

СНИЖЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ОТ КИСЛЫХ ДРЕНАЖНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОНИЦАЕМЫХ РЕАКЦИОННЫХ БАРЬЕРОВ¹

REDUCING THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF ACID MINE DRAINAGE USING PERMEABLE REACTIVE BARRIERS

**N. Rastanina
I. Galanina
A. Perfiliev**

Summary. The paper examines state-of-the-art methods for the treatment of acid mine drainage (AMD) from mining operations, with a particular focus on permeable reactive barriers (PRBs) as a cost-effective and environmentally sustainable alternative to conventional technologies. The advantages of PRBs over traditional methods are analyzed, including their economic feasibility and the potential for utilizing industrial waste as sorbent materials. The study confirms that reactive barriers made from readily available and recycled materials not only provide an effective solution for wastewater treatment but also support the reutilization of industrial waste — thus aligning with the principles of sustainable development and the circular economy.

Keywords: acid mine drainage, reactive barriers, heavy metals, sorption, mining industry, environmental safety.

Растанина Наталья Константиновна

Кандидат биологических наук, доцент, Тихоокеанский
государственный университет, г. Хабаровск
n.rastanina@yandex.ru

Галанина Ирина Александровна

старший преподаватель, Тихоокеанский
государственный университет, г. Хабаровск
000911@togudv.ru

Перфильев Александр Владимирович

Кандидат химических наук, старший научный
сотрудник, ФГБУН Институт химии, Дальневосточное
отделение, Российская академия наук, г. Владивосток
a.v.perfilev@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы очистки кислых дренажных вод горнодобывающих предприятий, особое внимание уделяется применению проницаемых реакционных барьеров как экономически эффективной и экологически безопасной альтернативе традиционным технологиям. Рассмотрены преимущества технологии проницаемых реакционных барьеров по сравнению с традиционными методами, включая экономическую эффективность и возможность использования промышленных отходов в качестве сорбционных материалов. Исследование подтверждает, что применение реакционных барьеров на основе доступных и вторичных материалов способствует не только решению проблемы очистки сточных вод, но и утилизации промышленных отходов, что соответствует принципам устойчивого развития и циркулярной экономики.

Ключевые слова: кислые дренажные воды, реакционные барьеры, тяжелые металлы, сорбция, горнодобывающая промышленность, экологическая безопасность.

Минимизация негативного воздействия промышленных стоков на природные экосистемы при одновременной организации их ресурсоэффективной переработки является важнейшим условием обеспечения экологической безопасности и рационального использования сырьевых ресурсов. Состояние водной среды выступает критически важным фактором при разработке управленческих решений и внедрении принципов устойчивого природопользования.

Современные системы очистки сточных вод и изоляции токсичных отходов (как твердых, так и жидких) обычно сопряжены с высокими капитальными вложе-

ниями, а также значительными энергетическими и материальными затратами в процессе эксплуатации. В связи с этим актуальной становится задача снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду с применением экономически эффективных методов. В современных природоохранных практиках наблюдается устойчивая тенденция к применению реакционных барьеров, способных в определенных условиях заменить капиталоемкие очистные комплексы и иные затратные экологические технологии. На основе концепции реакционных барьеров можно определить стратегический подход к минимизации загрязнения окружающей среды. Наиболее оптимальными являются методы, направленные

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 24–27–20085 <https://rscf.ru/project/24-27-20085/> и Министерства образования и науки Хабаровского края (Соглашение № 121С/2024).

на ускорение естественного преобразования загрязняющих веществ в безопасные формы или их локализацию в строго ограниченных зонах литосферы — то есть создание искусственных геохимических барьеров.

Применение реакционных барьеров обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными технологиями. В частности, такой подход более экологичен, поскольку моделирует естественные геохимические процессы. Материалами для барьеров могут служить как природные компоненты (почвы, горные породы), так и производственные отходы, что снижает затраты на природоохранные мероприятия.

Особый интерес представляет использование промышленных отходов для создания барьеров. Это не только экономически выгодно, но и способствует решению еще одной экологической проблемы — утилизации отходов.

Горнодобывающая промышленность генерирует значительные объемы отходов в форме пустой породы, хвостов и шлака (рис. 1).

Пустая порода — это нерентабельная порода, которую необходимо добывать и извлекать для доступа к минерализованному рудному телу (или месторождению). Чаще всего она образуется в больших объемах при открытых работах, и в меньших количествах при проведении работ для доступа к минерализованным зонам в подземных шахтах.

Хвосты представляют собой частицы измельченной породы, из которых на концентрате была извлечена коммерческая ценность. Они характеризуются относительно однородным распределением размеров частиц и считаются однородными материалами [2].

Методы управления для каждой категории отходов различаются. Пустые породы обычно складываются на поверхности в виде отвалов, если они не используются повторно для заделки шахт. Хвосты обычно складываются в виде пульпы с начальным содержанием твердых компонентов от 25 % до 45 %, которые оседают со временем. Хвосты транспортируются из концентратора в специальную зону, называемую хвостохранилищем, где они складываются. Эта зона частично или полностью окружена дамбами, которые удерживают как твердую фазу, так и жидкие стоки [3].

Горнодобывающие предприятия генерируют сточные воды на всех стадиях технологического цикла — от добычи до переработки минерального сырья. В зависимости от источника формирования и характера образования, данные техногенные воды классифицируются на четыре основные группы [4] (табл. 1).

Влияние кислых дренажных вод на экосистемы классифицируется по четырем направлениям [5]:

- химическое — ацидификация и металлизация сред;
- физическое — изменение оптических характеристик;
- биологическое — токсикологическое воздействие на организмы;
- экологическое — структурные изменения биоценозов.

Кислые дренажные воды образуются в горнодобывающих районах и вокруг них. Обычно это заброшенные и действующие шахты, при добыче открытым способом или при подземных работах [6]. Вторичные источники кислых дренажных вод включают отвалы шахт, склады руды, отвалы пустой породы, дамбы хвостохранилищ, технологические дороги, карьеры, рудничные озера



Рис. 1. Операционный цикл горных работ и типология отходов горнодобывающей промышленности [адаптировано из 1]

Таблица 1.
Классификация техногенных вод горных предприятий

Группа	Подгруппа / Категория	Характеристика
1. Технологические сточные воды обогатительного передела	а) сточные воды основных процессов обогащения	Технологические хвосты (твердые и жидкие отходы процесса обогащения)
	б) сточные воды вспомогательных процессов обогащения	Сливы и фильтрат от сгущения и обезвоживания концентратов
	в) стоки мокрой газоочистки	Воды после очистки дымовых газов
	г) смывные стоки	Стоки от мытья полов, стен, охлаждения оборудования, гидрообеспыливания и др.
	— инфильтрационные стоки хвостохранилищ	Просачивающиеся воды из хвостохранилищ
2. Растворы технологических процессов	—	Жидкие отходы, образующиеся в ходе химических или гидрометаллургических процессов
3. Воды от атмосферных осадков	а) дождевые (ливневые) с промплощадок	Стоки, формируемые атмосферными осадками на промышленных территориях
	б) талые с промплощадок	Воды от таяния снега на промплощадках
	в) подотвальные воды	Воды, дренируемые из отвалов (пустой породы, забалансовых руд, отходов обогащения и металлургии, площадок складирования сырья)
4. Попутно-извлекаемые воды	а) карьерный водоотлив	Воды, откачиваемые из карьеров
	б) шахтный водоотлив	Воды, откачиваемые из шахт
	в) дренажные воды	Воды, собираемые дренажными системами

и шлакоотстойники [5]. Кислые дренажные воды из этих вторичных источников могут быть еще более агрессивными, вследствие таких факторов как размер частиц, площадь поверхности, аморфность и дезагрегация. Общее влияние кислых дренажных вод, однако, зависит от геоморфологии, климата и организации сети и расположения источника [7].

Очевидно, что кислые дренажные воды изменяют физико-химические характеристики водных объектов,

а также донных отложений, в частности pH, химический состав и цвет (рис. 2), так как любой сульфидсодержащий минерал может рассматриваться как потенциальный источник кислых дренажных вод.

Современные исследования в области горнодобывающей промышленности сосредоточены на изучении процессов окисления сульфидсодержащих отходов и механизмов миграции металлов в водных системах. Особое внимание уделяется анализу формирования антропогенных геохимических аномалий и трансформации форм нахождения металлов при взаимодействии с техногенно-измененными геологическими средами.

Практика обращения с металлосодержащими сточными водами на горнодобывающих предприятиях требует совершенствования, поскольку существующие технологии преимущественно предусматривают их перевод в сложные осадочные соединения с последующим захоронением. Актуальной задачей является разработка комплексных решений, сочетающих очистку сточных вод с извлечением ценных компонентов. Для этого необходимы четкие критерии оценки как экологических рисков, так и технологической целесообразности переработки конкретных водных потоков.

Эффективность очистных технологий напрямую зависит от понимания форм нахождения металлов в растворах. Современные методы обработки вод, основанные на традиционных подходах к фазовому разделению, требуют модернизации с учетом необходимости получения товарных металлосодержащих продуктов. При этом разработка принципиально новых методов очистки сталкивается со значительными технологическими сложностями, что делает более перспективным адаптацию существующих технологий к специфике конкретных производственных стоков.

Ключевым направлением развития отрасли является создание ресурсосберегающих технологий, позволяющих минимизировать экологическое воздействие при максимально полном извлечении полезных компонентов. Решение этой задачи требует комплексного подхода, учитывающего как экологические, так и экономические аспекты переработки промышленных сточных вод.

Среди инновационных решений по очистке кислых дренажных вод проницаемые реакционные барьеры привлекают значительное внимание. Их применение представляет собой многообещающее решение для смягчения последствий воздействия кислых дренажных вод, позволяя проводить пассивную очистку загрязненных территорий [8]. Такое пассивное восстановление является экономически приемлемым, поскольку требует меньше затрат на обслуживание, чем активные методы, а также эффективно с точки зрения удаления загрязне-

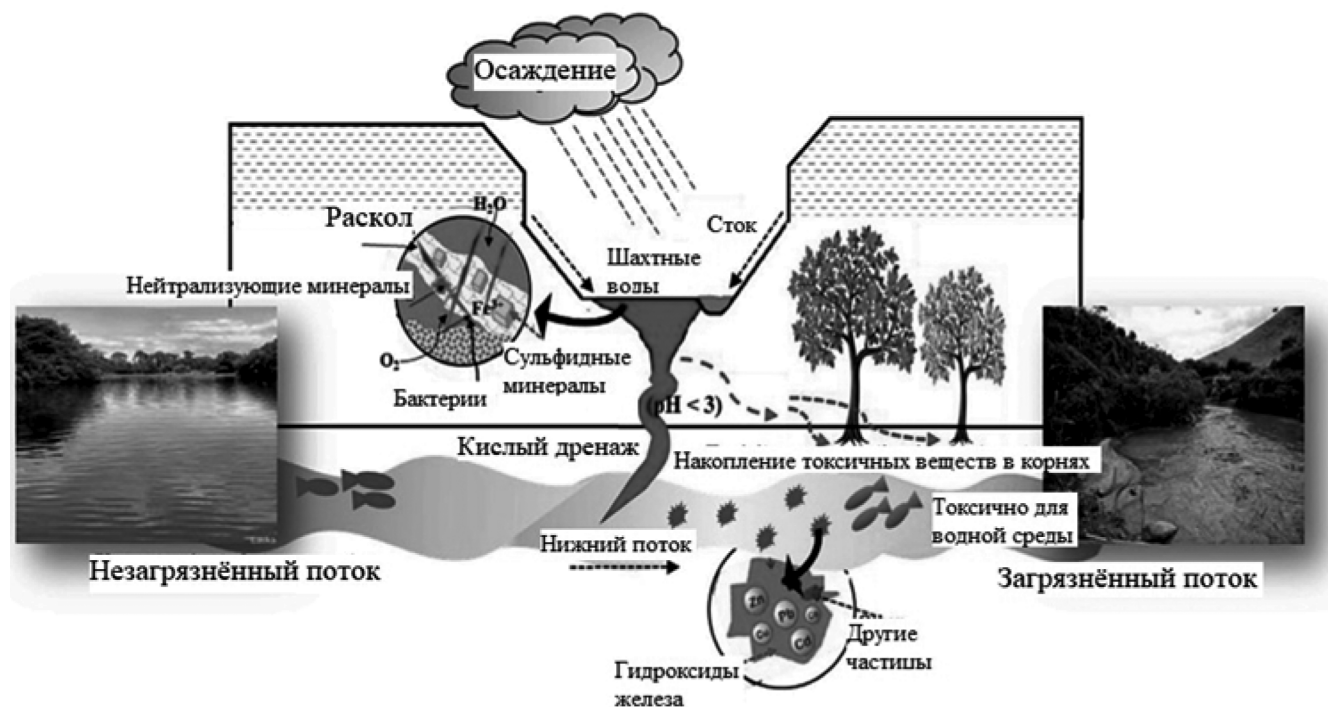


Рис. 2. Схема процесса образования кислых дренажных вод и загрязнения водных объектов [адаптировано из 17]

ний [9]. Работа проницаемого реакционного барьера обеспечивается путем установки проницаемого реагирующего материала на пути грунтовых вод (перпендикулярно направлению потока) в качестве реакционной среды для загрязняющих веществ. Барьер вступает в реакцию с загрязняющими веществами под действием гидравлического градиента и может трансформировать загрязняющие вещества в безвредные растворенные соединения или осадки, которые сорбируются на поверхности реакционного материала. С момента создания первого проницаемого реакционного барьера в 1991 году, к настоящему времени в мире создано более 200 барьеров [10]. Эти барьеры доказали свою эффективность в борьбе с разнообразным спектром загрязняющих веществ, включая галогенированные углеводороды, тяжелые металлы, нефтепродукты и др.

Применение проницаемых реакционных барьеров для контроля загрязнения объектов должно опираться на методику очистки кислых дренажных вод. Точная и эффективная конструкция проницаемого реакционного барьера требует правильного понимания нескольких факторов:

1. реакционная способность выбранного материала относительно загрязняющих веществ в кислых дренажных водах для достижения заданного значения времени задержания поверхностного стока, то есть, поставленной цели очистки;
2. химический состав подземных вод, включая неорганические и органические компоненты грунтовых вод;

3. долгосрочная стабильность и долговечность системы проницаемого реакционного барьера для работы в течение заданного периода;
4. гидравлические характеристики, обеспечивающие беспрепятственный поток грунтовых вод через барьер;
5. экологическая совместимость для минимизации образования потенциально вредных вторичных загрязнителей в процессе очистки.

Долгосрочный эффект применения проницаемого реакционного барьера во многом зависит от выбора подходящих реакционных сред для целевых загрязнений [11]. В зависимости от материала механизм действия барьера можно разделить на деградацию, осаждение, адсорбцию, соадсорбцию, соосаждение, ионный обмен и комплексообразование.

Проницаемый реакционный барьер обычно устанавливается после шлейфа загрязнения в перпендикулярном направлении потоку грунтовых вод. Проницаемые реакционные барьеры делятся на непрерывные реакционные системы, системы «воронка-затвор», инъектируемые реакционные системы, системы реакционного блока с пассивным сбором и новые, называемые пассивными, системы конвергенции в зависимости от типа конструкции (рис. 3).

Определение приемлемой технологии строительства проницаемого реакционного барьера также имеет решающее значение для его успешной работы и оптимизации общих затрат. Проницаемый реакционный барьер

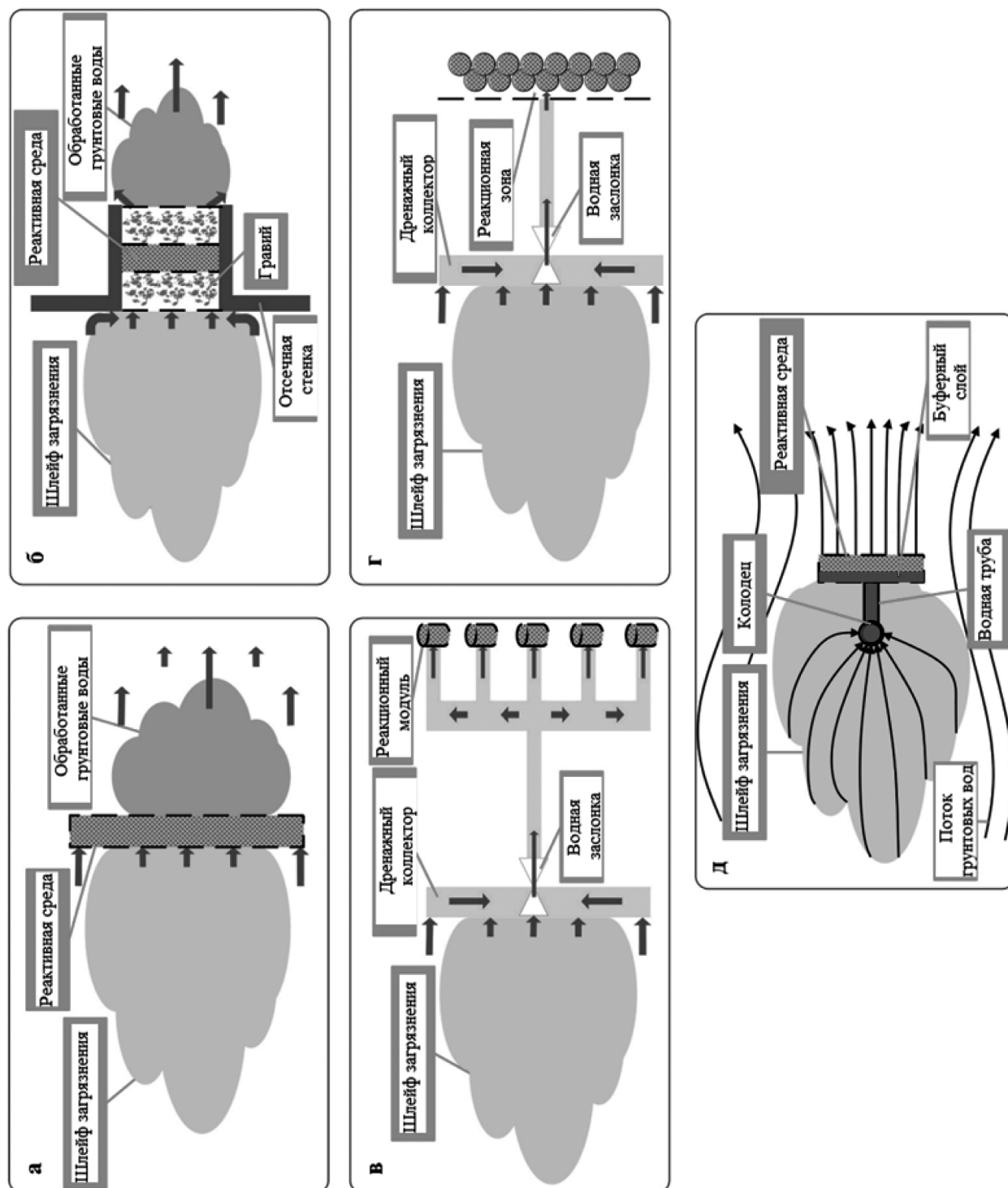


Рис. 3. Типы конструкций проницаемых реакционных барьеров
(а — непрерывная реакционная система, б — система «воронка-затвор», в — инжецируемая реакционная система, г — система реакционного блока с пассивным сбором, д — система пассивной конвергенции) [адаптировано из 18]

обычно конструируется так, чтобы проникнуть в водоносный горизонт, водоупорный пласт и быть встроенным в водоупор на расстояние 0,5–1 м, но не за пределы водоупора. Существует два основных типа строительных технологий: с выемкой и без выемки грунта [12].

Проницаемые реакционные барьеры имеют много достоинств, но имеют и существенные недостатки. Траншеи в глубоких водоносных горизонтах непрактичны. В частности, они могут применяться для неглубоких шлейфов. Расколотая порода или почва могут сформировать более предпочтительные пути потока вокруг барьера, делая его бесполезным. На поверхности барьера могут образовываться осадения в результате химических взаимодействий в зоне реакции, снижая его проницаемость и эффективность. Недостаточно эффективная очистка воды в случае большой концентрации или совместного действия анионов и катионов [8].

Для локализации кислых дренажных вод также применяют барьеры медленной проницаемости. В отличие от проницаемого реакционного барьера, барьер медленной проницаемости — это технология инженерного контроля, иногда называемая отсечной стенкой, стеной в грунте или вертикальным барьером, первоначально использовавшейся для предотвращения просачивания через фундаменты или плотины.

Российская горнодобывающая отрасль характеризуется значительными объемами отходообразования — около 7 млрд тонн в год. При этом общий объем накопленных горнопромышленных отходов в различных типах хранилищ достигает 80 млрд тонн. [13].

С точки зрения применения техногенных отходов и продуктов на их основе в технологиях обработки кислых техногенных вод интерес представляют новые материалы, получаемые в результате переработки техногенного, рудного и нерудного сырья. Значительные объемы такого сырья образуются в процессе деятельности предприятий теплоэнергетики, металлургии и горно-обогатительных комбинатов [14–15].

Следует отметить, что перспективность применения, например пеносиликатов в качестве сорбционного материала для реакционных барьеров подтверждают и экспериментальные исследования.

В работе [19] качестве объектов исследования были отобраны образцы пеносиликата, полученные из отходов переработки слюдяного сланца по методике, описанной в научной литературе [16]. Образцы представляли собой легкие пористые гранулы фракцией 2–8 мм с преобладающим содержанием оксидов кальция, кремния и алюминия.

Оценка сорбционных свойств проводилась в условиях фильтрации многокомпонентных кислых сточных вод промышленного производства через слой пеносиликата в течение 120 часов.

Результаты показали максимальную эффективность извлечения ионов меди (98,6 %) и хрома (III) (35,6 %). Одновременно зафиксировано увеличение концентрации хлорид-ионов с 2,44 до 258,54 мг/л, что требует дополнительного изучения.

Таким образом, оптимизация технологических решений для переработки кислых дренажных вод горно-обогатительных комбинатов с одновременным извлечением тяжелых металлов представляет собой комплексную инженерно-экологическую задачу. Ее сложность обусловлена необходимостью комбинирования разнонаправленных методов очистки, что приводит к усложнению технологических схем.

Эффективная реализация сорбционных методов очистки требует применения специализированных сорбентов, обладающих следующими характеристиками:

- способность к селективному извлечению металлов из разбавленных растворов;
- устойчивость к высокому солевому фону;
- возможность генерации концентрированных элюатов для последующего металлургического передела.

Перспективным направлением является создание проницаемых реакционных барьеров, использующих:

- природные минеральные материалы (экономическая доступность, локальная сырьевая база);
- промышленные отходы (решение проблемы утилизации вторичных ресурсов).

Данный подход сочетает технологическую эффективность с экономической целесообразностью, обеспечивая: снижение капитальных затрат; минимизацию логистических расходов; комплексное решение экологических задач

Современные исследования ориентированы на получение новых материалов, обладающих такими преимуществами как повышенная адсорбционная емкость, повышенная селективность, более простые регенерация и восстановление, а также более экологически приемлемый и экономически эффективный процесс очистки загрязненных вод. Для максимизации эффективности процесса очистки кислых дренажных вод от ионов тяжелых металлов целесообразно использовать комбинацию традиционных и инновационных материалов. В этом случае индивидуальные преимущества каждого вида материала в совокупности могут обеспечить необходимые показатели обработки вод, а также увеличение срока службы реакционных загрузок и экономической эффективности процесса очистки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yassine Ait-Khouia, Mostafa Benzaazoua, Isabelle Demers Environmental desulfurization of mine wastes using various mineral processing techniques: Recent advances and opportunities. *Minerals Engineering* 174 (2021) 107225.
2. Amos R.T., Blowes D.W., Bailey B.L., Sego D.C., Smith L., Ritchie A.I.M. 2015. Waste-rock hydrogeology and geochemistry. *Applied geochemistry* 57, 140–156.
3. Bussi`ere B., 2007. Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal* 44 (9), 1019–1052.
4. Орехова Н.Н. Научное обоснование и разработка технологии комплексной переработки и утилизации техногенных медно-цинковых вод горных предприятий: дис. ... докт. техн. наук / ФГБОУ ВПО «Магнитогорск. гос. техн. ун-т». — Магнитогорск, 2014. — 388 с.
5. Gray N.F., 1997. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environ. Geol.* 30, 10. <https://doi.org/10.1177/026461969701500103>.
6. Udayabhanu S., Prasad B. 2010. Studies on environmental impact of acid mine drainage generation and its treatment: an appraisal. *IJEP* 30, 953–967.
7. Dold B., 2017. Acid rock drainage prediction: a critical review. *J. Geochem. Explor.* 172, 120–132.
8. Budania R., Dangayach S., 2023. A comprehensive review on permeable reactive barrier for the remediation of groundwater contamination. *J. Environ. Manag.* 332, 117343 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117343>.
9. Lorio C.T., Opiso E.M., Resabal V.J.T., Bernardo-Aruguay I., Ortenero J.R., Beltran A.B., Alorro R.D., Tabelin C.B., Orbecido A.H., Promentilla M.A.B. 2023. Optimal treatment technology selection for acid mine drainage via spherical fuzzy analytic hierarchy process. *Miner. Eng.* 202, 108260 <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108260>.
10. Singh R., Chakma S., Birke V. 2023. Performance of field-scale permeable reactive barriers: an overview on potentials and possible implications for in-situ groundwater remediation applications. *Sci. Total Environ.* 858, 158838 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158838>.
11. Torregrosa M., Schwarz A., Nancucheo I., Balladares E., 2019. Evaluation of the bioprotection mechanism in diffusive exchange permeable reactive barriers for the treatment of acid mine drainage. *Sci. Total Environ.* 655, 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.083>.
12. Bekele D.N., Naidu R., Birke V., Chadalavada S., 2015. Choosing the best design and construction technologies for permeable reactive barriers. In: *Permeable Reactive Barrier*. CRC Press.
13. Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П., Бурцев Л.И. Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества, М.: Научтехлитиздат, 2003, 261 с.
14. Крупская Л.Т., Зверева В.П., Майорова Л.П., Перфильев А.В., Голубев Д.А., Костина А.М., Черенцова А.А., Гула К.Е., Растанина Н.К., Бубнова М.Б., Филатова М.Ю. Эколого-геохимические основы оценки влияния техногенной системы на окружающую среду и её охрана (на примере закрытого горного предприятия «Солнечный ГОК»), Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2019, 260 С.
15. Павлов В.Ф. Физические основы технологии получения новых материалов с заданными свойствами на основе создания системы комплексного использования техногенного и нерудного сырья, Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005, 196 С.
16. Пат. 2524585 Российская Федерация, МПК C04B 38/00, C04B 5/06 Способ получения пеносиликата / В.В. Иванов, В.Ф. Павлов // № 2012122817/03; заявл. 01.06.2012; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35.
17. Yu Yang, Bo Li, Tao Li, Pu Liu, Beibei Zhang, Lulu Che A review of treatment technologies for acid mine drainage and sustainability assessment. *Journal of Water Process Engineering* 55 (2023) 104213.
18. Yu Wang, Chunrong Wang, Rongfei Feng, Yang Li, Zhiqiang Zhang, Saisai Guo A review of passive acid mine drainage treatment by PRB and LPB: From design, testing, to construction. *Environmental Research Volume* 251, Part 1, 15 June 2024, 118545.
19. Перфильев А.В., Цыбульская О.Н., Ксенин Т.В., Юдаков А.А., Белая А.А., Ушкова М.А., Павлов М.В., Растанина Н.К. Применение отходов металлургического производства и продуктов на их основе для очистки кислых дренажных вод горно-обогатительных предприятий // IX Международный симпозиум «Химия и химическое образование», 30 сентября — 3 октября 2024 г., Владивосток : материалы. — Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2024. — С. 230–231.

© Растанина Наталья Константиновна (n.rastanina@yandex.ru); Галанина Ирина Александровна (000911@togudv.ru);

Перфильев Александр Владимирович (a.v.perfilev@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»