

Климова Евгения Всеволодовна, магистр
Алтайский государственный университет
Klimova Evgeniya Vsevolodovna
Altai state university

**ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ
КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В США
ENVIRONMENTALLY ORIENTED TECHNOLOGIES
FOR PROCESSING CRITICAL MINERALS IN THE USA**

Аннотация. В статье анализируются современные экологически ориентированные технологии переработки критически важных полезных ископаемых в США. Рассмотрены гидрометаллургические процессы, биовыщелачивание, использование ионных жидкостей и мембранные методы как альтернативы традиционной пирометаллургии. Подчеркивается их роль в снижении энергозатрат, минимизации токсичных отходов и повышении степени утилизации сырья. Отмечено, что данные инновации становятся основой для формирования новых регуляторных стандартов и инструментом достижения устойчивых целей развития. Цель исследования заключается в выявлении технологических и стратегических преимуществ экологически ориентированных решений и оценке их влияния на промышленную и экологическую политику США.

Abstract. The article analyzes modern environmentally oriented technologies for processing critical minerals in the USA. Hydrometallurgical processes, bioleaching, ionic liquids, and membrane methods are examined as alternatives to traditional pyrometallurgy. Their role in reducing energy consumption, minimizing toxic waste, and increasing raw material utilization rates is highlighted. It is noted that these innovations form the basis for new regulatory standards and serve as instruments for achieving sustainability goals. The purpose of the study is to identify the technological and strategic advantages of environmentally oriented solutions and assess their impact on industrial and environmental policy in the USA.

Ключевые слова: Критически важные полезные ископаемые, экологически ориентированные технологии, гидрометаллургия, биовыщелачивание, ионные жидкости, мембранные методы, США, устойчивое развитие.

Keywords: Critical minerals, environmentally oriented technologies, hydrometallurgy, bioleaching, ionic liquids, membrane methods, USA, sustainable development.

Критически важные полезные ископаемые занимают центральное место в стратегии экономической и технологической безопасности США. Их использование необходимо для производства аккумуляторов, электроники, возобновляемых источников энергии и оборонных технологий. Однако высокая степень зависимости от импорта и экологические издержки традиционных методов переработки обуславливают необходимость внедрения экологически ориентированных технологий [1]. В последние годы в США усилилось внимание к созданию замкнутых циклов производства, применению энергоэффективных и малотоксичных методов извлечения, а также к развитию инновационных решений в области гидро- и биометаллургии. Эти подходы направлены на снижение углеродного следа, минимизацию воздействия на окружающую среду и повышение ресурсной независимости [2]. Цель данной статьи заключается в анализе экологически ориентированных технологий переработки критически важных полезных ископаемых в США и оценке их роли в формировании устойчивых производственных и регуляторных стратегий.

Экологически ориентированные технологии переработки критически важных полезных ископаемых

В рамках трансформации добывающей и перерабатывающей промышленности США ключевое внимание уделяется внедрению технологий, направленных на снижение негативного воздействия на окружающую среду [3]. Наибольшее развитие получили



гидрометаллургические методы, технологии биовыщелачивания, использование ионных жидкостей и мембранные процессы. Эти подходы отличаются меньшей энергоёмкостью, снижением объёмов токсичных отходов и возможностью более полного вовлечения сырья в переработку [4, 5].

Особое значение приобретают биотехнологические решения, где микроорганизмы применяются для селективного извлечения металлов из руд и техногенных источников [6]. Также активно исследуются мембранно-сорбционные методы, которые позволяют разделять ценные компоненты при минимальном использовании агрессивных реагентов. Эти технологии не только обеспечивают повышение эффективности переработки, но и способствуют формированию новых стандартов экологической безопасности [7].

Для наглядного представления систематизации методов переработки критически важных полезных ископаемых и их экологических преимуществ представлен рисунок 1.



Рисунок 1. Экологически ориентированные технологии переработки критически важных полезных ископаемых и их преимущества

Сравнительный анализ технологий переработки критически важных полезных ископаемых показывает, что экологически ориентированные решения позволяют не только повышать эффективность извлечения металлов, но и значительно снижать негативное воздействие на окружающую среду. Гидрометаллургические методы обеспечивают снижение объёмов выбросов по сравнению с пирометаллургией; биовыщелачивание демонстрирует высокую селективность и минимизацию токсичных отходов; использование ионных жидкостей способствует сокращению применения агрессивных растворителей; мембранно-сорбционные методы позволяют экономить ресурсы и обеспечивать замкнутые циклы производства [8]. Таким образом, выбор технологий переработки напрямую влияет на устойчивость добывающего сектора и формирует новые ориентиры экологической политики в США.

Регуляторные и стратегические аспекты внедрения экологически ориентированных технологий

Эффективное внедрение инновационных методов переработки критически важных полезных ископаемых невозможно без соответствующей поддержки со стороны регулирующих органов. В США формируется система нормативных требований, направленных на стимулирование компаний к переходу на энергоэффективные и экологически безопасные технологии [9]. На первый план выходят стандарты по снижению углеродного следа, меры по ограничению токсичных выбросов, а также требования к раскрытию информации об устойчивых практиках [10]. На рисунке 2 отражены ключевые регуляторные механизмы и их влияние на выбор технологических решений в переработке критически важных полезных ископаемых.

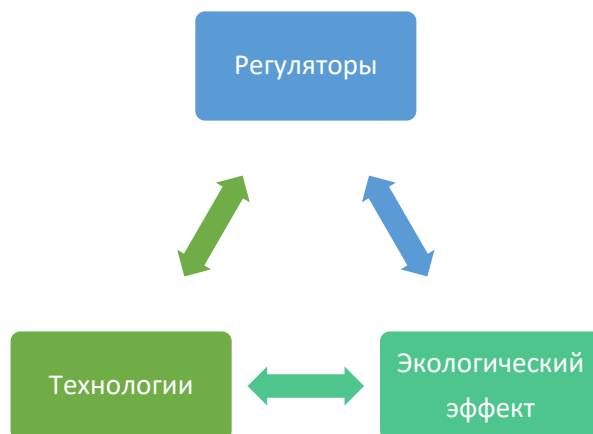


Рисунок 2. Взаимосвязь технологий, регуляторов и экологического эффекта при переработке критически важных полезных ископаемых

Представленная схема демонстрирует циклический характер взаимодействия технологий, регуляторов и экологического эффекта [11]. Регуляторные механизмы выступают центральным элементом, определяя рамки внедрения инновационных решений и задавая ориентиры экологической политики. Технологии, в свою очередь, формируют новые стандарты в переработке критически важных полезных ископаемых, а экологический эффект становится индикатором результативности как технологических, так и нормативных инициатив. Таким образом, взаимосвязь между инновациями и регулированием носит двусторонний характер, обеспечивая устойчивое развитие отрасли.

Заключение

Экологически ориентированные технологии переработки критически важных полезных ископаемых в США становятся стратегическим инструментом снижения негативного воздействия на окружающую среду и повышения ресурсной независимости. Гидрометаллургия, биовыщелачивание, ионные жидкости и мембранные процессы обеспечивают сокращение энергозатрат и отходов, а также создают основу для новых регуляторных стандартов. Их внедрение способствует долгосрочному снижению издержек, расширяет доступ к устойчивому финансированию и усиливает конкурентные позиции американской промышленности.

Список литературы:

1. Reich M., Simon A.C. Critical minerals // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2024. Vol. 53.
2. Kukula I. Technological innovations in the extraction and processing of critical minerals as a factor of USA resource independence // International Journal of Scientific and Research Publication. 2025. Vol. 15 (5). P. 295-298.



3. Can Sener S.E., Thomas V.M., Hogan D.E., Maier R.M., Carbajales-Dale M., Barton M.D., Amy G.L. Recovery of critical metals from aqueous sources // ACS sustainable chemistry & engineering. 2021. Vol. 9. № 35. P. 11616-11634.
4. Khamidov R. Development of sustainable development strategies for energy companies // Professional Bulletin: Economics and Management. 2024. № 4/2024. P. 40-44.
5. Kukula I. Critical mineral deposits in the USA and prospects for their development // International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. 2025. Vol. 5 (1). P. 86-90.
6. Dou S., Xu D., Zhu Y., Keenan R. Critical mineral sustainable supply: Challenges and governance // Futures. 2023. Vol. 146. P. 103101.
7. Stepanov M. Analysis of the impact of frequency converters on equipment energy efficiency // Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies. 2024. Vol. 18. № 3.
8. Gielen D. Critical minerals for the energy transition // International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2021. Vol. 42.
9. Yarov Y. Risk management in construction projects under changing climate and environmental regulations: international practices // Trends in the development of science and education. 2025. № 119 (2). P. 145-149.
10. Vivoda V. Friend-shoring and critical minerals: exploring the role of the minerals security partnership // Energy research & social science. 2023. Vol. 100. P. 103085.
11. Abdullina L. Development of the circular economy in developed countries using the example of the USA: impact on sustainable development strategies // Norwegian Journal of development of the International Science. 2024. № 145. P. 41-45.

