

## ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ И ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ

К.К. Размахнин<sup>1</sup>, А.Н. Хатькова<sup>1</sup>, Л.В. Шумилова<sup>1</sup>, Т.С. Номоконова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Забайкальский государственный университет, Чита, Россия,  
e-mail: constantin-const@mail.ru

**Аннотация:** Изучены вопросы концентрации редких и редкоземельных элементов из золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2 с применением методов рудоподготовки и магнитной сепарации. Определена возможность применения гидрохимического метода обогащения для извлечения редких и редкоземельных элементов из золошлаковых отходов. Разработана технология обогащения золошлаковых отходов, включающая их рудоподготовку, магнитную сепарацию, разделение в тяжелых жидкостях или флотацию, а также переработку методов выщелачивания. Приведены результаты экспериментальных исследований по изучению химического состава золошлаковых отходов, их электромагнитной сепарации, количественного содержания редких и редкоземельных элементов до и после выщелачивания азотной и соляной кислотами, а также в серной кислоте и царской водке. Представлены результаты проведенных экспериментальных исследований, позволяющих сделать вывод о том, что посредством применения выщелачивания существенно снижается содержание редких и редкоземельных элементов в золошлаковых отходах за счет перевода данных элементов в раствор с возможностью дальнейшего извлечения. Установлена наивысшая степень извлечения титана, стронция, галлия и рубидия из золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2. Целью проведения исследований являлось снижение негативного воздействия на окружающую среду золошлаковых отходов, образующихся при сжигании угля на Читинской ТЭЦ-2, за счет их обогащения и переработки с получением товарных продуктов (редких и редкоземельных элементов).

**Ключевые слова:** золошлаковые отходы, негативное воздействие, окружающая среда, обогащение, электромагнитная сепарация, выщелачивание, содержание, редкоземельные элементы, технология, извлечение.

**Благодарность:** Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 22-17-00040 «Научное обоснование и разработка экологически чистых безотходных технологий переработки природного и техногенного минерального сырья» (2022–2023 гг.)

**Для цитирования:** Размахнин К. К., Хатькова А. Н., Шумилова Л. В., Номоконова Т. С. Технология переработки и обогащения золошлаковых отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10. – С. 122–135. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_10\_0\_122.

### Ash residue beneficiation and processing technology

K.K. Razmakhnin<sup>1</sup>, A.N. Khatkova<sup>1</sup>, L.V. Shumilova<sup>1</sup>, T.S. Nomokonova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Transbaikal State University, Chita, Russia,  
e-mail: constantin-const@mail.ru

---

**Abstract:** The issues connected with concentration of rare earth elements from ash residue of Chita Thermal Power Plant 2 using the methods of ore pretreatment and magnetic separation are studied. The applicability of the hydrochemical processing in recovery of rare earth elements from ash residue is determined. The processing technology is developed for ash residue, including pretreatment, magnetic separation, heavy medium separation or flotation, and leaching. The experimental research findings on the chemical composition of the test ash residue, its electromagnetic separation, as well as the contents of rare earth elements before and after leaching in nitrogen and hydrochloric acids, and in sulfuric and nitrohydrochloric acids are presented. The experimental results allow drawing a conclusion that leaching essentially reduces the content of rare earth elements in ash residue as these elements are transferred to solution and are made extractable later on. Regarding the ash residue from Chita Thermal Power Plant 2, titanium, strontium, gallium and rubidium exhibit the highest extraction ratios. The aim of the studies was mitigation of the environmental impact of ash residue from coal combustion at Chita Thermal Power Plant 2 by means of beneficiation and processing with manufacture of marketable products (rare earth elements).

**Key words:** ash residue, adverse effect, environment, beneficiation, electromagnetic separation, leaching, content, rare earth elements, technology, extraction.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 22-17-00040: Scientific Substantiation and Development of Environmentally Clean and Wasteless Technologies for Treatment of Natural and Manmade Mineral Raw Materials, 2022–2023.

**For citation:** Razmakhnin K. K., Khatkova A. N., Shumilova L. V., Nomokonova T. S. Ash residue beneficiation and processing technology. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10):122-135. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_10\_0\_122.

---

## Введение

Сжигание углей на теплоэлектростанциях и котельных промышленных предприятий связано с образованием и накоплением значительных объемов золошлаковых отходов (ЗШО), которые представляют собой ценное сырье для извлечения таких компонентов, как золото, серебро, железо, редкие элементы и т.д. [1–3]. При этом в России объемы образования отходов от сжигания углей достигают ежегодно до 90 млн т, а доля переработанных золошлаков составляет не более 5%. Лидерами по объемам утилизации ЗШО являются следующие страны:

1. Япония, где доля утилизации золошлаков достигает 100% (85% из кото-

рых приходится на строительную индустрию, остальное на сельское хозяйство и экспорт) [4];

2. Китай, в котором из 565 млн т отходов тепловых станций утилизируется 398 млн т (70,1%). Большая часть ЗШО направлена на производство бетонов и цементов, а с 2011 г. извлечение глинозема является приоритетным направлением для утилизации [5];

3. Индия также входит в тройку лидеров по переработке ЗШО, а доля утилизации составляет 67%. Основное направление: строительство и мелиорация земель [6].

Золошлаковые отходы, образующиеся при сжигании энергетических углей, состоят из продуктов обжига и окисления

компонентов образования золы, а также органических соединений и несгоревшего угля [7]. Промышленное сжигание углей характеризуется образованием нескольких видов золошлаков, к которым следует отнести: золу-унос, представленную тонкодисперсным материалом (3,5–100 мкм); шлак (сплавленные агрегаты золы крупностью 0,3–30 мм); золошлаковые отходы (механическая смесь шлака и золы-уноса) [8]. Вместе с тем большое значение при образовании золошлаковых отходов имеют: технология сжигания угля, его химический состав и зольность, способ удаления (пневмолито гидроудаление), складирования и хранения золы [9, 10]. В составе золошлаков, как правило, содержатся следующие химические элементы:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  и др. [11].

Проведенный анализ мирового опыта [12–14] по промышленному использованию золошлаковых отходов позволил сделать вывод о том, что они представляют собой техногенные месторождения, ввод которых в разработку позволит получить широкий перечень ценной продукции.

Для определения возможности переработки золошлаковых отходов, вторичных ресурсов, с целью извлечения из них ценных компонентов необходима информация об их физико-механических свойствах, минеральном и химическом составе, дисперсности и влажности [15, 16]. Наиболее распространенными методами переработки золошлаков являются магнитная сепарация, гидроциклонирование, обогащение на концентрационных столах и в концентраторах, с помощью которых может быть извлечено железо, золото, серебро и кремнезем, используемый в дальнейшем в строительной индустрии [17]. В частности, в таких странах, как КНР, Япония и Индия, для извлечения ценных ком-

понентов из ЗШО используются гравитационные методы в комбинации с гидрометаллургическим способом переработки. В России данная технология до настоящего времени не нашла широкого применения, а используется в основном гравитационный метод обогащения ЗШО, применение которого не позволяет эффективно извлекать редкоземельные элементы, содержащиеся в отходах сжигания углей [18, 19].

Как правило, показатель извлечения редких и редкоземельных элементов с применением данных методов не превышает 12–15% [18, 19]. В этой связи возникает необходимость разработки эффективной технологии обогащения и переработки золошлаковых отходов с целью получения концентратов данных элементов. При этом наиболее перспективным методом для извлечения редкоземельных элементов из золошлаков, исходя из мирового опыта, является гидрометаллургический в комбинации с гравитационными методами и магнитной сепарацией [1, 3, 14]. Вместе с тем распределение редких и редкоземельных элементов в золошлаковых отходах обусловлено генезисом углей, а эффективность их извлечения определяется минералого-технологическими свойствами ЗШО.

### **Методы**

Объектом исследования являлись золошлаковые отходы Читинской ТЭЦ-2, химический и элементный состав представлены в табл. 1 и 2 соответственно [1]. Данная ТЭЦ применяет жидкое золошлакоудаление потоком воды, а образующиеся при пылевидном сжигании углей золошлаковые отходы представлены агрегатами слипшихся частиц дегидротезированного глинистого сланца и содержат частицы кварца, полевых шпатов и аморфные карбонаты кальция. В процессе сжигания минеральные компо-

Таблица 1

**Усредненный химический состав геосистемы  
«уголь – зола – золошлак» Читинской ТЭЦ-2**

*Averaging the chemical composition of the geosystem «coal-ash-ash waste» of Chita TPP-2*

Элемент	ТЭЦ-2		
	ХУ ТЭЦ-2, %	З ТЭЦ-2, %	ЗШУ ТЭЦ-2, %
SiO <sub>2</sub>	53,30	50,49	51,77
CaO	9,70	14,02	12,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,30	20,58	21,89
MgO	2,80	1,87	1,77
MnO	0,03	0,02	0,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,10	8,53	9,13
FeO	4,58	6,99	4,57
K <sub>2</sub> O	1,90	1,34	3,34
TiO <sub>2</sub>	0,60	0,78	0,65
SO <sub>3</sub>	4,67	0,84	0,76
BaO	–	0,67	1,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,10	1,11	1,04

ненты угля претерпевают фазовые превращения и вступают в сложные химические взаимодействия друг с другом, что обуславливает образование крупных и мелких фракций золошлаков.

В табл. 1 представлен усредненный химический состав угля Харанорского месторождения с угольного склада Читинской ТЭЦ-2 (ХУ ТЭЦ-2), золы с котлоагрегата № 4 марки Е-42/40 Читин-

Таблица 2

**Усредненный элементный анализ золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2**

*Averaged elemental analysis of ash and slag wastes from the Chita TPP-2*

Элемент	Его содержание в ЗШУ ТЭЦ-2, г/т	Элемент	Его содержание в ЗШУ ТЭЦ-2, г/т	Элемент	Его содержание, в ЗШУ ТЭЦ-2, г/т
Al	91 910,01	Cu	62,83	Pb	34,65
As	89,33	Fe	40 855,79	S	2993,50
Ba	1392,51	K	18 366,54	Zr	110,18
Be	8,43	La	41,25	Sc	3,83
Rb	5,76	Li	44,23	Sn	86,49
Ca	64 117,53	Mg	15 016,86	Sr	1450,67
Cd	4,41	Mn	1214,67	Ti	3046,80
Co	23,88	Mo	14,27	V	71,89
Cr	105,27	Ni	82,53	W	110,18
Y	29,40	Zn	36,87	Ce	12,02
P	601,21	Ga	4,27	Ge	172,52

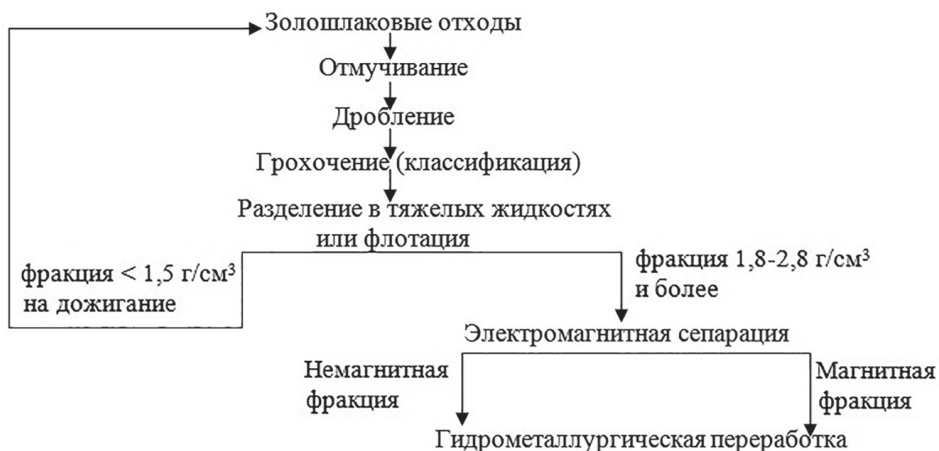


Рис. 1. Схема обогащения и гидрометаллургической переработки золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2

Fig. 1. Scheme of enrichment and hydrometallurgical processing of ash and slag waste of Chita TPP-2

ской ТЭЦ-2 (3 ТЭЦ-2) и золы-уноса с золошлакового озера Читинской ТЭЦ-2 (ЗШУ ТЭЦ-2).

Данные, представленные в табл. 1, показывают, что химический состав золы и золошлака, полученных на разных станциях, может сильно различаться из-за исходного угля, его хранения, способов сжигания. Для определения химического элементного состава использовалась атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС). Результаты элементного состава ЗШО представлены в табл. 2.

Методика проведения эксперимента по их обогащению заключалась в следующем. Пробы золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2 были подвергнуты классификации по классам крупности ( $-2+1$  мм,  $-1+0,5$  мм,  $-0,5+0,3$  мм,  $-0,3+0,1$  мм) и обогащению с последующей гидрометаллургической переработкой классов с наиболее высоким содержанием редких и редкоземельных элементов ( $-0,5+0,3$  мм,  $-0,3+0,1$  мм). Одной из наиболее эффективных схем обогащения ЗШО Читинской ТЭЦ-2, с учетом мирового и отечественного опыта [18, 19], является комбинированная

гравитационно-гидрометаллургическая, представленная на рис. 1. Необходимо отметить, что процессы флотации и разделения в тяжелых жидкостях применительно к ЗШО не всегда являются рациональными, что обусловлено трудностью подбора реагентов, сложностью и дороговизной аппаратного оформления. В этой связи проведены исследования по изучению возможности извлечения редких и редкоземельных элементов из ЗШО с применением магнитной сепарации с дальнейшей гидрометаллургической переработкой магнитной фракции. При этом выщелачивание проводилось с применением предварительной ультразвуковой обработки с целью активации кислых пульп (ЗШО-вода) и повышения извлечения редких и редкоземельных элементов в раствор.

Электромагнитная сепарация осуществлялась на лабораторном электромагнитном сепараторе 138-СЭМ и лабораторном магнитном сепараторе для мокрого обогащения. Следует отметить, что полученные результаты исследований возможности применения магнитной сепарации золошлаковых отходов для концентрации редкоземельных элемен-

тов не выявили существенной разницы в эффективности сухого и мокрого магнитного обогащения. В этой связи наиболее перспективным следует считать мокрое обогащение золошлаков с расположением обогатительного комплекса непосредственно на выходе к месту их размещения.

Методика проведения эксперимента по переработке магнитной фракции золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2 методом выщелачивания заключалась в следующем: 12 подготовленных навесок золошлаков массой по 10 г были разбавлены дистиллированной водой массой 90 мл. Соответственно общий объем пробы составил 100 мл, отношение Т:Ж 1:10.

После разбавления проб ЗШО водой в каждую из них было добавлено по 100 мл кислоты: серной кислоты – 93,6–95,6% масс.; азотной кислоты – 65% масс.; соляной кислоты – 35% масс.; а также смеси азотной и соляной кислот той же концентрации в соотношении 1:3 по объему.

Далее проводилась ультразвуковая обработка магнитной фракции золошлаковых отходов (ЗШО) в установке УЗДН-1, продолжительность воздействия составила 5–10 мин, температура смеси поддерживалась на уровне 25 °С.

Различным условиям проведения исследований соответствовали определенные обозначения проб ЗШО. Обозначения проб представлены в табл. 3.

Содержание редких и редкоземельных элементов в золошлаковых отходах приведено в табл. 4 и 5.

После обработки в ультразвуковой ванне образцы выпаривались до состояния влажных солей, а после отфильтровывались под вакуумом на фильтре «белая лента». В результате экспериментальных исследований получены два концентрата: твердый остаток и жидкий концентрат, который подвергли анализу

Таблица 3

**Обозначение проб золошлаковых отходов при выщелачивании**

**Designation of samples of ash and slag waste during leaching**

Обозначение пробы	Кислота	Время обработки, мин
0-N	HNO <sub>3</sub>	0
5-N		5
10-N		10
0-Cl	HCl	0
5-Cl		5
10-Cl		10
0-S	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0
5-S		5
10-S		10
0-ЦВ	HNO <sub>3</sub> + + HCl (царская водка)	0
5-ЦВ		5
10-ЦВ		10

на рентгенофлуоресцентном спектрометре для оценки степени извлечения металлов.

Необходимо отметить, что выделенная флотационным методом несгоревшая масса представлена в основном сажей, которая характеризуется как товарная продукция с достаточно высокими потребительскими свойствами. При этом для повышения свойств данного продукта переработки он может быть направлен на дожигание.

**Результаты и их обсуждение**

В результате проведения экспериментальных исследований по изучению возможности обогащения золошлаковых отходов методом тяжелосреднего разделения установлено, что такие элементы, как германий, скандий, цирконий, иттрий и другие накапливаются в основном в легких фракциях. Данный эффект стоит связывать с органическим веществом [20, 21].

Электромагнитная сепарация позволила получить продукты с содержани-

Таблица 4

**Результаты электромагнитной сепарации золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2**  
**Results of electromagnetic separation of ash and slag wastes of Chita TPP-2**

Элемент	Содержание, г/т	
	золошлаковые отходы	магнитная фракция
Ti	1500 – 3000	2000 – 4000
Ga	20	20 – 25
Ge	2	3
Rb	1	2
Sr	7	8
Y	20	20 – 40
Zr	200	150 – 300
La	40	70 – 100
Ce	0,5	1

ем достаточно большой группы металлов. Содержание некоторых элементов в продуктах электромагнитной сепарации золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2 представлены в табл. 4. Установлено, что в магнитной фракции накапливаются все присутствующие в сжигаемых углях редкоземельные элементы. При этом наиболее эффективным следует считать переход в магнитный продукт таких элементов, как титан, лантан, циркон и галлий, что определяет данную фракцию как коллективный концентрат редких и редкоземельных металлов, имеющий перспективу дальнейшей эффективной промышленной переработки. Следует отметить, что выход магнитной фракции, содержащий редкоземельные металлы, составил 22%, что является, исходя из мирового и отечественного опыта, достаточно высоким показателем.

В этой связи, учитывая большие запасы и объемы вновь образуемых золошлаковых отходов на Читинской ТЭЦ-2, можно сделать вывод о перспективности применения предлагаемой технологии и возможности получения тысяч

тонн магнитного концентрата, представляющего собой минеральное сырье с высоким содержанием редкоземельных элементов.

Полученные результаты исследований показывают, что магнитная сепарация золошлаковых отходов классов крупности  $-0,5+0,3$  мм,  $-0,3+0,1$  мм позволяет добиться некоторой концентрации редких и редкоземельных элементов в магнитной фракции, в частности, таких элементов, как титан (до 25%), циркон (до 33%), иттрий (до 50%), лантан (до 150%), церий (до 50%). Необходимо отметить, что полученная магнитная фракция представляет собой коллективный концентрат металлов, имеющих промышленную перспективу извлечения. При этом, учитывая достаточно большие запасы и объемы образования золошлаковых отходов на Читинской ТЭЦ-2 (емкость золоотвала составляет 370 000 м<sup>3</sup>) [22, 23], существует возможность ежегодно получать несколько сотен тонн магнитного концентрата. Кроме того, магнитная фракция золошлаковых отходов может рассматриваться в качестве сырьевого источника Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [23, 24], так как содержит 37,1% данного оксида. Вместе с тем немагнитная фракция характеризуется достаточно высоким содержанием глинозема, что позволяет сделать вывод о перспективности ее использования в качестве сырья для глиноземного производства.

Объемы образования золошлаковых отходов, а также возможность концентрации редких и редкоземельных элементов в продуктах магнитной сепарации обуславливают рациональность и необходимость их дальнейшей переработки методом выщелачивания. Результаты выщелачивания золошлаковых отходов с указанием данных по количественному содержанию редких и редкоземельных (РиРЗ) элементов до и после выщелачивания представлены в табл. 5 и 6. Знак

Таблица 5

**Количественное содержание редких и редкоземельных элементов до и после выщелачивания азотной и соляной кислотами, мг/л**  
**Quantitative content of rare and rare earth elements before and after leaching with nitric and hydrochloric acids, mg/l**

Элемент, его содержание	0-N	5-N	10-N	0-Cl	5-Cl	10-Cl
Ti, 3,110	2,456	1,240	1,240	3,246	2,402	2,100
Ga, 0,008	0,011	0,011	0,011	0,032	0,047	0,049
Ge, 0,207	0,207	0,207	0,207	0,207	0,207	0,207
Rb, 0,108	0,028	0,019	0,013	0,089	0,103	0,103
Sr, 0,726	0,054	1,131	1,201	0,068	0,068	0,068
Y, 0,006	—	0,007	—	0,007	—	—
Zr, 11,588	363,000	10,412	—	299,000	105,000	32,257

« — » обозначает, что элемент находится за пределом обнаружения.

По данным табл. 5 и 6 можно сделать следующие выводы по наилучшим показателям выщелачивания:

- при кислотном выщелачивании соляной кислотой без УЗ-обработки наблюдается увеличение содержания титана в 1,04 раза (с 3,110 до 3,246 мг/л);
- при кислотном выщелачивании азотной кислотой (с/без УЗ-обработки) наблюдается увеличение содержание галлия в 1,4 раза (с 0,008 до 0,011 мг/л). Выщелачивание соляной кислотой дает

увеличение содержания этого же элемента в 4; 5,9; 6,1 раз с повышением времени УЗ-обработки;

- количественное содержание германия остается неизменным под воздействием азотной и соляной кислот;
- при кислотном выщелачивании азотной кислотой (время УЗ-обработки 5 мин) количественное содержание стронция увеличивается в 1,65 раз (с 0,726 до 1,201 мг/л);
- при кислотном выщелачивании азотной кислотой без УЗ-обработки наблюдается увеличение содержания циркония

Таблица 6

**Количественное содержание редких и редкоземельных элементов до и после выщелачивание в серной кислоте и царской водке, мг/л**  
**Quantitative content of rare and rare earth elements before and after leaching in sulfuric acid and aqua regia, mg/l**

Элемент и его содержание	0-S	5-S	10-S	0-ЦВ	5-ЦВ	10-ЦВ
Ti, 3,110	5,220	4,499	4,999	4,330	4,020	4,017
Ga, 0,008	0,044	0,057	0,058	0,022	0,024	0,024
Ge, 0,207	0,207	0,207	0,207	0,207	0,207	0,207
Rb, 0,108	0,119	0,457	0,369	0,071	0,048	0,022
Sr, 0,726	0,059	0,059	0,059	4,060	3,996	4,030
Y, 0,006	0,034	—	—	0,020	0,014	0,007
Zr, 11,588	544,000	147,879	103,257	43,000	47,259	44,025
La, 0,055	—	—	—	0,219	0,287	0,247
Ce, 0,052	—	—	—	0,212	0,194	0,222



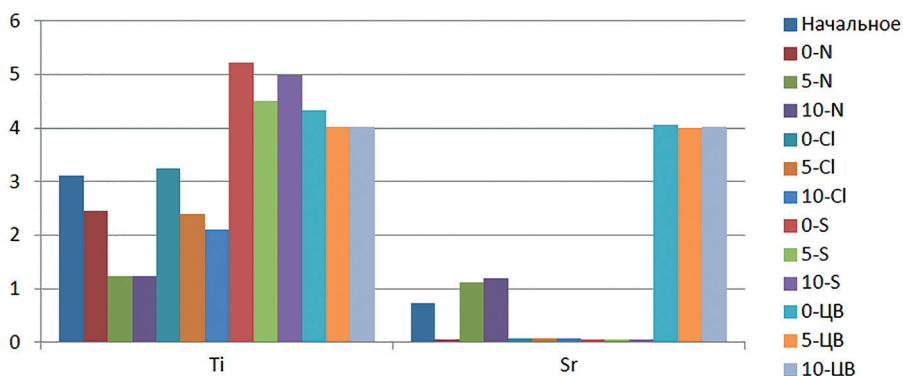


Рис. 2. Степень извлечения титана и стронция из золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2  
 Fig. 2. Degree of extraction of Titanium and Strontium from ash and slag wastes of Chita TPP-2

в 31,32 раза (с 11,588 до 363,000 мг/л). Выщелачивание соляной кислотой дает увеличение содержания этого же элемента в 25 раз (с 11,588 до 299,000 мг/л).

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что выщелачивание позволяет существенно снизить содержание редких и редкоземельных элементов в золошлаковых отходах посредством перевода данных элементов в раствор с возможностью дальнейшего извлечения. Данный эффект также подтверждается данными, представленными на рис. 2 и 3.

Из представленных на рис. 2 данных следует, что наивысшая степень извлечения титана и стронция достигается при времени обработки азотной кислотой 5 мин и серной кислотой 10 мин соответственно.

Из представленных на рис. 3 данных следует, что наивысшая степень извлечения галлия и рубидия достигается при времени обработки серной кислотой 10 мин.

Таким образом, в результате проведения исследований определена возможность обогащения золошлаковых отхо-

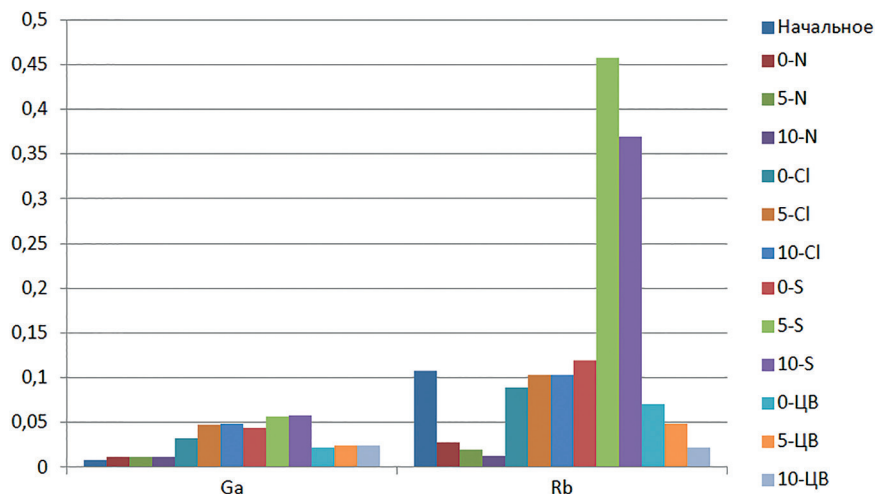


Рис. 3. Степень извлечения галлия и рубидия из золошлаковых отходов Читинских ТЭЦ-2  
 Fig. 3. Degree of extraction of Gallium and Rubidium from ash and slag wastes of Chita TPP-2

дов, образующихся на Читинской ТЭЦ-2 при сжигании углей. При этом наиболее эффективным для извлечения редкоземельных элементов из золошлаков является гидрометаллургический способ в сочетании с рудоподготовкой, флотацией/разделением в тяжелых жидкостях и магнитной сепарацией. В этой связи в Забайкальском крае имеются все необходимые предпосылки для решения проблемы промышленного извлечения редкоземельных элементов из золошлаковых отходов, в частности Читинской ТЭЦ-2. Немагнитная фракция, как правило, содержит такие цветные металлы, как свинец, медь, цинк, а также благородные металлы (золото, серебро), что позволяет рассматривать ее в качестве потенциального источника данных элементов.

Кроме того, продукты переработки золошлаковых отходов могут найти широкое применение в строительной индустрии (производство гравия, бетона, глиноземного кирпича и керамзита, цемента), резинотехнической промышленности, при производстве пластмасс и рулонно-кровельных материалов, а также в лакокрасочной и текстильной промышленности.

Вместе с тем следующим шагом для подтверждения рациональности внедрения предлагаемой технологии обогащения золошлаков должно стать проведение геолого-экономической оценки золошлакоотвалов, представляющих собой техногенные месторождения.

## **Заключение**

Проведенные экспериментальные исследования показали, что золошлаковые отходы Читинской ТЭЦ-2 могут быть использованы в масштабах крупнотоннажного производства с целью извлечения редких и редкоземельных элементов посредством применения комбинированной схемы обогащения, включающей магнитную сепарацию и кислотное выщелачивание с предварительной ультразвуковой обработкой пульпы. Вместе с тем с применением магнитной сепарации возможно получение железного концентрата и полиметаллического немагнитного продукта с перспективой дальнейшей металлургической переработки. При этом получаемые в результате переработки и обогащения золошлаковых отходов побочные продукты, в соответствии с имеющимся мировым опытом, могут найти широкое применение в строительной индустрии. Кроме того, помимо промышленной ценности следует иметь в виду экологический эффект от переработки золошлаков, получаемый при обогащении золошлаковых отходов.

Предлагаемые технологические решения позволят существенным образом снизить экологическую нагрузку на район расположения золоотвала, а также в значительной степени повысить экономическую эффективность работы Читинской ТЭЦ-2, в том числе за счет предотвращения ущерба от деградации почв и земель.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Мязин В. П. Методы сепарации зольных уносов сжигания углей Восточного Забайкалья для извлечения из них редких элементов // Химия твердого топлива. — 2006. — № 1. — С. 75 — 80.
2. Арбузов С. И., Ершов В. В., Поцелуев А. А., Рихванов Л. П. Редкие элементы в углях Кузнецкого бассейна. — Кемерово, 1999. — 248 с.
3. Мязин В. П., Мязина В. И., Размахнин К. К., Шумилова Л. В. Исследования техногенных образований ТЭК Забайкалья как сложных геосистем и нетрадиционных источни-

ков минерального сырья / Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов. Т. 1. — Чита: ЗабГУ, 2017. — С. 152—159.

4. Золотова И. Ю. Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС // Инновации и инвестиции. — 2020. — № 7. — С. 123—128.

5. Heidrich C., Feuerborn H. J., Weir A. Coal combustion products: a global perspective // World of Coal Ash Conference. 2013, pp. 22—25.

6. Venkatesh Sharma, Shalom Akhai Trends in utilization of coal fly ash in India: A review // Journal of Engineering Design & Analysis. 2019, vol. 2, no. 12-16, pp. 13—16.

7. Шаванов Н. Д., Коновалова Н. А., Панков П. П., Руш Е. А. Изучение состава и свойств золошлаковых смесей с целью их утилизации в строительной индустрии / Актуальные проблемы техносферной безопасности. Сборник тезисов научных трудов IV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых, преподавателей, приуроченная к 45-летию кафедры «Промышленная экология и техносферная безопасность». — Ульяновск: УГТУ, 2022. — С. 134—137.

8. Бесполитов Д. В., Коновалова Н. А., Дабига О. Н., Панков П. П., Руш Е. А. Влияние механоактивации золы уноса на прочность грунтобетонных конструкций на основе отходов производства // Экология и промышленность России. — 2021. — Т. 25. — № 11. — С. 36—41. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-11-36-41.

9. Calderón Márquez A. J., Cassetari Filho P. C., Rutkowski E. W., de Lima Isaac R. Landfill mining as a strategic tool towards global sustainable development // Journal of Cleaner Production. 2019, vol. 226, pp. 1102—1115. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.057.

10. Huimin Chang, Haobo Tan, Yan Zhao, Ying Wang, Xuemei Wang, Yanxia Li, Wenjing Lu, Hongtao Wang Statistical correlations on the emissions of volatile odorous compounds from the transfer stage of municipal solid waste // Waste Management. 2019, vol. 87, no. 30, pp. 701—708. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.014.

11. Sözer H., Sözen H. Waste capacity and its environmental impact of a residential district during its life cycle // Energy Reports. 2020, vol. 6, pp. 286—296. DOI: 10.1016/j.egy.2020.01.008.

12. Енджиевская И. Г., Васильевская Н. Г., Дубровская О. Г., Баранова Г. П., Чудаева А. А. Влияние механоактивации на стабилизацию свойств золы уноса красноярских ТЭЦ // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. — 2018. — Т. 11. — № 7. — С. 842—855. DOI: 10.17516/1999-494X-0099.

13. Fan J., Wang D., Qian D. Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018, vol. 10, no. 4, pp. 791—797. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.004.

14. Matinde E., Simate G. S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes. A review of recycling and re-use practices // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018, vol. 118, no. 8, pp. 825—844. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5.

15. Konovalova N. A., Pankov P. P., Petukhov V., Fediuk R., Amran Mugahed, Vatin N. I. Structural formation of soil concretes based on loam and fly ash, modified with a stabilizing polymer additive // Materials. 2022, vol. 15, no. 14, article 4893. DOI: 10.3390/ma15144893.

16. Semenov P. A., Uzunyan A., Davidenko A. M., Derevschikov A. A., Goncharenko Y. M., Kachanov V. A., Khodyrev V. Y., Meschanin A. P., Minaev N. G., Mochalov V. V., Melnick Y. M., Ryazantsev A. V., Vasiliev A. N., Burachas S. F., Ippolitov M., Manko V., Vasiliev A. A., Mochalov A. V., Novotny R. W., Tamulaitis G. First study of radiation hardness of lead tungstate crystals at low temperatures // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. 2007, vol. 582, no. 2, pp. 575—580. DOI: 10.1016/j.nima.2007.08.178.

17. Sharonova O. M., Yumashev V. V., Solovyov L. A., Anshits A. G. The fine high-calcium fly ash as the basis of composite cementing material // Magazine of Civil Engineering. 2019, vol. 91, no. 7, pp. 60—72. DOI: 10.18720/MCE.91.6.

18. Власова В. В., Артемова О. С., Фомина Е. Ю. Определение направлений эффективного использования отходов ТЭС // Экология и промышленность России. – 2017. – Т. 21. – № 11. – С. 36–41. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-11-36-41.

19. Худякова Л. И., Залуцкий А. В., Палеев П. Л. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций // XXI век. Техносферная безопасность. – 2019. – № 4 (3). – С. 375–391. DOI: 10.21285/2500-1582-2019-3-375-391.

20. Dave J. M. Disposal of fly ash – an environmental problem // International Journal of Environmental Studies. 1986, vol. 26, no. 3, pp. 191–215. DOI: 10.1080/00207238608710257.

21. Satpathy H. P., Patel S. K., Nayak A. N. Development of sustainable lightweight concrete using fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate // Construction and Building Materials. 2019, vol. 202, no. 2, pp. 636–655. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.034.

22. Ling Y., Wang K., Li W., Shi G., Lu P. Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash – based engineered geopolymer composites // Composites Part B Engineering. 2019, vol. 164, pp. 747–757. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.01.092.

23. Krechetov O., Chernitsova A., Sharapova A., Terskaya E. Technogenic geochemical evolution of chernozems in the sulfur coal mining areas // Journal of Soils and Sediments. 2019, vol. 19, pp. 3139–3154. DOI: 10.1007/s11368-018-2010-7.

24. Barabanshchikov Y., Fedorenko I., Kostyrya S., Usanova K. Cold-bonded fly ash lightweight aggregate concretes with low thermal transmittance: Review // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019, vol. 983, pp. 858–866. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8\_84. **WJAS**

## REFERENCES

1. Myazin V. P. Methods for separating fly ash from coal combustion in Eastern Transbaikalia to extract rare elements from them. *Khimiya tverdogo topliva*. 2006, no. 1, pp. 75–80. [In Russ].

2. Arbuzov S. I., Ershov V. V., Potseluev A. A., Rikhvanov L. P. *Redkie elementy v uglyakh Kuznetskogo basseyna* [Rare elements in coals of the Kuznetsk basin], Kemerovo, 1999, 248 p.

3. Myazin V. P., Myazina V. I., Razmakhnin K. K., Shumilova L. V. Research of technogenic formations of the fuel and energy complex of Transbaikalia as complex geosystems and unconventional sources of mineral raw materials. *Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov*. T. 1 [Kulagin readings: techniques and technologies of production processes, vol. 1], Chita, ZabGU, 2017, pp. 152–159. [In Russ].

4. Zolotova I. Yu. Benchmarking of foreign experience in the utilization of solid fuel combustion products of coal thermal power plants. *Innovacii i investicii*. 2020, no. 7, pp. 123–128. [In Russ].

5. Heidrich C., Feuerborn H. J., Weir A. Coal combustion products: a global perspective. *World of Coal Ash Conference*. 2013, pp. 22–25.

6. Venkatesh Sharma, Shalom Akhai Trends in utilization of coal fly ash in India: A review. *Journal of Engineering Design & Analysis*. 2019, vol. 2, no. 12-16, pp. 13–16.

7. Shavanov N. D., Konovalova N. A., Pankov P. P., Rush E. A. Study of the composition and properties of ash and slag mixtures for their utilization in the construction industry. *Aktual'nye problemy tekhnosfernoy bezopasnosti. Sbornik tezisev nauchnykh trudov IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov, molodykh uchennykh, prepodavateley, priurochennaya k 45-letnemu yubileyu kafedry «Promyshlennaya ekologiya i tekhnosfernaya bezopasnost'»* [Actual problems of technosphere security. Collection of abstracts of scientific papers of the IV International scientific and practical conference of students, postgraduates, young scientists, teachers, dedicated to the 45th anniversary of the Department «Industrial Ecology and Technosphere safety»], Ul'yanovsk, UGTU, 2022, pp. 134–137. [In Russ].

8. Bespolitov D. V., Konovalova N. A., Dabizha O. N., Pankov P. P., Rush E. A. Influence of mechanoactivation of fly ash on the strength of ground concretes based on production waste. *Ecology & Industry of Russia*. 2021, vol. 25, no. 11, pp. 36–41. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-11-36-41.

9. Calderón Márquez A. J., Cassettari Filho P. C., Rutkowski E. W., de Lima Isaac R. Land-fill mining as a strategic tool towards global sustainable development. *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 226, pp. 1102 – 1115. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.057.

10. Huimin Chang, Haobo Tan, Yan Zhao, Ying Wang, Xuemei Wang, Yanxia Li, Wenjing Lu, Hongtao Wang Statistical correlations on the emissions of volatile odorous compounds from the transfer stage of municipal solid waste. *Waste Management*. 2019, vol. 87, no. 30, pp. 701 – 708. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.014.

11. Sözer H., Sözen H. Waste capacity and its environmental impact of a residential district during its life cycle. *Energy Reports*. 2020, vol. 6, pp. 286 – 296. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.01.008.

12. Endzhievskaya I. G., Vasilovskaya N. G., Dubrovskaya O. G., Baranova G. P., Chudava A. A. The effect of mechanical activation on the stabilization of ash properties of Krasnoyarsk CHP. *Journal of Siberian federal university*. 2018, vol. 11, no. 7, pp. 842 – 855. [In Russ]. DOI: 10.17516/1999-494X-0099.

13. Fan J., Wang D., Qian D. Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018, vol. 10, no. 4, pp. 791 – 797. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.004.

14. Matinde E., Simate G. S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes. A review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018, vol. 118, no. 8, pp. 825 – 844. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5.

15. Konovalova N. A., Pankov P. P., Petukhov V., Fediuk R., Amran Mugahed, Vatin N. I. Structural formation of soil concretes based on loam and fly ash, modified with a stabilizing polymer additive. *Materials*. 2022, vol. 15, no. 14, article 4893. DOI: 10.3390/ma15144893.

16. Semenov P. A., Uzunyan A., Davidenko A. M., Derevschikov A. A., Goncharenko Y. M., Kachanov V. A., Khodyrev V. Y., Meschanin A. P., Minaev N. G., Mochalov V. V., Melnick Y. M., Ryazantsev A. V., Vasiliev A. N., Burachas S. F., Ippolitov M., Manko V., Vasiliev A. A., Mochalov A. V., Novotny R. W., Tamulaitis G. First study of radiation hardness of lead tungstate crystals at low temperatures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*. 2007, vol. 582, no. 2, pp. 575 – 580. DOI: 10.1016/j.nima.2007.08.178.

17. Sharonova O. M., Yumashev V. V., Solovyov L. A., Anshits A. G. The fine high-calcium fly ash as the basis of composite cementing material. *Magazine of Civil Engineering*. 2019, vol. 91, no. 7, pp. 60 – 72. DOI: 10.18720/MCE.91.6.

18. Vlasova V. V., Artemova O. S., Fomina E. Yu. Determination of directions for the efficient use of TPP waste. *Ecology & Industry of Russia*. 2017, vol. 21, no. 11, pp. 36 – 41. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-11-36-41.

19. Khudyakova L. I., Zalutsky A. V., Paleev P. L. Use of ash and slag waste from thermal power plants. *XXI century. Technosphere safety*. 2019, no. 4 (3), pp. 375 – 391. [In Russ]. DOI: 10.21285/2500-1582-2019-3-375-391.

20. Dave J. M. Disposal of fly ash – an environmental problem. *International Journal of Environmental Studies*. 1986, vol. 26, no. 3, pp. 191 – 215. DOI: 10.1080/00207238608710257.

21. Satpathy H. P., Patel S. K., Nayak A. N. Development of sustainable lightweight concrete using fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate. *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 202, no. 2, pp. 636 – 655. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.034.

22. Ling Y., Wang K., Li W., Shi G., Lu P. Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash – based engineered geopolymer composites. *Composites Part B Engineering*. 2019, vol. 164, pp. 747 – 757. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.01.092.

23. Krechetov O., Chernitsova A., Sharapova A., Terskaya E. Technogenic geochemical evolution of chernozems in the sulfur coal mining areas. *Journal of Soils and Sediments*. 2019, vol. 19, pp. 3139 – 3154. DOI: 10.1007/s11368-018-2010-7.

24. Varabanshchikov Y., Fedorenko I., Kostyrya S. Usanova K. Cold-bonded fly ash light-weight aggregate concretes with low thermal transmittance: Review. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019, vol. 983, pp. 858 – 866. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8\_84.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Размахнин Константин Константинович*<sup>1</sup> — д-р техн. наук,  
доцент, e-mail: constantin-const@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2944-7642,

*Хатькова Алиса Николаевна*<sup>1</sup> — д-р техн. наук,

профессор, e-mail: alisa1965.65@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6527-0026,

*Шумилова Лидия Владимировна*<sup>1</sup> — д-р техн. наук,

профессор, e-mail: shumilovalv@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5991-9204,

*Номоконова Татьяна Сергеевна*<sup>1</sup> — аспирант,

e-mail: krutikova\_1995@mail.ru,

ORCID ID: 0009-0002-9096-864X,

<sup>1</sup> Забайкальский государственный университет.

**Для контактов:** Размахнин К.К., e-mail: constantin-const@mail.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*K.K. Razmakhnin*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.),

Assistant Professor,

e-mail: constantin-const@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2944-7642,

*A.N. Khatkova*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: alisa1965.65@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6527-0026,

*L.V. Shumilova*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: shumilovalv@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5991-9204,

*T.S. Nomokonova*<sup>1</sup>, Graduate Student,

e-mail: krutikova\_1995@mail.ru,

ORCID ID: 0009-0002-9096-864X,

<sup>1</sup> Transbaikal State University,

672039, Chita, Russia.

**Corresponding author:** K.K. Razmakhnin, e-mail: constantin-const@mail.ru.

Получена редакцией 02.05.2023; получена после рецензии 31.07.2023; принята к печати 10.09.2021.

Received by the editors 02.05.2023; received after the review 31.07.2023; accepted for printing 10.09.2021.

