

УДК 622.772

**ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ**

**В. А. Чантурия, В. Г. Миненко, А. Л. Самусев,
Е. В. Копорулина, Г. А. Кожевников**

*Институт проблем комплексного освоения недр им. акад. Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: andrey63vzm@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Представлены результаты исследования процесса азотнокислотного выщелачивания редкоземельных элементов (РЗЭ) из золошлаковых отходов. Методами РЭМ и РФА изучены морфология и текстурно-структурные свойства поверхности микросфер золошлаковых отходов. Экспериментально установлены рациональные параметры азотнокислотного выщелачивания РЗЭ, обеспечивающие максимальное извлечение РЗЭ на уровне 50.4 %: температура 130 °С, концентрация кислоты 7.2 М, продолжительность 180 мин, частота перемешивания минеральной суспензии 500 мин⁻¹. Кинетика выщелачивания РЗЭ соответствует внутридиффузионной модели усадки ядра. Установлена возможность интенсификации процесса выщелачивания РЗЭ за счет предварительной обработки золошлаковых отходов мощными электромагнитными импульсами и ультразвуком, обеспечивающих интенсивное разрушение алюмосиликатных микросфер и, как следствие, повышение извлечения РЗЭ на 3.8 – 18.2 % при последующем выщелачивании.

Золошлаковые отходы, редкоземельные элементы, выщелачивание, рациональные параметры, кинетика, энергетические воздействия

DOI: 10.15372/FTPRPI20220211

Интенсивный рост мирового потребления редкоземельных элементов (Sc, Y и лантаноиды) в качестве критически важных компонентов для многих высокотехнологичных производств (атомная промышленность, радиоэлектроника, авиастроение, космическая отрасль, “зеленая” энергетика и др.) в сочетании с ограниченностью запасов основных минеральных ресурсов (месторождения бастнезита, монацита и ксенотима) обуславливает необходимость разработки и внедрения технологий переработки вторичных ресурсов РЗЭ — промышленных отходов (фосфогипс, бокситовый остаток, золошлаковые отходы, фосфатные хвосты), минерального сырья с низким содержанием РЗЭ (ионно-адсорбированные глины, апатиты, эвдиалитовые руды, океанические отложения) и отработанных материалов (магниты, батареи, люминофоры, лампы освещения и др.) [1]. Значительные объемы запасов, развитие техники и технологий

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 (соглашение 075-15-2020-802).

добычи и переработки полезных ископаемых позволяют повысить экономическую целесообразность переработки вторичных ресурсов РЗЭ. Вовлечение в переработку промышленных отходов и отработанных материалов дает возможность не только получить дополнительный источник РЗЭ, но и снизить нагрузку на экологические системы, вызванную наличием опасных примесей (тяжелых металлов и радиоактивных элементов). Высокая чистота получаемых продуктов, необходимая для большинства высокотехнологичных производств, многостадийность процессов выщелачивания, сорбции и экстракции РЗЭ приводит к увеличению их себестоимости и обуславливает необходимость оптимизации процессов переработки вторичных ресурсов РЗЭ. Применительно к выщелачиванию руд и концентратов вопрос изучения кинетики и механизма растворения РЗЭ является фундаментальным аспектом проектирования и оптимизации промышленных процессов. Повышение эффективности выщелачивания и извлечения ценных компонентов можно осуществлять путем обеспечения оптимальных параметров их растворения, избегая реакций получения побочных продуктов [1].

К перспективным дополнительным источникам РЗЭ можно отнести золошлаковые отходы теплоэлектростанций [2, 3]. Они — побочный продукт, образующийся при сжигании каменных и бурых углей, годовой объем которых составляет 600–800 млн т во всем мире, с содержанием РЗЭ 100–1000 г/т [4, 5]. По данным Министерства энергетики РФ, в золоотвалах российских ТЭЦ накоплено 1070 млн т золошлаков, тогда как вторичной переработке подвергается всего 20–25 % от общего объема [6, 7]. Золошлаковые отходы содержат опасные для окружающей среды микроэлементы: мышьяк, бор, кадмий, фтор, шестивалентный хром, ртуть, свинец, селен [8, 9]. Разработаны десятки технологий выщелачивания золошлаковых отходов (в основном кислотного растворения) и предложены различные методы интенсификации процессов извлечения РЗЭ [10–19].

В последние годы в ИПКОН РАН научно обосновано и апробировано применение энергетических методов воздействия на минеральные суспензии (ультразвук, электрохимическая обработка, высоковольтные электромагнитные импульсы и др.), обеспечивающих повышение эффективности вскрытия, диспергирования минеральных комплексов и извлечения РЗЭ в раствор [20, 21].

Цель настоящей работы — исследование влияния различных параметров (продолжительность, температура, концентрация кислоты) и предварительных энергетических воздействий (МЭМИ, ультразвук и доизмельчение) на кинетику и эффективность кислотного выщелачивания редкоземельных элементов из золошлаковых отходов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Материал исследований — золошлаковые отходы ТЭЦ-9 (г. Иркутск) класса крупности –200 мкм. Основные компоненты золошлаковых отходов по данным атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС) с предварительным сплавлением со смесью боратов лития (Agilent 725 ICP-OES, Agilent Technologies) представлены в табл. 1. Суммарное содержание редкоземельных элементов составляет 605 г/т. Основные редкоземельные элементы (Ce, Nd, Y, La) показаны на рис. 1.

ТАБЛИЦА 1. Химический состав золошлаковых отходов, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	ΣРЗЭ	ZrO ₂
54.18	31.25	5.35	2.01	1.14	0.69	0.67	0.13	0.06	0.06	0.05

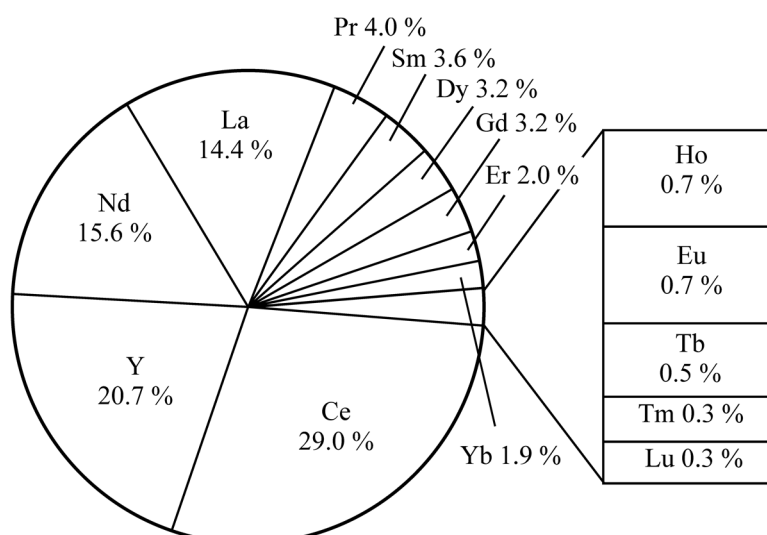


Рис. 1. Распределение редкоземельных элементов в исходных золошлаковых отходах

Выщелачивание золошлаковых отходов осуществлялось в автоклаве серии TOP 120 (TOP INDUSTRY). Условия выщелачивания: навеска 60 г; концентрация азотной кислоты 2.4–9.6 М; температура 80–140 °С; продолжительность 60–300 мин; соотношение Т : Ж = 1 : 10; давление 0.04 МПа; интенсивность перемешивания 550 мин⁻¹. Предварительная УЗ-обработка в воде (5, 10, 20 и 30 мин) и в растворе кислоты 7.2 М (10 мин) проводилась диспергатором (МЭФ-15, МЭЛФИЗ) мощностью 600 Вт и рабочей частотой 22 кГц при Т : Ж = 1 : 10.

Образцы МЭМИ обрабатывались на воздухе с использованием генератора мощных высоковольтных электромагнитных импульсов (ИПКОН РАН, г. Москва; ООО НПП ФОН, г. Рязань) при следующих параметрах: тип импульса — видеоимпульс; длительность переднего фронта импульса 3–8 нс; длительность импульса 30–50 нс; амплитуда напряжения импульса не менее 70 кВ; напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве не менее 10⁷ В/м; расстояние между электродами 7 мм; частота повторения импульсов 375 Гц; продолжительность обработки золошлаковых отходов 60 с; влажность пробы 30 % масс. После выщелачивания минеральную суспензию центрифугировали (UC-1536 E, ULAB) в течение 10 мин при 3000 об./мин для разделения твердой и жидкой фаз. Твердую фазу промывали дистиллированной водой и высушивали 24 ч при температуре 80 °С.

Анализ морфологии и структурно-химических свойств поверхности золошлаковых отходов выполнен с помощью сканирующей электронной микроскопии (РЭМ) (LEO 1420VP, Carl Zeiss), элементный и фазовый составы определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) (Agilent 725 ICP-OES, Agilent Technologies) и рентгеновской дифрактометрией (РФА) (XRD 7000, Shimadzu, АДП-2, НПО “Буревестник”) в Центре коллективного пользования ИПКОН РАН “Аналитический центр изучения природного вещества при комплексном освоении недр”. Извлечение элементов рассчитывалось как

$$\varepsilon = \frac{\beta m_1}{\alpha m} \cdot 100,$$

где α , β — содержание элемента в исходной навеске и в кеке; m , m_1 — масса исходной навески и кека.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика золошлаковых отходов. Исходные пробы золошлаковых отходов представлены сферическими частицами и их фрагментами (рис. 2). На изображениях в отраженных электронах (BSE) ясно различимы два типа микросфер (рис. 2а) — преобладающие серые (с малой величиной среднего атомного номера Z) и яркие, находящиеся в подчиненных количествах (с большей величиной Z). Серые в BSE частицы (рис. 2б) представлены частично раскристаллизованным кремний-глиноземистым стеклом, образовавшимся в результате плавления глинистого компонента исходных углей. По их среднему валовому составу можно утверждать, что глинистое вещество в углях составляют преимущественно минералы группы каолина, а не смектиты или гидрослюды. При остывании подобные Si-Al стекла быстро раскристаллизуются с образованием тонковолокнистых агрегатов муллита. Поскольку отношение $Al:Si$ в муллите выше, чем в каолине, остаточное после кристаллизации муллита стекло обогащается кремнием и обедняется алюминием. Также оно обогащается всеми компонентами расплава, не вошедшими в состав муллита. С этим связана возможность возникновения локальных концентраций некогерентных элементов Mg, Ca, REE, Ba, K и др. и их минералов-концентраторов.

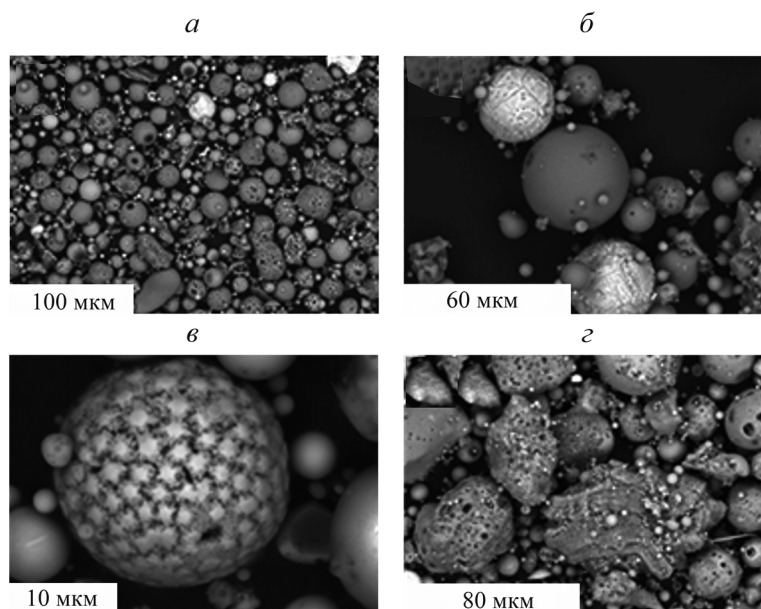


Рис. 2. РЭМ-изображения исходных золошлаковых отходов

Яркие в BSE микросферы состоят из различных оксидов железа (иоцит, магнетит, гематит, маггемит) и представляют собой продукты горения/окисления железистых компонентов углей — пирита/марказита, железистых карбонатов, сидерита (рис. 2в). Кроме того, отмечено значительное количество сильнопористых агрегатов микросфер и шлакоподобных частиц неправильной формы. Очевидно, формирование последних происходило из вещества, отличающегося повышенной кремнеземистостью и более высокой вязкостью расплава, не позволяющей ему при остывании формировать сферические частицы.

По данным рентгенофазового анализа основными кристаллическими фазами проб золошлаковых отходов являются кварц и муллит (рис. 3). Широкое гало в области малых и средних углов рентгendifракционного спектра свидетельствует о частичной раскристаллизации расплава и присутствии значительного количества аморфного вещества.

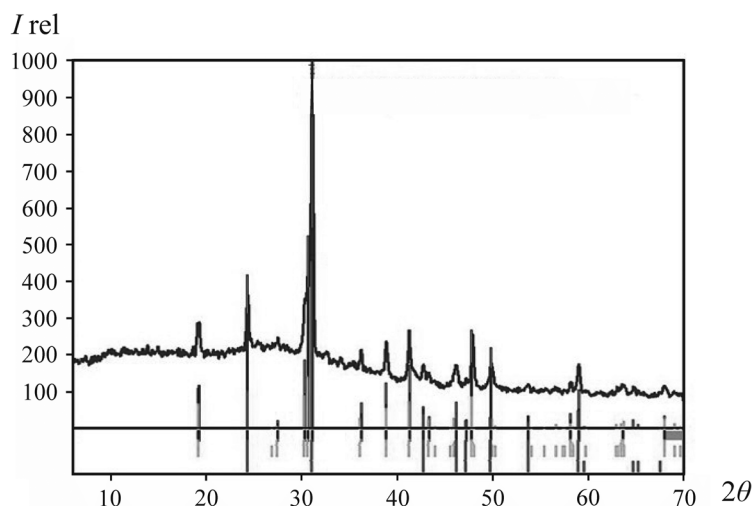


Рис. 3. Рентгенограмма образцов золошлаковых отходов

Влияние параметров выщелачивания на извлечение РЗЭ. На рис. 4а показаны зависимости извлечения основных редкоземельных элементов Ce, La, Nd и Y от продолжительности выщелачивания золошлаковых отходов. Извлечение Ce, La, Nd и Y за первые 60 мин составляет 32.95, 44.65, 38.13 и 65.52 % соответственно. Увеличение продолжительности выщелачивания до 180 мин повышает уровень извлечения Ce, La, Nd и Y на 3.6–10.9 % до 43.9 %, 48.3, 45.6 и 64.0 % соответственно, а увеличение до 300 мин — уровень извлечения Ce, La, Nd и Y на 0.7–2.9 % до 45.9 %, 51.2, 46.6 и 64.7 % соответственно. Поскольку основные редкоземельные элементы демонстрируют сходные зависимости извлечения, далее в работе приводятся данные по извлечению их суммы Σ РЗЭ.

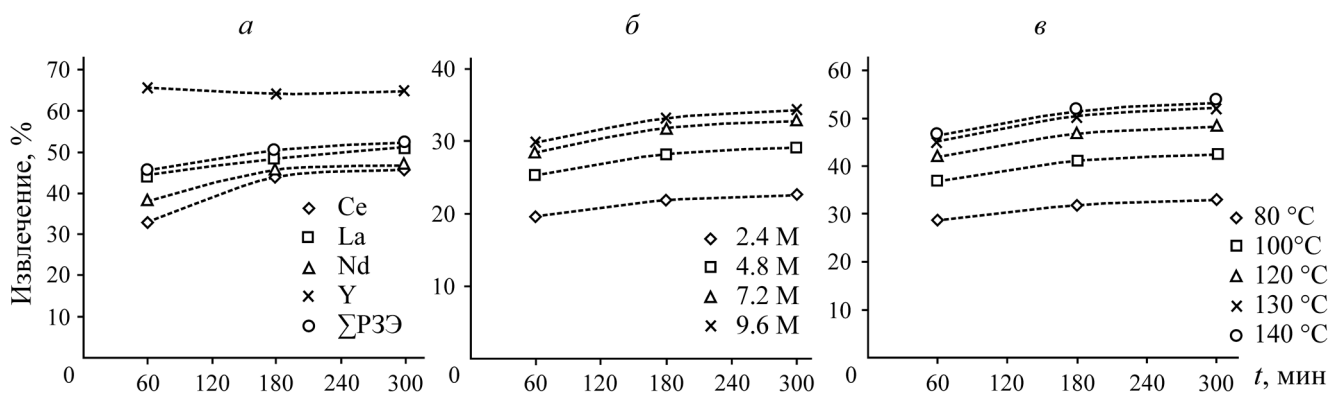


Рис. 4. Влияние продолжительности выщелачивания на извлечение РЗЭ: а — при температуре 130 °C и концентрации HNO_3 7.2 М; б — при температуре 80 °C для различных концентраций HNO_3 ; в — при концентрации HNO_3 7.2 М для различных температур

Результаты экспериментов по исследованию зависимости извлечения суммы редкоземельных элементов от концентрации азотной кислоты представлены на рис. 4б. Повышение концентрации азотной кислоты с 2.4 до 4.8 М увеличивает извлечение РЗЭ на 6.5 % с 22.6 до 29.1 %; с 4.8 до 7.2 М — на 3.8 % с 29.1 до 32.9 %. Последующее повышение концентрации азотной кислоты до 9.6 М не оказывает существенного влияния на процесс выщелачивания: прирост извлечения РЗЭ составляет только 1.4 % (с 32.9 до 34.3 %). Дальнейшие исследования проводились при концентрации азотной кислоты 7.2 М.

На рис. 4в приведены зависимости извлечения суммы РЗЭ от температуры выщелачивания. Повышение температуры с 80 до 100 °С увеличивает извлечение РЗЭ на 9.6 % с 32.9 до 42.5 %; со 100 до 120 °С — на 5.8 % с 42.5 до 48.3 %; со 120 до 130 °С — на 3.9 % с 48.3 до 52.2 %. Увеличение температуры до 140 °С существенно не влияет на выщелачивание: прирост извлечения РЗЭ составляет только 1.0 % с 52.2 до 53.2 %.

На основе экспериментальных данных установлены рациональные параметры выщелачивания золошлаковых отходов: температура 130 °С, концентрация азотной кислоты 7.2 М, продолжительность 180 мин, обеспечивающие извлечение РЗЭ на уровне 50.4 %. Анализ снимков РЭМ кеков выщелачивания золошлаковых отходов (рис. 5) не выявил значительного изменения морфологии поверхности микросфер и образования новых фаз.

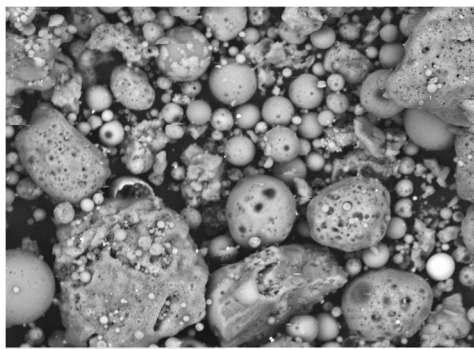


Рис. 5. РЭМ-изображения золошлаковых отходов после выщелачивания (температура 130 °С, концентрация HNO_3 7.2 М, продолжительность 180 мин)

Кинетика выщелачивания РЗЭ. Для понимания механизма растворения исследована кинетика выщелачивания суммы редкоземельных элементов из золошлаковых отходов с использованием данных, полученных при различных температурах. Предполагая участие сферических частиц твердого образца в процессе выщелачивания, этап, определяющий скорость процесса, выявляли посредством сравнения кинетических данных с моделями диффузионной и химически контролируемой усадки ядра [22]. Данные модели описываются следующими уравнениями:

— для диффузионной области

$$1 - \frac{2}{3}x - (1-x)^{2/3} = K_d t = K \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)t, \quad (1)$$

— для химической контролируемой области

$$1 - (1-x)^{1/3} = K_r t = K \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)t. \quad (2)$$

В кинетических экспериментах энергия активации рассчитывается по уравнению Аррениуса:

$$K = K_0 e^{-E_a/RT}, \quad (3)$$

где x — доля извлеченного компонента; K_d , K_r — константы скорости, рассчитанные по уравнениям (1) и (2) соответственно; t — время реакции; K — кинетическая константа; T — абсолютная температура; K_0 — постоянная Аррениуса; R — универсальная постоянная газа; E_a — энергия активации [23, 24].

На рис. 6 показаны взаимосвязи между экспериментальными данными, полученными на основе предложенных кинетических моделей, и временем выщелачивания при различных температурах.

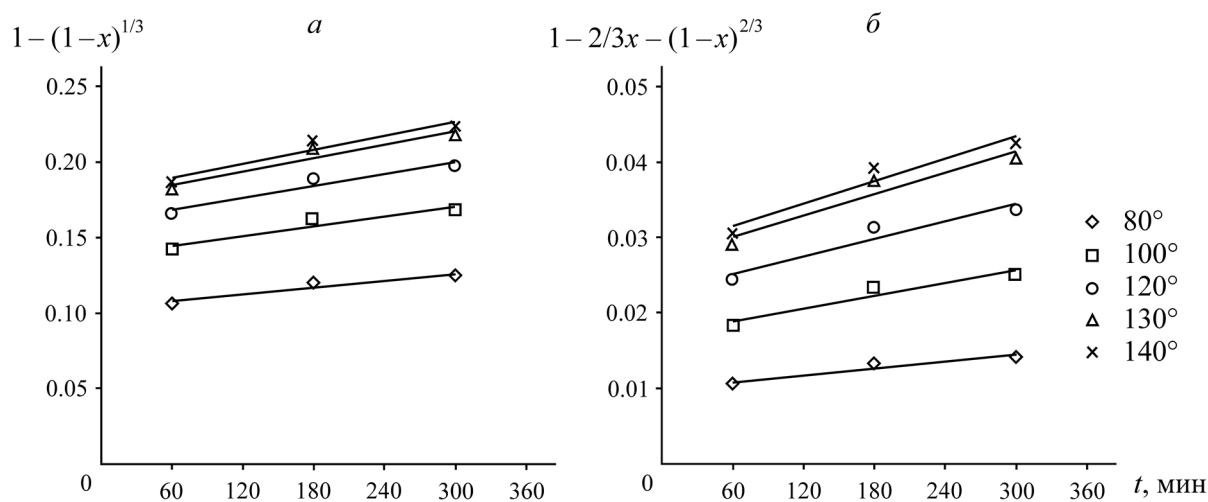


Рис. 6. Кинетический график растворения Σ РЗЭ: а — контролируемая химическая реакция; б — диффузия

Значения кажущихся констант скорости K_r и K_d (табл. 2) рассчитывали как наклоны прямых линий, полученных на рис. 6.

ТАБЛИЦА 2. Значения K_r , K_d и коэффициенты корреляции R^2 при разных температурах

Температура, °C	K_r	K_d	R^2	
			K_r	K_d
80	0.00008	0.00002	0.9231	0.9327
100	0.00010	0.00003	0.9242	0.9325
120	0.00010	0.00004	0.9250	0.9320
130	0.00010	0.00005	0.9257	0.9313
140	0.00020	0.00005	0.9259	0.9303

Более высокие коэффициенты корреляции $K_d = 0.9303 - 0.9327$ предполагают, что в данных условиях при выщелачивании РЗЭ преобладает механизм, контролируемый внутренней диффузией. При этом полученные достаточно высокие значения R^2 для обеих моделей подтверждают вероятность перехода исходных РЗЭ в золошлаковые отходы по двум известным механизмам [25 – 30]:

- 1) осаждение испарившихся РЗЭ при горении исходных углей на поверхности образующихся частиц золы уноса;
- 2) сплавление и распределение РЗЭ с зольными компонентами угля, таких как муллит, кварц и аморфные фазы.

Вероятно, на ранних стадиях выщелачивания (до 60 мин) растворяются РЗЭ, осевшие на поверхности золы уноса, приводя к резкому увеличению константы скорости. После этого реакция внутри частиц золошлаковых отходов кинетически медленная, что обусловлено низкой растворимостью РЗЭ, связанных с силикатной фазой [29]. Идентификация форм нахождения РЗЭ чрезвычайно важна для прогнозирования не только доминирующих механизмов, но и изменения кинетического поведения системы выщелачивания золошлаковых отходов.

Энергия активации E_a реакции выщелачивания рассчитывалась по уравнению Аррениуса (3), выраженной в виде

$$\ln K_d = \ln K_0 - \frac{E_a}{RT}.$$

Зависимость $\ln K_d$ от $1/T$ дает прямую линию (рис. 7) с наклоном $-E_a/RT$ и точкой пересечения $\ln K_0$. В процессе, контролируемом диффузией, энергия активации составляет < 25 кДж/моль, энергия активации для химически контролируемого процесса — > 40 кДж/моль [31].

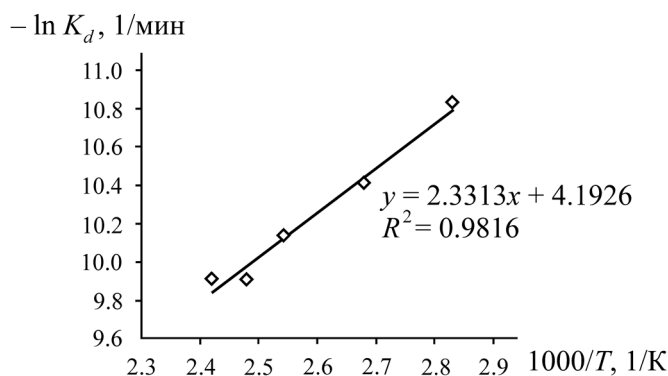


Рис. 7. Диаграмма Аррениуса для выщелачивания РЗЭ из золошлаковых отходов

Рассчитанная энергия активации E_a реакции ($E_a/R = 2.3313$), равная 19.4 кДж/моль, подтверждает, что скорость растворения золошлаковых отходов контролируется внутренней диффузией, т. е. процесс растворения описывается внутридиффузионной кинетической моделью. Также вычислена постоянная Аррениуса:

$$\ln K_0 = 4.1926 \frac{1}{\text{мин}} \rightarrow K_0 = 1.03 \frac{1}{\text{с}}.$$

Модель кинетики выщелачивания золошлаковых отходов для данных условий экспериментов можно описать уравнением

$$1 - \frac{2}{3}x - (1-x)^{2/3} = 1.03 \exp\left(-\frac{19.4}{RT}\right) t.$$

Влияние предварительных энергетических воздействий на выщелачивание РЗЭ. На рис. 8 представлены РЭМ-изображения образцов золошлаковых отходов после предварительной обработки МЭМИ и ультразвуком. Основной характерной особенностью проб после обработки как МЭМИ, так и ультразвуком является наличие различного количества поврежденных, расколотых микросфер, что должно обеспечить интенсификацию взаимодействия выщелачивающего агента с частицами.

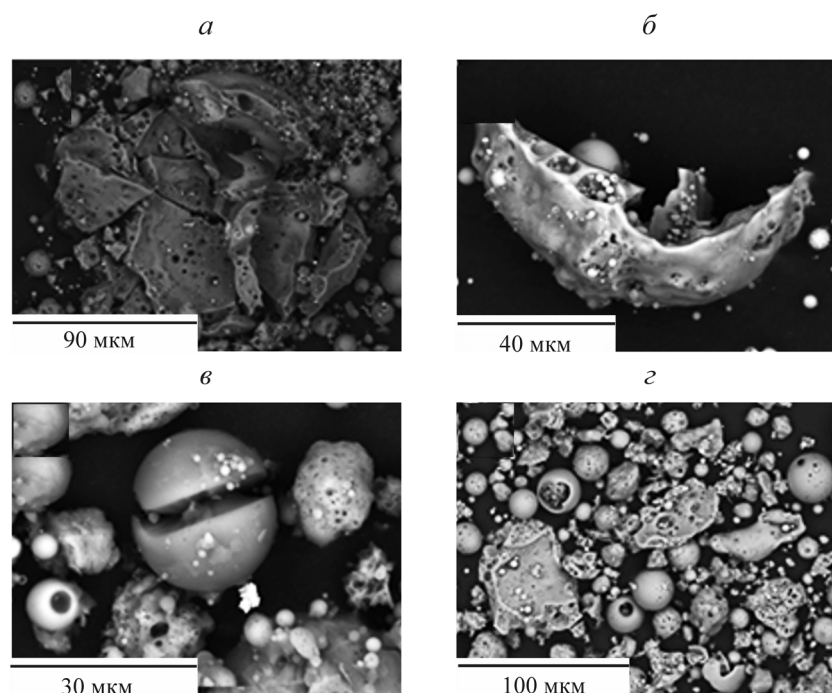


Рис. 8. Изображения золошлаковых отходов после предварительных воздействий: *а, б* — после МЭМИ; *в, з* — после ультразвука

В табл. 3 приведены результаты выщелачивания золошлаковых отходов после предварительных энергетических воздействий. Обработка мощными электромагнитными импульсами в течение 30–90 с повышает извлечение $\Sigma\text{РЗЭ}$ на 1.0–3.8 % с 50.4 до 51.4–54.2 %. Предварительное воздействие ультразвуковых воздействий на водную суспензию золошлаковых отходов ($\text{T}:\text{Ж}=1:10$) повышает извлечение $\Sigma\text{РЗЭ}$ на 6.9–7.5 % с 50.4 до 54.5–57.9 % при последующем азотнокислотном выщелачивании. Наиболее рациональная продолжительность ультразвуковой обработки, обеспечивающая извлечение РЗЭ 57.3 %, составляет 10 мин. Дальнейший рост продолжительности предварительной ультразвуковой обработки до 20 и 30 мин практически не влияет на эффективность последующего выщелачивания: извлечение РЗЭ увеличивается на 0.4 и 0.6 % соответственно. Максимальное интенсифицирующее воздействие на выщелачивание золошлаковых отходов оказывает предварительная ультразвуковая обработка золошлаковых отходов в 7.2 М растворе азотной кислоты ($\text{T}:\text{Ж}=1:10$), обеспечивающая повышение уровня извлечения $\Sigma\text{РЗЭ}$ на 18.2 % с 50.4 до 68.6 %.

ТАБЛИЦА 3. Влияние предварительных энергетических воздействий на выщелачивание РЗЭ

Вид обработки	Время обработки, с	$\varepsilon_{\Sigma\text{РЗЭ}}$
Без обработки	—	50.4
МЭМИ	30	51.4
	60	53.5
	90	54.2
	300	54.5
Ультразвук в воде	600	57.3
	1200	57.7
	1800	57.9
Ультразвук в HNO_3	600	68.6
Предварительное измельчение до 63 мкм	—	51.0

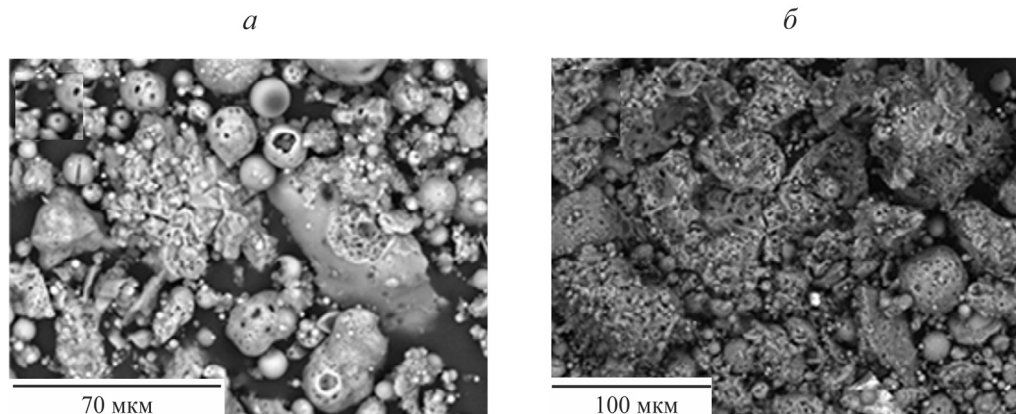


Рис. 9. Изображения золошлаковых отходов после выщелачивания: *а* — после МЭМИ; *б* — после ультразвука; температура 130 °С, концентрация HNO_3 7.2 М, продолжительность 180 мин

Данные РЭМ-изображений кеков выщелачивания золошлаковых отходов подтверждают, что в наибольшей степени дезинтеграции подвергаются образцы после предварительной обработки ультразвуком в растворе азотной кислоты с последующим азотнокислотным выщелачиванием (рис. 9б). Как и ранее, в пробе не зафиксировано образование каких-либо новых фаз, являющихся результатом взаимодействия азотной кислоты с материалом пробы.

Отметим, что эффект от предварительных воздействий МЭМИ и ультразвука заключается не только в разрушении алюмосиликатных микросфер, так как предварительное измельчение исходных золошлаковых отходов класса крупности –200 мкм (содержание класса –63 мкм 62.5 %) до крупности –63 мкм обеспечивает при последующем азотнокислотном выщелачивании прирост извлечения РЗЭ только 0.6 % с 50.4 до 51.0 %. Эффект в процессе выщелачивания золошлаковых отходов указанными физическими воздействиями обусловлен также в случае:

- ультразвука — гидроакустической кавитацией, инициирующей различные физико-химические явления [32];
- МЭМИ — изменением электроповерхностных и электрических свойств минералов, способствующих более быстрому проникновению выщелачивающего агента в микросферы.

Данные предположения требуют проведения дополнительных исследований.

ВЫВОДЫ

Исследования азотнокислотного выщелачивания редкоземельных элементов из золошлаковых отходов позволили выявить рациональные параметры выщелачивания (температура 130 °С, концентрация азотной кислоты 7.2 М, продолжительность 180 мин), обеспечивающие извлечение РЗЭ на уровне 50.4 %. Установлен механизм кинетики выщелачивания РЗЭ, соответствующий внутридиффузионной модели усадки ядра, что подтверждается рассчитанной энергией активации реакции (19.4 кДж/моль). Вскрыт механизм интенсификации выщелачивания РЗЭ за счет предварительной обработки золошлаковых отходов мощными электромагнитными импульсами и ультразвуком в результате разрушения алюмосиликатных микросфер, которое обеспечивает более эффективное взаимодействие выщелачивающего агента с поверхностью и объемом частиц и, как следствие, повышение извлечения РЗЭ на 3.8–18.2 %. Максимальное извлечение РЗЭ достигается при ультразвуковой обработке и составляет 68.6 %.

Авторы выражают благодарность своему коллеге доктору технических наук И. Ж. Бунину за научные консультации по воздействию мощных высоковольтных электромагнитных импульсов на золошлаковые отходы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Brahim J. A., Hak S. A., Achiou B., Boulif R., Beniazza R., and Benhid R.** Kinetics and mechanisms of leaching of rare earth elements from secondary resources, *Miner. Eng.*, 2022, Vol. 177, 107351.
2. **Binnemans K., Jones P. T., Blanpain B., Van Gerven T., and Pontikes Y.** Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review, *J. Clean. Prod.*, 2015, Vol. 99. — P. 17–38.
3. **Wang N., Sun X., Zhao Q., Yang Y., and Wang P.** Leachability and adverse effects of coal fly ash: A review, *J. Hazard. Mater.*, 2020, Vol. 396. — P. 122–725.
4. **Blissett R. S., Smalley N., and Rowson N. A.** An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content, *Fuel*, 2014, Vol. 119. — P. 236–239.
5. **Seredin V. V.** Rare earth element-bearing coals from the Russian Far East deposits, *Int. J. Coal Geol.*, 1996, Vol. 430. — P. 101–129.
6. **Мязин В. П., Шумилова Л. В., Размахнин К. К., Богидаев С. А.** Комплексная переработка золошлаковых отходов тепловых электростанций восточного Забайкалья // ФТПРПИ. — 2018. — № 5. — С. 159–173.
7. **Размахнин К. К.** Переработка природных цеолитов, используемых в фильтрах ТЭС Забайкальского края // Экомониторинг. Экол. эффективность. — 2014. — № 10.
8. **Xu M., Yan R., Zheng C., Qiao Y., Han J., and Sheng C.** Status of trace element emission in a coal combustion process: A review, *Fuel Proc. Technol.*, 2003, Vol. 85, No. 2–3. — P. 215–237.
9. **Ksenofontov B. S., Butorova I. A., Kozodaev A. S., Afonin A. V., and Taranov R. A.** Problems of toxicity of ash and slag waste, *Ecol. Industry of Russia*, 2017, Vol. 21, No. 2. — P. 4–9.
10. **Behera S. K., Meena H., Chakraborty S., and Meikap B. C.** Application of response surface methodology (RSM) for optimization of leaching parameters for ash reduction from low-grade coal, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2018, Vol. 28, No. 4. — P. 621–629.
11. **Yang B., Cheng C., Li Y., Cheng W., Zang J., Lai X., and Wang X.** Modes of occurrence and pre-concentration of rare earth elements in No. 17 coal in Liupanshui coalfield, China, *J. Rare Earths*, 2021.
12. **Hower J. C., Groppo J. G., Hsu-Kim H., and Taggart R. K.** Distribution of rare earth elements in fly ash derived from the combustion of Illinois Basin coals, *Fuel*, 2021, Vol. 289, 119990.
13. **Анферов Б. А., Кузнецова Л. В.** Комплексное использование кузнецких энергетических углей при многоступенчатой подготовке к сжиганию и утилизации отходов // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 89–95.
14. **Римкевич В. С., Сорокин А. П., Пушкин А. А., Гиренко И. В.** Физико-химические исследования распределения полезных компонентов в техногенных отходах предприятий теплоэнергетики // ФТПРПИ. — 2020. — № 3. — С. 152–165.
15. **Досмухамедов Н. К., Каплан В. А., Даруеш Г. С.** Инновационная технология комплексной переработки золы от сжигания угля // Уголь. — 2020. — № 1 (1126). — С. 58–63.
16. **Блайда И. А., Васильева Т. В., Слюсаренко Л. И., Хитрич В. Ф.** Поведение германия и галлия при переработке золы от сжигания углей химическими и микробиологическими методами // Изв. вузов. Серия: Химия и хим. технология. — 2014. — Т. 57. — № 1. — С. 78–83.
17. **Ксенофонов Б. С., Козодаев А. С., Таранов Р. А., Виноградов М. С., Сенник Е. В., Воропаева А. А.** Выщелачивания редкоземельных металлов из угольной золы и их концентрирование // Безопасность в техносфере. — 2016. — Т. 5. — № 1. — С. 48–55.
18. **Ксенофонов Б. С., Буторова И. А., Козодаев А. С., Афонин А. В., Таранов Р. А.** Проблемы токсичности золошлаковых отходов // Экология и промышленность России. — 2017. — Т. 21 (2). — С. 4–9.

19. Римкевич В. С., Пушкин А. А., Гиренко И. В. Разработка гидрохимического метода обогащения зольных техногенных отходов предприятий теплоэнергетики // *Фундаментальные исследования*. — 2015. — № 2 (23). — С. 5156–5160.
20. Chanturiya V. A., Minenko V. G., Samusev A. L., Chanturia E. L., Koporulina E. V., Bunin I. Zh., and Ryazantseva M. V. The effect of energy impacts on the acid leaching of eudialyte concentrate, *Mineral Proc. Extractive Metallurgy Rev.*, 2021, Vol. 42, No. 7. — P. 1–12.
21. Бунин И. Ж., Рязанцева М. В., Миненко В. Г., Самусев А. Л. Влияние мощных электромагнитных импульсных воздействий на структурно-химические свойства и эффективность выщелачивания эвдиалитового концентрата // *Обогащение руд*. — 2021. — № 5. — С. 15–20.
22. Levenspiel O. *Chemical reaction engineering*, Copyright© John Wiley and Sons Inc., 1999. — 684 p.
23. Davison R. L., Natusch D. F., Wallace J. R., and Evans Jr C. Trace elements in fly ash. dependence of concentration on particle size, *Environmental Sci. Technol.*, 1974, Vol. 8, No. 13. — P. 1107–1113.
24. Makanyire T., Jha A., and Sutcliffe S. Kinetics of hydrochloric acid leaching of niobium from TiO₂ residues, *Int. J. Miner. Process.*, 2016, Vol. 157 (Suppl. C). — P. 1–6.
25. Arroug L., Elaatmani M., Zegzouti A., and Aitbabram M. Low-grade phosphate tailings beneficiation via organic acid leaching: process optimization and kinetic studies, *Minerals*, 2021, Vol. 11, No. 5. — 492 p.
26. Galbreath K. C., Toman D. L., Zygarlicke C. J., and Pavlish J. H. Trace element partitioning and transformations during combustion of bituminous and subbituminous U. S. Coals in a 7-kW combustion system, *Energy Fuel*, 2000, Vol. 14, No. 6. — P. 1265–1279.
27. Meij R. Trace element behavior in coal-fired power plants, *Fuel Proc. Technol.*, 1994, Vol. 39, No. 1–3. — P. 199–217.
28. Meij R. and Winkel H. The emissions of heavy metals and persistent organic pollutants from modern coal fired power stations, *Atmospheric Environment*, 2007, Vol. 41, No. 40. — P. 9262–9272.
29. Kashiwakura S., Kumagai Y., Kubo H., and Wagatsuma K. Dissolution of rare earth elements from coal fly ash particles in a dilute H₂SO₄, *Solvent Open J. Phys. Chem.*, 2013, Vol. 3. — P. 69–75.
30. Taghavi M., Gharabaghi M., and Shafaie S. Z. Selective leaching of low-grade phosphate ore using a mixture of organic acids, *Int. J. Min. Geo-Eng.*, 2020, Vol. 54. — P. 65–70.
31. Wu D., Wang X., and Li D. Extraction kinetics of Sc(III), Y(III), La(III) and Gd(III) from chloride medium by Cyanex 302 in heptane using the constant interfacial cell with laminar flow, *Chem. Eng. Process. Process. Intensif.*, 2007, Vol. 46. — P. 17–24.
32. Эльпинер И. Е. *Биофизика ультразвука*. — М.: Наука, 1973. — 384 с.

Поступила в редакцию 24/I 2022

После доработки 10/II 2022

Принята к публикации 14/III 2022