

ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ЗАБРОШЕННЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

Н.Ф. Фетисова¹, В.В. Фетисов²

¹ Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия,
e-mail: fetisova.n.f@gmail.com

² Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермь, Россия

Аннотация: Существующие системы очистки кислотного дренажа шахт могут быть классифицированы как активные или пассивные. Пассивные методы, основанные на самоподдерживающихся геохимических, биологических и физических процессах, более экономичны и, следовательно, предпочтительны для заброшенных горных выработок. Однако эффективность применения таких методов имеет ряд ограничений. К ключевым параметрам, обуславливающим выбор технологии пассивной или активной очистки, является расход потока и кислотность воды, учитывающая, кроме pH, содержание в воде ионов металлов, гидролиз которых сопровождается выделением в раствор ионов водорода. Целью данной работы является подбор возможных систем очистки кислых шахтных вод, поступающих в р. Косьва (Пермский край), с учетом существующих критериев и рекомендаций по управлению шахтным дренажем, а также опубликованных материалов, обобщающих опыт очистки кислых стоков на заброшенных рудниках. Для выбора системы очистки были рассчитаны следующие параметры: кислотность воды (мг/л эквивалента CaCO₃), учитывающая pH и содержание металлов Fe, Al, Mn, и «кислотная нагрузка», соответствующая массе щелочного материала (эквивалентного CaCO₃), требуемой для нейтрализации поступающего объема шахтной воды в день. Сопоставление значений рассчитанных параметров с рекомендованными критериями показали, что кислотность воды в большинстве изливов превышает значения, оптимальные для эффективного применения методов пассивной очистки. Однако для потоков с относительно небольшим дебитом возможность применения пассивных технологий может быть рассмотрена при условии последовательного размещения систем очистки (каналов, прудов-осадителей, заболоченных участков).

Ключевые слова: угольные шахты, кислые шахтные воды, кислотность, щелочность, активные и пассивные системы очистки, критерии выбора системы очистки

Благодарность: Исследование выполнено при поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2023.

Для цитирования: Фетисова Н. Ф., Фетисов В. В. Подходы к выбору систем очистки дренажных вод заброшенных горных выработок Кизеловского угольного бассейна // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1. – С. 109–124. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_109.

Choosing purification systems for drainage water from abandoned mines in the Kizel Coal Field

N.N. Fetisova¹, V.V. Fetisov²

¹ Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia,
e-mail: fetisova.n.f@gmail.com

² Perm State National Research University, Perm, Russia

Abstract: The existing purification systems for acid water of mine drainage can be classified as active and passive. The passive methods include self-sustaining geochemical, biological and physical processes, and are therefore economic and, accordingly, preferable for abandoned mines. On the other hand, these methods have some constraints. The key parameters to govern the choice of a passive or active purification technique are the flow rate and acidity of water, including pH and the content of metal ions as hydrolysis of the latter goes with output of hydrogen ions in the solution. This study aimed to select purification systems for acid mine water discharged in the Kosva River in the Perm Krai. The analysis used the existing criteria and recommendations on mine drainage control, as well as the published generalized experience of acid sewage purification in abandoned mines. With that end in view, the following parameters were calculated: the water acidity (CaCO₃ equivalent in mg/l), including pH and contents of Fe, Al and Mn, and the alkali load as the alkaline material mass (CaCO₃ equivalent) required to neutralize daily infed mine water. The comparison of the calculated and recommended parameters shows that acidity of spill water mostly exceeds the optimal values for the efficient passive purification. Anyway, in case of the flows at relatively small rates, the passive techniques are only applicable given a series arrangement of treatment systems (channels, sediment-ponds, water-logged sites).

Key words: coal mines, acid mine water, acidity, alkalinity, active and passive purification systems, purification system selection criterion.

Acknowledgements: The study was supported by the Perm Scientific and Education Center for Rational Subsoil Use.

For citation: Fetisova N. N., Fetisov V. V. Choosing purification systems for drainage water from abandoned mines in the Kizel Coal Field. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1):109-124. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_109.

Введение

Кислотный дренаж шахт (КДШ), или кислые шахтные воды, — это серьезная экологическая проблема, с которой сталкивается горнодобывающая промышленность. Кислотный дренаж возникает в действующих и заброшенных горных выработках, отвалах пустой породы, хвостохранилищах, а также в сернокислых почвах, особенно вблизи угольных шахт и золотых рудников [1]. Бесконтрольное

поступление кислых дренажных вод в водоемы приводит к их загрязнению и снижению водного биоразнообразия [2, 3]. В условиях, когда водоносные горизонты имеют ограниченную буферную способность, инфильтрация кислых стоков может привести к тому, что подземные воды станут кислыми и будут содержать повышенные концентрации металлов. Это может представлять угрозу для здоровья населения, использующе-

го подземные воды в питьевых целях, а также влиять на экосистемы на участках, где происходит разгрузка подземных вод или при их близком залегании к поверхности [4].

Значительный объем кислых стоков в мире приходится на многочисленные заброшенные шахты. Начавшийся в нарушенных горных породах процесс окисления сульфидных минералов может продолжаться столетиями. Золотые рудники римского периода в Румынии до сих пор являются источниками кислотного дренажа, спустя 2000 лет после прекращения их разработки [5]. Ориентировочные затраты на борьбу с кислотным дренажем и на восстановление загрязненных участков исчисляются миллиардами долларов. Стоимость реабилитационных работ на заброшенных шахтах в Северной Америке оценивается примерно в 10 млрд долл. США [6]. В Австралии, где из-за кислотного дренажа шахт загрязнено около 215 000 км² земли, ежегодные затраты на борьбу с ним оцениваются примерно в 150 млн долл. США для действующих рудников и более 500 млн долл. США для заброшенных рудников [6].

Типичные для угледобывающих районов экологические проблемы представлены на территории заброшенного Кизеловского угольного бассейна, а также на сопредельных с ним территориях, вследствие миграции загрязняющих веществ с природными водами [7–10]. Масштабное загрязнение окружающей среды, начавшееся еще в период работы шахт и усугубившееся после их ликвидации в конце 90-х гг. прошлого века, обусловлено как отсутствием разработанной стратегии управления шахтными водами на долгосрочную перспективу, в т.ч. на случай прекращения работы предприятия, так и крайне недостаточным выделением средств на решение экологических вопросов в период ликвидации

шахт. В результате этого закрытие горнодобывающего предприятия произошло без проведения необходимых культивационных мероприятий на загрязненных участках и без принятия мер по предотвращению загрязнения окружающей среды шахтными стоками.

В настоящее время на территории Кизеловского угольного бассейна насчитывается 19 изливов шахтных вод со средним расходом (за период 2007–2013 гг.) около 25 000 м³/ч [9].

Предложения по улучшению экологической ситуации начали разрабатывать практически сразу после ликвидации шахт. Для нейтрализации шахтного дренажа, рекультивации отвалов и ликвидации последствий воздействия кислых вод на поверхностные воды было предложено использовать отходы содового производства [7, 11, 12]. Один из вариантов [7] предполагает очистку шахтных вод непосредственно на разливах, путем подготовки раствора щелочного реагента на специальных установках и добавления его в поток изливающейся шахтной воды с последующим осаждением образующегося осадка в каскаде отстойников. Последние исследования по борьбе с кислыми дренажными водами Кизеловского угольного бассейна рассматривают подходы, направленные на снижение объемов изливающейся шахтных вод (за счет тампонирувания горных выработок, возведения перемычек, перехвата поверхностного стока, водопонижения или откачки подземных вод) [13]. Системы отвода, сбора и перенаправления шахтных вод являются важнейшими компонентами любого проекта по их очистке. Поэтому изучение этих вопросов весьма актуально.

Однако разработка, внедрение и эксплуатация некоторых инженерно-технических мероприятий (например, установка очистных станций, непрерывная откачка шахтных вод) в масштабах всего

угольного бассейна предполагает значительные материальные затраты.

Поскольку одним из приоритетных условий реализации мер, направленных на борьбу с кислотными стоками на заброшенных рудниках, является их относительно низкая стоимость, рассмотрение возможности применения более экономичных технологий очистки на основе геохимических методов там, где их применение будет эффективным, остается актуальным.

Ввиду того, что проблема кислотного дренажа является глобальной, научными сообществами, а также коммерческими организациями, специализирующимися на очистке стоков (в США, Австралии и других странах), накоплен значительный опыт по ее решению и разработаны рекомендации по выбору предпочтительной технологии очистки в зависимости от характеристик дренажа [14 – 17]. Обзор передового опыта и технологий для предотвращения и смягчения последствий формирования кислых шахтных вод представлен в руководстве Global Acid Rock Drainage (GARD), разработанном международной отраслевой группой, созданной для решения проблемы шахтного дренажа (International Network for

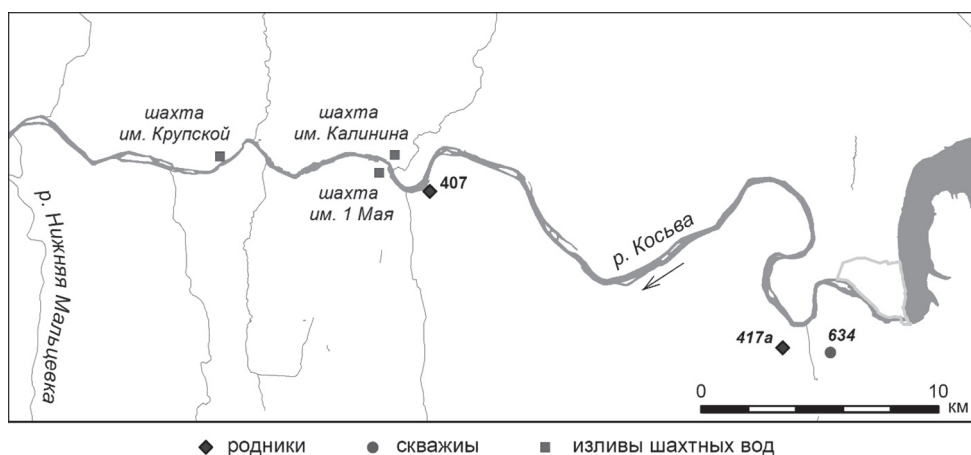
Acid Prevention, INAP), <http://www.gardguide.com>.

К основным характеристикам КДШ, влияющим на выбор предпочтительной технологии очистки, относят скорость потока, химический состав и свойства дренажных вод, такие как кислотность и щелочность. Кроме того, при выборе инженерно-технических мероприятий для улучшения качества воды учитываются временные и сезонные изменения этих характеристик. Важнейшими критериями также являются целевые показатели качества очищенных вод. В зависимости от требований к их качеству, для очистки могут потребоваться совершенно разные технологии.

Цель данной работы – подобрать возможные системы очистки дренажных вод заброшенных шахт Кизеловского угольного бассейна, руководствуясь существующими критериями и рекомендациями по управлению шахтным дренажем, а также опубликованными материалами, обобщающими опыт очистки кислых стоков на заброшенных рудниках.

Территория исследования

Территория исследования охватывает бассейн р. Косьва в ее среднем тече-



Источники поступления шахтных вод

Location of the mine water discharges

нии, между Широковским водохранилищем и р. Нижняя Мальцевка (рисунок). В административном отношении территория относится к Губахинскому муниципальному округу Пермского края.

Бассейн р. Косьва характеризуется развитием карстовых процессов, наличием подземных и поверхностных карстовых форм (пещер, воронок, котлованов). Поверхностный сток частично или полностью поглощается карстовыми воронками, образуя суходолы, и, следуя по системе карстовых полостей, разгружается в долине р. Косьва [7]. Основными источниками загрязнения р. Косьва и ее притоков являются изливы шахтных вод заброшенных горных выработок Кизеловского угольного бассейна, родники и стоки породных отвалов, расположенных на берегах водотоков [7].

В качестве объектов исследования в работе рассмотрены источники поступления шахтных вод в р. Косьва. Расположение участков разгрузки шахтных вод показано на рисунке.

Материалы и методы

Существующие методические подходы к выбору системы очистки шахтных вод

Согласно Руководству GARD, существующие системы очистки кислотного дренажа классифицируются как пассивные и активные, при этом обе системы потенциально сочетают в себе физические, биологические и химические подходы.

Системы активной очистки обычно требуют регулярного добавления реагентов и технического обслуживания на основе внешних источников энергии с использованием инфраструктуры и инженерных систем. К методам активной очистки относят аэрацию, нейтрализацию (которая часто включает осаждение), удаление металлов, химическое осаждение, мембранные процессы, ионный

обмен и биологическое удаление сульфатов. Такие системы могут быть организованы с использованием как стационарных установок, так и переносного оборудования, устанавливаемого непосредственно на месте изливов. С учетом вышесказанного технологии активной очистки наиболее подходят для этапов разработки месторождения.

Системы пассивной очистки КДШ основаны на естественных биологических, геохимических и физических процессах. Технологии пассивной очистки наиболее привлекательны на этапах закрытия шахт и после их ликвидации, поскольку требуют только периодического контроля, технического обслуживания и мониторинга самоподдерживающихся процессов. Применение пассивных систем в настоящее время считается наиболее практичным подходом в очистке КДШ на заброшенных рудниках. Однако, несмотря на экономическую привлекательность, применение систем пассивной очистки дренажных вод имеет ряд существенных ограничений, обусловленных их химическим составом, расходом потока и целевыми показателями качества очищенной воды.

Наиболее часто механизмом очистки КДШ как в пассивных, так и в активных системах является нейтрализация. При повышении pH растворимость большинства металлов значительно снижается за счет образования гидроксидов или сульфидных минералов. Большинство металлов, присутствующих в составе дренажных вод, обладает амфотерным свойством, то есть их растворимость увеличивается в кислых (низкий pH) и щелочных (высокий pH) условиях и достигает минимума при некотором промежуточном значении pH [GARD]. Значение величины pH, соответствующее теоретически минимальной растворимости гидроксидов некоторых металлов, представлены в табл. 7 — 5 Руководства GARD.

Для нейтрализации наиболее часто используются карбонаты, такие как кальцит (известняк). Однако при обработке кислых стоков с помощью известняка не все металлы могут осаждаться из раствора. Растворение карбонатов в полевых условиях повышает pH воды максимум до 7,5–8,0, и только те металлы, которые достигают насыщения ниже этого pH, будут осаждаться и удаляться из воды [14]. Например, если для осаждения определенных металлов требуется pH~10, то известняк не будет достаточно эффективным материалом, так как он повышает pH примерно до 8. Химические свойства (pH насыщения и растворимость в холодной воде) некоторых материалов, применяемых для нейтрализации кислых дренажных вод, приведены в табл. 3 работы [14].

Недостатком методов пассивной очистки является то, что их использование часто не позволяет достигать высоких показателей качества очищаемой воды. В условиях, когда качество очищенной воды должно соответствовать нормативным требованиям, системы активной очистки будут предпочтительнее [17]. В отличие от пассивных аналогов, системы активной очистки могут быть спроектированы и построены таким образом, чтобы приспособиться практически к любой кислотности и скорости потока и удовлетворить широкий спектр требований к очищенной воде [14]. Для помощи в выборе подходящей системы очистки шахтных вод разрабатываются технологические схемы или «деревья принятия решений» (например, рис. 7–3 Руководства GARD). Другие варианты деревьев, позволяющих выбрать предпочтительный подход к процессу обработки воды в зависимости от ряда факторов (скорости потока, pH, кислотности, щелочности, концентрации загрязняющих веществ и уклона рельефа), приведены в работах [16, 17].

Несмотря на большие капитальные затраты, в некоторых случаях системы активной очистки используются и после завершения работы шахт. Выбор в пользу активных систем может быть обусловлен наличием ряда факторов, которые ограничивают возможность применения пассивных технологий, либо делают стоимость их строительства и обслуживания сопоставимой со стоимостью применения методов активной очистки.

Одним из ключевых показателей для выбора подходящих систем очистки являются кислотность и щелочность воды. Наиболее подробно понятия кислотности и щелочности, а также методы их определения раскрыты в статьях [18, 19].

Под кислотностью раствора понимается величина, характеризующая суммарное количество веществ, вступающих в реакцию с гидроксид-анионами при изменении pH от начального значения до 8,3 [18, 20]. В кислых шахтных водах кислотность включает минеральную кислотность (обусловленную наличием Fe²⁺, Fe³⁺, Mn²⁺, Al³⁺ и ионов других металлов) и кислотность ионов водорода [18]. Другими словами, под кислотностью понимается мера, равная количеству основания, необходимого для нейтрализации ионов водорода, присутствующих в растворе, и ионов водорода, образующихся при гидролизе растворенных металлов.

Кислотность обычно выражается в мг CaCO₃/л (мг/л эквивалента CaCO₃). Аналитически кислотность определяется с помощью стандартных методов, приведенных в работе [18]. Расчетным путем кислотность может быть найдена с помощью выражения [18]:

$$PK = 50 \times \left(\frac{2Fe^{2+}}{56} + \frac{3Fe^{3+}}{56} + \frac{2Al^{3+}}{27} + \frac{2Mn^{2+}}{55} + 1000 \times (10^{-pH}) \right), \quad (1)$$

где PK — рассчитываемая кислотность, мг $\text{CaCO}_3/\text{л}$; Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} и Mn^{2+} — концентрации металлов в растворе, мг/л; 50 — коэффициент для перевода миллиэквивалент кислотности в мг $\text{CaCO}_3/\text{л}$. Сравнение результатов расчета кислотности (мг $\text{CaCO}_3/\text{л}$) с экспериментально определенным количеством щелочного реагента, необходимого для нейтрализации кислых шахтных вод, показало сопоставимость этих значений [21].

Под щелочностью понимается количественный показатель способности водной среды реагировать с катионами водорода при понижении величины pH до значения 4,5 [18, 20]. Щелочность обусловлена содержанием в воде гидрокарбонат-ионов, карбонат-ионов и гидроксид-ионов и может быть определена на основании следующего выражения [18]:

$$PЩ = [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+], \quad (2)$$

где $PЩ$ — рассчитываемая щелочность, в квадратных скобках указаны концентрации ионов, моль/л.

Аналитически общая щелочность определяется титрованием растворов до значений $\text{pH} = 4,5$ [18, 19]. В случае, если pH раствора меньше 4,5, то щелочность принимается равной нулю [18]. В растворах с $\text{pH} 4,5 < \text{pH} < 8,0$ за щелочность, кроме гидроксид-анионов, отвечают только гидрокарбонат-ионы, содержание других соединений, являющихся акцепторами катионов водорода, предположительно несущественное [20].

Соответственно, вычисление щелочности, с учетом содержания гидроксид- и гидрокарбонат-ионов, выраженной в мг $\text{CaCO}_3/\text{л}$, может быть выполнено согласно формуле [20]:

$$PЩ = 50 \times \left(1000 \times 10^{-(14-\text{pH})} + \frac{[\text{HCO}_3^-]}{61} \right), \quad (3)$$

где 50 — молярная масса эквивалента карбоната кальция, мг/ммоль, 1000 — коэффициент пересчета моль/л в ммоль/л; $10^{-(14-\text{pH})}$ — концентрация гидроксид-ионов, моль/л; 61 — молярная масса гидрокарбонат-иона, мг/ммоль; HCO_3^- — аналитическая концентрация гидрокарбонат-ионов, мг/л.

В зарубежных руководствах и публикациях, посвященных вопросам управления шахтным дренажем, также используются понятия «net acidity» и «net alkalinity» [14, 18, 19]. В отечественной литературе [20] рассматриваемые параметры были определены как «фактическая кислотность» и «фактическая щелочность», соответственно. В настоящей работе авторы придерживаются перевода, данного в статье [20].

Фактическая кислотность (ΦK) соответствует разнице между величинами кислотности и щелочности, тогда как фактическая щелочность ($\Phi Щ$) — это разница между щелочностью и кислотностью. Если последние получены расчетным путем, то ΦK и $\Phi Щ$ определяются согласно следующим выражениям [19, 20]:

$$\Phi K = PK - PЩ, \quad (4)$$

$$\Phi Щ = -\Phi K = PЩ - PK, \quad (5)$$

Одним из параметров, имеющих важное значение при выборе систем очистки КДШ, является «кислотная нагрузка» (acidity load) [14]. Этот показатель представляет собой количество щелочного реагента, эквивалентного CaCO_3 , необходимое для нейтрализации имеющегося объема кислой воды в единицу времени, и рассчитывается по формуле [14]:

$$\begin{aligned} \text{Кислотная нагрузка (кг CaCO}_3/\text{день)} = \\ = \text{расход (л/с)} \times \\ \times \text{кислотность (мг/л CaCO}_3) \times 0,0864. \quad (6) \end{aligned}$$

Рассмотренные выше параметры (фактическая кислотность и кислотная нагрузка, учитывающая расход потока) являются ключевыми при принятии ре-

Таблица 1

Условия применения некоторых геохимических методов пассивной очистки
Conditions of application of some geochemical methods of passive treatment

№	Метод	Условия эффективной работы	Краткая характеристика	Источник
1	Открытый канал с щебнем известняка	Кислотность < 500 мг CaCO ₃ /л, расход потока < 20 л/с, кислотная нагрузка < 150 кг CaCO ₃ /день, уклон > 10°	Представляют собой канал, заполненный крупнообломочным известняком. Наиболее эффективны при размещении на достаточно крутых склонах, благодаря чему периодически промываются дождевыми потоками	[GARD, 14, 16, 17]
2	Бескислородный канал с щебнем известняка	Кислотность < 500 мг CaCO ₃ /л, расход потока < 20 л/с, кислотная нагрузка < 150 кг CaCO ₃ /день, растворенный O ₂ < 1 мг/л, Al < 1 мг/л	Канал заполняется щебнем известняка, сверху покрывается глиной. В канале поддерживаются условия с низким содержанием кислорода, что препятствует окислению Fe ²⁺ до Fe ³⁺ и образованию осадка. При взаимодействии с известняком в воде появляется свободная щелочность, за счет которой нейтрализуются дополнительные ионы H ⁺ , образующиеся при осаждении металлов после выхода воды из канала	[GARD, 14, 16, 17]
3	Пласт выщелачивания известняка	Использовался для воды с кислотностью 400–650 мг CaCO ₃ /л и высоким содержанием Fe и Al	Представляет собой пруд или резервуар, заполненный крупнообломочным известняком. Размеры и конструкция пруда должны обеспечивать не менее чем 30-минутное удерживание воды	[16, 17]
4	Пласт выщелачивания сталеплавильного шлака	Кислотность < 1000 мг CaCO ₃ /л, расход потока < 20 л/с, кислотная нагрузка < 1–2 т CaCO ₃ /год. Низкое содержание Fe, Al и Mn	Пласт выщелачивания доменного (сталеплавильного) шлака организуется в виде канала или пруда, заполненного мелкозернистым шлаком. Доменный шлак способен поднять pH воды до 10	[14, 16, 17]
5	Колодец для перемешивания	Кислотность < 500 мг CaCO ₃ /л, расход потока < 1000 л/с, кислотная нагрузка < 1000 кг CaCO ₃ /день, перепад высот для создания напора 2,5–10 м	Представляет собой цилиндрический резервуар, заполненный дробленным известняком. Поступающая кислая вода подается по трубе на дно колодца, под давлением, создаваемым гидравлическим напором, что вызывает интенсивное перемешивание	[14, 16, 17]
6	Каналы для окисления железа	Низкий pH воды, высокое содержание Fe, наличие уклона	Представляет собой водослив с перепадом по высоте в виде неглубокого канала, ширина, длина и уклон которого должны обеспечивать достаточно длительный контакт с воздухом, необходимый для окисления железа и выпадения осадка	[GARD, 17]

шения в пользу пассивной или активной системы очистки. Опыт австралийских специалистов, резюмированный в работе [14], свидетельствует о том, что методы пассивной очистки более эффективны, если фактическая кислотность дренажных вод составляет менее 800 мг $\text{CaCO}_3/\text{л}$, расход потока — менее 50 л/с, а кислотная нагрузка — менее 150 кг $\text{CaCO}_3/\text{день}$ (см. табл. 4 в [14]). Критерии выбора в пользу технологий пассивной очистки и условия эффективного применения некоторых геохимических методов, согласно опубликованным исследованиям обзорного характера, приведены в табл. 1.

Исходные данные и методология

В качестве исходных данных для выполнения исследования по выбору оптимальной системы очистки использовались результаты анализов проб шахтных вод, отобранных в течение 2017 г. в ходе гидрохимического мониторинга водных объектов территории Кизеловского угольного бассейна [22]. Мониторинг шахтных вод в указанной период осуществлялся ООО «Пермэнергоаудит». В 2017 г. отбор проб шахтных вод из каждого источника, рассмотренного в настоящем исследовании, выполнялся 3 раза. Пробы анализировались на анионно-катионный состав, содержание железа и ми-

кроэлементов (в т.ч. Al и Mn). Методы выполнения химических анализов приведены в работе [8].

Усредненные концентрации ионов и значения pH, необходимые для определения фактической кислотности и типа шахтных вод, представлены в табл. 2. Средние значения получены по данным анализов трех проб из каждого излива. Дренажные воды с $\text{pH} < 6$ определялись как кислотный дренаж шахт (КДШ), а воды с $\text{pH} > 6$ и концентрацией сульфат-ионов менее 1000 мг/л — как нейтральный дренаж шахт (НДШ), согласно Руководству GARD.

Для выбора в пользу пассивной или активной системы очистки прежде всего необходимо знать фактическую кислотность и кислотную нагрузку. Для определения кислотности расчетным путем по формуле (1) следует учитывать концентрации ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} . Распределение ионных форм железа со степенью окисления +2 и +3 было выполнено с использованием программы геохимического моделирования PHREEQC [23]. При моделировании использовались данные химического состава шахтных вод. Значение окислительно-восстановительного потенциала (re) определялось автоматически с учетом имеющихся концентраций ионов NH_4^+ и NO_3^- . Баланс заряда корректировался по concentra-

Таблица 2

Показатели химического состава дренажных вод и их тип **Indicators of chemical composition of drainage waters and their type**

Излив шахтных вод	pH	Fe^{2+}	Fe^{3+}	Mn^{2+}	Al^{3+}	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Тип
Штольня шахты им. Калинина	2,97	679,9	519,9	10,24	38,60	2327,3	н.о.*	КДШ
Трубный ходок шахты им. Крупской	3,07	852,8	715,6	12,97	105,97	4440,0	н.о.	КДШ
Штольня шахты им. 1 Мая	2,73	45,7	76,9	2,44	14,37	825,7	н.о.	КДШ
Скв. 634 шахты «Шумихинская»	5,3	516,6	281,7	5,24	1,22	1473,3	20,0	КДШ
Родник 417а	4,9	6,51	3,32	0,32	19,12	372,7	8,0	КДШ
Родник 407	6,5	0,74	4,9	0,62	0,16	180,7	31,3	НДШ

* н.о. — не обнаружен.

Таблица 3

Характеристики воды и рекомендуемая система очистки
Water characteristics and recommended treatment system

Излив шахтных вод	Ср. ФК мг CaCO ₃ /л	Ср. расход потока, л/с	Ср. кисл. нагрузка, кг CaCO ₃ /день	Рекомендуемая система очистки
Штольня шахты им. Калинина	2896,2	121,13	30 310,9	активная
Трубный ходок шахты им. Крупской	4095,7	5,16	1826,8	активная /пассивная позтапная
Штольня шахты им. 1 Мая	468,1	15,88	642,2	активная /пассивная позтапная
Скв. 634 шахты «Шумихинская»	1677,5	2,28	330,0	пассивная
Родник 417а	122,2	47,29	499,3	пассивная
Родник 407	-9,2	483,99	—	пассивная / активная (аэрирование)

ции сульфатов. В шахтных водах с pH менее 4,5 щелочность отсутствует, а кислотность соответствует фактической кислотности (net acidity) [18]. Вода из родников и скважины характеризуется более высокими значениями pH и наличием гидрокарбонат-ионов. Для этих вод, помимо расчета кислотности (РК) по формуле (1), был выполнен расчет щелочности (РЩ) по формуле (3), а затем расчет фактической кислотности (ФК) согласно выражению (4). Для определения «кислотной нагрузки» (acidity load) по формуле (6), использовались усредненные данные по расходам шахтных вод за 2007 – 2019 гг., опубликованные в работе [24]. Расчет ФК и расхода реагента выполнялся для каждого анализа отдельно, после чего выводилось среднее значение этих параметров для каждого излива и родника.

Результаты и обсуждение

На основании сравнения значений фактической кислотности воды, кислотной нагрузки, а также расхода потока с критериями, рекомендованными для определения пригодности систем активной или пассивной очистки [14, табл. 4], и руководствуясь условиями эффективной работы геохимических методов, ре-

зюмированных в табл. 1, были определены те изливы шахтных вод, для очистки которых могут быть применены пассивные технологии. Характеристики шахтных и родниковых вод и рекомендуемая система очистки показаны в табл. 3.

Приведенные ниже комментарии относительно возможности или невозможности применения геохимических методов пассивной очистки для каждого рассмотренного излива и предложения по выбору в пользу того или иного метода геохимической очистки были основаны на анализе существующих подходов и рекомендаций, кратко изложенных в первой части раздела «Материалы и методы».

Излив из штольни шахты им. Калинина

По причине очень высокой фактической кислотности, обусловленной высоким содержанием металлов, а также из-за большого расхода потока классические системы пассивной очистки не смогут эффективно работать. Высокая скорость потока ограничит время, необходимое для протекания реакции, а большое количество образующегося осадка быстро покроет поверхность щелочного материала, закупорит поры и каналы,

препятствуя протеканию реакции нейтрализации. Для поддержания работы системы пассивной очистки потребуется частая промывка и замена щелочного материала-заполнителя. В данном случае в качестве основных могут рассматриваться методы активной очистки, с использованием более эффективных реагентов (с меньшим расходом), тогда как технологии пассивной обработки дренажных вод могут быть использованы на стадии доочистки. Однако ввиду значительного дебита рассматриваемого источника наиболее оптимальное решение заключается в разработке и реализации инженерных мероприятий по снижению объемов разгружающихся шахтных вод на основании модельных прогнозов [13].

Излив из шахты им. Крупской

Отток воды из трубного хода шахты характеризуется относительно низким дебитом, что соответствует условиям успешного применения методов пассивной очистки. Однако очень высокая кислотность воды приведет к снижению эффективности системы из-за быстрого накопления осадка. Тем не менее, при условии наличия достаточной площади и уклона, возможность применения комплекса методов пассивной очистки может быть рассмотрена. Такой комплекс мероприятий предполагает несколько этапов: предварительную очистку путем окисления и осаждения железа за счет аэрирования (п. 6, табл. 1), нейтрализацию в открытом бассейне или канале, заполненном щебнем известняка (пп. 1, 3, табл. 1), отстаивание в пруду-осадителе и/или доочистку в условиях водно-болотных угодий.

Излив из штольни шахты им. 1 Мая

Шахтный дренаж отличается небольшим расходом потока и относительно низкой кислотностью, что обусловлено более низкими, по сравнению с другими

источниками, концентрациями Fe, Al и Mn. Несмотря на значительную кислотную нагрузку (642,2 кг CaCO_3 /день), возможность применения системы пассивной очистки не должна полностью исключаться. Для снижения нагрузки на систему может быть предусмотрено разделение потока на два или более.

На практике, согласно примеру, приведенному в работе [17], «пласт выщелачивания известняка» (п. 3, табл. 1) использовался для воды с кислотностью до 650 мг CaCO_3 /л, и расходом потока 9,5 л/с, что соответствует кислотной нагрузке 533,5 кг CaCO_3 /день. Для борьбы с засорением была предусмотрена система периодической промывки. Для доочистки сточные воды поступали в пруд-осадитель и затем в водно-болотные угодья, в которых поддерживались восстановительные условия.

Излив из скв. 634 шахты «Шумихинская»

Характеризуется небольшим расходом, но повышенной фактической кислотностью. Однако, поскольку вода поступает непосредственно из скважины, выбор метода пассивной очистки, такой как «бескислородный канал из известняка» (п. 2, табл. 1), может быть предпочтителен ввиду, вероятно, низких концентраций растворенного кислорода. Для того, чтобы избежать окисления железа, канал должен начинаться как можно ближе к источнику. Дополнительным аргументом в пользу данного метода является относительно низкое содержание Al. При содержании Al более 1 мг/л эффективность системы может быть ограничена из-за образования осадка (в виде $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) и закупорки пущот [14, 17].

Родник 417 а (р. Шумиха)

Низкие фактическая кислотность и дебит (менее 50 л/с) подходят для сис-

тем пассивной очистки. В данном случае высокое содержание Al ограничивает возможность применения бескислородных каналов и обуславливает выбор в пользу открытых систем. Высокая кислотная нагрузка (~500 кг CaCO₃/день) может быть снижена созданием параллельных систем очистки, за счет разделения потоков, либо увеличением длины канала (площади бассейна), заполненного щелочным крупнообломочным материалом. При использовании в качестве реагента известняка необходимо учитывать, что он повышает pH раствора примерно до 8, тогда как для осаждения некоторых металлов необходимо достичь более высоких значений pH. Удаление части ионов металлов возможно благодаря адсорбции на осаждающемся гидроксиде железа. Однако в воде данного источника концентрации железа может быть недостаточно для снижения содержания металлов до нормативных значений за счет адсорбции. Предварительно оценить, какие металлы и в каком количестве могут быть сорбированы при осаждении гидроксидов железа, можно с помощью методов физико-химического моделирования [25] или экспериментальным путем [26].

Родник 407 (р. Ладейный Лог)

Согласно исследованиям [7], данный источник представляет собой разгрузку по системе карстовых полостей вод р. Ладейный Лог в р. Косьва. Химический состав вод, разгружающихся в источнике 407, формируется в результате смешивания природных и кислых шахтных вод и их взаимодействия с карбонатными породами. Поскольку щелочность превышает кислотность, то в воде достаточно щелочных компонентов для нейтрализации ионов водорода, которые высвобождаются при гидролизе содержащегося в воде железа. Таким образом, для очистки этих вод может быть доста-

точно аэрирования, путем создания каскада воды, за которым следует пруд для отстаивания взвешенных частиц. Однако непосредственная близость места разгрузки к реке осложняет возможность применения систем гравитационного типа. В данном случае для обогащения воды кислородом могут быть применены аэраторы, используемые для очистки коммунальных и промышленных сточных вод.

Заключение

Варианты очистки шахтных вод подбираются в зависимости от их объема, химического состава, фактической кислотности и щелочности, морфологических особенностей территории, наличия необходимых площадей, а также имеющихся ресурсов для строительства и обслуживания систем очистки. Кислотность дренажных вод может быть достаточно точно оценена расчетными методами при наличии данных об их химическом составе. В настоящей работе фактическая кислотность была рассчитана для шахтных вод, разгружающихся через заброшенные горные выработки и родники, расположенные в бассейне р. Косьва.

На основании полученных значений фактической кислотности и сведений об объемах разгрузки шахтных вод в работе предложены подходы к выбору систем очистки. Поскольку шахты закрыты, то прежде всего рассматривалась возможность применения систем пассивной очистки, ввиду меньшей стоимости их строительства и эксплуатации. Фактическая кислотность воды в большинстве рассмотренных источников превышает значения, рекомендуемые для эффективной работы систем пассивной очистки, что ограничивает возможность применения таких технологий. Однако для источников с относительно небольшим дебитом (изливы из шахт им. Круп-

ской, им. 1 Мая, скв. 634 шахты «Шумихинская» и родник 417а) возможность применения пассивных методов может быть рассмотрена при наличии необходимых площадей и уклона, для размещения объектов поэтапной пассивной очистки.

Несмотря на экономическую привлекательность систем пассивной геохимической очистки, их эксплуатация не отменяет необходимость постоянных затрат на техническое обслуживание, включающее периодическую промывку или

полную замену щелочного материала, а также удаление шлама из прудов-осадителей путем его захоронения на полигонах или размещения в шламохранилищах.

Предлагаемые варианты инженерно-технических мероприятий, основанные на особенностях химического состава шахтных вод, носят рекомендательный характер и требуют дополнительного изучения возможности их реализации, в том числе с учетом природно-техногенных особенностей территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chen G., Ye Y., Yao N., Hu N., Zhang J., Huang Y.* A critical review of prevention, treatment, reuse, and resource recovery from acid mine drainage // *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 329, article 129666. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129666.

2. *Rambabu K., Banat F., Pham Q. M., Ho S.-H., Ren N.-Q., Show P. L.* Biological remediation of acid mine drainage: review of past trends and current outlook // *Environmental Science and Ecotechnology*. 2020, vol. 2, article 100024. DOI: 10.1016/j.ese.2020.100024.

3. *Ushakova E., Menshikova E., Blinov S., Vaganov S., Perevoshchikov R.* Distribution of trace elements, rare earth elements and ecotoxicity in sediments of the Kosva Bay, Perm Region (Russia) // *Journal of Ecological Engineering*. 2022, vol. 23, no. 4. DOI: 10.12911/22998993/146269.

4. *Jones D. R., Taylor J., Pape S., McCullough C. D., Brown P., Garvie A., Appleyard S., Miller S., Unger C., Laurencont T., Slater S., Williams D., Scott P., Fawcett M., Waggitt P., Robertson A.* Preventing acid and metalliferous drainage: leading practice sustainable development program for the mining industry / Commonwealth of Australia, Canberra, 2016, 221 p.

5. *Iatan E.-L.* Gold mining industry influence on the environment and possible phytoremediation applications / *Phytoremediation of abandoned mining and oil drilling sites*. Chapter 16. Oxford: Elsevier, 2021, pp. 373–408. DOI: 10.1016/B978-0-12-821200-4.00007-8.

6. *Naidu G., Ryu S., Thiruvengkatachari R., Choi Y., Jeong S., Vigneswaran S.* A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage // *Environmental Pollution*. 2019, vol. 247, pp. 1110–1124. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.01.085.

7. *Максимович Н. Г., Пьянков С. В.* Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. — Пермь: ПГНИУ, 2018. — 288 с.

8. *Фетисова Н. Ф.* Исследование форм миграции металлов в реках, подверженных влиянию шахтных вод Кизеловского угольного бассейна // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. — 2021. — № 1. — С. 141–152. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3007.

9. *Ushakova E., Menshikova E., Blinov S., Osovetsky B., Belkin P.* Environmental assessment impact of acid mine drainage from Kizel Coal Basin on the Kosva Bay of the Kama Reservoir (Perm Krai, Russia) // *Water (Switzerland)*. 2022, vol. 14, no. 5, article 727. DOI: 10.3390/w14050727.

10. *Максимович Н. Г., Хмурчик В. Т., Березина О. А.* Формы переноса микроэлементов в речной сети и распределение их во фракциях донных отложений в районах угледобычи // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2022. — № 11. — С. 52–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_52.

11. *Блинов С. М., Максимович Н. Г., Найданова Н. Ф., Шлыков В. Г., Потапов С. С.* Минералогические основы утилизации отходов ОАО «Березниковский содовый завод» // *Минералогия техногенеза*. — 2003. — № 4. — С. 51–55.

12. Максимович Н. Г. Создание геохимических барьеров для очистки кислых стоков породных отвалов // Уголь. — 2006. — № 9 (965). — С. 64–65.

13. Рыбников П. А., Рыбникова Л. С., Максимович Н. Г., Деменев А. Д. Исследование гидрогеологических условий угольных месторождений на постэксплуатационном этапе с использованием гидродинамического моделирования (на примере Кизеловского угольного бассейна, Западный Урал, Россия) // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 475–487. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-475-487.

14. Taylor J., Pape S., Murphy N. A summary of passive and active treatment technologies for acid and metalliferous drainage (AMD). Fremantle, Werstern Australia, 2005, 49 p.

15. Skousen J. G., Rose A. W., Geidel G., Foreman J., Evans R., Hellier W. Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage. Morgan-town, National Mine Land Reclamation Center, 1998, 131 p.

16. Skousen J., Ziemkiewicz P. Performance of 116 passive treatment systems for acid mine drainage / Proceedings of 22nd National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation. Lexington, ASMR, 2005, pp. 1100–1133. DOI: 10.21000/JASMR05011100.

17. Skousen J., Zipper C. E., Rose A., Ziemkiewicz P. F., Nairn R., McDonald L. M., Kleinmann R. L. Review of passive systems for acid mine drainage treatment // Mine Water and the Environment. 2017, vol. 36, pp. 133–153. DOI: 10.1007/s10230-016-0417-1.

18. Kirby C. S., Cravotta C. A. Net alkalinity and net acidity 1: theoretical considerations // Applied Geochemistry. 2005, vol. 20, pp. 1920–1940. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.07.002.

19. Kirby C. S., Cravotta C. A. Net alkalinity and net acidity 2: practical considerations // Applied Geochemistry. 2005, vol. 20, pp. 1941–1964. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.07.003.

20. Еделев А. В. Прогнозная оценка состава дренажных вод, взаимодействующих с сульфидсодержащим веществом // Геология и геофизика. — 2013. — Т. 54. — № 1. — С. 144–157.


21. Фетисова Н. Ф. Кислотность и щелочность шахтных вод как ключевые показатели для планирования систем очистки // Горное эко. — 2022. — № 2(87). — С. 32–38. DOI: 10.7242/echo.2022.2.5.

22. Геоэкологическая геоинформационная система Кизеловского угольного бассейна: [сайт]. URL: <http://kub.maps.psu.ru> (обращение 24.10.2022).

23. Parkhurst D. L., Appelo C. A. J. Description of input and examples for PHREEQC version 3-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Techniques and Methods / Book 6 Modeling Techniques, chapter 43 of Section A: Groundwater. Denver, Colorado, 2013, 497 p. DOI: 10.3133/TM6A43.

24. Максимович Н. Г., Хмурчик В. Т., Мещерякова О. Ю., Березина О. А., Деменев А. Д. Формирование техногенных донных отложений под влиянием изливов кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна / Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Т. 23. — М.: Геоинфо, 2022. — С. 385–387.

25. Fetisova N. F. Arsenic speciation and sorption in acid mine drainage and the polluted water of the Kosva river basin, Russia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022, vol. 962, no. 1, article 012050. DOI: 10.1088/1755-1315/962/1/012050.

26. Lozano A., Ayora C., Fernández-Martínez A. Sorption of rare earth elements on schwertmannite and their mobility in acid mine drainage treatments // Applied Geochemistry. 2020, vol. 113, article 104499. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104499. 

REFERENCES

1. Chen G., Ye Y., Yao N., Hu N., Zhang J., Huang Y. A critical review of prevention, treatment, reuse, and resource recovery from acid mine drainage. *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 329, article 129666. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129666.

2. Rambabu K., Banat F., Pham Q. M., Ho S.-H., Ren N.-Q., Show P. L. Biological remediation of acid mine drainage: review of past trends and current outlook. *Environmental Science and Ecotechnology*. 2020, vol. 2, article 100024. DOI: 10.1016/j.ese.2020.100024.
3. Ushakova E., Menshikova E., Blinov S., Vaganov S., Perevoshchikov R. Distribution of trace elements, rare earth elements and ecotoxicity in sediments of the Kosva Bay, Perm Region (Russia). *Journal of Ecological Engineering*. 2022, vol. 23, no. 4. DOI: 10.12911/22998993/146269.
4. Jones D. R., Taylor J., Pape S., McCullough C. D., Brown P., Garvie A., Appleyard S., Miller S., Unger C., Laurencont T., Slater S., Williams D., Scott P., Fawcett M., Waggitt P., Robertson A. *Preventing acid and metalliferous drainage: leading practice sustainable development program for the mining industry*. Commonwealth of Australia, Canberra, 2016, 221 p.
5. Iatan E.-L. Gold mining industry influence on the environment and possible phytoremediation applications. *Phytoremediation of abandoned mining and oil drilling sites*. Chapter 16. Oxford: Elsevier, 2021, pp. 373–408. DOI: 10.1016/B978-0-12-821200-4.00007-8.
6. Naidu G., Ryu S., Thiruvengatchari R., Choi Y., Jeong S., Vigneswaran S. A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage. *Environmental Pollution*. 2019, vol. 247, pp. 1110–1124. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.01.085.
7. Maksimovich N. G., P'yankov S. V. *Kizelovskiy ugol'nyy basseyn: ekologicheskie problemy i puti resheniya* [Kizel coal basin: ecological problems and solutions], Perm, PGNIU, 2018, 288 p.
8. Fetisova N. F. Study of migration forms of metals in rivers affected by acid mine drainage of the Kizel coal basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021, no. 1, pp. 141–152. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3007.
9. Ushakova E., Menshikova E., Blinov S., Osovetsky B., Belkin P. Environmental assessment impact of acid mine drainage from Kizel Coal Basin on the Kosva Bay of the Kama Reservoir (Perm Krai, Russia). *Water (Switzerland)*. 2022, vol. 14, no. 5, article 727. DOI: 10.3390/w14050727.
10. Maksimovich N. G., Khmurchik V. T., Berezina O. A. Forms of transfer of microelements in river network and their distribution in bottom sediments in coal mining regions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11, pp. 52–66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_52.
11. Blinov S., Maksimovich N. G., Naidanova N. F., Shlykov V. G., Potapov S. S. Mineralogical bases of waste disposal of JSC «Berezniki soda plant». *Mineralogiya tekhnogeneza*. 2003, no. 4, pp. 51–55. [In Russ].
12. Maksimovich N. G. Creation of geochemical barriers to clearing sour drains waste from breed. *Ugol'*. 2006, no. 9 (965), pp. 64–65. [In Russ].
13. Ribnikov P. A., Ribnikova L. S., Maksimovich N. G., Demenev A. D. Hydrogeology of the Kizel coal basin (Western Urals, Russia) in post-mining stage: the main problems and ways of their solution. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 475–487. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-475-487.
14. Taylor J., Pape S., Murphy N. *A summary of passive and active treatment technologies for acid and metalliferous drainage (AMD)*. Fremantle, Werstern Australia, 2005, 49 p.
15. Skousen J. G., Rose A. W., Geidel G., Foreman J., Evans R., Hellier W. *Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage*. Morgan-town, National Mine Land Reclamation Center, 1998, 131 p.
16. Skousen J., Ziemkiewicz P. Performance of 116 passive treatment systems for acid mine drainage. *Proceedings of 22nd National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation*. Lexington, ASMR, 2005, pp. 1100–1133. DOI: 10.21000/JASMR05011100.
17. Skousen J., Zipper C. E., Rose A., Ziemkiewicz P. F., Nairn R., McDonald L. M., Kleinmann R. L. Review of passive systems for acid mine drainage treatment. *Mine Water and the Environment*. 2017, vol. 36, pp. 133–153. DOI: 10.1007/s10230-016-0417-1.
18. Kirby C. S., Cravotta C. A. Net alkalinity and net acidity 1: theoretical considerations. *Applied Geochemistry*. 2005, vol. 20, pp. 1920–1940. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.07.002.
19. Kirby C. S., Cravotta C. A. Net alkalinity and net acidity 2: practical considerations. *Applied Geochemistry*. 2005, vol. 20, pp. 1941–1964. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.07.003.

20. Edelev A. V. Composition of drainage mine waters interacting with sulfide-containing rock: a predictive estimation. *Geologiya i geofizika*. 2013, vol. 54, no. 1, pp. 144 – 157. [In Russ].
21. Fetisova N. F. Acidity and alkalinity of mine water as key indicators for planning of treatment systems. *Gornoe ekho*. 2022, no. 2(87), pp. 32 – 38. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2022.2.5.
22. *Geoekologicheskaya geoinformatsionnaya sistema Kizelovskogo ugol'nogo basseyna* [Geoeological geoinformation system of the Kizel coal basin], available at: <http://kub.maps.psu.ru> (accessed 24.10.2022). [In Russ].
23. Parkhurst D. L., Appelo C. A. J. *Description of input and examples for PHREEQC version 3-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Techniques and Methods*. Book 6 Modeling Techniques, chapter 43 of Section A: Groundwater. Denver, Colorado, 2013, 497 p. DOI: 10.3133/TM6A43.
24. Maksimovich N. G., Khmurchik V. T., Meshcheryakova O. Y., Berezina O. A., Demenev A. D. Formation of technogenic bottom sediments under the influence of acid mine drainage of the Kizel coal basin. *Sergeevskie chteniya. Fundamental'nye i prikladnye voprosy sovremen-nogo gruntovedeniya: Materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoe-kologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii* [Sergeyevskiye chteniya. Fundamental and applied issues of modern soil science: Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the RAS on the problems of geoeology, engineering geology and hydrogeology], vol. 23, Moscow, Geoinfo, 2022, pp. 385 – 387. [In Russ].
25. Fetisova N. F. Arsenic speciation and sorption in acid mine drainage and the polluted wa-ter of the Kosva river basin, Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 962, no. 1, article 012050. DOI: 10.1088/1755-1315/962/1/012050.
26. Lozano A., Ayora C., Fernández-Martínez A. Sorption of rare earth elements on schw-ertmannite and their mobility in acid mine drainage treatments. *Applied Geochemistry*. 2020, vol. 113, article 104499. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104499.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фетисова Наталья Фотеевна — канд. геол.-минерал. наук,
научный сотрудник, Горный институт Уральского отделения РАН,
e-mail: fetisova.n.f@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-2346-337X,

Фетисов Вячеслав Владимирович — канд. геол.-минерал. наук,
доцент, Пермский государственный национальный
исследовательский университет, e-mail: fetisov.v.v@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-4712-4265.

Для контактов: Фетисова Н.Ф., e-mail: fetisova.n.f@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.F. Fetisova, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Researcher, Mining Institute of Ural Branch,
Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia,
e-mail: fetisova.n.f@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-2346-337X,

V.V. Fetisov, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Associate Professor, Perm State National Research University,
614990, Perm, Russia, e-mail: fetisov.v.v@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-4712-4265.

Corresponding author: N.N. Fetisova, e-mail: fetisova.n.f@gmail.com.

Получена редакцией 24.01.2023; получена после рецензии 06.04.2023; принята к печати 10.12.2023.
Received by the editors 24.01.2023; received after the review 06.04.2023; accepted for printing 10.12.2023.