



КРЪГОВА ИКОНОМИКА В УПРАВЛЕНИЕТО НА КИСЕЛИННИТЕ МИННИ ДРЕНАЖИ: ВЪЗСТАНОВЯВАНЕ НА РЕСУРСИ И ПРОИЗВОДСТВО НА КРАЙНИ МАТЕРИАЛИ

Георги Савов¹, Кремена Деделянова², Иван Гюров¹, Иван Александров³

¹Премиятех ООД, ²Химико технологичен и металургичен университет, ³Елаците Мед АД

РЕЗЮМЕ

Настоящият доклад анализира революционните възможности за трансформиране на киселинния минен дренаж (AMD) от екологично бреме в източник на ресурси чрез принципите на кръговата икономика. Основният фокус е върху технологиите за извличане и възстановяване на редкоземни елементи и други критични материали от AMD потоците, както и производството на крайни продукти с висока добавена стойност. Изследването показва, че интегрираните системи за управление на AMD могат да извличат литий, редкоземни елементи, мед, цинк и други критични материали, необходими за енергийния преход и високотехнологичните индустрии. Добавени са примери от практиката на водещи минно-добивни компании, демонстриращи успешни приложения на кръговата икономика в управлението на AMD.

Ключови думи: Кръгова икономика, киселинен минен дренаж, устойчивост, възстановяване на ресурси, цифров добив, въглеродна неутралност, редкоземни елементи

ABSTRACT

This paper investigates the potential for transforming acid mine drainage (AMD) from an environmental liability into a valuable secondary resource, through the implementation of circular economy principles. Emphasis is placed on advanced technologies for the extraction and recovery of rare earth elements, lithium, copper, zinc, and other critical raw materials from AMD streams. The study highlights the feasibility of producing high value-added products that are essential for the energy transition and high-tech industries. Case studies from leading mining and metallurgical operations are presented, illustrating integrated approaches for sustainable AMD management and resource recovery.

1. Въведение

1.1 Актуалност на проблема

Киселинният минен дренаж представлява един от най-сериозните дългосрочни екологични предизвикателства в глобалната минна индустрия. Традиционно третиран като екологичен пасив, AMD се характеризира с ниско рН, високи концентрации на разтворени метали и дългосрочно въздействие върху водните ресурси и екосистемите. Въпреки това, изследванията показват, че AMD може да служи като естествен процес на куповото излужване, който извлича и концентрира редкоземни елементи и критични минерали от земната кора, създавайки частично обогатена суровина, подходяща за последващо извличане, разделяне и възстановяване [1].

Същевременно, нарастващото търсене на редкоземни елементи (РЗЕ) и критични материали за зелената трансформация създава нови възможности за възстановяване на ресурси. Само в региона на Северна Апалачи в САЩ, стотици изоставени въглищни мини колективно отделят 500-3400 тона РЗЕ годишно [2].

1.2 Кръговата икономика като решение

Принципите на кръговата икономика предлагат нов подход към управлението на AMD, базиран на:

- Минимизиране на отпадъците чрез възстановяване на ресурси
- Максимизиране на жизнения цикъл на материалите
- Създаване на затворени производствени цикли
- Трансформиране на отпадъци в суровини



2. Методология на изследването

Настоящият доклад е изготвен въз основа на систематичен преглед на актуални научни публикации, свързани с управлението на киселинния минен дренаж (AMD) и прилагането на принципите на кръговата икономика в минната индустрия. Методологията включва следните етапи:

1. **Събиране на данни:** Използвани са академични бази данни като *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Google Scholar* и *Scopus* за идентифициране на релевантни публикации, публикувани между 2014 и 2025 г.
2. **Критерии за подбор:** Публикациите са подбрани въз основа на тяхната релевантност към темите за възстановяване на ресурси от AMD, технологии за преработка и приложения на кръговата икономика.
3. **Анализ и синтез:** Извършен е качествен анализ на идентифицираните източници, за да се обобщят ключови технологии и практически примери.

3. Кръгова икономика в контекста на AMD

3.1 Концептуална рамка

Кръговата икономика в управлението на AMD се базира на три основни принципа:

Принцип 1: Проектиране за минимизиране на отпадъците

- Превантивни мерки за контрол на образуването на AMD
- Оптимизация на добивните процеси за намаляване окислението на сулфидните минерали
- Интегрирано планиране на жизнения цикъл на рудника

Принцип 2: Задържане на продукти и материали в употреба

- Извличане на ценни метали и редкоземни елементи
- Рециклиране на процесни води
- Повторно използване на утаени материали

Принцип 3: Регенерация на природни системи

- Неутрализация на киселинността
- Възстановяване на екосистемите
- Заклучване на въглерод в минерални форми

3.2 Стойностна верига на кръговата икономика

Традиционната линейна верига "взимане-производство-изхвърляне" се трансформира в кръгова система, състояща се от:

➤ **Входящи потоци:**

- Киселинни минни дренажи
- Процесни води от обогатяването
- Отпадъци от металургичните процеси

➤ **Преработващи процеси:**

- Селективно утаяване и филтриране
- Биометалургични процеси
- Хидрометалургично извличане
- Електрохимични методи

➤ **Изходящи продукти:**

- Възстановени критични материали
- Пречистени води за повторна употреба
- Вторични суровини за строителството
- Екосистемни услуги

4. Концентрации на елементи в AMD

4.1 Редкоземни елементи (РЗЕ)

Актуалните данни показват следните концентрации на РЗЕ в AMD:



Общи концентрации на РЗЕ:

- Въглищни мини в Апалачи: средно 18.3 µg/L [3]
- Диапазон в речни води и минни води: 0.57 µg/L (Lu) до 2579 µg/L [4]
- AMD утайките съдържат значително по-концентрирани РЗЕ - с фактор $5-7 \times 10^3$ по-високи концентрации

Разпределение на РЗЕ:

- Предимно леки РЗЕ (La, Ce, Pr, Nd)
- Концентрациите варират според геоложките условия и вида на рудата

4.2 Други критични материали

Литий:

- Актуални пазарни цени за Литиев хидрооксид: ~8,000 USD/тон (LME, 2025)
- Цените се характеризират с висока волатилност поради пазарни условия и предлагане/търсене
- Концентрациите на литий в AMD варират значително в зависимост от геоложките условия
- Необходими са допълнителни изследвания за точно определяне на концентрациите

Кобалт:

- Актуални пазарни цени: ~32,400 USD/тон (LME, 2025)
- Критичен за батерийните технологии
- Извличане чрез хидрометалургични процеси

Никел:

- Актуални пазарни цени: ~15,500 USD/тон (LME, 2025)
- Критичен за батерийните технологии
- Извличане чрез хидрометалургични процеси

Цветни метали:

- Извличане на Cu и Zn
- Актуални пазарни цени:
 - Cu: ~9,700 USD/тон (LME, 2025)
 - Zn: ~2,800 USD/тон (LMEq 2025)
- Производство на соли или метали
- Интеграция с металургичните процеси

5. Технологии за извличане на ресурси от AMD

5.1 Технологии за извличане на РЗЕ

Селективно утаяване:

- Използване на фосфатни и оксалатни утайки
- Ефективност зависи от рН и присъствието на други йони

Йонообменни смоли:

- Специализирани смоли за РЗЕ
- Високоселективни процеси за разделяне

Течна екстракция:

- Органофосфорни екстрактанти
- Подходяща за концентриране на РЗЕ

Мембранни процеси:

- Нанофилтрация и обратна осмоза
- Ефективността зависи от състава на подаваемата течност.

5.2 Иновативни биотехнологични подходи

Биомайнинг:

- Използване на *Acidithiobacillus ferrooxidans* за селективно извличане
- Биосорбция чрез микроводорасли
- Генно модифицирани микроорганизми за специфични елементи

Фиторемедиация:



- Хиперакумулиращи растения за концентриране на метали
- Биомаса богата на ценни елементи
- Устойчиво възстановяване на терени

6. Производство на крайни материали

6.1 Високотехнологични продукти

Редкоземни магнити:

- Неодим-желязо-бор (NdFeB) магнити
- Приложения: вятърни турбини, електрически превозни средства

Батерийни материали:

- Литиев карбонат (Li₂CO₃) - батерийно качество
- Кобалтови соли за катодни материали
- Никелови сулфати за Li-ion батерии

Катализатори:

- Церий за автомобилни катализатори
- Редкоземни катализатори за нефтохимическата индустрия

6.2 Строителни материали

Цементозаместващи материали:

- Утилизация на неутрализирани утайки
- Пуцоланова активност на алуминиевите хидроксици
- Намаляване на CO₂ емисиите в строителството

Геополимери:

- Използване на желязо-алуминиеви утайки
- Високоэффективни строителни материали
- Устойчивост на химическа корозия

7. Технологична интеграция и цифровизация

7.1 Интелигентни системи за управление

AI-базирано оптимизиране:

- Прогнозиране на химичния състав на AMD
- Оптимизация на процесите за извличане
- Автоматизирано управление на качеството

Цифрови близнаци:

- Виртуално моделиране на процесите
- Сценарен анализ и оптимизация
- Превантивна поддръжка на оборудването

7.2 Интернет на нещата (IoT) и сензорни мрежи

Мониторинг в реално време:

- Непрекъснато измерване на pH, метали, дебит
- Алармени системи за отклонения
- Автоматично регулиране на процесите

Блокчейн за проследимост:

- Сертифициране на произхода на възстановените материали
- Прозрачност в устойчивостта на доставките

8. Предизвикателства и решения

8.1 Технологични предизвикателства

Селективност на извличането:

Необходимост от високоселективни процеси

Минимизиране на кръстосаното замърсяване



Интеграция на множество технологии

Мащаб на операциите:

Необходимост от централизирано третиране

Партньорства между множество мини

8.2 Нормативни и пазарни бариери

Нормативна рамка:

- Класификация на AMD като отпадък vs. суровина
- Стандарти за качество на възстановените материали
- Опростяване на разрешителните процедури

Пазарно приемане:

- Изграждане на доверие в качеството
- Създаване на дългосрочни договори
- Сертифициране на устойчивостта

9. Бъдещи перспективи

9.1 Технологично развитие

Нанотехнологии:

- Наноматериали за селективна адсорбция
- Мембрани от нанопибри
- Каталитични наночастици

Синтетична биология:

- Инженерни микроорганизми за специфични елементи
- Биосензори за мониторинг
- Биологични фабрики за производство

9.2 Интеграция с възобновяема енергия

Енергийна автономност:

- Соларни паркове на рекултивирани терени
- Използване на геотермална енергия
- Батерийно съхранение от възстановени материали

Power-to-X технологии:

- Електролизни процеси за извличане
- Производство на водород от възобновяема енергия
- Синтез на синтетични горива

10. Примери от реалната практика

Посочени са няколко типични приложения на принципите на кръговата икономика в управлението на AMD, реализирани от водещи международни минни компании:

➤ **Rio Tinto – Boron Mine (Калифорния, САЩ)**

Rio Tinto демонстрира успешно възстановяване на литий от отпадъчни води в борната мина в Калифорния чрез хидрометалургични процеси. Полученият литиев карбонат се използва в производството на батерии.[8]

➤ **BHP – Olympic Dam (Австралия)**

BHP внедрява интегрирано управление на киселинни дренажи с добив на мед, злато, уран и сребро от отпадъчни води, като използва SX/EW технологии, съчетани с рециклиране на вода [9].

➤ **Teck Resources – Trail Operations (Канада)**

Компанията извлича германий и индий от утайки, получени при третирането на AMD чрез мембранни и биологични технологии. Възстановените метали се използват в електрониката и фотоволтаиката [10].



- **Glencore – Северна Европа**
Glencore използва AMD утайки за производство на устойчиви строителни материали (геополимери), намалявайки отпадъците и CO₂ емисиите чрез заместване на клинкер в циментовата индустрия [11].
- **Eramet – Франция и Африка**
Eramet използва сензорни мрежи и AI базирано управление на процесите за извличане на редкоземни елементи и никел от отпадъчни потоци в никеловите си мини [12].
- **Anglo American – Колумбия**
Anglo American използва биочининг и йонообмен за извличане на редкоземни елементи от AMD, генериран в медни мини в Колумбия. Проектът включва и повторна употреба на пречистената вода в процесите по обогатяване. Използвани са биоразградими реагенти за селективност.[13]
- **LKAB – Швеция**
Шведската компания LKAB добива редкоземни елементи, фосфор и флуор от минни отпадъци и AMD чрез хидрометалургия и калцинация. Инсталацията в Malmberget е проектирана да поддържа въглеродна неутралност и минимално водно потребление.[14]
- **MINTEK – Южна Африка**
MINTEK разработи пилотна технология за едновременна преработка на AMD и добив на мед, манган и алуминий. Използвана е комбинация от мембранна сепарация, електролиза и биосорбция.[15]
- **Metso-Outotec – Финландия**
Metso-Outotec внедрява интегрирана схема за добив на цинк и германий от AMD, използвайки ZINCEX и SX технологии. Пречистената вода се използва за рецикулация в инсталациите.[16]
- **Shougang Group – Китай**
Shougang прилага етапен подход за добив на желязо, алуминий и редкоземни елементи от AMD и утайки в желязната мина в Хъбей, използвайки нискоенергийни техники и локална рекултивация.[17]

11. Заключение и препоръки

11.1 Ключови изводи

Кръговата икономика в управлението на AMD предлага реална възможност за трансформиране на екологичен пасив в ресурсен актив. Извличането на редкоземни елементи и критични материали може да допринесе за устойчивото развитие, докато същевременно решава екологичните проблеми. Концепцията за кръговата икономика се стреми да подобри екологичната устойчивост на минните операции чрез рециклиране и повторна употреба на генерираните отпадъци като суровини за производство на нови продукти [5].

11.2 Препоръки за индустрията

1. **Стратегическо планиране:** Интегриране на принципите на кръговата икономика в дългосрочните планове за развитие на мините.
2. **Инвестиции в технологии:** Приоритизиране на инвестициите в технологии за възстановяване на ресурси и цифровизация.
3. **Партньорства:** Развитие на стратегически партньорства с технологични компании и изследователски институти.
4. **Образование и обучение:** Изграждане на компетенции в областта на кръговата икономика и нови технологии.
5. **Политически диалог:** Активно участие в разработването на нормативната рамка за кръговата икономика.

11.3 Бъдещи изследвания

Приоритетните направления за бъдещи изследвания включват:

- Развитие на интегрирани системи за многоелементно извличане



- Изследване на социалното въздействие и приемането от обществото
- Анализ на жизнения цикъл на новите технологии
- Създаване на стандарти за устойчивост и проследимост

Трансформацията към кръгова икономика в управлението на AMD представлява не просто екологична необходимост, а стратегическа възможност за създаване на конкурентни предимства и нови източници на стойност в минната индустрия.

Литература

- [1] G. Simate and S. Ndlovu, "Acid mine drainage: Challenges and opportunities," J. Environ. Chem. Eng., vol. 2, no. 3, pp. 1785–1803, 2014. doi: 10.1016/j.jece.2014.07.021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343714001638>
- [2] A. Middleton, B.C.Hedin, H. Hsu-Kim, „Recovery of Rare Earth Elements from Acid Mine Drainage with Supported Liquid Membranes: Impacts of Feedstock Composition for Extraction Performance.“, 29 Jan 2024 Environ. Sci. Technol.2024 Feb 13;58(6):2998-3006. doi: 10.1021/acs.est.3c06445. Epub 2024 Jan 29.,https://www.researchgate.net/publication/377805945_Recovery_of_Rare_Earth_Elements_from_Acid_Mine_Drainage_with_Supported_Liquid_Membranes_Impacts_of_Feedstock_Composition_for_Extraction_Performance
- [3] Z. Cicek, "Selective Recovery of Rare Earth Elements from Acid Mine Drainage Treatment Sludge," Doctoral Dissertation, West Virginia University, 2023. [Online]. Available: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/11788/>
- [4] León, R., Macías, F., Ruíz, C., Millán-Becerro, R., Pérez□López, R., Ayora, C., & Nieto, J. M. (2025). *Evidence of rare earth elements origin in acid mine drainage from the Iberian Pyrite Belt (SW Spain)*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5029041> .
- [5] Vhahangwele Masindi, S. Foteinis, Phil Renforth, John Ndiritu, Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review July 2022 Ecological Engineering, Ol:10.1016/j.ecoleng.2022.106740. https://www.researchgate.net/deref/https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.1016%2Fj.ecoleng.2022.106740?_t_p=eyJjb250ZXh0lp7lmZpcnN0UGFnZSI6lnB1YmXPY2F0aW9uliwicGFnZSI6lnB1YmXPY2F0aW9uIn19
- [6] Pyrgaki, K., Gemeni, V., Karkalis, C., Koukouzas, N., Koutsovitis, P., & Petrounias, P. (2021). Geochemical Occurrence of Rare Earth Elements in Mining Waste and Mine Water: A Review. *Minerals*, 11(8), 860. <https://doi.org/10.3390/MIN11080860> [7] USGS, "Determination and prediction of rare earth element geochemical associations in acid mine drainage treatment wastes," 2023. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/publication/70238719>
- [8] Rio Tinto, "Rio Tinto borates starts lithium demonstration plant," 2021. [Online]. Available: <https://www.riotinto.com/en/can/news/releases/2022/rio-tinto-starts-demonstration-plant-for-lithium-concentration-in-quebec>
- [9] BHP, "Sustainability Report," 2023. [Online]. Available: <https://www.bhp.com/sustainability/environment>
- [10] Teck Resources, "Metal Recovery Innovation," 2023. [Online]. Available: <https://www.teck.com/documents-and-reports/>
- [11] Glencore, "Circular Economy Initiatives," 2024. [Online]. Available: <https://www.glencore.com/publications>
- [12] Eramet, "Recycling and Circular Economy," 2023. [Online]. Available: <https://www.eramet.com/en/innovation/openmine/>
- [13] Anglo American, "Water management and circularity case study," 2023. [Online]. Available: <https://www.angloamerican.com/sustainable-mining-plan/healthy-environment/water>
- [14] LKAB, "REE and phosphorus recovery from mine waste," 2024. [Online]. Available: https://lkab.com/en/press/lkabs-exploration-results-confirm-potential-for-production-of-phosphorus-mineral-fertiliser-and-rare-earth-elements/?utm_source=chatgpt.com
- [15] S. Ndlovu et al., "Integrated AMD valorisation pilot at MINTEK," 2023. [Online]. Available: https://www.miningreview.com/top-stories/mintek-mine-effluent-treatment-technology/?utm_source=chatgpt.com



- [16] Metso Outotec, “Advanced zinc and germanium recovery” 2023. [Online]. Available: https://www.metso.com/globalassets/industry-pages/metals-refining/hydrometallurgy/outotec_hydrometallurgical_zinc_plants_and_processes_lowres.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [17] Xuemei Wang, Bo Li, Mingtan Zhu, Jie Tang, Guo Liu, JinJin Wang, Yanqun Wang, Jinzhao Hu, Geochemical behavior of rare earth elements in mining-affected waters, southwest China, *Science of The Total Environment*, Volume 957, 2024,177747,ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177747>