

УДК 504.06

## Экологически безопасные направления использования отходов добычи угля как техногенного сырья алюминия

Е. И. Верех–Белоусова<sup>1</sup>, А. В. Харламова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Луганский государственный университет имени Владимира Даля, ЛНР, Российская Федерация, 91034, Луганск, кв. Молодежный, 20а

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Верех-Белоусова Е. И., Харламова А. В.* Экологически безопасные направления использования отходов добычи угля как техногенного сырья алюминия // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 142–150. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-142-150

### Аннотация

**Цель:** Обоснование и разработка новых экологически безопасных направлений утилизации отвальной породы угольных шахт Донбасса в качестве техногенных месторождений алюминия. Исследовать минералогический и химический состав образцов отвальной породы разной степени метаморфизма с целью обоснования возможности их переработки как техногенного бедного алюминиевого сырья. Провести эксперименты по химическому и биохимическому (бактериальному) выщелачиванию подвижных (растворимых) соединений алюминия из образцов отвальной породы. **Методы:** Анализ химических превращений и техногенной минералогии в складированной отвальной породе. Проведено химическое и биохимическое кислотное выщелачивание сульфатных солей алюминия из отвальной породы разной степени метаморфизма. **Результаты:** Установлено, что по содержанию бокситов отвальную породу угольных шахт Донбасса можно отнести к бедному алюминиевому сырью. Предложен способ кислотного химического выщелачивания растворимых соединений алюминия растворами серной кислоты различных концентраций, и доказано эффективное выщелачивание слабыми растворами кислоты. Обоснован и доказан способ биохимического (бактериального) выщелачивания солей алюминия. **Практическая значимость:** Доказано, что экологичность и экономичность процесса кучного биохимического выщелачивания обеспечивается тем, что основной реагент — серная кислота — образуется естественным путем в результате жизнедеятельности бактерий и процесс не нуждается в дополнительных технологических единицах для производства кислоты.

**Ключевые слова:** Шахты, породные отвалы, переработка отходов, кислотное выщелачивание, бактерии *Th. ferrooxidans*, алюминий.

### Введение

Результатом добычи и переработки угля в Донбассе является накопление большого количества крупнотоннажных отходов — породных отвалов и терриконов. Такие породные отвалы, занимая большие территории, негативно влияют на состояние окружающей среды, подвергаются процессам горения, водной и ветровой эрозиям. В результате естественных физико-химических

процессов, протекающих в толще складированной породы, прилегающие к отвалам территории подвергаются загрязнению тяжелыми металлами, оксидами серы и углерода, сероводородом, а также радионуклидами и органическими летучими соединениями. Большинство подобных отходов расположены в селитебных зонах и зачастую без соблюдения санитарно-защитной зоны, что оказывает прямое негативное воздействие на

состояние здоровья населения, проживающего в зоне влияния.

Все эти и другие факторы требуют решения проблемы накопления отходов добычи и переработки угля в регионе. В сложившихся экологических условиях и требованиях экономики к значительному росту эффективности использования ресурсного потенциала утилизация подобного рода отходов должна быть обоснована как с экологической, так и с экономической точки зрения. Данной проблеме уже более трех десятилетий посвящается значительное количество научных работ отечественных и зарубежных ученых (М. Я. Шпирт, Б. С. Панов, Л. Г. Зубова, В. Б. Артемьев, А. К. М. Rainbow, D. Leinenger, E. Raask, I. Twardowska и др.). Однако проблема до сегодняшнего дня остается нерешенной в силу невозможности предложения эколого-экономически оправданных направлений комплексной или малоотходной утилизации.

Основной **целью** работы является обоснование и разработка новых экологически безопасных направлений использования отвальной породы угольных шахт Донбасса в качестве техногенных месторождений алюминия.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование минералогического и химического состава образцов отвальной породы разной степени метаморфизма с целью обоснования возможности их переработки как техногенного бедного алюминиевого сырья.

2. Проведение экспериментов по химическому и биохимическому (бактериальному) выщелачиванию подвижных (растворимых) соединений алюминия из образцов отвальной породы.

### **Материалы и методы исследования**

Отвальная порода угольных шахт содержит в своем составе практически все элементы периодической системы Д. И. Менделеева, что и

обуславливает ее «богатый» минералогический состав. Однако основными по массе минералами являются алюмосиликаты и сульфидные соединения железа — пирит и марказит. В золе отвальной породы, согласно нашим исследованиям и данным донецких ученых [1], также преобладают оксиды кремния, алюминия и железа.

Причины негативного влияния отвалов угольных шахт на окружающую среду обусловлены процессами химического и биохимического окисления сульфидов (пирита и марказита) в складированной породе. Породы отвалов имеют своеобразные водно-физические свойства: скелет и каменистость обуславливают их высокую водопроницаемость, а наличие мелкоземлистого элювия глинистых пород и щебнисто-каменистых фракций аргиллита с влагоемкостью около 8–10 % определяют достаточно большой запас влаги. В результате этого создается стабильный водный режим, сохраняя значительные запасы производительной влаги [1–4]. Кроме того, угли и углистые породы при добыче оказываются дополнительно переувлажненными, так как при выемочных работах поступает большое количество подземных вод в призабойные и выработанные пространства из водоносных горизонтов. Поднятие увлажненной породы на поверхность и отсыпка в отвалы приводит к дополнительному переувлажнению ее атмосферными осадками. Такое постоянное проникновение влаги в поровые растворы отвальной породы изменяет состав и свойства последних, а затем изменяет и химический состав минералов, находившихся ранее в шахтной выработке в относительно стабильных восстановительных условиях и тем самым вызывает новые геохимические изменения. При этом имеют место процессы растворения, выщелачивания, гидратации и др. Этим геохимическим процессам особенно подвержены минералы, содержащие элементы с несколькими степенями окисления и валентности: сера, железо, алюминий, марганец и другие.

Гипергенные геохимические превращения в отвальной породе связаны с процессом взаимодействия серы, пирита и марказита, входящих в состав породы с влагой и кислородом окружающей среды, в результате чего образуется серная кислота. А при наличии в поровых растворах породы тионовых бактерий *Th. ferrooxidans* процесс кислотообразования приобретает биохимическую природу. Такие реакции являются экзотермическими, что приводит к дальнейшим геохимическим превращениям при повышении температуры в толще породы.

Все эти факторы приводят к изменению минералогического состава поднятой на поверхность породы, возникают новые минералы, и такая минералогия уже имеет техногенное происхождение.

Донецкими и луганскими учеными [1, 5] установлено, что при длительном самонагревании в складированной отвальной породе образуются сернокислотные зоны, серная кислота взаимодействует с минералами и ускоряет при повышенных температурах гидролиз полевых шпатов, а также взаимодействует с элементной серой, разлагая минералы породы, переводя их компоненты в виде сульфатов в раствор. Вследствие этого породы обогащаются кремнеземом, глиноземами, полевыми шпатами. Гидролиз этих минералов при повышенных температурах сопровождается образованием каолина. При дальнейшем самонагревании до 600 °С и более протекают процессы превращения каолина в метакаолин  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  и затем в  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ .

По данным Ю. А. Проскурни [6] и М. Я. Шпирга [7] в результате изучения терриконов угольных шахт были обнаружены такие техногенные алюминийсодержащие минералы: галотрихит —  $FeAl_2[SO_4]_4 \cdot 22H_2O$ , пикерингит —  $MgAl_2[SO_4]_4 \cdot 22H_2O$ , тамаругит —  $NaAl[SO_4]_2 \cdot 6H_2O$ , алуноген —  $Al_2[SO_4]_3 \cdot 17H_2O$ , чермигит —  $NH_4Al[SO_4]_2 \cdot 12H_2O$ , мулит —  $Al_6Si_2O_{13}$ , даусонит  $NaAl(OH)_2CO_3$ , диккит и другие. Условия их обра-

зования разнообразны. Часть минералов формируется в результате псевдофумарольной деятельности при сублимации газообразных продуктов из очагов горения (температура образования минералов — 80–300 °С). Однако гипергенные изменения пород в поверхностных слоях отвалов обуславливаются влиянием  $H_2SO_4$ . Температура образования минералов этой группы — 10–80 °С. На поверхности выделяются алюмосульфатные корки (с преобладанием сульфатов  $Al^{3+}$  и  $Fe^{3+}$ ), которые формируются при резком доминировании глинистых пород [2, 3, 6].

Для проведения исследований были отобраны образцы отвальной породы разной стадии метаморфизации: свежееотсыпанная отвальная порода средней метаморфизации ш/у «Луганская» (г. Луганск); отвальная порода сильной метаморфизации в процессе самонагревания шахт им. Г. Вахрушева (г. Антрацит) и им. М. Свердлова (г. Свердловск); перегоревшая отвальная порода слабой метаморфизации шахты «Матроская» (г. Лисичанск).

Химический анализ отвальной породы на содержание отдельных элементов осуществляли с применением метода атомно-эмиссионной спектроскопии. Валовое содержание  $Al_2O_3$  в золе образцов породы определялось весовым методом и с использованием объединенного реагента (алюминон). Обменный (подвижный) алюминий в отвальной породе выделяли раствором хлористого калия с дальнейшим получением окрашенного комплекса алюминия с хромазуолом *C* или ксилиноловым оранжевым в слабокислой среде с последующим фотометрированием полученного окрашенного раствора. Выделение чистой культуры бактерий *Th. ferrooxidans* проводилось согласно общепринятым микробиологическим методикам.

### Результаты исследования и их обсуждение

Учитывая протекающие в складированной отвальной породе химические и биохимические

процессы окисления сульфидов, техногенного минералообразования и выщелачивания металлов, использование отходов добычи и переработки угля в качестве техногенного алюминиевого сырья является оправданным, так как в породе имеются все необходимые для биохимического выщелачивания компоненты: каолиниты, сульфиды (пирит, марказит), тионовые бактерии *Th. ferrooxidans*; а вследствие горения терриконов (или искусственного обжига породы) алюминий легче переходит в свободную ионную форму.

Спектральный анализ отобранных образцов породы показал, что в ее химическом составе преобладают кремний, железо, алюминий, медь, титан, хром, марганец, никель, цинк, галлий, германий, висмут, цирконий, иттрий и др. Причем содержание некоторых легких (алюминий, титан) и редкоземельных металлов (галлий, германий, цирконий и др.) приближено к минимальной промышленной концентрации.

Проведены исследования на содержание алюминия (в виде оксида  $Al_2O_3$ ) в образцах горелой и негорелой отвальной породы, и в результате установлено, что содержание  $Al_2O_3$  колеблется от 13 до 21%, поэтому отвальную породу можно отнести к бедному алюминиевому сырью (табл. 1). Превышение содержания  $Al_2O_3$  в образцах перегоревшей породы объясняется тем, что горелые породы (горелый тонштейн) терриконов, по отношению к свежедобытым, характеризуются большим содержанием  $Al_2O_3$ .

Угли и подстилающие их горные породы содержат большое количество влаги в порах. Однако антрациты, а также все угли сильной и средней степени метаморфизации по сравнению с другими каменными углями содержат больше поровой влаги. Поэтому дальнейшим этапом исследования было определение подвижных форм алюминия (водорастворимых сульфатных солей) в образцах горелой и негорелой породы разной степени метаморфизма (табл. 2).

ТАБЛИЦА 1. Содержание  $Al_2O_3$  в образцах отвальной породы

Отвальная порода	Содержание $Al_2O_3$ , %
В стадии горения (г. Свердловск)	20,87
Перегоревшая (г. Антрацит)	19,80
Свежеотсыпанная (г. Луганск)	13,79
Перегоревшая (г. Лисичанск)	18,30

ТАБЛИЦА 2. Исходное содержание подвижного алюминия в породе разной степени метаморфизации

Отвальная порода	Степень метаморфизации	Содержание подвижного алюминия, мг/100 г породы
В стадии горения (г. Свердловск)	Сильная	0,08
Перегоревшая (г. Антрацит)	Сильная	0,07
Свежеотсыпанная (г. Луганск)	Средняя	0,02
Перегоревшая (г. Лисичанск)	Слабая	0,05

Большее содержание подвижной формы алюминия в отвальной породе сильной степени метаморфизации можно объяснить тем, что антрациты и сопутствующие им породы характеризуются высокой естественной влажностью, а в процессе регулярного внешнего увлажнения (например, атмосферными осадками) имеет место повышенный прирост сорбированной влаги. Это также обуславливается большей внутренней поверхностью антрацитов. В связи с этим наиболее значительные и быстрые изменения свойств химических веществ в составе отвальной породы — геохимическое окисление пирита с последующим выделением свободной серной кислоты — присущи антрацитам.

Химическое кислотное выщелачивание подвижного алюминия (сульфатных солей алюминия) проводилось с использованием растворов серной кислоты различных концентраций, %: 80, 40, 20, 10, 5 и 2,5 (рис. 1). Различные концентрации сернокислых растворов подобраны с целью выявления оптимальных показателей

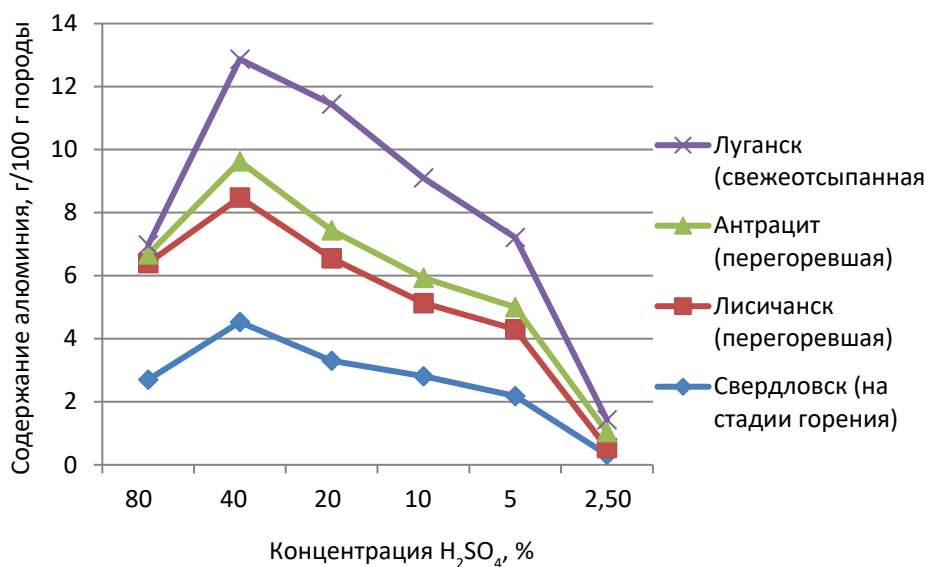


Рис. 1. Результаты кислотного выщелачивания алюминия

выщелачивания и имитирования естественных процессов образования серной кислоты при химическом и биохимическом выщелачивании сульфидных соединений железа и элементной серы.

Образцы отвальной породы подвергались измельчению, а свежесыпанная отвальная порода шахты «Луганская» дополнительному обжигу при 600 °С для разрушения крепких химических связей в алюмосиликатах и перевода структуры каолина в метакаолин. Однако наличие также большого числа техногенно образованных некаолинитовых минералов алюминия в отвальной породе, в отличие от каолинитов, легко выщелачиваются растворами слабой серной кислоты и даже воды (например, даусонит и другие минералы). В результате эксперимента установлено, что даже слабые растворы серной кислоты (5–20 %) выщелачивают алюминий, а наибольшие показатели выщелачивания по всем образцам породы наблюдаются при 20–40 % концентрации.

Таким образом, в естественных условиях на начальных стадиях окисления пирита, образованная серная кислота даже небольших концентраций способна разрушать алюмосиликаты и

другие минералы алюминия, а самонагревание породы облегчает данный процесс.

Далее было проведено биохимическое (бактериальное) выщелачивание алюминия. Из образцов отвальной породы (водной вытяжки) была выделена культура бактерий *Th. ferrooxidans* (среда 9Ж Сильвермана и Ландгрена) [1, 8]. Обогащенную культуру *Th. ferrooxidans* получили путем нескольких пересевов. Соотношение твердой и жидкой фаз колебалось при условии  $T : Ж = 1 : 2$ . Орошение породы полученными бактериальными растворами проведено однократно в начале эксперимента.

Из научной литературы известно [1, 9, 10], что один из основных источников получения энергии бактериями *Th. ferrooxidans* — это окисное железо. Его стабильное содержание поддерживается в растворе при pH менее 3. При повышении показателя pH скорость окисления может замедляться и продукты окисления будут препятствовать последующему контакту клетки со средой. Поэтому в процессе эксперимента и по его окончании проводился постоянный контроль pH среды [11] (рис. 2).

На 8-е сутки отмечено повышение содержания подвижного алюминия (табл. 3), в результате разло-

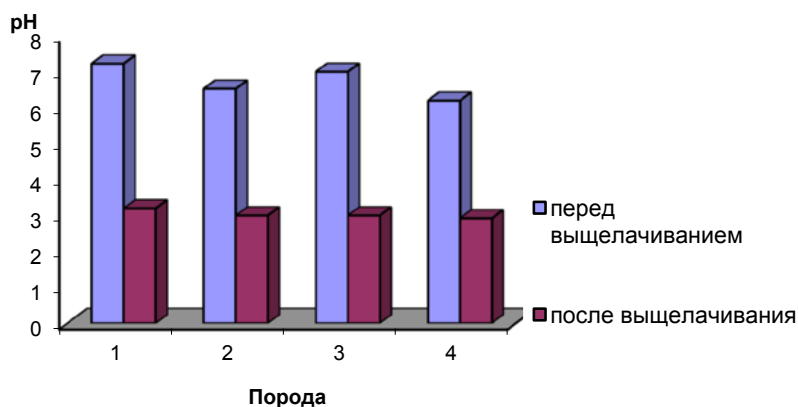


Рис. 2. Результаты изменения рН после биохимического выщелачивания:

- 1 — сильнометаморфизированная порода (г. Свердловск);
- 2 — сильнометаморфизированная порода (г. Антрацит);
- 3 — среднеметаморфизированная порода (г. Луганск);
- 4 — слабометаморфизированная порода (г. Лисичанск)

жения полевых шпатов сернокислотными продуктами жизнедеятельности бактерий *Th. ferrooxidans*.

Степень биохимического выщелачивания алюминия колеблется в относительно небольших пределах — от 16 до 63 %, что, однако, доказывает возможность утилизации породы и требует дальнейшего усовершенствования микробиологических процессов.

Процесс биохимического выщелачивания, его скорость и результат будут зависеть от таких факторов, как количество клеток бактерий в растворе, аэрация отвальной породы и ее гранулометрического состава, высота отвала и количество сульфидных минералов в составе отвальной породы. Полученный в результате выщелачивания продукт — сульфатные соли алюминия — могут иметь широкий спектр применения в качестве коагулянта в очистных системах (при очистке сточных вод и питьевой воды) как компонент пестицидов в сельском хозяйстве, в текстильном производстве и в печатно-издательском деле, в металлургии и в других отраслях.

Также из полученного сульфата алюминия после его гидролитического выделения возможно получать глинозем термическим разложением сульфата алюминия. Вместе с основным товарным продуктом (глиноземом) выделяются также

ТАБЛИЦА 3. Результаты биохимического кислотного выщелачивания алюминия

Отвальная порода	Содержание $Al^{3+}$ , г/100 г породы	Степень извлечения, %
В стадии горения (г. Свердловск)	5,86	30
Перегоревшая (г. Антрацит)	3,0	16
Свежеотсыпанная (г. Луганск)	8,91	63
Перегоревшая (г. Лисичанск)	5,0	28

отходящие газы — оксиды серы, которые целесообразно включать в замкнутый цикл и использовать для получения серной кислоты, используемой для дальнейшего выщелачивания алюминия. Таким образом, данный способ получения глинозема будет характеризоваться малоотходностью.

Реализация предложенного биохимического способа выщелачивания возможна на территории закрытых шахт, что позволит существенно снизить расходы на строительство технологических комплексов и т. п. Закрытые шахты имеют железнодорожное и автодорожное сообщение, что также является существенным экономически важным фактором создания комплекса биохимического выщелачивания металлов. Отходы выщелачивания целесообразно использовать в жилищ-

ном строительстве для производства кирпича, керамзита и другой продукции, а также для производства материалов, используемых в дорожном строительстве. Максимально полная утилизация отвальной породы угольных шахт с получением товарного продукта и использование отходов утилизации создаст экологически безопасную и экономически выгодную технологию.

## Выводы

Проведенная оценка химических и биохимических превращений в складываемой породе показала, что естественные биохимические процессы образования серной кислоты ускоряют разложение алюмосиликатов, что приводит к образованию каолина и высвобождает изоморфно замещенные металлы. Эти биохимические процессы можно использовать при переработке породы как бедного техногенного сырья для получения алюминия. Экспериментально доказано, что даже слабые растворы серной кислоты (5–20 %) выщелачивают алюминий, а наибольшие показатели выщелачивания по всем образцам породы наблюдаются при 20–40 % концентрации. Степень биохимического выщелачивания алюминия колеблется в относительно небольших пределах — от 16 до 63 %. Биохимическое выщелачивание алюминия может характеризоваться как более дешевое и экологически чистое, потому что серная кислота производится естественно в поровых растворах отвальной породы как следствие жизнедеятельности бактерий *Th. ferrooxidans*. Внедрение предложенных схем позволит существенно улучшить экологическое и экономическое состояние региона.

## Библиографический список

1. Зборщик М. П. Предотвращение экологически вредных проявлений в породах угольных месторождений / М. П. Зборщик, В. В. Осокин. — Донецк: ДонГТУ, 1996. — 178 с.
2. Зборщик М. П. Условия самонагревания пиритсодержащих осадочных горных пород / М. П. Зборщик, В. В. Осокин, Ю. Н. Паниотов // Горный журнал. — 1990. — № 11. — С. 9–16.
3. Панов Б. С. Модель самовозгорания породных отвалов угольных шахт Донбасса / Б. С. Панов, Ю. А. Проскурня // Геология угольных месторождений. — Екатеринбург, 2002. — С. 274–281.
4. Верех-Белоусова Е. И. Эколого-геохимическое обоснование возможности переработки породных отвалов угольных шахт Луганщины / Е. И. Верех-Белоусова, Т. С. Титова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2018. — Т. 15. — Вып. 3. — СПб.: ПГУПС, 2018. — С. 463–470.
5. Верех-Белоусова Е. И. К вопросу экологически безопасных способов переработки породных отвалов угольных шахт Луганщины / Е. И. Верех-Белоусова // Научно-практический журнал «Безопасность жизнедеятельности». — 2019. — № 4(220). — М.: Новые технологии, 2019. — С. 42–46.
6. Проскурня Ю. А. Минералогия отвалов угольных шахт Донбасса (на примере Донецко-Макеевского промышленного района): автореф. дис. на получение науч. степени канд. геолог. наук / Ю. А. Проскурня. — Кривой Рог, 2000. — 19 с.
7. Шпирт М. Я. Использование твердых отходов добычи и переработки углей / М. Я. Шпирт, В. Б. Артемьев, С. А. Силютин. — М.: Горное дело, ООО «Киммерийский центр», 2013. — 432 с.
8. Мейнелл Дж. Экспериментальная микробиология: теория и практика / Дж. Мейнелл, Э. Мейнелл. — М.: Мир, 1967. — 347 с.
9. Татаринев А. В. Роль микроорганизмов в гипергенном преобразовании полиметаллических руд и формировании биогеохимических аномалий благородных металлов на месторождениях Забайкалья / А. В. Татаринев, Л. И. Ялович, Э. В. Данилова // Доклады АН РФ. — 2007. — Т. 414. — № 5. — С. 651–655.
10. Зарубина З. М. Исследование микробиологического окисления пирита угля / З. М. Зарубина, Н. Н. Ляли-

кова, Е. И. Шмук // Изв. АН СССР. Отделение технических наук. — 1959. — № 1. — С. 26–31.

11. Верех-Белюсова Е. И. Перспективы извлечения редкоземельных металлов из породных отвалов угольных шахт Луганщины / Е. И. Верех-Белюсова // Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования: материалы II Национальной научно-практической конференции (г. Керчь, 15–17 мая 2019 г.). — Симферополь: ФГБУО ВО «КГИТУ»; АТ «Ариал», 2019. — С. 150–156.

Дата поступления: 12.01.2023

Решение о публикации: 18.02.2023

#### Контактная информация:

ВЕРЕХ-БЕЛОУСОВА Екатерина Иосифовна —

канд. техн. наук, доц.;

kate3152@yandex.ru

ХАРЛАМОВА Алина Вадимовна —

канд. техн. наук, доц.; alavina@yandex.ru

## Environmentally Safe Trends of Coal Mining Waste Usage as Aluminum Technogenic Raw Material

E. I. Verekh-Belousova<sup>1</sup>, A. V. Kharlamova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lugansk Vladimir Dahl State University, 20a, Molodezhnykv., Lugansk, 91034, LPR, Russian Federation

<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Verekh-Belousova E. I., Kharlamova A. V. Environmentally Safe Trends of Coal Mining Waste Usage as Aluminum Technogenic Raw Material // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 142–150. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-142-150

### Summary

**Purpose:** Substantiation and development of new environmentally safe trends for utilization of dump rock of Donbass coal mines as technogenic aluminum deposits. To investigate mineralogical and chemical composition of dump rock samples of metamorphism varying degrees in order to substantiate the possibility of their processing as technogenic poor aluminum raw material. To conduct the experiments on chemical and biochemical (bacterial) leaching of fluid (soluble) aluminum compounds from dump rock samples. **Methods:** Analysis of chemical transformations and technogenic mineralogy in stored dump rock. Chemical and biochemical acid leaching of aluminum sulfate salts from dump rock of metamorphism varying degrees was carried out. **Results:** It has been established that according to the content of bauxites, the dump rock of Donbass coal mines can be attributed to poor aluminum raw material. Method of acid chemical leaching of soluble aluminum compounds with sulfuric acid solutions of various concentrations is proposed and effective leaching with weak acid solutions is proved. Method of biochemical (bacterial) leaching of aluminum salts is substantiated and vindicated. **Practical significance:** It is testified that environmental friendliness and cost-effectiveness of the process of closely-grouped biochemical leaching is ensured by the fact that the main reagent — sulfuric acid - is formed naturally as a result of bacteria vital functions and the process does not need additional technological units for acid production.

**Keywords:** Mines, rock dumps, waste recycling, acid leaching, bacteria *Th. ferrooxidans*, aluminum.

### References

1. Zborshhik M. P., Osokin V. V. *Predotvrashhenie ekologicheski vrednyh pojavlenij v porodah ugol'nyh mestoro-*

*zhdenij* [Prevention of environmentally harmful manifestations in the rocks of coal deposits]. Doneck: DonGTU Publ., 1996, 178 p. (In Russian)



2. Zborshhik M. P., Osokin V. V., Paniotov J. N. Usloviya samonagrevaniya piritsoverzhashhih osadochnyh gornyh porod [Conditions of self-heating of pyrite-containing sedimentary rock pores]. *Gornyj zhurnal* [Mining Magazine]. 1990, Iss. 11, pp. 9–16. (In Russian)
3. Panov B. S., Proskurnja Ju. A. Model' samovozgoraniya porodnyh otvalov ugol'nyh shaht Donbassa [Model of spontaneous combustion of rock dumps of Donbass coal mines]. *Geologija ugol'nyh mestorozhdenij* [Geology of Coal Deposits]. Ekaterinburg, 2002, pp. 274–281. (In Russian)
4. Vereh-Belousova E. I., Titova T. S. Jekologo-geohimicheskoe obosnovanie vozmozhnosti pererabotki porodnyh otvalov ugol'nyh shaht Luganshhiny [The possibility of processing rock dump of the Lugansk region coal mines: environmental and geochemical justification]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2018, vol. 15, Iss. 3. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2018, pp. 463–470. (In Russian)
5. Vereh-Belousova E. I. K voprosu jekologicheskii bezopasnyh sposobov pererabotki porodnyh otvalov ugol'nyh shaht Luganshhiny [Regarding Environmentally Safe Methods for Processing Coal Mine Waste Rock Dumps in Lugansk Region]. *Nauchno-prakticheskij zhurnal "Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti"* [Life Safety]. 2019, Iss. 4(220). Moscow: Novye tehnologii Publ., 2019, pp. 42–46. (In Russian)
6. Proskurnja Ju. A. *Mineralogija otvalov ugol'nyh shaht Donbassa (na primere Donecko-Makeevskogo promyshlennogo rajona): avtoref. dlss. na poluchenie nauch. Stepeni kand. geolog. nauk* [Mineralogy of dumps of Donbass coal mines (on the example of the Donetsk-Makeevsky industrial region): author. dis. to receive scientific degree cand. geologiSt. sciences]. Krivoj Rog, 2000, 19 p. (In Russian)
7. Shpirt M. Ja., Artem'ev V. B., Siljutin S. A. *Ispol'zovanie tverdyh othodov dobychi i pererabotki uglej* [Use of solid wastes of coal mining and processing]. Moscow: Gornoe delo, OOO "Kimmerijskij centr" Publ., 2013, 432 p. (In Russian)
8. Mejnell Dzh., Mejnell Je. *Jeksperimental'naja mikrobiologija: teorija i praktika* [Experimental microbiology: theory and practice]. Moscow: Mir Publ., 1967, 347 p. (In Russian)
9. Tatarinov A. V., Jalovik L. I., Danilova Je. V. Rol' mikroorganizmov v gipergennom preobrazovanii polimetallicheskikh rud i formirovanii biogeokhimicheskikh anomalij blagorodnykh metallov na mestorozhdeniyakh Zabaykal'ya [The role of microorganisms in the hypergene transformation of polymetallic ores and the formation of biogeochemical anomalies of noble metals in the deposits of Transbaikalia]. *Doklady AN RF* [Doklady AN RF]. 2007, vol. 414, Iss. 5, pp. 651–655. (In Russian)
10. Zarubina Z. M., Ljalikova N. N., Shmuk E. I. Issledovanie mikrobiologicheskogo okislenija pirita uglja [Investigation of microbiological oxidation of coal pyrite]. *Izv. AN SSSR. Otdelenie tehniceskikh nauk* [The news of the Academy of Sciences of USSR. Department of Technical Sciences]. 1959, Iss. 1, pp. 26–31. (In Russian)
11. Vereh-Belousova E. I. *Perspektyvy izvlechenija redkozemel'nyh metallov iz porodnyh otvalov ugol'nyh shaht Luganshhiny. Aktual'nye problemy bioraznoobraziya i prirodopol'zovaniya: materialy II Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Kerch', 15–17 maya 2019 g.)* [Prospects for the extraction of rare earth metals from rock dumps of coal mines in the Luhansk region. Actual problems of biodiversity and nature management: materials of the II National scientific and practical conference (Kerch, 15–17 May, 2019)]. Simferopol': FGBUO VO "KGITU"; AT "Arial" Publ., 2019, pp. 150–156. (In Russian)

Received: January 12, 2023

Accepted: February 18, 2023

**Author's information:**

Ekaterina I. VEREKH-BELOUSOVA —  
PhD in Engineering, Associate Professor;  
kate3152@yandex.ru

Alina V. KHARLAMOVA — PhD in Engineering,  
Associate Professor; alavina@yandex.ru