параллельно из массива агрессивными водами в окислительной среде газовой атмосферы выработок шахты.

Значительные вариации содержаний, силы и характера связей компонентов между районами служат признаком возможности реализации различных механизмов метаморфизации воды.

Общим для региона является запуск окислением сульфидов серии параллельных и цепей последовательного преобразования состава материнской и шахтной

вод первичными продуктами окисления (серная кислота, ионы двухвалентного железа) и новообразованными ингредиентами [Мохов, 2023].

Большое влияние на преобразование состава воды оказывает реакция Гильгарда [Мохов, 2023], обеспечивающая приток сюда гидрокарбонатов, что влияет на состав в целом и создает, с одной стороны, благоприятные условия для накопления микроэлементов и геохимические барьеры для них, с другой. Вероятны антагонистические взаимоотношения гидрокарбонат-ионов с *Mn*, вытеснение ими из раствора сульфат-ионов и кальция, что особенно развито в КГГПР и НГПР.

Высокое содержание *Sr* в кислых шахтных водах (в регионе 2,0-12,10 г/дм³) всех исследованных районов кроме КГГПР, наличие его устойчивой положительной корреляции с содержанием кальция, магния, сульфат- и гидрокарбонат-ионов указывает на источник поступления в воду данного элемента, как и ряда сопутствующих микро- и макрокомпонентов – карбонатный материал массива (известняки, цемент пород, конкреции).

Повышенные содержания *Zn* в НГПР и ШГПР вероятно сопряжены с известной здесь, а в ГЗГПР также потенциальной полиметаллической минерализацией в связи с посткаменноугольной магматической деятельностью.

Накопление *Mn* связано, вероятно, с выщелачиванием материала, доставленного палеореками из окружающих регион областей сноса, в частности, докембрийского возраста на стадии формирования здесь угленосной толщи.

Выводы

Обобщение результатов химических анализов шахтных вод действовавших в начале–середине 1980-х гг. шахт Восточного Донбасса показало широкое распространение *Pb, Cd, Ni, Co, Sr, Be, F, Mo, V, Bi, Ba, Mn, Zn, Ti, Cu, Cr*.

Содержание этих микроэлементов распределено мозаично и варьируется здесь от десятитысячных долей до нескольких миллиграммов в литре воды. Повсеместно распространены в относительно больших концентрациях *Mo, Sr, Cd, Mn*. Повышенным содержанием и регулярным присутствием относительно других микроэлементов района выделяются: *Pb* в ГЗГПР, КГГПР, *Cd* – НГПР и ШГПР, *Ni* – НГПР и ГЗГПР, *Be* и *Zn* – ГЗГПР, *Mn* – ГЗГПР и НГПР, *Cu* и *Cr* – НГПР.

Обнаружена корреляция содержаний микроэлементов между собой и с макрокомпонентами состава шахтных вод.

Формирование микроэлементного и макрокомпонентного состава шахтных вод из подземных материнских происходит в рамках единого процесса выщелачивания и растворения пород.

Главным источником микроэлементов является в силу седиментационно-литологических и горно-геомеханических причин вещество разрабатываемых угольных пластов. Накопление, разубоживание и преобразование формы нахождения микроэлементов тяготеет ко времени становления и активного функционирования элизинной водонапорной системы угленосного массива.

Общим триггером накопления микроэлементов служит окисление сульфидов, прежде всего, пирита как сильнейшего фактора, запускающего серию параллельных и цепи последовательных физико-химических реакций. Различия микроэлементного состава вод объясняется преимущественно разнообразием минералогических факторов, в частности, присутствием сульфидов и карбонатов, углекислого и углеводородных газов в горном массиве.

Источником поступления *Sr* в повышенном количестве является карбонатное вещество в ходе его растворения кислыми водами. Повышенные локальные содержания *Zn* на западе региона связаны с распространенной здесь полиметаллической минерализацией в связи с посткаменноугольной магматической деятельностью. Накопление *Mn* связывается с его присутствием в материале, поступавшем из областей денудации на стадии формирования угленосной толщи. Эти выводы представляют интерес для поисков различных руд в регионе.

Литература

1. Гавришин А.И. Шахтные воды и управление качеством грунтовых вод в Восточном Донбассе. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №3. – С. 127–138. DOI: 10.46698/VNC.2020.62.81.008.
2. Гамов М.И., Левченко С.В. Металлоносность углей Восточного Донбасса. // Материалы научно-практической конференции «Состояние минерально-сырьевой базы Юга России и перспективы её развития». Ростов-на-Дону: НОК, 2009. – С. 121–124.
3. Гамов М.И., Левченко С.В., Рылов В.Г., Рыбин И.В., Труфанов А.В. Закономерности формирования и перспективы комплексного использования металлоносных углей Восточного Донбасса. // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. №8. – С. 1477–1487. DOI: 10.15372/GiG20160804.
4. Гидрогеология СССР. Т. VI. Донбасс. М.: Недра, 1971. – 480 с.
5. Горшков В.А. Очистка и использование сточных вод предприятий угольной промышленности. М.: Недра, 1981. – 269 с.
6. Докукин А.В., Докукина Л.С. Возникновение кислотных рудничных вод и борьба с ними. М.-Л.: Углетехиздат, 1950. – 332 с.
7. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях. Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 2002. – 296 с.
8. Кравцов А.И. Геологические условия газоносности угольных, рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1968. – 330 с.
9. Мохов А.В. Минерагенический аспект накопления сульфат- и гидрокарбонат-ионов в шахтных водах (на примере Восточного Донбасса). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. №4. – С. 188–197. DOI: 10.46698/VNC.2023.97.79.015.
10. Назарова Л.Н. Шахтные воды восточной части Донбасса и некоторые вопросы происхождения их химического состава. // Гидрохимические материалы. – 1968. – Т. 47. – С. 99–109.
11. Парада С.Г., Давыденко Д.Б., Мохов А.В., Рыбин И.В., Трощенко В.В., Гамбург К.Ю. Металлогенический анализ Донбасса на основе современных геофизических данных. // Труды Южного научного центра Российской академии наук. – 2022. – С. 78–93.
12. Посохов Е.В. Общая гидрохимия. Л.: Недра, 1975. – 208 с.
13. Cao Q., Yang L., Qian Ya., Chen S. Dissolution of harmful trace elements from coal and the environmental risk to mine water utilization. // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – Vol. 30. Issue 3. – pp. 7786–7800. DOI: 10.1007/s11356-022-22530-x.
14. Cao Q., Yang L., Ren W. et al. Spatial distribution of harmful trace elements in Chinese coalfields: an application of WebGIS technology. // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 755. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.
15. Dai S., Hower J.C., Finkelman R.B., Graham I.T., French D., Ward C.R. et al. Organic associations of non-mineral elements in coal: A review. // International Journal of Coal Geology. – 2019. – Vol. 185. Issue 1. DOI:10.1016/j.coal.2019.
16. Finkelman R.B., Plamer C.A., Wang P. Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal. // International Journal of Coal Geology. – 2018. – Vol. 185. – pp. 138–160. DOI: 10.1016/j.coal.2017.09.005.

17. Han Z., Zhang F., Yao H. et al. Change of regional water chemistry driven by group coal mining in Changzhi basin, Shanxi, China. // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 98. DOI: 10.1051/e3sconf/20199809001.
18. Kursun I., Terzi M. Distribution of trace elements in coal and coal fly ash and their recovery with mineral processing practices: A review. // *Journal of Mining & Environment*. – 2018. – Vol. 9. No. 3. – pp. 641–655. DOI: 10.22044/jme.2018.6855.1518.
19. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Pit Lake and Drinking Water Intake: Example of Coexistence (Middle Urals, Russia). // *Mine Water and the Environment*. – 2020. – Vol. 39. – pp. 464–472. DOI: 10.1007/s10230-020-00691-w.
20. Sun Y., Xiao K., Wang X. et al. Evaluating the distribution and potential ecological risks of heavy metal in coal gangue. // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 28. Issue 15. – pp. 18604–18615. DOI: 10.1007/s11356-020-11055-w.
21. Zhu Y., Zheng L., Chen X., Chen Y. Speciation characteristics and contamination degree of trace elements in coal gangue hill of a mining area in Huainan Coalfield, China. // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2024. – Vol. 33. No. 2. – pp. 1981–1989. DOI: 10.15244/pjoes/174397.

References

1. Gavrishin A.I. Mine waters and groundwater quality management in Eastern Donbass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 127–138. DOI: 10.46698/VNC.2020.62.81.008. (In Russ.)
2. Gamov M.I., Levchenko S.V. Metal content of coals of the Eastern Donbass. In: *Proceedings State of the mineral resource base of the South of Russia and prospects for its development*. Rostov-on-Don. NOK. 2009. pp. 121–124. (In Russ.)
3. Gamov M.I., Levchenko S.V., Rylov V.G., Rybin I.V., Trufanov A.V. Metal-containing coals of the East Donetsk basin: regularities of formation and integrated-use prospects. *Geology and Geophysics*. 2016. Vol. 57. No. 8. pp. 1477–1487. DOI: 10.15372/GiG20160804. (In Russ.)
4. *Hydrogeology of the USSR. Vol. VI. Donbass*. Moscow. Nedra. 1971. 480 p. (In Russ.)
5. Gorshkov V.A. Purification and use of wastewater from coal industry enterprises. Moscow. Nedra. 1981. 269 p. (In Russ.)
6. Dokukin A.V., Dokukina L.S. The occurrence of acidic mine waters and their control. Moscow. Leningrad. Ugletekhizdat. 1950. 332 p. (In Russ.)
7. Kizilshtein L.Ya. Ecogeochemistry of impurity elements in coals. Rostov-on-Don. SKNC VSh. 2002. 296 p. (In Russ.)
8. Kravtsov A.I. Geological conditions of gas content of coal, ore and non-metallic mineral deposits. Moscow. Nedra. 1968. 330 p. (In Russ.)
9. Mokhov A.V. Mineragenic aspect of the accumulation of sulfate and hydrocarbonate ions in mine waters (on the example of Eastern Donbass). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 188–197. DOI: 10.46698/VNC.2023.97.79.015. (In Russ.)
10. Nazarova L.N. Mine waters of the eastern part of Donbass and some questions of the origin of their chemical composition. *Hydrochemical materials*. 1968. Vol. 47. pp. 99–109. (In Russ.)
11. Parada S.G., Davydenko D.B., Mokhov A.V., Rybin I.V., Troshchenko V.V., Hamburg K.Yu. Metallogenic analysis of Donbass based on modern geophysical data. In: *Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022. pp. 78–93. (In Russ.)
12. Posokhov E.V. General hydrochemistry. Leningrad. Nedra. 1975. 208 p. (In Russ.)
13. Cao Q., Yang L., Ren W. et al. Spatial distribution of harmful trace elements in Chinese coalfields: an application of WebGIS technology. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 755. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.
14. Cao Q., Yang L., Qian Ya., Chen S. Dissolution of harmful trace elements from coal and the environmental risk to mine water utilization. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. Issue 3. pp. 7786–7800. DOI: 10.1007/s11356-022-22530-x.

15. Dai S., Hower J.C., Finkelman R.B., Graham I.T., French D., Ward C.R. et al. Organic associations of non-mineral elements in coal: A review. *International Journal of Coal Geology*. 2019. Vol. 185. Issue 1. DOI: 10.1016/j.coal.2019.
16. Finkelman R.B., Plamer C.A, Wang P. Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal. *International Journal of Coal Geology*. 2018. Vol. 185. pp. 138–160. DOI: 10.1016/j.coal.2017.09.005.
17. Han Z., Zhang F., Yao H. et al. Change of regional water chemistry driven by group coal mining in Changzhi basin, Shanxi, China. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 98. Art. No. 09001. DOI: 10.1051/e3sconf/20199809001.
18. Kursun I., Terzi M. Distribution of trace elements in coal and coal fly ash and their recovery with mineral processing practices: A review. *Journal of Mining & Environment*. 2018. Vol. 9. No. 3. pp. 641–655. DOI: 10.22044/jme.2018.6855.1518.
19. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Pit Lake and Drinking Water Intake: Example of Coexistence (Middle Urals, Russia). *Mine Water and the Environment*. 2020. Vol. 39. pp. 464–472. DOI: 10.1007/s10230-020-00691-w.
20. Sun Y., Xiao K., Wang X. et al. Evaluating the distribution and potential ecological risks of heavy metal in coal gangue. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 28. Issue 15. pp. 18604–18615. DOI: 10.1007/s11356-020-11055-w.
21. Zhu Y., Zheng L., Chen X., Chen Y. Speciation characteristics and contamination degree of trace elements in coal gangue hill of a mining area in Huainan Coalfield, China. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2024. Vol. 33. No. 2. pp. 1981–1989. DOI: 10.15244/pjoes/174397.