

УДК 504.064.45

Белоусова К.О., студент ХНм-251
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
Belousova K.O, student HNm-251
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

ОЦЕНКА ТЕХНОГЕННОЙ СИТУАЦИИ В КУЗБАССЕ

НАКОПЛЕНИЕ УГОЛЬНЫХ ОТХОДОВ В КУЗБАССЕ И СПОСОБЫ ИХ
УТИЛИЗАЦИИ С ПОЛУЧЕНИЕМ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВACCUMULATION OF COAL WASTE IN KUZBASS AND METHODS OF
THEIR DISPOSAL TO PRODUCE RARE EARTH METALS

Кемеровская область, расположенная на Кузнецком каменноугольном бассейне и, частично, на Канско-Ачинском бурогоугольном бассейне, является ключевым угледобывающим регионом России. Угли Кузбасса отличаются высоким качеством и представлены широким спектром технологических марок – от бурых до антрацитов. На долю региона приходится около 50-60% общероссийской добычи энергетического угля и 75% – коксующегося. По итогам 2024 года объём добычи составил 193,7 млн т. Кузнецкий угольный бассейн насчитывает 164 действующих и 99 строящихся шахт и разрезов. На балансе предприятий находится 20450,22 млн т каменного угля, а общие учтенные Госбалансом запасы Кузнецкого бассейна на 01.01.2025 составляют 54652,0 млн т [1].

Угольные предприятия, расположенные практически по всей территории области, нередко находятся вблизи населенных пунктов и оказывают комплексное негативное воздействие на окружающую среду. Интенсивная добыча и переработка угля сопровождаются истощением природных ресурсов и образованию обширных отвалов, занимающих значительные территории.

Анализ динамики образования и утилизации отходов в Кузбассе выявляет устойчивую негативную тенденцию. Несмотря на снижение объема образования промышленных отходов в 2024 году до 3,3 млрд т (на 18,9% ниже показателя 2023 года), темпы сокращения утилизации оказались более значительными – 33,1% (603,1 млн т) по сравнению за 2023 г. В результате накопление отходов в окружающей среде продолжает расти, усугубляя нагрузку на экосистемы и создавая риски для здоровья населения [1-2].

Значительный вклад в загрязнение региона вносят теплоэлектростанции и котельные. В процессе сжигания угля образуются золошлаковые отходы, в котором содержатся ценные элементы. Ежегодный объем образования золошлаков на территории Кузбасса оценивается в 2,5 млн т. При этом накопленный объем на начало 2022 года достиг 131,3 млн т, что создаёт устойчивую антропогенную нагрузку на экосистемы региона [3-5].

Монополизация редкоземельного рынка Китаем и ужесточение экспортных квот стимулируют поиск альтернативных источников их получения. Одним из таких перспективных направлений является извлечение РЗЭ из угольных отходов. Данная технология приобретает стратегическое значение, поскольку РЗЭ, обладая уникальными магнитными и каталитическими свойствами, являются незаменимыми компонентами для высокотехнологичных отраслей, включая производство процессоров, постоянных магнитов, медицинского диагностического оборудования и спутниковых систем. [6].

Сложный вещественный состав редкоземельных руд обуславливает необходимость применения многостадийных технологических схем, в которых сочетаются различные методы обогащения. Процесс обогащения является ключевым звеном между добычей сырья и извлечением ценных элементов, поскольку он значительно увеличивает долю полезных компонентов в концентрате. Извлечение РЗЭ из пустых пород осуществляется комплексно, с использованием физических и химических методов [7-9].

Основным методом первичного обогащения является гравитационное обогащение, основанное на разнице плотностей минералов, однако данный метод имеет ограниченную эффективность. Согласно работе Хонакера [10], возможность предварительного концентрирования РЗЭ этим способом минимальна по причине сверхмелкого размера редкоземельных минералов. Для высвобождения РЗЭ из силикатной матрицы требуется тонкий помол угольной золы, однако этот процесс сопряжен со значительными энергозатратами, что существенно снижает общую энергоэффективность технологии, а также из-за низкой эффективности обогащения тонких классов руды потери полезных компонентов с мелкими (шламовыми) фракциями в хвостах могут достигать 50% [9, 11].

Пенная флотация является более перспективным методом, основанная на избирательной гидрофобности частиц, которые прилипают к пузырькам воздуха. Её эффективность зависит от размера крупиц (оптимальный диапазон 40-100 мкм) и уровня pH (7,5-11,5), что обеспечивает высокую селективность процесса. По сравнению с другими методами, такими как экстракция, в которой как правило, состоит из сотен стадий, где используются опасные органические растворители и токсичные экстрагенты, такие как ди-(2-этилгексил)фосфорная кислота, и дороговизной в промышленных масштабах, пенная флотация обладает существенными преимуществами, включая меньший расход воды и энергопотребление, простоту эксплуатации, снижение объёма шламов и эксплуатационных затрат, а также отсутствие токсичных органических растворителей [12].

Ионная и осадочная флотация представляют собой экологичную альтернативу традиционным методам извлечения и очистки РЗЭ, принцип которого схож с пенной флотацией, но работают с растворёнными ионами, а не с твёрдыми частицами. При ионной флотации целевые ионы адсорбируются непосредственно на поверхностно-активных веществах, стабилизирующих пузырьки. В случае осадочной флотации ионы предварительно осаждаются, а затем образующиеся частицы прикрепляются к пузырькам. В обоих процессах обогащенный материал всплывает в виде пены для дальнейшего сбора [12].

Также эффективным методом служит ионообменная технология с применением смол, способных к регенерации, для извлечения катионов РЗЭ из кислых растворов после выщелачивания. Исследования демонстрируют перспективность карбоксильного катионита КБ-4 гелевого типа, проявляющего более высокую сорбционную емкость в сравнении с сульфокатионитами. Однако проблемой остается присутствие ионов железа и алюминия, снижающих эффективность процесса. Это обуславливает необходимость оптимизации параметров процесса для обеспечения эффективного разделения ионов-примесей и целевых редкоземельных элементов [13].

Гидрометаллургический метод извлечения металлов включает три основных этапа: выщелачивание с переводом целевых компонентов в раствор с помощью кислот или галогенидов; очистка раствора от примесей методами экстракции, адсорбции или ионного обмена; и извлечение металлов посредством электроосаждения, химического восстановления или кристаллизации. Наиболее эффективны сильные кислоты (соляная, серная, азотная), обеспечивающие высокую степень извлечения металлов. Однако их ключевой недостаток – отсутствие селективности, приводящее к совместному растворению примесей (железа и алюминия), которое ведет к загрязнению растворов РЗЭ [14], что требует дополнительных стадий очистки. А также образование больших объемов кислых отходов и необходимость энергоемкой предварительной подготовки сырья [15].

Биовыщелачивание – экологичная альтернатива для переработки бедных руд, использующая микроорганизмы для растворения металлов. Технология отличается мягкими условиями и низкой стоимостью процесса, что делает её перспективной для работы с низкосортным сырьём и отходами. Однако применение в крупных масштабах по-прежнему сталкивается с серьёзными проблемами: низкая скорость процесса, высокая стоимость культивирования микроорганизмов и, что наиболее важно, недостаточная изученность механизмов взаимодействия микробов с минералами РЗЭ [16].

Таким образом, накопление угольных отходов в Кузбассе создает серьёзную экологическую проблему, обусловленную постоянным ростом объемов отходов и возрастающей антропогенной нагрузкой на экосистемы. Одним из перспективных решений является переработка этих отходов с извлечением РЗЭ. Для достижения максимальной эффективности необходимы комбинированные технологические подходы, а также разработка новых и усовершенствование существующих методов переработки.

Список литературы

1. Доклад «О состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2024 году». Кемерово, 2025, 205 с. Режим доступа URL: <https://eco.kemobl.ru/informaciya/doklady-o-sostoyanii-okruzhayushej-sredy/> (дата обращения 20.10.2025).
2. Белоусова, К.О. Проблемы отходов углепереработки и пути их решения / К.О. Белоусова, А.А. Мальцева // II Всероссийская научно-практическая конференция студентов и школьников «Экология и безопасность жизнедеятельности». – 2024. – С. 1-5.

3. Бюллетень «Об утверждении комплексной региональной программы «Обращение с отходами производства и потребления, в том числе твердыми коммунальными отходами, Кемеровской области – Кузбасса» на 2023 – 2030 годы». Кемерово, 2023. Режим доступа URL: <https://bulleten-kuzbass.ru/bulletin/318901> (дата обращения 20.10.2025).

4. Ветошкин, А. Г. Технологии защиты окружающей среды от отходов производства и потребления : учебное пособие для вузов / А. Г. Ветошкин. — 5-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2025. — 304 с.

5. Анализ отходов угледобычи, углепереработки и углеобогащения месторождений кузнецкого угольного бассейна / Т. Г. Черкасова, Т. G. Cherkasova, Е. В. Черкасова [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2022. — № 6 (154). — С. 59-66.

6. Tanushree Dutta, Ki-Hyun Kim, Minori Uchimiya, Eilhann E Kwon. Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. *Environmental Research*. 2016; 150(26):182-190. (In Eng.) doi: 10.1016/j.envres.2016.05.052.

7. Суслина, Л. А. Обогащение полезных ископаемых : учебное пособие / Л. А. Суслина. — Кемерово : КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2020. — 194 с.

8. Ariuntuya Battsengel, Altansukh Batnasan, Ariunbolor Narankhuu, Kazutoshi Haga, Yasushi Watanabe, Atsushi Shibayama. Recovery of light and heavy rare earth elements from apatite ore using sulphuric acid leaching, solvent extraction and precipitation. *Hydrometallurgy* 179. May 2018. doi: 10.1016/j.hydromet.2018.05.024.

9. Доронин Н.А., Сафронов Е.К., Чистов Л.Б., Комаров О.К., Олимпий Константинovich Переработка руд редких металлов / О.К. Комаров, Л.Б. Чистов, Н.А. Доронин, Е.К. Сафронов]. - Москва : Недра, 1977. - 120 с. : ил. ; 21 см. - Список лит.: с. 114-119 (141 назв.)

10. R. Honaker, J. Hower, C. Eble, J. Weisenfluh, J. Groppo, M. Rezaee. A Comprehensive Review of Rare Earth Elements Recovery from Coal-Related Materials. *Minerals* 2020, 10(5), 451. doi: <https://doi.org/10.3390/min10050451>

11. Bennet Sam Thomas, Piet Dimitriadis, Chandan Kundu, Sai Sree Varsha Vuppaladiyam, R.K. Singh Raman, Sankar Bhattacharya. Extraction and separation of rare earth elements from coal and coal fly ash: A review on fundamental understanding and on-going engineering advancements. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Volume 12, Issue 3, June 2024, 112769. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112769>. doi: 10.1016/j.mineng.2020.106585

12. Sharath Shetty, Irina V. Chernyshova, Sathish Ponnurangam. Foam flotation of rare earth elements by conventional and green surfactants. *Minerals Engineering* 158:106585

13. Погодаева М.А. Выбор ионообменной смолы для извлечения РЗЭ из сложных растворов при переработке катализатора крекинга нефти / М.А. Погодаева, А.О. Богданова, Л.Н. Адеева. // Вестник Омского университета. — 2020. — Т. 25, №2. — с. 39-43.

14. Белоусова, К.О. Извлечение лантана из отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская» методом перколяционного выщелачивания / К.О. Белоусова, Н.А. Золотухина // Россия молодая: Сборник материалов XVII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева». — Кемерово, 2025. — С. 1-5.

15. S. Peelman, D. Kooijman, J. Sietsma, Y. Yang. Advancements in hydrometallurgical processes for rare earth elements recovery from coal ash. *Journal of Sustainable Metallurgy* 4(Part 1). 2018. doi: 10.1007/s40831-018-0178-0.

16. Shulan Shi, Jinhe Pan, Bin Dong, Weiguang Zhou, Changchun Zhou. Bioleaching of Rare Earth Elements: Perspectives from Mineral Characteristics and Microbial Species. *Minerals* 2023, 13(9), 1186. doi: 10.3390/min13091186

References

1. The report "On the state and protection of the environment of the Kemerovo region – Kuzbass in 2024". Kemerovo, 2025, 205 p. URL access mode: <https://eco.kemobl.ru/informaciya/doklady-o-sostoyanii-okruzhayushej-sredy/> (date of appeal 20.10.2025).

2. Belousova, K.O. Problems of coal refining waste and ways to solve them / K.O. Belousova, A.A. Maltseva // II All-Russian Scientific and practical Conference of students and schoolchildren "Ecology and life safety". - 2024. – pp. 1-5.

3. Bulletin "On the approval of the integrated regional program "Management of industrial and consumer waste, including solid municipal waste, Kemerovo region - Kuzbass" for 2023-2030". Kemerovo, 2023. URL access mode: <https://bulleten-kuzbass.ru/bulletin/318901> (accessed 20.10.2025).

4. Vetoshkin, A. G. Technologies for environmental protection from industrial and consumer waste : a textbook for universities / A. G. Vetoshkin. — 5th ed., revised. — St. Petersburg : Lan, 2025. — 304 p.

5. Analysis of waste from coal mining, coal refining and coal enrichment of deposits of the Kuznetsk coal basin / T. G. Cherkasova, T. G. Cherkasova, E. V. Cherkasova [et al.] // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. — 2022. — № 6 (154). — Pp. 59-66.

6. Tanushree Dutta, Ki-Hyun Kim, Minori Uchimiya, Eilhann E Kwon. Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. *Environmental Research*. 2016; 150(26):182-190. (In Eng.) doi: 10.1016/j.envres.2016.05.052.

7. Suslina, L. A. Mineral processing : a textbook / L. A. Suslina. Kemerovo : KuzSTU named after T.F. Gorbachev, 2020. 194 p

8. Ariuntuya Battsengel, Altansukh Batnasan, Ariunbolor Narankhuu, Kazutoshi Haga, Yasushi Watanabe, Atsushi Shibayama. Recovery of light and heavy rare earth elements from apatite ore using sulphuric acid leaching, solvent extraction and precipitation. *Hydrometallurgy* 179. May 2018. doi: 10.1016/j.hydromet.2018.05.024.

9. Doronin N.A., Safronov E.K., Chistov L.B., Komarov O.K., Olimpiy Konstantinovich Processing of rare metal ores / O.K. Komarov, L.B. Chistov, N.A. Doronin, E.K. Safronov]. Moscow : Nedra Publ., 1977. 120 p. : ill. ; 21 cm. - List of lit.: pp. 114-119 (141 titles)

10. R. Honaker, J. Hower, C. Eble, J. Weisenfluh, J. Gropo, M. Rezaee. A Comprehensive Review of Rare Earth Elements Recovery from Coal-Related Materials. *Minerals* 2020, 10(5), 451. doi: <https://doi.org/10.3390/min10050451>

11. Bennet Sam Thomas, Piet Dimitriadis, Chandan Kundu, Sai Sree Var-sha Vuppaladiyam, R.K. Singh Raman, Sankar Bhattacharya. Extraction and separation of rare earth elements from coal and coal fly ash: A review on fundamental understanding and on-going engineering advancements. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Volume 12, Issue 3, June 2024, 112769. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112769>. doi: 10.1016/j.mineng.2020.106585

12. Sharath Shetty, Irina V. Chernyshova, Sathish Ponnuram. Foam flotation of rare earth elements by conventional and green surfactants. *Minerals Engineering* 158:106585
13. Pogodaeva M.A. The choice of ion-exchange resin for the extraction of REE from complex solutions during the processing of an oil cracking catalyst / M.A. Pogodaeva, A.O. Bogdanova, L.N. Adeeva. // *Bulletin of Omsk University*. – 2020. – Vol. 25, No. 2. – pp. 39-43.
14. Belousova, K.O. Extraction of lanthanum from coal enrichment waste of JSC Central Processing Plant Berezovskaya by percolation leaching / K.O. Belousova, N.A. Zolotukhina // *Molodaya Russia: Collection of materials of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists with International Participation / Kuzbass State Technical University. T. F. Gorbachev University*". Kemerovo, 2025. pp. 1-5.
14. S. Peelman, D. Kooijman, J. Sietsma, Y. Yang. Advancements in hydrometallurgical processes for rare earth elements recovery from coal ash. *Journal of Sustainable Metallurgy* 4(Part 1). 2018. doi: 10.1007/s40831-018-0178-0.
16. Shulan Shi, Jinhe Pan, Bin Dong, Weiguang Zhou, Changchun Zhou. Bioleaching of Rare Earth Elements: Perspectives from Mineral Characteristics and Microbial Species. *Minerals* 2023, 13(9), 1186. doi: 10.3390/min13091186