ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Оценка эффективности очистки кислых шахтных вод (на примере медноколчеданных рудников Среднего Урала)

Л.С.Рыбникова, П.А.Рыбников, В.Ю.Наволокина✉
Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю. Оценка эффективности очистки кислых шахтных вод (на примере медноколчеданных рудников Среднего Урала) // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 388-401. EDN SBKRCK

Аннотация. По результатам антирейтинга регионов с экстремальным загрязнением водотоков в Свердловской обл. в последние годы фиксируется самое большое число загрязненных рек – более четверти всех высоких и экстремально высоких загрязнений. Одним из источников загрязнения природных водных объектов на Среднем Урале являются закрытые и затопленные медноколчеданные рудники, на которых продолжают формироваться и разгружаться на поверхность кислые шахтные воды. На нескольких из них организован сбор и двухступенчатая система очистки кислых вод, включающая нейтрализацию известковым молоком и отстаивание в пруде-осветлителе. Несмотря на идентичные схемы, при сбросе в водные объекты фиксируются разные показатели загрязняющих веществ. Цель работы – оценка эффективности применяемой системы очистки кислых шахтных вод и выявление параметров, влияющих на качество очищенных шахтных вод. Лабораторные исследования выполнялись с использованием методов пламенно-эмиссионной спектрометрии, пламенной атомно-абсорбционной, атомно-абсорбционной спектрометрии, масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме, потенциометрический и др. Установлено, что на Дегтярском руднике существующая система очистки шахтных вод позволяет значительно снизить концентрации большинства токсичных компонентов шахтных вод практически до нормативных показателей. На Левихинском руднике кратность превышения предельно допустимых концентраций достигает сотни и тысячи раз. Для достижения более высокой степени очистки необходимо, чтобы продолжительность пассивной очистки была достаточной для взаимодействия реагента с кислыми водами. Однако для обеспечения этой возможности потребуется создание каскада прудов площадью несколько тысяч гектаров. Если для Дегтярского рудника действующая двухступенчатая система является достаточно эффективной, то для Левихинского необходим переход на использование более современных систем, включающих три этапа очистки.

***Ключевые слова*:** кислые шахтные воды; гидросфера; активные и пассивные методы очистки; медноколчеданные рудники; пруд-осветлитель; реагенты

Благодарность. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГД УрО РАН № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022-2024 гг.) «Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании» (FUWE-2022-0002) № 1021062010532-7-1.5.1.

Поступила: 11.04.2024 ***Принята: 03.06.2024*** ***Онлайн: 04.07.2024*** ***Опубликована: 04.07.2024***

Введение. Кислые шахтные воды (КШВ) – одна из наиболее серьезных экологических проблем, тесно связанная с горнодобывающей деятельностью. Основной причиной образования этих вод является наличие в породах сульфидных минералов [1, 2]. Во время добычи нарушается целостность горного массива, происходит сернокислотное выветривание сульфидных минералов при взаимодействии с водой и воздухом, что приводит к образованию кислых шахтных дренажей [3-5]. Низкие значения pH в шахтных водах способствуют дальнейшему растворению минералов и выделению из них тяжелых металлов. Эти потоки при поступлении на ландшафты горнодобывающих территорий наносят существенный ущерб как гидросфере, так и всей окружающей среде в целом [6-8].

Основной проблемой при очистке КШВ является их высокая кислотность (pH = 2,5-4,5), наличие опасных химических элементов (Cu, Zn, Mn, Fe, Al), а также большие объемы воды, которые образуются после затопления рудников и выходят на поверхность в течение десятков, а иногда и сотен лет [9]. Состав шахтных вод зависит от времени, которое прошло после затопления. В первые

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 388-401
© Л.С.Рыбникова, П.А.Рыбников, В.Ю.Наволокина, 2024

годы наблюдается резкий рост всех показателей, иногда в 3-5 раз по сравнению с этапом отработки. Это явление носит название «первый смыв» и проявилось, в том числе, и на медноколчеданных рудниках Среднего Урала [2, 10]. В дальнейшем происходит постепенный достаточно медленный спад минерализации и концентраций отдельных компонентов, но при этом отмечаются значительные колебания их содержания в зависимости от сезона и водности периода. Эти процессы значительно осложняют организацию очистки шахтных вод и должны учитываться на каждом конкретном объекте.

В Свердловской обл. на многих ликвидированных медноколчеданных рудниках (Левихинский, Карпушихинский, Ломовский, Дегтярский и др.) после прекращения водоотлива сформировались сосредоточенные выходы КШВ, как правило, в наиболее низкой части горнопромышленного ландшафта (в провалах, карьерах). Хотя их расход ниже, чем в период отработки и шахтного водоотлива, он может достигать несколько тысяч кубометров в сутки и без очистки приводит к деградации ландшафта и недопустимому загрязнению гидросферы на значительных площадях. Для предотвращения загрязнения окружающей среды таких объектов с начала 2000-х годов за счет средств областного бюджета организован сбор и нейтрализация КШВ (для этого было создано Государственное казенное учреждение Свердловской обл. «УралМонацит»). Очищенные сточные воды с Левихинского, Карпушихинского и Ломовского рудников сбрасываются в р. Тагил (Иртышский бассейновый округ), ниже сбросов расположено Леневское водохранилище, которое является одним из источников водоснабжения г. Нижний Тагил (население 350 тыс. чел.) [11]. Несмотря на очистку, уровень загрязнения воды в устье р. Левиха превышает допустимые нормы в тысячи и сотни раз [12].

Дегтярское медноколчеданное месторождение расположено на восточном склоне Среднего Урала в муниципальном округе г. Дегтярск Свердловской обл., в 45 км юго-западнее Екатеринбурга, в 18 км юго-восточнее г. Ревда. Месторождение отрабатывалось с 1914 по 1995 годы. Эксплуатация проводилась комплексно как открытым, так и подземным способами до глубины 610 м. В конце 1995 г. в связи с ликвидацией рудника шахтный водоотлив был прекращен и к 1999 г. завершилось заполнение депрессионной воронки [13]. С этого момента КШВ с расходом около 180 м^3/ч поступают в провал карьера шахты «Колчеданная» в северной части месторождения. КШВ, вытекающие из карьера, рассредоточенным стоком поступают в р. Исток, где смешиваются с известковым молоком, которое подается по трубопроводу со станции нейтрализации. Затем весь сток нейтрализованных рудничных вод по руслу реки поступает в Ельчевский пруд-отстойник, построенный в 1952 г. для очистки шахтных вод работающего рудника [14-16]. Проектный объем пруда – 9,4 млн м^3, площадь 220 га [17]. После отстаивания вода, очищенная от взвеси, по руслу р. Ельчевка попадает в Волчихинское водохранилище, которое является основным источником питьевого водоснабжения Екатеринбурга (население 1,5 млн чел.) (рис.1) [18].

Степень очистки здесь гораздо выше, практически до нормативов предельно допустимых концентраций (ПДК). Волчихинское водохранилище расположено в бассейне р. Чусовая (Камский бассейновый округ), Екатеринбург находится на р. Исеть (Иртышский бассейновый округ). Фактически осуществляется межбассейновая переброска стока рек через Главный уральский водораздел. Вода из Волчихинского водохранилища подается в Екатеринбург, обеспечивая основную долю хозяйственно-бытового водоснабжения города, поэтому состояние гидросферы в водосборе Волчихинского водохранилища является предметом пристального внимания и надзорных органов и общественности.

Левихинское медноколчеданное месторождение расположено в 120 км на север от Екатеринбурга, на восточной окраине пос. Левиха, в 30 км северо-западнее г. Кировград (рис.2). Отработка рудника велась с 1927 по 2003 годы как открытым, так и подземным способом до глубины 615 м. Вплоть до конца 1950-х годов КШВ без предварительной очистки сбрасывались в болото Пороховое, расположенное на северо-западе месторождения. В 1959 г. в долине р. Левиха был построен осветлительный пруд. Его проектный объем составляет 3 млн м^3, площадь – 142 га. В 2003 г. водоотлив был остановлен, что привело к заполнению депрессионной воронки, и к 2007 г. в самой низкой точке горного отвода в провале шахты «Левиха II» образовался техногенный водоем, в который происходит разгрузка КШВ. Расход разгрузки составляет примерно 115 м^3/ч, что вдвое меньше, чем было в период отработки. Шахтные воды по трубопроводу перекачиваются из техногенного водоема

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

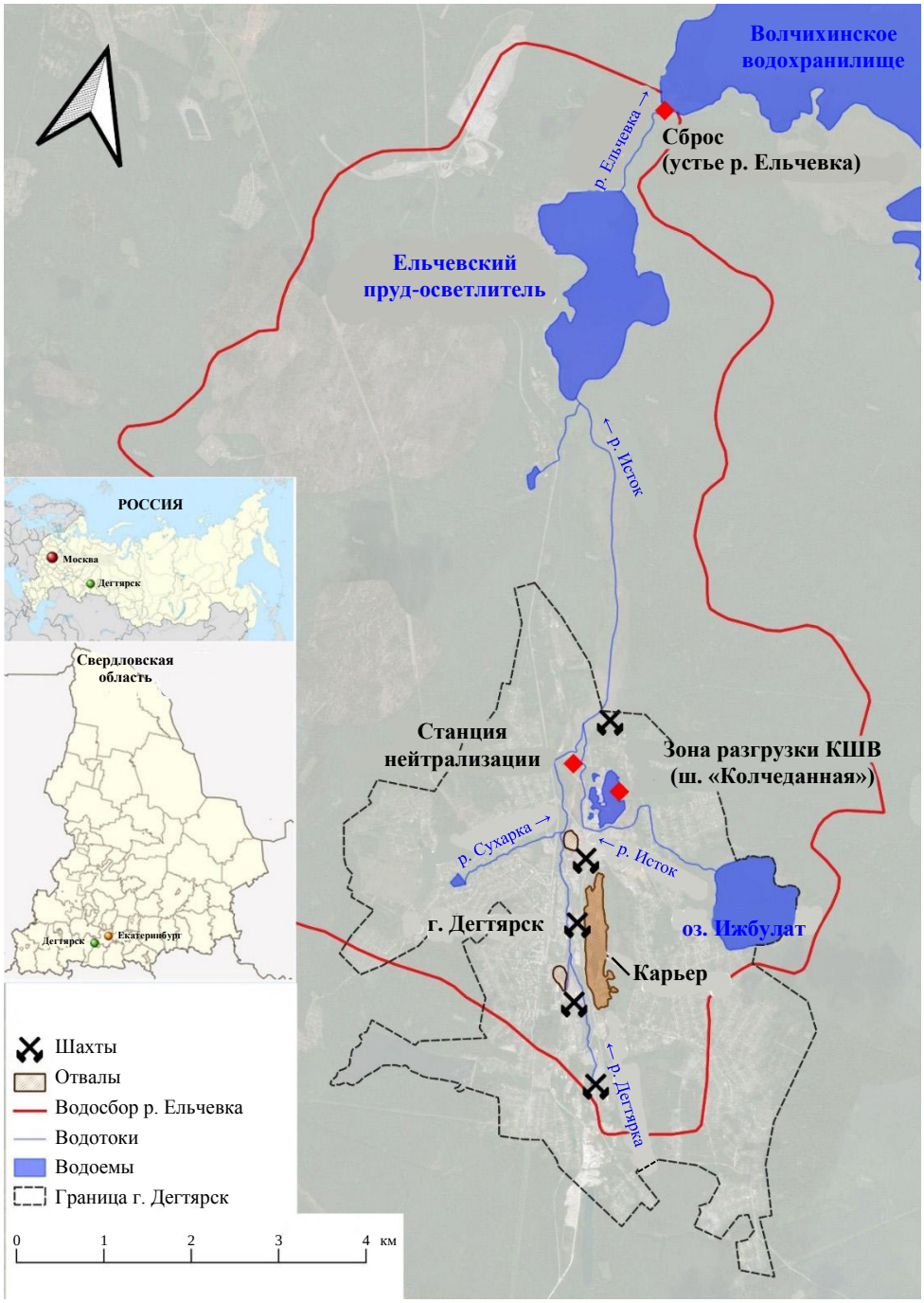


Рис.1. Обзорная карта-схема расположения объектов на Дегтярском руднике

в районе шахты «Левиха II» на станцию нейтрализации. После добавления известкового молока эти воды поступают в пруд-осветлитель, а затем самотеком по старому руслу р. Левиха попадают в р. Тагил (рис.2).

Для эффективной очистки КШВ в настоящее время применяется множество разнообразных технологий, в общем виде они подразделяются на активные и пассивные методы [19-21].

Активные методы очистки – химические (нейтрализация), электрохимические, мембранные, ионный обмен, сорбция, окисление, эвтектическая кристаллизация замораживанием [22-24]. Для работы систем активной очистки требуется различное оборудование (резервуары, миксеры, насосы и аэраторы), регулярное, техническое обслуживание, непрерывное дозирование химикатов, электропитание. К основным преимуществам их применения относятся: эффективное удаление загрязнений из шахтных дренажей, точное управление процессом, позволяющее спроектировать и эксплуатировать их для получения воды определенного химического состава, а также

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 388-401
© Л.С.Рыбникова, П.А.Рыбников, В.Ю.Наволокина, 2024

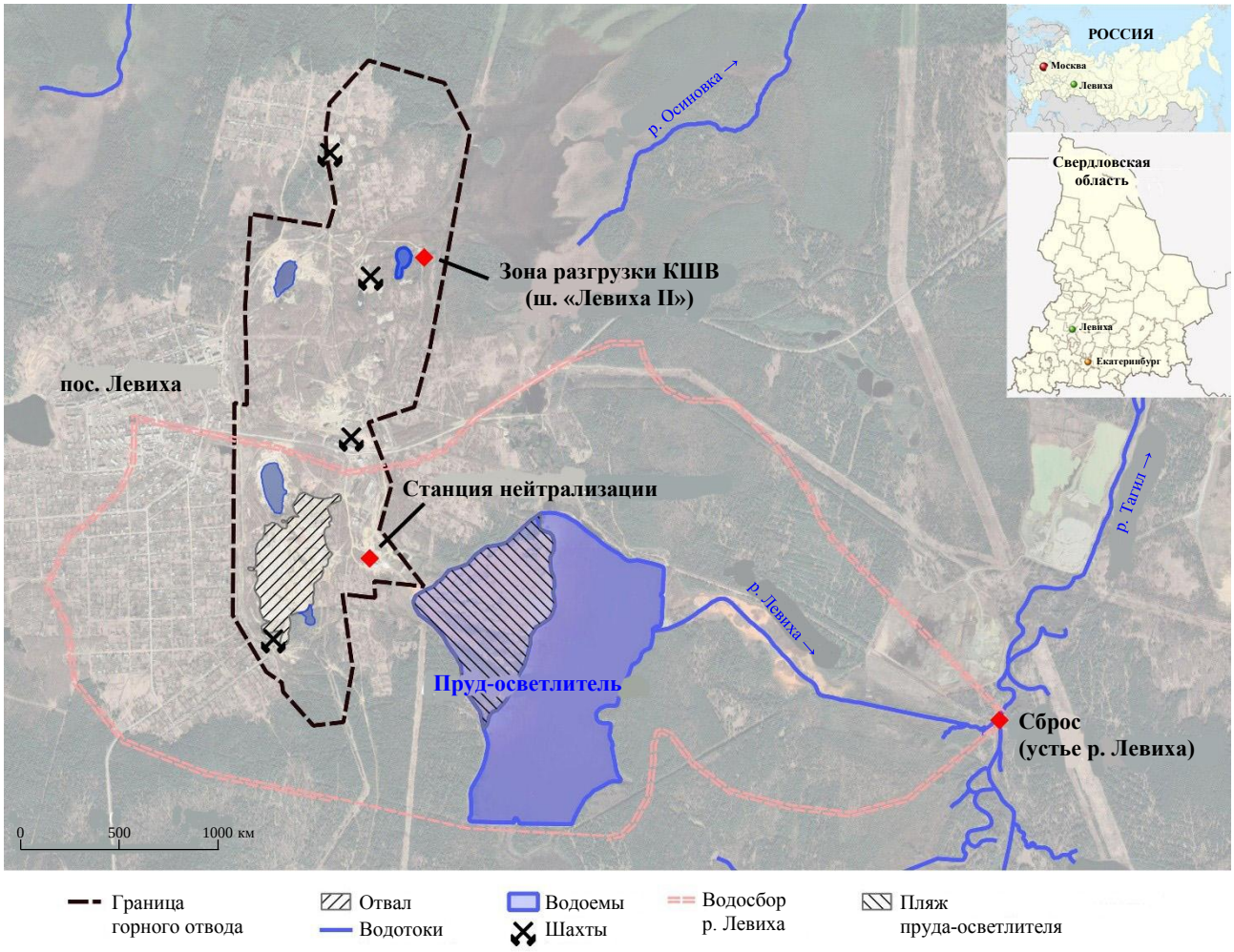


Рис.2. Обзорная карта-схема расположения объектов на Левихинском руднике

возможность использования в местах с ограниченной площадью. Основные ограничения – высокие капитальные и текущие затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание. Активная очистка больше подходит для действующих рудников, которые обычно имеют участок недр для добычи, а также производственные мощности и персонал для управления системой очистки.

С целью повышения pH шахтных вод, уменьшения растворимости загрязняющих веществ, контроля над составом сточных вод и снижения вреда, наносимого окружающей среде кислыми водами, в качестве реагентов используют такие вещества, как известняк $CaCO_3$, гашеная известь $Ca(OH)_2$, негашеная известь, или оксид кальция CaO, жидкая и твердая каустическая сода $NaOH$, кальцинированная сода Na_2CO_3, аммиак NH_3 [25]. Определенный химикат подходит для конкретного состояния и условий. Выбор конкретного реагента зависит как от технических (уровень pH, расход, концентрация металлов), так и экономических факторов (цена на реагент, рабочая сила, оборудование, продолжительность очистки) [26-28].

Пассивные системы очистки основываются на естественных физических, геохимических и биологических процессах. Укрупненно к ним можно отнести: известняковые стоки или каналы, водно-болотные угодья, системы снижения и повышения щелочности, пруды-осветлители, системы пассивного окисления (каскады) [17, 29].

В отличие от активных методов, которые требуют непрерывного поступления реагентов для нейтрализации кислотности шахтных вод в течение всего периода работы, пассивные системы обычно конструируются с таким сроком службы (25 лет) нейтрализующего материала, что никаких дополнительных затрат в этот период не требуется [30]. Большинство пассивных систем основаны на растворении нейтрализующего материала (обычно известняка) для повышения pH. С целью эффективного взаимодействия загрязняющих веществ с реагентами необходимо достаточное

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

время пребывания в системах, поэтому для реализации пассивных систем обычно необходимы большие площади земли [31-33]. Сочетание активных и пассивных методов приводит к существенному повышению степени очистки. Наиболее экономически выгодной и высокоэффективной является комбинация методов, например использование реагентов для снижения кислотности и отстаивание шахтных вод в прудах-осветлителях перед сбросом в водные объекты.

Целью настоящей работы является оценка эффективности очистки КШВ на объектах Среднего Урала и выявление основных параметров, которые позволяют достичь более высоких показателей качества воды на сбросе в водные объекты. Для этого были решены следующие задачи: обработан массив данных гидрохимического мониторинга на Дегтярском и Левихинском рудниках как наиболее показательных объектах; оценена эффективность системы очистки КШВ; установлены основные факторы, от которых зависит снижение показателей загрязнения, и предложены мероприятия по организации очистки на Левихинском руднике.

Методы исследования. Для анализа химического состава воды в районе Дегтярского и Левихинского медноколчеданных рудников использованы данные мониторинга, который проводился УралМонацитом в г. Дегтярск и пос. Левиха. На этих объектах ежемесячно (начиная с момента выхода КШВ на поверхность) в зоне разгрузки и при сбросе сточных вод в поверхностные водоемы определяются наиболее характерные для КШВ показатели загрязнения: водородный показатель, медь, цинк, железо общее, взвешенные вещества, общая минерализация (сухой остаток), хлориды, сульфаты, марганец, нефтепродукты и мышьяк.

Институтом горного дела УрО РАН выполнено опробование на расширенный перечень компонентов. Анализы проводились в Институте промышленной экологии УрО РАН (Екатеринбург) с использованием методов пламенно-эмиссионной спектрометрии (определение Na, K), пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии (Ca, Mg), атомно-адсорбционной спектрометрии (Fe), масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме (Al, Be, Cd, Co, Mn, Cu, As, Ni, Pb, Se, Zn), определения азотсодержащих веществ (NO_2), потенциометрического с ионоселективным электродом (NO_3), гравиметрического (SO_4) и аргентометрического (Cl), фотометрического в виде желтой кремнемолибденовой гетерополикислоты (Si), определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. В каждой пробе установлено порядка 16 компонентов. На месте измеряли *t* (°C), Eh (мВ), pH, TDS (мг/л), EC (мСм/см).

Для наглядного представления результатов химического состава воды и отображения множества показателей наиболее часто используются классификации на основе диаграмм Пайпера и Дурова. В основе таких графиков лежит одинаковый принцип построения – изображение пробы двумя точками на двух треугольниках Ферре. В диаграммах используются три главных катиона Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} (в нашем случае содержание Na^{+} незначительно, поэтому учитываются $Fe+Al^{3+}$) и три главных аниона HCO^{3-}, SO_4^{2-}, Cl^{-}. На треугольниках отображается доминирующее количество катионов и анионов, а в поле – классификация пробы. Основное отличие диаграммы Дурова в том, что она включает водородный показатель и минерализацию. Руководствуясь соображениями унификации, визуализации и обнаружения трендов изменения химического состава и показателей воды, для построения графиков в работе выбрана классификация на основе диаграммы Дурова.

Эффективность работы системы оценивалась по формуле:

$$Э = \frac{C_{вх} - C_{вых}}{C_{вх}} \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

где $C_{вх}$, $C_{вых}$ – концентрации загрязняющих веществ в зоне разгрузки КШВ и в сточной воде в устье рек Ельчевка и Левиха соответственно, мг/л.

Для расчета необходимого объема щелочного реагента, который будет нейтрализовать ионы водорода как присутствующие в растворе (pH раствора), так и образующиеся при окислении растворимых металлов и их осаждении, используется формула кислотности воды[1] [34]:

$$\text{Кислотность} = 50\left(\frac{2Fe^{2+}}{56} + \frac{3Fe^{3+}}{56} + \frac{2Mn^{2+}}{55} + \frac{3Al^{3+}}{27} + \frac{2Cu^{2+}}{64} + \frac{2Zn^{2+}}{65} + 1000\left(10^{-pH}\right)\right), \qquad (2)$$

[1] *Hedin R.S., Nairn R.W., Kleinmann R.L.P.* Passive Treatment of Coal Mine Drainage. Washington: United States Department of the Interior, 1994. 52 p.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 388-401
© Л.С.Рыбникова, П.А.Рыбников, В.Ю.Наволокина, 2024

где рассчитанная кислотность выражается в мг/л $CaCO_3$; Fe^{2+}, Fe^{3+}, Al^{3+}, Mn^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+} – концентрации металлов в растворе, мг/л; 50 – коэффициент для перевода мг-экв кислотности в мг/л $CaCO_3$; содержание Fe^{2+} и Fe^{3+} рассчитывалось с использованием компьютерной программы PHREEQC[2].

Для оценки степени воздействия группы компонентов-загрязнителей используется суммарный показатель загрязнения[3]:

$$Z_c = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{C_{\text{ПДК}}} - (n-1), \quad (3)$$

где C_i – фактическое содержание определяемого вещества в воде, мг/л; $C_{\text{ПДК}}$ – ПДК загрязняющих веществ рыбохозяйственного назначения; n – число определяемых суммируемых веществ.

Для оценки площади каскада прудов, необходимой для пассивной очистки и отстаивания воды после нейтрализации, используется зависимость [22]

$$F = \frac{Q_d \left(C_i - C_t\right)}{R_a}, \quad (4)$$

где F – требуемая площадь пруда, м^2; Q_d – среднесуточный расход воды, м^3/сут; C_t – концентрации загрязняющих веществ при окончательном сбросе, мг/л; R_a – скорость удаления загрязняющих веществ, г/м^2/сут.

Обсуждение результатов. Для оценки эффективности очистки шахтных вод взяты сопоставительные даты – 10 лет после остановки водоотлива – 2003-2004 гг. на Дегтярском, 2015-2016 гг. и Левихинском рудниках. Шахтные воды на Дегтярском руднике в зоне разгрузки (здесь в провале карьера шахты «Колчеданная» сформировался техногенный водоем) характеризуются как кислые (pH = 2,3-3,3), Eh = 263 мВ, по анионному составу сульфатные, по катионному алюминиево-железо-кальциево-магниевые (порядок катионов не постоянен), минерализация M варьируется от 1,4 до 16 г/л (табл.1, 2, рис.3). На Левихинском руднике в зоне разгрузки (в техногенном водоеме в провале шахты «Левиха II») воды менее кислые (pH = 3,6-3,9), Eh = 188 мВ, по составу сульфатные кальциево-магниево-железо-алюминиевые (соотношение катионов может меняться), с минерализацией от 14,2 до 20,0 г/л.

Таблица 1

Результаты гидрохимического мониторинга

Показатели	ПДК		Зона разгрузки КШВ		Сброс		Эффективность очистки, %	
	рх*	пит**	Дегтярский рудник	Левихинский рудник	Устье р. Ельчевка	Устье р. Левиха	Дегтярский рудник	Левихинский рудник
pH	6,5-8,5	6,0-9,0	2,3-3,3*** / 2,6	3,6-3,9 / 3,8	7,2-7,5 / 7,4	6,6-7,6 / 7,2	–	–
$Fe_{общ}$, мг/л	0,1	0,3	477-2562 / 899	994-2353 / 1455	0,1-0,03 / 0,1	35-245 / 95	99	93
Cu, мг/л	0,001	1,0	4,6-12 / 11	16-29 / 19	0,01-0,01 / 0,01	0,9-1,3 / 1,0	99	93

* Для водоемов рыбохозяйственного значения (Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения», с изменениями на 22 августа 2023 года).

** Для централизованных систем питьевого водоснабжения (СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», с изменениями на 30 декабря 2022 года).

*** В числителе минимальное и максимальное значения, в знаменателе медианное значение.

[2] *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 6–A43. Denver: United States Geological Survey: 2013, 2013. 497 p.

[3] МУ 2.1.7.730-99. Методические указания «Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ от 07.02.1999).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Окончание табл.1

Показатели	ПДК		Зона разгрузки КШВ		Сброс		Эффективность очистки, %	
	рх	пит	Дегтярский рудник	Левихинский рудник	Устье р. Ельчевка	Устье р. Левиха	Дегтярский рудник	Левихинский рудник
Zn, мг/л	0,01	5,0	54-151 / 121	234-397 / 280	0,03-0,2 / 0,1	54-123 / 107	99	62
Mn, мг/л	0,01	0,1	8-56 / 39	44-137 / 82	0,1-0,2 / 0,2	1,6-73 / 34	99	52
Cd, мкг/л	5	1	40-100 / 100	н.о.	0,8-5 / 0,8	н.о.	99	–
Cl, мг/л	300	350	34-52 / 42	32-53 / 33	23-32 / 28	10-28 / 20	–	–
SO_4, мг/л	100	500	2685-8791 / 7110	3710-10450 / 7493	583-826 / 704	274-5460 / 2133	90	71
Сухой остаток, мг/л	–	1000	4356-15990 / 11188	14183-19942 / 1654	930-1284 / 628	458-9296 / 4557	–	–
Zc			36 057	64 821	44	15 967		

Таблица 2

Формула Курлова

Рудник	Разгрузка КШВ	Сброс (устье рек Ельчевка и Левиха)
Дегтярский	$M_{9,7}\frac{SO_4 99}{Fe36Mg35Ca16Al13}pH2,6$	$M_{1,3}\frac{SO_4 95}{Ca65Mg30}pH7,5$
Левихинский	$M_{11,5}\frac{SO_4 99}{Al32Fe28Mg23Ca16}pH3,8$	$M_{3,5}\frac{SO_4 98}{Ca62Mg34}pH7,3$

Как видно из рис. 3, по катионному и анионному составам большинство точек образуют компактные поля, что свидетельствует о схожести химического состава воды на двух объектах. По катионному составу в зоне разгрузки КШВ на Дегтярском руднике большинство проб имеют не постоянное содержание элементов, в отличие от Левихинского. В анионном составе на объектах как в зоне разгрузки, так и после сброса заметно преобладает сульфат. Важно отметить, что на

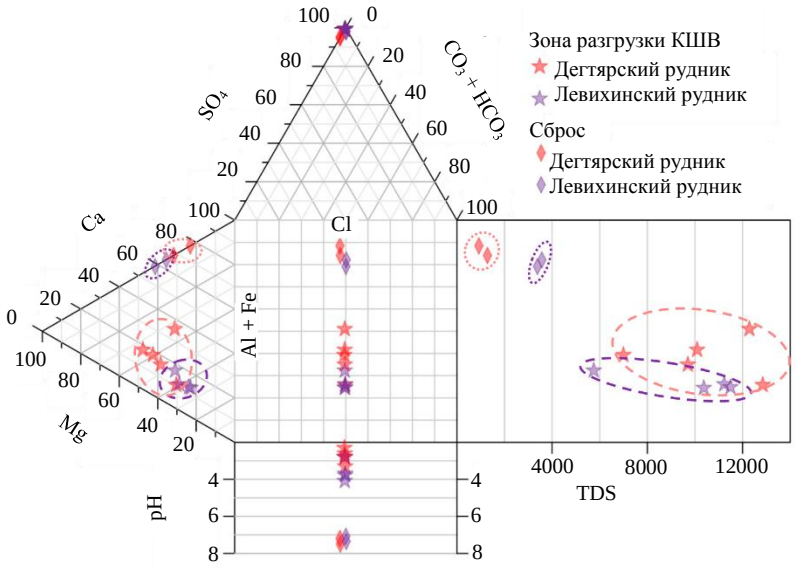


Рис.3. Диаграмма Дурова – график химического состава воды в зоне разгрузки КШВ и после очистки, %-экв/л

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 388-401
© Л.С.Рыбникова, П.А.Рыбников, В.Ю.Наволокина, 2024

сбросе очищенных КШВ на двух объектах повышается pH и снижается минерализация. Следовательно, по этим двум параметрам можно сделать вывод об эффективности осуществляемых мероприятий по сбору нейтрализации КШВ.

Тем не менее содержание металлов в шахтных водах превышает ПДК на несколько порядков. Самые существенные (в тысячи раз) отмечаются по меди, железу, цинку, алюминию, марганцу на Левихинском руднике. На Дегтярском по этим же элементам превышения меньше (табл.3). В целом минерализация и содержание основных загрязняющих компонентов на Левихинском в 1,5-3 раза выше, чем в шахтных водах Дегтярского рудника. Для снижения экологической нагрузки на гидросферу и предотвращения поступлений неочищенных кислых вод в водотоки на затопленных рудниках действует двухступенчатая система очистки КШВ, которая включает нейтрализацию шахтных вод известковым молоком и отстаивание в пруде-осветлителе.

Таблица 3

Превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения

Рудник	Разгрузка КШВ	Сброс (устье рек Ельчевка и Левиха)
Дегтярский	Cu (3600) Fe (2790) Mn (1600) Zn (1960) Al (1275) Co (53) Ni (25) Cd (8) Be (8)	Mn (20) Cu (10) Zn (10)
Левихинский	Cu (16300) Fe (12900) Zn (12700) Al (12350) Mn (5830) Co (110) Ni (50) Cd (50) Be (32)	Mn (1437) Zn (444) Cu (256) Al (110) Fe (10) Mg (5) Ca (5) Cd (3) Co (3)

Примечание. Химический состав воды представлен в виде обобщенной ассоциации, где справа от наименования элемента – кратность превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения.

Расчетная кислотность шахтных вод на Дегтярском руднике составляет 1003 мг/л эквивалента $CaCO_3$, на Левихинском руднике – 5413 мг/л (табл.4). Следовательно, и количество реагента, необходимое для нейтрализации шахтных вод, различается и по расчетным данным составляет 1581 и 5462 т/год соответственно (при значениях расхода разгрузки 50 и 32 л/с).

Таблица 4

Расчет кислотности шахтных вод и необходимого для нейтрализации количества извести

Рудник	pH, ед.	Fe^{2+}, мг/л	Fe^{3+}, мг/л	Al, мг/л	Mn, мг/л	Cu, мг/л	Zn, мг/л	Расчетная кислотность, мг/л $CaCO_3$	Необходимое количество реагента, т/год
Дегтярский	2,5	274,4	5,6	51	16	3,6	19,6	1003	1581
Левихинский	3,8	1254	36	494	58,3	16,3	127	5413	5462

После осветления в Ельчевском пруде-осветлителе в устье р. Ельчевка воды характеризуются как сульфатные магниево-кальциевые, pH составляет 7,2-7,5, что соответствует нейтральной среде, минерализация – 0,9-1,3 г/л. Концентрация кадмия снижается до 0,0008 мг/л, но остается почти на порядок выше ПДК для питьевых целей. Концентрации железа на сбросе обычно не превышают 0,1 мг/л, что значительно ниже ПДКрх (см. табл.1).

После осветления в Левихинском пруде-осветлителе в устье р. Левиха состав воды также сульфатный магниево-кальциевый. Водородный показатель изменяется 6,6-7,6, что свидетельствует о нейтральной среде. Минерализация – 0,5-9,3 г/л. Эффективность двухступенчатой системы очистки шахтных вод на Дегтярском руднике достигает 99 % для железа, меди, цинка, марганца и кадмия, 90 % для сульфат-иона (см. табл.1). Несмотря на достаточно высокую степень очистки, концентрации компонентов на сбросе из пруда-осветлителя имеют превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДКрх): марганца (20 раз), меди и цинка (10 раз), сульфат-иона (7 раз). По нормативным показателям для питьевого водоснабжения превышения обнаружены по марганцу (2 раза) и сульфат-иону (1,5 раза).

На Левихинском руднике применяется в целом такая же схема очистки, однако она оказывается гораздо менее эффективной: от 59 % для марганца до 93 % для железа и меди. В результате

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

в устье р. Левиха на сбросе в р. Тагил концентрации компонентов имеют значительные превышения ПДКрх: для цинка в 11 тыс. раз, марганца в 1,4 тыс. раз, цинка, меди, алюминия – в сотни раз.

Таким образом, несмотря на одинаковые схемы очистки КШВ на рассматриваемых объектах, концентрации загрязняющих веществ на сбросе в гидросеть имеют различные показатели. Это можно объяснить несколькими факторами. Во-первых, несмотря на более низкие значения pH, кислотность шахтных вод на Дегтярском руднике в 5 раз ниже (см. табл.4). Во-вторых, для отстаивания воды после нейтрализации используются пруды, построенные в 1950-х годах, которые работают без очистки десятки лет. При этом качество очищенной воды на Дегтярском руднике гораздо выше, чем на Левихинском. Это связано с тем, что площадь пруда на Дегтярском руднике в 1,5 раза больше, а его объем почти в 3 раза больше. Степень заполнения прудов шламом после нейтрализации также различается: 74 % на Ельчевском и 93 % на Левихинском прудах. В итоге свободный для отстаивания объем Ельчевского пруда оказывается в 10 раз больше. Очевидно, что оставшегося объема Левихинского пруда-осветлителя недостаточно для отстаивания воды после нейтрализации и взаимодействия загрязняющих веществ с реагентами. В-третьих, в этап пассивной очистки входит отстаивание воды после нейтрализации в водотоках, время движения от станции нейтрализации до сброса в 2,25 раз больше на Дегтярском руднике (табл.5, рис.4).

В итоге по суммарному показателю загрязнения степень очистки на Дегтярском руднике в 300 раз выше, чем на Левихинском (при том, что в зоне разгрузки КШВ этот показатель отличается всего в два раза).

Таблица 5

Параметры очистки КШВ

Рудник	Расход, л/с	Характеристики пруда-осветлителя				Участки пассивной очистки, км		Суммарный показатель загрязнения Zc	
		Площадь, га	Объем*, млн м^3	Степень заполнения, %	Свободный объем, млн м^3	Протяженность**, км	Время, сут	Разгрузка КШВ	Сброс
Дегтярский	50	220	9,34	74	2,43	6,3 (5,0 + 1,3)***	1,26	36057	44
Левихинский	32	142	3,30	93	0,23	2,8 (0,5 + 2,3)	0,56	64821	15967
Кратность параметров	1,56	1,55	2,83	0,80	10,57	2,25	2,25	0,56	0,003

***** Проектный. ** Общая. *** В скобках «нейтрализация – осветлитель» + «осветлитель – сброс».

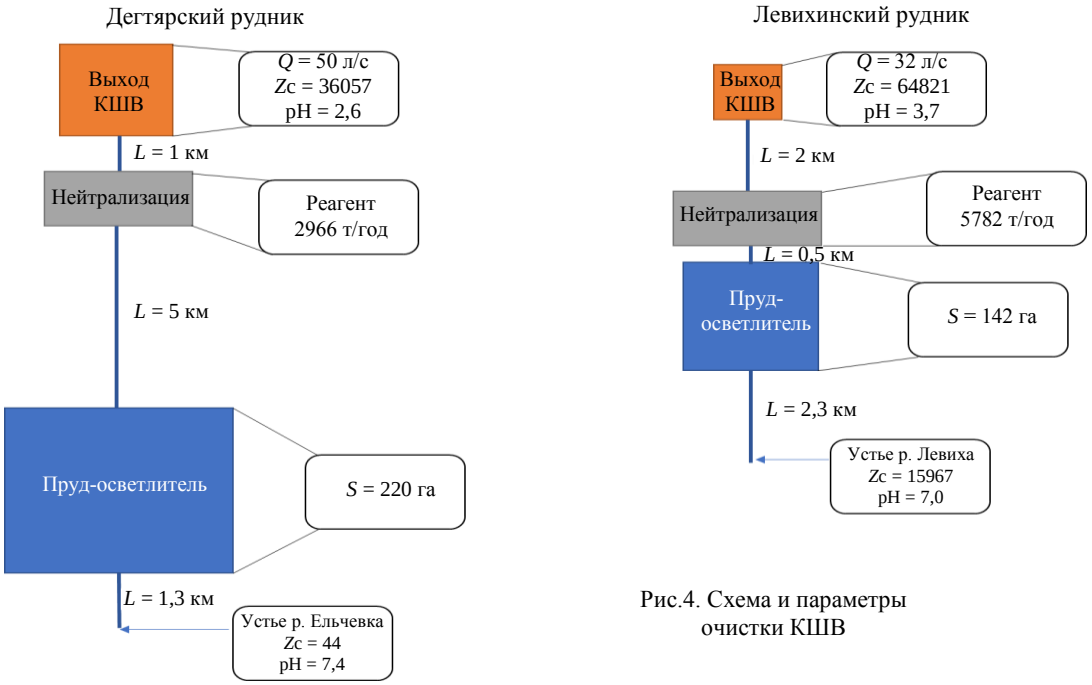


Рис.4. Схема и параметры очистки КШВ

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 388-401
© Л.С.Рыбникова, П.А.Рыбников, В.Ю.Наволокина, 2024

Предложения по организации очистки на Левихинском руднике. Для Дегтярского рудника действующая двухступенчатая система является достаточно эффективной. Для Левихинского рудника необходим переход на использование более современных систем, включающих три этапа очистки, например: 1 – очистные сооружения с аэраторами, 2 – радиальные отстойники, 3 – каскад прудов [10].

Первая ступень очистки – использование очистных сооружений с аэраторами (например, FUCHS OxyStar Aerators), которые в последние десятки лет успешно зарекомендовали себя на разных предприятиях. Один из примеров по идентичному составу воды (содержание Fe до 700 мг/л) с низким значением pH и расходом КШВ до 3600 м^3/ч является выход КШВ из угольной шахты в Германии[4]. Аэраторы применяются для подачи кислорода в воду. Помимо мелкопузырчатой глубокой аэрации они также обеспечивают циркуляцию и тщательное перемешивание шахтных вод с реагентом. В процессе работы аэраторы втягивают атмосферный воздух через полый вал и выпускают его в поток воды, создаваемый вращающимся воздушным винтом. Благодаря высокой турбулентности достигается мелкопузырьковая аэрация и отличная эффективность переноса кислорода. При использовании очистных сооружений с аэраторами (этап 1) будет происходить повышение pH шахтной воды. В результате увеличения скорости перемешивания и времени взаимодействия кислых вод с известковым молоком образуется осадок.

По результатам эксплуатации аэраторов FUCHS выявлено, что очистка имеет эффективность 99 % (содержание Mn от 600 мг/л на входе и до 3 мг/л на выходе). Однако нейтрализация КШВ за счет аэрации ограничена. Достичь высокой скорости химических реакций, увеличить эффективность очистки воды и сократить количество аэраторов можно с помощью отстойника радиального типа со встроенной камерой флокуляции (этап 2). Флокулянты при смешивании с очищенными шахтными водами приведут к нормализации pH воды и ее дополнительной очистке.

Тем не менее систему активной очистки целесообразно дополнить пассивной очисткой (этап 3). Ее можно реализовать в виде каскада прудов на участке русла р. Левиха.

С декабря 2020 г. в основной процесс очистки шахтных вод на Левихинском руднике был включен пруд-осветлитель артели старателей «Нейва» (отработанный карьер площадью 12,9 га), расположенный ниже основного пруда-осветлителя (рис.5).

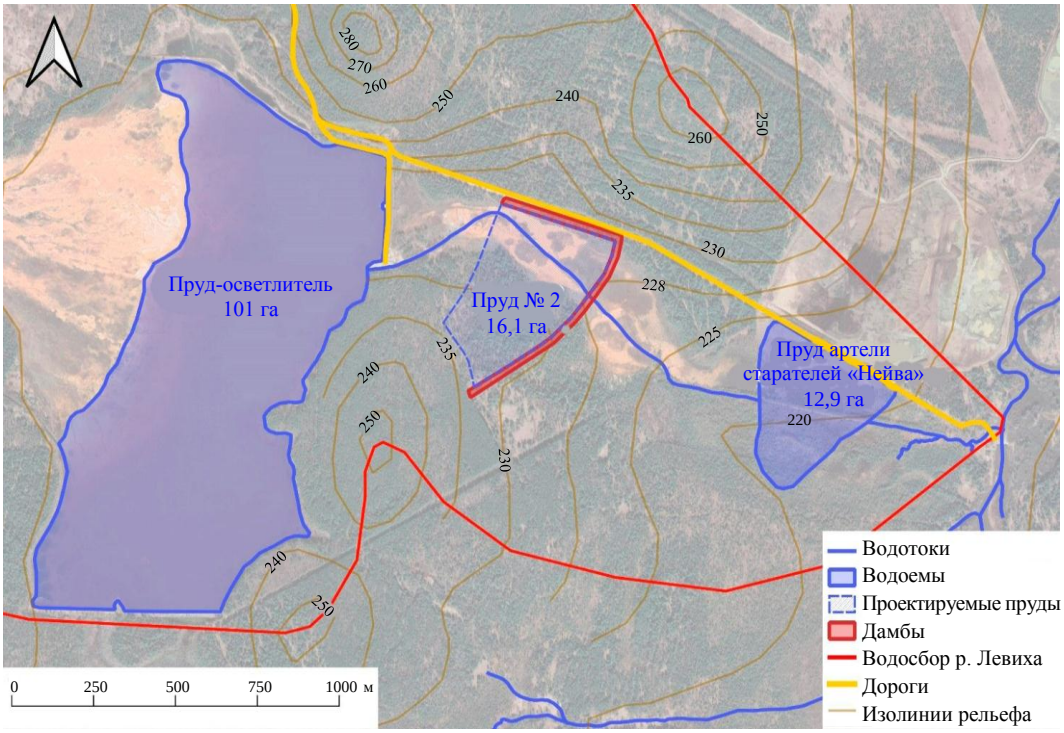


Рис.5. Карта-схема размещения каскада прудов-осветлителей в долине р. Левиха

[4] FUCHS Mine water treatment. Case studies. Mayen: FUCHS, 2021. 10 p.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В 2021 г. концентрации компонентов на сбросе в р. Тагил по сравнению с аналогичным периодом 2020 г. существенно снизились: меди до 0,04-0,5 мг/л (было 2,2-4,9 мг/л), железа до 0,6-17 мг/л (было 27-101 мг/л), цинка до 10-20 мг/л (было 35-96 мг/л), марганца до 12-16 мг/л (было 13-38 мг/л), сульфата до 1515-2115 мг/л (было 1420-2450 мг/л). Тем не менее при сбросе в воде р. Левиха остаются значительные превышения ПДКрх: цинка в 1000-2000 раз, марганца в 1230-1600 раз, меди в 50-500 раз, железа в 6-170 раз, сульфат-иона в 15-21 раз (табл.6).

Таблица 6

Эффективность очистки шахтных вод с использованием пруда «Нейва»

Месяц	Год	Объект/показатель	Компоненты, мг/л				
			Cu	Fe	Zn	Mn	SO_4
			ПДКрх				
			0,001	0,1	0,01	0,01	100
Март	2020	Кратность ПДК Устье р. Левиха	4900	1010	9600	3800	22
	2021		400	8	2000	1230	21
	2020	Эффективность очистки, %	67	90	40	32	53
	2021		98	99	91	78	67
Апрель	2020	Кратность ПДК Устье р. Левиха	2200	367	3940	1320	14
	2021		500	170	1900	1600	20
	2020	Эффективность очистки, %	90	96	82	74	–
	2021		97	99	88	71	66
Май	2020	Кратность ПДК Устье р. Левиха	4900	2700	6500	2600	25
	2021		50	6	1000	1300	15
	2020	Эффективность очистки, %	71	97	62	62	51
	2021		99	99	95	78	81

Использование второго пруда-осветлителя по сравнению с аналогичным периодом 2020 г. привело к повышению эффективности очистки для железа 99 % (было 90-97 %), меди 97-99 % (было 67-90 %), цинка 88-95 % (было 40-80 %), марганца 71-78 % (было 32-62 %) и сульфат-иона 66-81 % (было 51-53 %). Применение дополнительного пруда позволяет значительно снизить концентрации элементов.

В результате накопления больших объемов донных отложений и высокой степени заполнения существующего пруда-осветлителя на Левихинском руднике вопрос по утилизации шлама является актуальным. Основные направления использования шлама рассмотрены в работе [35]: это рекультивация отвалов пустых пород и некондиционных руд, складирование в отработанные карьеры, производство строительных материалов, извлечение ценных компонентов и складирование после обезвоживания шлама в геотубах (Geotube). К сожалению, каждый из вариантов имеет существенные ограничения. Вариант по использованию шлама в качестве рекультивации отвала не целесообразен в связи с возможностью выщелачивания из донных отложений элементов 2-4 классов опасности. Закладка отработанных карьеров невозможна из-за того, что запасы месторождения до сих пор числятся в государственном балансе. Для реализации варианта по производству строительных материалов необходима организация государственно-частного партнерства. Извлечение ценных компонентов не обеспечено пока рентабельной технологией. Кроме того, все равно нужно будет складировать шлам в геотубах после обезвоживания. Основное ограничение – это образование отходов после извлечения ценных компонентов, подготовка и гидроизоляция площадки, строительство установок по извлечению и необходимость значительного отчуждения земли.

Таким образом, ни один из рассмотренных вариантов по очистке шлама в полной мере не позволяет очистить пруд-осветлитель и без изменения существующей системы очистки добиться нормативных показателей на сбросе в р. Тагил невозможно.

Дальнейшего повышения степени очистки можно добиться с использованием каскада прудов и вывода из эксплуатации действующего пруда-осветлителя (рис.5, табл.7).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 388-401
© Л.С.Рыбникова, П.А.Рыбников, В.Ю.Наволокина, 2024

Таблица 7

Предполагаемая эффективность очистки, %

Степени очистки	Система очистки	Эффективность очистки
1	Очистные сооружения с аэраторами	90-99
2	Радиальный отстойник	80-95
3	Каскад прудов	76-100

Эксплуатации для пассивной очистки только существующего пруда-осветлителя артели старателей «Нейва» недостаточно из-за его небольшой площади (12.9 га). Для полноценной пассивной очистки площадь прудов, рассчитанная по формуле (4), составляет 18 га. Целесообразно использовать пруд старателей «Нейва» и еще дополнить одним прудом-осветлителем площадью 16,1 га, которые в совокупности будут обеспечивать осаждение металлов вследствие снижения скорости течения воды и увеличения времени взаимодействия загрязняющих веществ с реагентами.

Заключение. На отработанных и затопленных медноколчеданных рудниках происходит разгрузка КШВ на поверхность. Воды характеризуются низкими значениями pH (2,5 на Дегтярском и 3,3 на Левихинском рудниках), по составу воды сульфатные, алюминиево-железо-кальциево-магниевые с минерализацией до 12 г/л.

Очистка КШВ на рассматриваемых объектах осуществляется в два этапа: нейтрализация известковым молоком и отстаивание в прудах-осветлителях. Эффективность очистки шахтных вод на Дегтярском руднике достигает 99 % для основных загрязняющих веществ. На Левихинском руднике применяется в целом такая же схема очистки, однако она оказывается гораздо менее эффективной – от 59 % для марганца до 93 % для железа и меди.

Несмотря на одинаковую систему очистки, на Левихинском руднике качество воды, сбрасываемой в гидросеть, не достигает нормативных показателей, кратность превышения достигает сотни и тысячи для марганца, меди, цинка, алюминия.

Причинами низкой эффективности очистки на Левихинском руднике является комплекс природно-техногенных факторов:

• несмотря на более низкие значения pH, кислотность шахтных вод на Дегтярском руднике в пять раз ниже;

• для отстаивания воды после нейтрализации используются пруды, построенные в 1950-х годах. Они работают без очистки десятки лет. Площадь и объем Ельчевского пруда в 1,5-3 раза больше. Степень заполнения прудов шламом после нейтрализации составляет 74 % в Дегтярском и 93 % Левихинском рудниках. В итоге свободный для отстаивания объем Ельчевского пруда оказывается в 10 раз больше;

• время отстаивание воды после нейтрализации в водотоках на Дегтярском руднике больше в 2,25 раз.

В итоге по суммарному показателю загрязнения Z_c степень очистки на Дегтярском руднике в 300 раз выше, чем на Левихинском (при том, что в зоне разгрузки КШВ этот показатель отличается всего в два раза).

Для увеличения эффективности процесса очистки необходимо модернизировать существующую систему: во-первых, вывести из эксплуатации действующий пруд-осветлитель, во-вторых, использовать активные (аэраторы, радиальные отстойники) и пассивные (каскад прудов ниже сброса нейтрализованных сточных вод) системы очистки. Трехступенчатая очистка (включающая сооружения с аэраторами, радиальные отстойники и каскад прудов) позволит снизить загрязнение поверхностных вод до нормируемых показателей, значительно улучшить экологическую обстановку и уменьшить ущерб гидросфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев В.А.* Причины образования кислых дренажных вод в отвалах сульфидсодержащих пород // Геохимия. 2022. Т. 67. № 1. С. 69-83. DOI: 10.31857/S0016752522010022

2. *Рыбникова Л.С., Рыбников П.А.* Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Левихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // Геохимия. 2019. Т. 64. № 3. С. 282-299. DOI: 10.31857/S0016-7525643282-299

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

3. *Mugova E., Molaba L., Wolkersdorfer C.* Understanding the Mechanisms and Implications of the First Flush in Mine Pools: Insights from Field Studies in Europe's Deepest Metal Mine and Analogue Modelling // Mine Water and the Environment. 2024. Vol. 43. Iss. 1. P. 73-86. DOI: 10.1007/s10230-024-00969-3

4. *Пшеничный И.А.* Модели и методы геохимической оценки риска взаимодействия породных отвалов с факторами внешней среды // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28. № 3. С. 21-27. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-3-21-27

5. *Пашкевич М.А., Алексеенко А.В., Нуреев Р.Р.* Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 155-167. DOI: 10.31897/PMI.2023.32

6. *Kharko P.A., Matveeva V.A.* Bottom Sediments in a River under Acid and Alkaline Wastewater Discharge // Ecological Engineering & Environmental Technology. 2021. Vol. 22. Iss. 3. P. 35-41. DOI: 10.12912/27197050/134870

7. *Карагодин С.С., Карагодин В.С., Морозов Ю.П., Заузолков И.В.* К вопросу о перспективах (второй жизни) заброшенных медноколчеданных рудников Урала // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. Вып. 4 (52). С. 114-121 (in English). DOI: 10.21440/2307-2091-2018-4-114-121

8. *Muravyov M., Radchenko D., Tsupkina M. et al.* Old Sulfidic Ore Tailing Dump: Ground Features, Mineralogy, Biodiversity – A Case Study from Sibay, Russia // Minerals. 2024. Vol. 14. Iss. 1. № 23. DOI: 10.3390/min14010023

9. *Sengupta M.* Environmental Impacts of Mining. Monitoring, Restoration, and Control. Boca Raton: CRC Press, 2021. 374 p. DOI: 10.1201/9781003164012

10. *Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю.* Снижение негативного влияния законсервированного медноколчеданного рудника Урала на состояние гидросферы // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 3. С. 194-201. DOI: 10.15372/FTPRPI20220318

11. *Барабанова Е.А.* Водохранилища водосбора арктических морей России // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 2. С. 123-131. DOI: 10.31857/S0321-0596462123-131

12. *Рыбникова Л.С., Рыбников П.А.* Оценка факторов формирования гидросферы природно-технических систем (на примере верховьев бассейна реки Тагил, Свердловская область) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5-2. С. 257-272. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_257

13. *Давыдов В.А.* Изучение техногенеза Дегтярского рудника с помощью аудиомагнитотеллурических экспресс-зондирований // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 379-387. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.379

14. *Гуман О.М., Макаров А.Б., Антонова И.А., Хасанова Г.Г.* Эколого-гидрохимические особенности современных техногенных водоемов (на примере Уральского региона) // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2018. № 1. С. 148-154. DOI: 10.17308/geology.2018.1/1469

15. *Макаров А.Б., Антонова И.А., Хасанова Г.Г.* Тяжелые металлы в компонентах техногенных водоемов Уральского региона // Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества. 2017. № 14. С. 81-86.

16. *Федорова О.И.* Геоэлектрический мониторинг Ельчевской грунтовой плотины методом частотной дисперсии электрического сопротивления // Уральский геофизический вестник. 2020. № 2 (40). С. 37-44. DOI: 10.25698/UGV.2020.2.4.37

17. *Федорова О.И., Давыдов В.А.* Диагностика грунтовых гидротехнических сооружений электрическими и сейсмическими методами на примере Ельчевской плотины // Водное хозяйство России. 2014. № 6. С. 44-55.

18. *Попов А.Н., Павлюк Т.Е., Мухутдинов В.Ф. и др.* Исследование состояния водоема для выбора приоритетных действий по экологической реабилитации (на примере Волчихинского водохранилища) // Водное хозяйство России. 2019. № 4. С. 170-195. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-4-8

19. *Kruse Daniels N., LaBar J.A., McDonald L.M.* Acid Mine Drainage in Appalachia: Sources, Legacy, and Treatment / Appalachia's Coal-Mined Landscapes. Cham: Springer, 2021. P. 193-216. DOI: 10.1007/978-3-030-57780-3_8

20. *Acharya B.S., Kharel G.* Acid mine drainage from coal mining in the United States – An overview // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 588. № 125061. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125061

21. *Максимович Н.Г., Пьянков С.В.* Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь: Раритет-Пермь, 2018. 288 с.

22. *Wolkersdorfer C.* Mine Water Treatment – Active and Passive Methods. Springer, 2022. 328 p. DOI: 10.1007/978-3-662-65770-6

23. *Yongwei Song, Zehao Guo, Rui Wang et al.* A novel approach for treating acid mine drainage by forming schwertmannite driven by a combination of biooxidation and electroreduction before lime neutralization // Water Research. 2022. Vol. 221. № 118748. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118748

24. *Yanan Jiao, Chunhui Zhang, Peidong Su et al.* A review of acid mine drainage: Formation mechanism, treatment technology, typical engineering cases and resource utilization // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 170. P. 1240-1260. DOI: 10.1016/j.psep.2022.12.083

25. *Zendelska A., Trajanova A., Golomeova M. et al.* Comparison of Efficiencies of Neutralizing Agents for Heavy Metal Removal from Acid Mine Drainage // Journal of Mining and Environment. 2022. Vol. 13. № 3. P. 679-691. DOI: 10.22044/jme.2022.12090.2205

26. *Saha S., Sinha A.* Review on Treatment of Acid Mine Drainage with Waste Materials: A Novel Approach // Global NEST Journal. 2018. Vol. 20. № 3. P. 512-528. DOI: 10.30955/gnj.002610

27. *Skousen J.G., Ziemkiewicz P.F., McDonald L.M.* Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies // The Extractive Industries and Society. 2019. Vol. 6. Iss. 1. P. 241-249. DOI: 10.1016/j.exis.2018.09.008

28. *Skousen J.* Chapter 29 – Overview of Acid Mine Drainage Treatment with Chemicals / Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils: Causes, Assessment, Prediction, Prevention, and Remediation. Wiley, 2014. P. 325-337. DOI: 10.1002/9781118749197.ch29

29. *Kleinmann B., Skousen J., Wildeman T. et al.* The Early Development of Passive Treatment Systems for Mining-Influenced Water: A North American Perspective // Mine Water and the Environment. 2021. Vol. 40. Iss. 4. P. 818-830. DOI: 10.1007/s10230-021-00817-8

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. *2024. Т. 267. С. 388-401*
© Л.С.Рыбникова, П.А.Рыбников, В.Ю.Наволокина, 2024

30. *Kleinmann R., Sobolewski A., Skousen J.* The Evolving Nature of Semi-passive Mine Water Treatment // Mine Water and the Environment. 2023. Vol. 42. Iss. 1. P. 170-177. DOI: 10.1007/s10230-023-00922-w

31. *Skousen J., Zipper C.E., Rose A. et al.* Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment // Mine Water and the Environment. 2017. Vol. 36. Iss. 1. P. 133-153. DOI: 10.1007/s10230-016-0417-1

32. *Turingan C.O.A., Cordero K.S., Santos A.L. et al.* Acid Mine Drainage Treatment Using a Process Train with Laterite Mine Waste, Concrete Waste, and Limestone as Treatment Media // Water. 2022. Vol. 14. Iss. 7. № 1070. DOI: 10.3390/w14071070

33. *Rambabu K., Banat F., Pham Q.M. et al.* Biological remediation of acid mine drainage: Review of past trends and current outlook // Environmental Science and Ecotechnology. 2020. Vol. 2. № 100024. DOI: 10.1016/j.ese.2020.100024

34. *Фетисова Н.Ф.* Кислотность и щелочность шахтных вод как ключевые показатели для планирования систем очистки // Горное эхо. 2022. № 2. С. 32-38. DOI: 10.7242/echo.2022.2.5

35. *Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю.* Реабилитация техногенных объектов отработанных медноколчеданных месторождений на примере Левихинского рудника (Средний Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 8. С. 137-150. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4089

Авторы: **Л.С.Рыбникова,** *д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-4221-7879* (*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), **П.А.Рыбников,** *канд. геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией, https://orcid.org/0000-0002-7829-5035* (*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), **В.Ю.Наволокина,** *научный сотрудник, vunavolokina@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1547-9451* (*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0