

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КЕРАМИЧЕСКИХ МЕМБРАН

© Н. П. Шапкин, А. Л. Шкуратов, А. В. Таскин, И. Г. Хальченко,
Н. В. Маслова, А. Н. Федорец

Дальневосточный федеральный университет,
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10
E-mail: npshapkin@gmail.com

Поступила в Редакцию 5 июня 2022 г.
После доработки 16 января 2023 г.
Принята к публикации 5 февраля 2023 г.

Исследованы процессы вскрытия золошлаковых отходов, при этом выполнен полный анализ подовой золы Лучегорской теплоэлектростанции Приморского края, а также проведено исследование по выделению редкоземельных элементов различными способами. Зола предварительно очищалась от несгоревшего угля (недожога) и оксидов железа, полученный продукт вскрывали различными способами. Выделение и разделение продуктов проводили в несколько этапов. Определена кислотность среды, отвечающая количественному осаждению матричных ионов железа и алюминия в зависимости от исходных концентраций растворов. Получен оксид кремния 97%-ной чистоты с высокой удельной поверхностью, а также твердый продукт с содержанием редкоземельных элементов более чем в 100 раз выше, чем в исходных образцах золы. Содержание редкоземельных элементов в конечном продукте составляет 74.5% от содержания данных элементов в исходном материале, также наблюдается обогащение продукта и другими рассеянными элементами, такими как цирконий, гафний и вольфрам. При вскрытии золы остаются твердые отходы, которые могут быть в дальнейшем использованы для получения керамических материалов и мембран с высокими техническими показателями.

Ключевые слова: подовая зола; переработка золошлаков; редкоземельные элементы; оксид кремния; сплавление со щелочью

DOI: 10.31857/S0044461822090134; EDN: PTAYQW

Золошлаковые отходы от сжигания угля являются потенциальным источником многих ценных компонентов, в том числе и редкоземельных элементов (РЗЭ). Извлечение оксидов кремния и алюминия является первой стадией переработки золошлаков [1, 2]. В литературе описаны два подхода, применяемые для извлечения алюминия из таких материалов: прямое выщелачивание минеральными кислотами и спекание с CaO, NaOH, Na₂CO₃, CaSO₄ и (или) (NH₄)₂SO₄ с последующим кислотным выщелачиванием [3], при этом низкие температуры (<100°C) и разбавленные кислоты не подходят для эффективного разруше-

ния алюмосиликатов и извлечения алюминия [4, 5]. В пирометаллургических методах используется высокотемпературное (400–1200°C) взаимодействие золы с соединениями кальция или натрия с образованием кислоторастворимых алюминатов кальция [6, 7]. Для улучшения извлечения алюминия могут использоваться добавки Na₂CO₃ и NaOH, отдельно или в комбинации с CaO [8], что требует более низких температур для термической активации [9]. Из полученного в результате гидротермальной обработки продукта возможно извлечение редкоземельных элементов [10, 11], однако из-за высокого содержания

матричных компонентов для получения концентрата РЗЭ необходимо дальнейшее селективное разделение компонентов [12, 13].

Переработка углей с целью выделения ценных компонентов сопровождается появлением большого количества отходов, которые могут быть использованы в качестве сырья при производстве строительных и керамических материалов [14].

Цель работы — исследование вскрытия подовой золы Лучегорской теплоэлектростанции, извлечение из нее ценных веществ и оценка возможности использования образующихся при этом отходов в качестве материала для изготовления керамических мембран.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования использована отвальная зола Приморской теплоэлектростанции (пгт. Лучегорск, Приморский край). Отбор точечных проб золошлаковых отходов проводили на различной глубине от 0.5 до 1.5 м от поверхности золоотвалов, расстояние между точками отбора составляло от 20 до 100 м. Из точечных проб формировали объединенную пробу, составленную путем смешивания точечных проб (не менее пяти), отобранных на одной площадке. Масса точечной пробы составляла не менее 500 г, масса объединенной пробы — 5 кг.

После гомогенизации объединенные пробы подвергали предварительной очистке от несгоревшего угля (недожога) и магнитной фракции, состоящей из Fe_2O_3 . Выделение недожога осуществляли путем флотации исходных проб золошлаковых отходов. Оксиды железа отделяли путем магнитной сепарации. Остаток пробы золошлака, прошедший флотацию и магнитную сепарацию, высушивали до постоянного веса и использовали для отбора лабораторной пробы методом квартования.

Элементный анализ проб проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометре Thermo Scientific iCAP 7600 Duo (табл. 1) и методом масс-спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 7500c (табл. 2). Для приготовления стандартных растворов с целью построения градуировочных графиков использовали стандартные мультиэлементные образцы MES-IV (Merck) и ICP-MS-68B (High Purity Standards).

Определение валового элементного состава выполняли путем сплавления образца золы со смесью карбонатов натрия и калия в массовом соотношении 1:3:3 и последующего анализа полученного плава. Содержание оксида кремния в плаве определяли

гравиметрическим способом, содержание остальных компонентов — методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Shimadzu ICPE-9000.

Рентгенофазовый анализ и определение минерального состава золы и плава выполняли на дифрактометре Bruker Advance-D8 (CuK_α -излучение) с 0.02 (θ) с разрешением $5^\circ < 2\theta < 90^\circ$.

Для различных вариантов химической обработки пробы, описанных ниже, использовали следующие реактивы: NH_3 водный 20%-ный (ос.ч., ООО «НеваРеактив»), HNO_3 70%-ный (ос.ч., ООО «НеваРеактив»), Na_2CO_3 (х.ч., АО «ЛенРеактив»), K_2CO_3 (х.ч., АО «ЛенРеактив»), NaOH (х.ч., АО «ЛенРеактив»). Дистиллированную воду получали с помощью дистиллятора Puridest PD 4 (Lauda).

Доведение в растворах pH до определенных значений выполняли путем прибавления к исходным растворам по каплям 8%-ного раствора NH_3 , значение pH контролировали с помощью pH-метра-иономера Эксперт-001 (НПП «Эконикс»). Полученные осадки отфильтровывали на фильтре с диаметром отверстий не более 0.45 мкм и растворяли в 2 М HNO_3 , содержание элементов во всех растворах определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии.

Разложение золошлаков выполняли двумя способами.

Способ 1. Полное разложение золы выполняли путем сплавления ее смеси с двукратным избытком Na_2CO_3 в муфельной печи SNOL 8,2/1100 при 900°C в течение 30 мин. Полученный плав измельчали, обрабатывали избытком дистиллированной воды, отфильтровывали нерастворимую часть, которую затем обрабатывали 25%-ным раствором HNO_3 , осадок вторично отфильтровывали. Осадки отжигали в муфельной печи для получения высокопористого SiO_2 , азотно-кислый раствор использовали в последующих экспериментах по выделению редкоземельных элементов.

Способ 2. Пробу золошлаковых отходов тщательно перемешивали с твердым NaOH и дистиллированной водой в массовом соотношении 1:2:3. Выщелачивание осуществляли в химическом реакторе-автоклаве Weihai Global Chemical Machinery MFG Co., Ltd GSH-50L. Время выщелачивания задавали с момента нагрева смеси до температуры 205°C и достижения давления в автоклаве 1.18–1.24 МПа. Обработку вели в течение 8 ч с поддержанием температуры в пределах 200 – 210°C и давления на достигнутом значении. После 8 ч автоклав отключали и оставляли охлаждаться до комнатной температуры. Продукт автоклавирования отстаивали, промывали водой и разделяли на твердую (проба 4) и жидкую

части (проба 5). Из промывной жидкости выделяли гель H_2SiO_3 и незначительное количество Al.

Обсуждение результатов

Химический анализ исходных золошлаков, проведенный методом атомно-эмиссионной спектроскопии, показывает наличие матричных Si и Al, на долю оксидов которых приходится порядка 64 и 18% соответственно (табл. 1). Общее содержание РЗЭ в исходной золе составляет $222 \text{ г} \cdot \text{т}^{-1}$ (табл. 2).

Удаление из исходного образца золошлаков недожога (углерод) и оксидов железа приводит к законо-

мерному увеличению содержания редкоземельных элементов, общее их содержание в такой пробе возрастает до $284 \text{ г} \cdot \text{т}^{-1}$ (табл. 2), при этом массовая доля некоторых из таких компонентов снижается, вероятно, за счет их удаления с фракцией оксидов железа.

Согласно данным рентгенофазового анализа, исходная зола содержит аморфные производные кремния и гематит (рис. 1, а). После сплавления золы при 900°C с Na_2CO_3 и NaOH (способ 1) компоненты золы аморфизируются, что также подтверждается данными рентгенофазового анализа (рис. 1, б), при этом остается и кристаллическая фаза, основой которой является гематит.

Таблица 1

Содержание макроэлементов в исходной пробе золошлаковых отходов с полигона Лучегорской теплоэлектростанции

Содержание элементов (в пересчете на оксиды), мас%										
SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	H_2O	потери при прокаливании
63.6	0.67	17.89	7.04	1.49	2.59	0.53	1.94	0.27	1.54	6.11

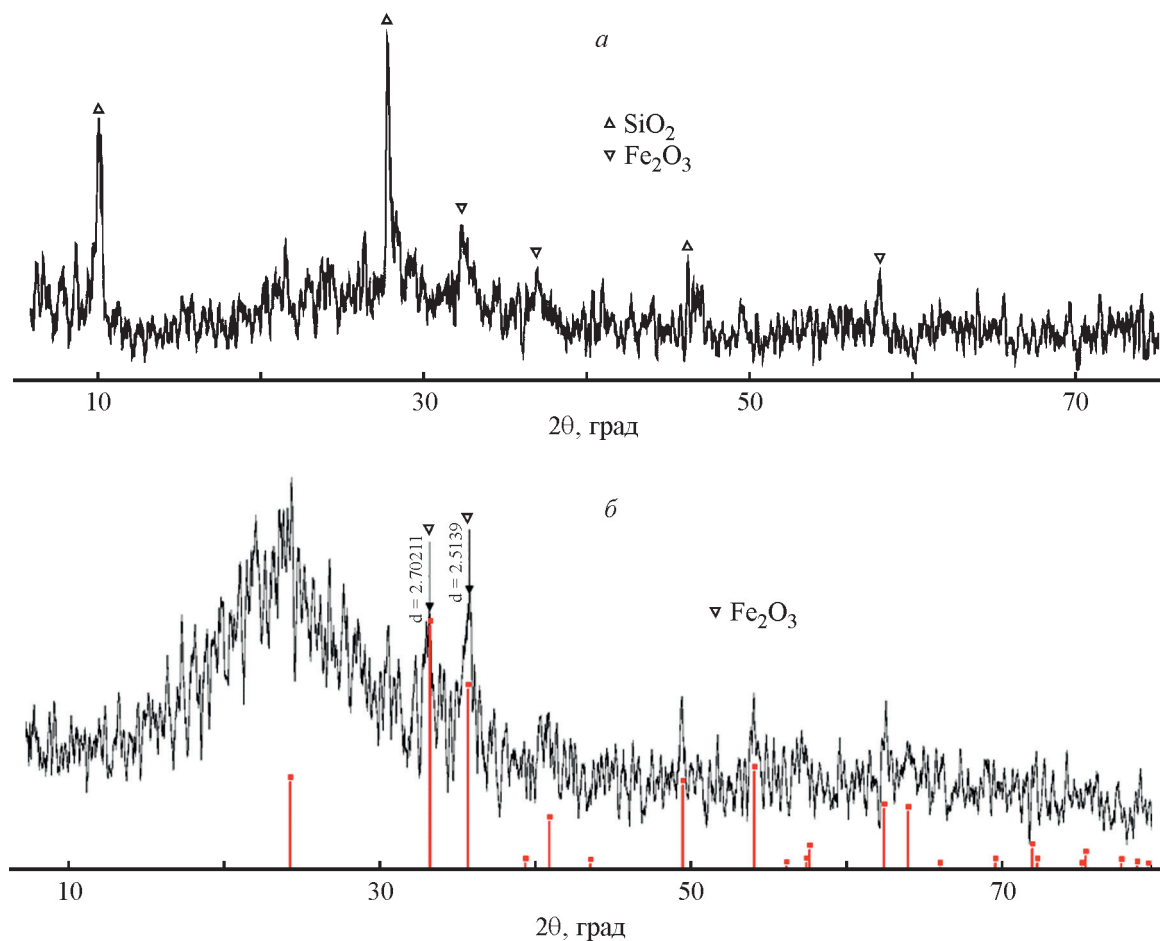


Рис. 1. Дифрактограммы исходной пробы золошлаков (а) и золошлаков после сплавления с NaOH и Na_2CO_3 (б).

Таблица 2

Содержание элементов в исходной пробе золошлаковых отходов с полигона Лучегорской теплоэлектростанции и в различных фракциях, полученных после выщелачивания плава золошлаковых отходов

Проба	Содержание элементов, г·г ⁻¹																			
	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Cd	Sn	Cs	Ba	Ho	Tm	
1	2.3	111.7	45.4	10.2	23.1	72.7	45.2	18.6	85.5	351.0	157.4	10.2	4.2	0.3	740.8	6.0	514.7	1.0	0.5	
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Lu	Hf	Ta	W	Pb	Th	U	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	La	Nd	Pr	Sc	Sm	Tb	Y	Yb
1	0.4	3.8	0.7	2.7	12.8	11.2	4.1	61.4	4.5	3.0	0.9	4.8	28.1	25.9	6.9	49.4	4.5	0.7	27.8	2.5
2	—	—	—	—	—	—	—	96.2	7.7	4.4	1.6	7.7	44.1	42.5	11.4	21.5	8.3	1.3	34.3	2.7
3	—	—	—	—	—	—	—	54.9	3.3	2.3	0.3	4.2	25.0	24.2	7.4	10.3	0.5	0.8	20.4	0.5
4	—	—	—	—	—	—	—	21.4	2.3	0.5	0.1	0.2	10.4	8.1	0.6	1.5	2.1	0.2	6.8	0.3
5	—	—	—	—	—	—	—	9.3	1.2	0.9	0.6	2.2	5.2	7.8	2.5	4.3	2.3	0.3	6.1	1.9

Примечание. Проба 1 — исходные золошлаковые отходы с полигона Лучегорской теплоэлектростанции; проба 2 — золошлаковые отходы, очищенные от недожога и оксидов железа; проба 3 — в растворе после отделения H_2SiO_3 ; проба 4 — в не растворившемся в 25%-ной HNO_3 осадке; проба 5 — в растворе после отделения H_2SiO_3 и обработки 25%-ной HNO_3 ; «—» — не определяли.

В результате выщелачивания плава дистиллированной водой, выпадения при pH 0.5 осадка H_2SiO_3 и его дальнейшего прокаливания получен порошок SiO_2 , масса которого составила 41.1% от массы золы, взятой для сплавления. В полученном после отделения кремнекислоты растворе определены содержания РЗЭ (табл. 2, проба 3). Извлечение РЗЭ в раствор таким образом составило 54.3%, масса не растворившегося после выщелачивания водой осадка — 23% от начальной массы золы. Данный осадок в несколько стадий обрабатывали 25%-ной HNO_3 , были получены фракции «красного шлама» (проба 5), геля H_2SiO_3 и оставшегося раствора (проба 4).

В раствор после отделения красного нерастворимого осадка перешло 19.2% от общего количества РЗЭ. Содержание РЗЭ в шламе составляет 15.7% от их общей массы в исходной пробе золы. Таким образом, суммарное содержание РЗЭ в пробах 3–5 составляет 89.2%, общие потери составили 10.8% от первоначальной массы.

Масса полученного после отделения «красного шлама» и прокаленного осадка SiO_2 составила 20.5 г. Таким образом, суммарная масса выделенного на двух стадиях из 100 г золы SiO_2 при чистоте данного продукта 97.5% составила 61.1 г, или 96% от его общего содержания в золе. Полученный SiO_2 можно отнести к микропористым сорбентам (рис. 2)

с высокой площадью удельной поверхности $S_{уд}$ (табл. 3).

В растворе, полученном в результате обработки щелочного плава подовой золы, при значениях pH 6.0 ± 0.2 наблюдается практически полное выпадение осадков $Fe(OH)_3$ и $Al(OH)_3$, почти равномерно распределяются между фазами осадка и раствора катионы элементов IIa группы таблицы Менделеева — Ca, Ba и Sr. Редкоземельные элементы переходят в твердую фазу практически полностью, за исключением оставшихся в растворе небольших количеств Ce, La и Dy. Преждевременный переход катионов некоторых элементов в фазу осадка при таких значениях pH может вызываться соосаждением данных компонентов, так как $Fe(OH)_3$ и $Al(OH)_3$ из-за их высокого содержания создают объемный осадок. Очевидно, что наибольший интерес с точки зрения выделения РЗЭ представляют растворы, характеризующиеся pH 5.0 ± 0.4 (табл. 4). При pH 4.8 в растворе остается еще значительная часть катионов Fe^{3+} (32.0%) и Al^{3+} (41.4%), при этом за счет нахождения части соединений Al в коллоидном состоянии фильтрация таких растворов затруднено. При pH 5.4 происходит практически полное удаление Fe^{3+} и Al^{3+} из раствора, в то же время в осадке находится и значительная часть РЗЭ, однако наиболее легкие из лантаноидов — La, Ce, Nd, Pr, Sm — переходят в осадок лишь частично.

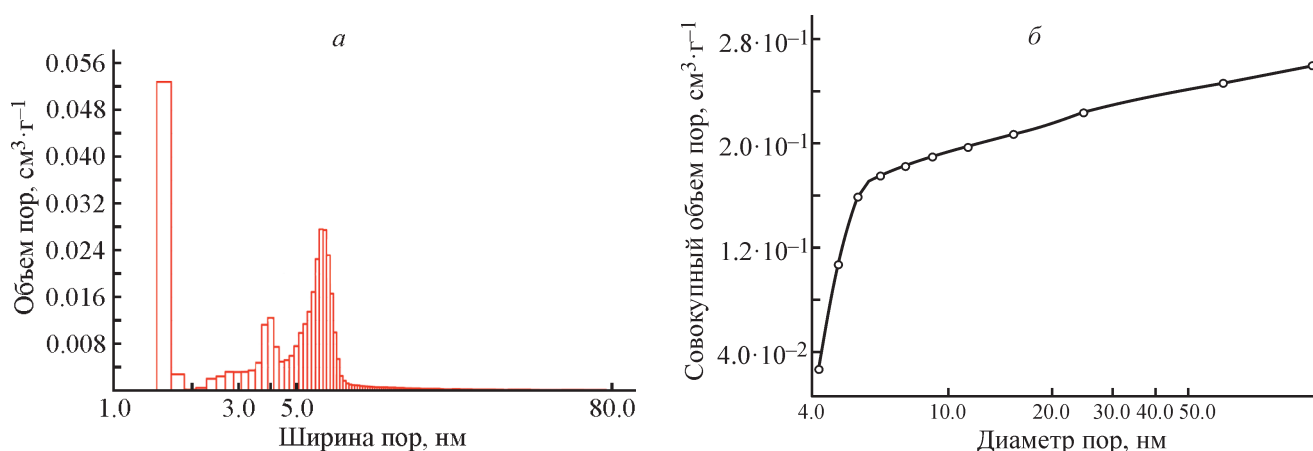


Рис. 2. Распределение диаметра пор SiO_2 по размерам, полученное методом низкотемпературной адсорбции азота: а — гистограмма, б — распределение объема пор по данным порометрии.

Таблица 3

Физико-химические характеристики SiO_2 , осажденного из продукта выщелачивания плава золошлаковых отходов

Параметр	Значение
Площадь удельной поверхности $S_{\text{уд}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$	456.0
Удельный объем $V_{\text{уд}}$, $\text{см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$	0.4
Диаметр пор d , нм	1.8–4.0
Максимальная адсорбция по метиленовому голубому a , $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$	251.0

При повышении значений pH с 4.8 до 5.4 значительно повышаются коэффициенты относительно концентрирования легких РЗЭ по отношению к матричному железу и алюминию в растворе. Такое концентрирование может быть использовано для дальнейшего отделения РЗЭ в виде гидроксидов при более высоких значениях pH.

Некоторые элементы, не относящиеся к группе редкоземельных, также могут представлять определенную ценность при достаточном обогащении ими продуктов разделения. При значениях pH в области 5.4 Cu и Cr практически полностью концентрируются в твердой фазе, Mn в большей степени концентрируется в растворе, для Co и Ni их распределение между твердой и жидкой фазами более равномерно. Следовательно, для увеличения рентабельности данного метода разделения возможно применение многоступенчатой схемы с целью выделения и других компонентов, не относящихся к группе редкоземельных.

После осаждения большей части Al и Fe при $\text{pH } 5.0 \pm 0.2$ в растворе наряду с оставшимися РЗЭ присутствует достаточно много других мешающих их дальнейшему селективному выделению веществ.

При доведении pH такого раствора до 7.5 практически все РЗЭ переходят в твердую фазу (табл. 5), большинство элементов, не относящихся к группе редкоземельных, остаются при таком значении pH в растворе. Полученный таким образом осадок содержит около 3% редкоземельных элементов и может быть использован для дальнейшего их выделения в чистом виде.

На основании полученных данных была предложена схема извлечения РЗЭ и получения оксида кремния методом щелочно-кислотного выщелачивания плава подовой золы (рис. 3).

Несмотря на то что щелочное сплавление позволяет выделить в чистом виде такие продукты, как SiO_2 и частично РЗЭ и другие металлы, этот метод достаточно энергоемкий и сложный. В связи с этим исследован другой метод вскрытия золошлаковых отходов (способ 2). Для извлечения легких, тяжелых металлов и РЗЭ был применен метод автоклавирования при повышенном давлении и температуре. Полученный в результате автоклавирования продукт был разделен на твердую (проба 4) и жидкую части (проба 5). Из промывной жидкости был выделен гель H_2SiO_3 и незначительное количество алюминия (табл. 6).

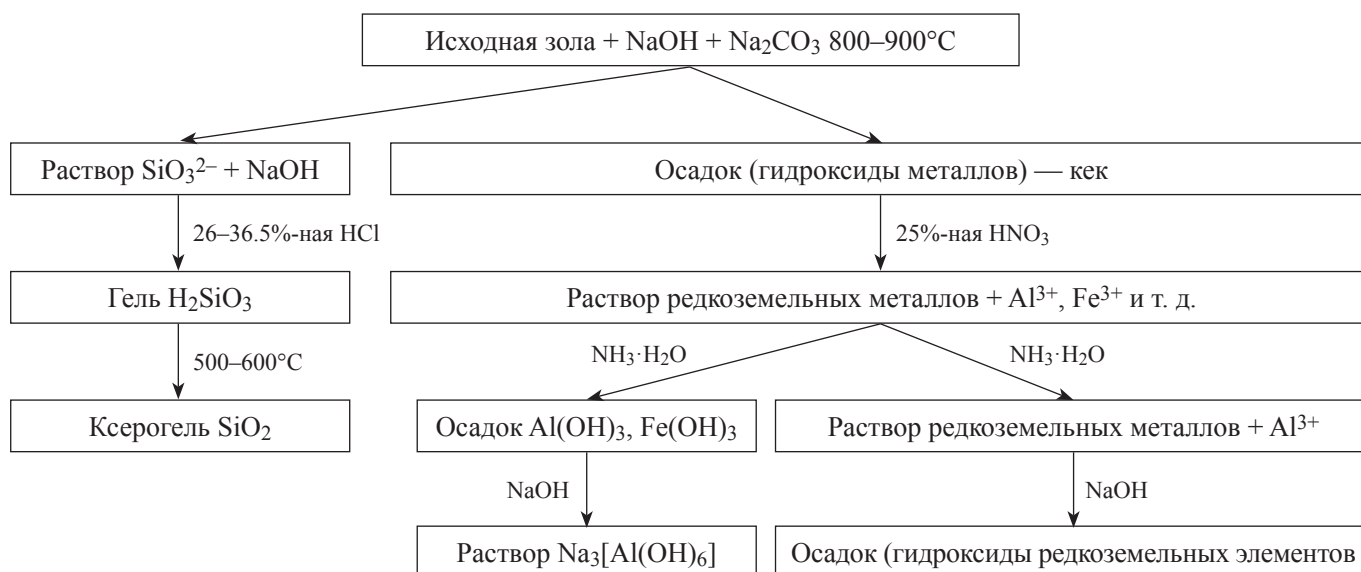


Рис. 3. Схема извлечения редкоземельных элементов из подовой золы при ее вскрытии сплавлением с NaOH и Na₂CO₃.

После выщелачивания полученного при 900°C (способ 1) плава водой вместе с Si и Al в раствор переходит большая часть РЗЭ (54%), в то время как при автоклавировании — незначительная их часть, при этом в раствор переходит большее количество матричных элементов (табл. 6).

Количество выделенного из жидкой фазы и прокаленного осадка SiO₂ составило около 65% от его общего содержания в золе при чистоте продукта 94.7% и $S_{уд} = 330 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$.

Из оставшегося после выделения H₂SiO₃ раствора путем добавления избытка Na₂CO₃ до pH 7 выделен белый осадок Al(OH)₃ с примесями других гидроксидов, содержащий 46.5% от исходной массы Al в золе (табл. 7, проба 6). Благодаря последовательным стадиям растворения и осаждения проведено обогащение осадка Al(OH)₃ (табл. 7, проба 7).

Масса нерастворившегося после выщелачивания остатка золы составила около 27% от массы исходной

золы, определено содержание РЗЭ в таком остатке (табл. 8, проба 8). Данную фракцию несколько раз последовательно обрабатывали растворами HCl и HNO₃, при этом некоторое количество РЗЭ перешло в жидкую фазу (табл. 8, проба 9).

Таким образом, выщелачивание кислотами твердой фазы после автоклавирования позволило выделить 41.2% РЗЭ. Вскрытие золы в автоклаве проводили несколько раз, каждый раз выщелачивание смесью кислот из твердой фазы составляло не более 40–42%. По-видимому, такой выход определяется составом твердой фазы, образующейся в условиях автоклавирования. Из РФА-спектров твердой фазы до выщелачивания кислотой (рис. 4, а) и после кислотной обработки (рис. 4, б) и данных элементного анализа этих материалов (табл. 9) можно заключить, что их минеральный состав коррелирует с элементным: в данных фазах преобладают соединения Na, Al и Si, в меньшей степени Fe. После кислотной обработки

Таблица 7

Содержание элементов в осадках на основе Al(OH)₃, выделенных из продуктов автоклавирования золошлаковых отходов

Проба	Содержание элементов (без учета кислорода), мас%							
	Al	Na	Cl	Fe	Si	Ca	Ti	K
6	64.1	14.5	11.3	6.9	1.4	0.9	0.4	0.2
7	76.0	8.9	75.3	6.1	0.7	0.4	0.2	0.1

Примечание. Проба 6 — осадок до переосаждения, проба 7 — осадок после двух стадий переосаждения за счет последовательного его растворения в HCl и дальнейшего осаждения путем добавления Na₂CO₃.

Таблица 8

Содержание редкоземельных элементов в различных фракциях, полученных после автоклавирования золошлаковых отходов в присутствии NaOH

Проба	Содержание элементов, г·г ⁻¹													
	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	La	Nd	Pr	Sc	Sm	Tb	Y	Yb	Σ
8	37.7	2.7	1.3	0.6	3.4	16.9	15.7	3.8	6.8	1.9	0.4	14.2	1.4	106.8
9	10.5	0.9	0.5	0.2	1.5	4.8	15.7	2.2	1.9	1.0	0.1	4.3	0.4	44.0

Примечание. Проба 8 — твердый остаток после автоклавирования, проба 9 — раствор после кислотного выщелачивания твердого остатка автоклавирования (в пересчете на исходную твердую фазу).

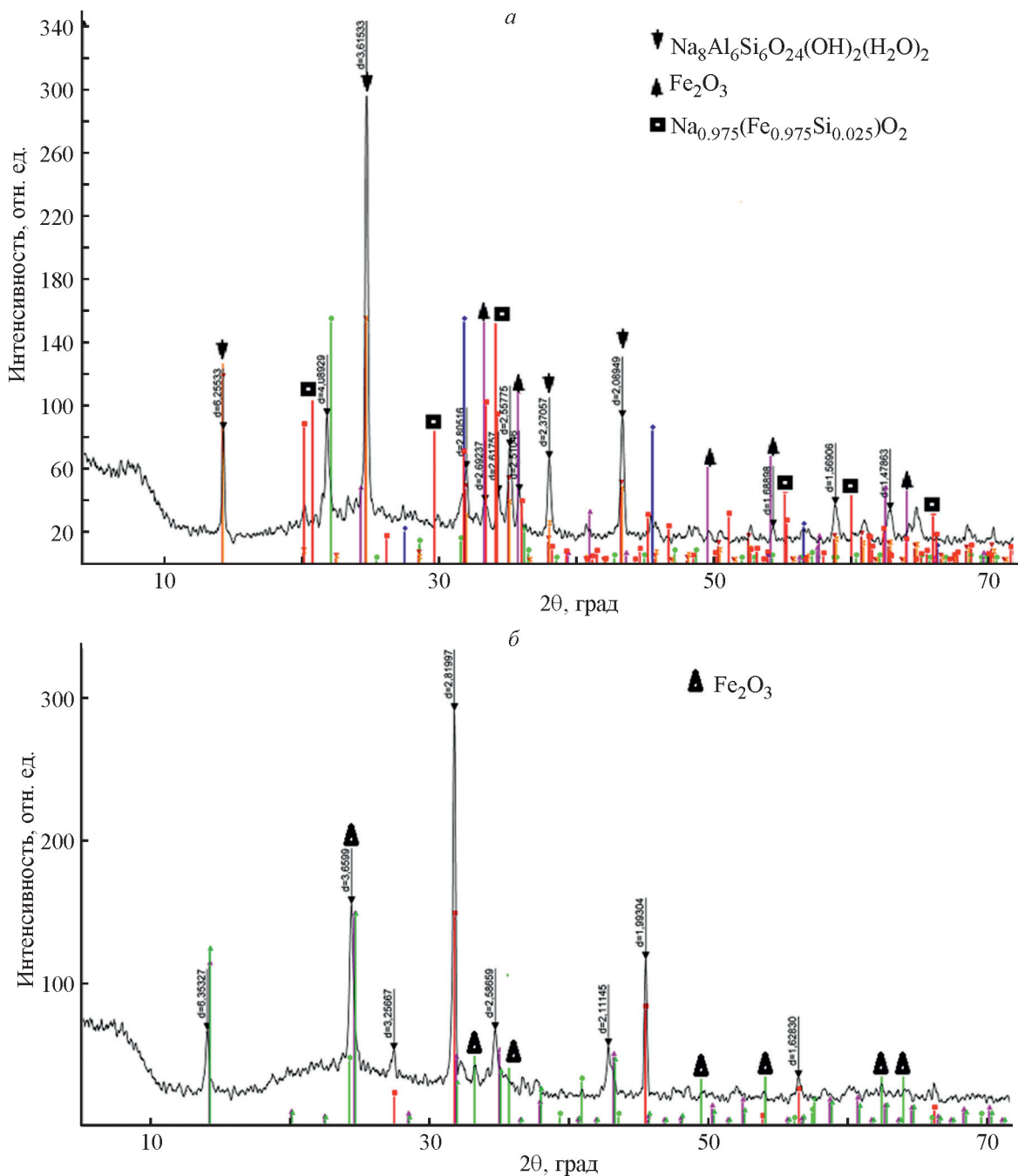


Рис. 4. Дифрактограммы твердого остатка после автоклавирования золошлаковых отходов в присутствии NaOH (а) и аналогичной фракции после обработки ее растворами HCl и HNO₃ (б).

Таблица 9

Макроэлементный состав твердого остатка автоклавирования золошлаковых отходов

Проба	Содержание элементов (без учета кислорода), мас%										
	Si	Na	Al	Fe	Ca	Mg	K	Ti	Ba	Sr	Mn
До кислотного выщелачивания (проба 8)	23.4	47.9	18.8	4.1	2.8	1.1	0.7	0.6	0.1	0.1	0.1
После кислотного выщелачивания (проба 10)	55.0	29.4	9.2	3.2	1.4	—	0.3	1.0	—	—	—

Примечание. «—» — не обнаружено.

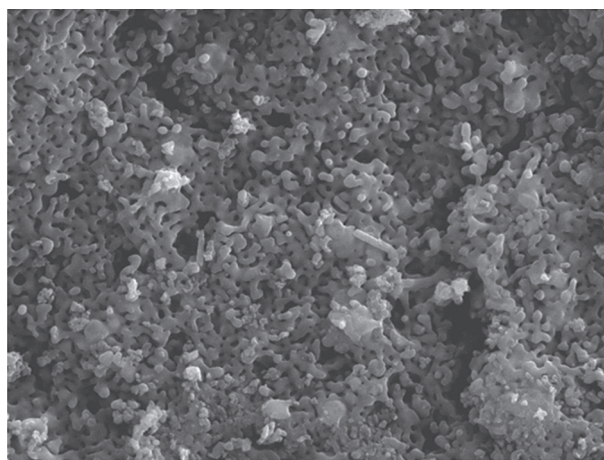
минеральный состав изменился, на РФА-спектрах присутствуют пики, соответствующие оставшимся фазам — натрийалюмосиликатам и Fe_2O_3 .

Полученные отходы (проба 10) представляют собой смесь алюмосиликатов натрия с небольшим содержанием NaCl. Данные материалы использованы для получения керамических материалов, в частности мембран. В условиях обычного формования (10 МПа, 900°C) получены мембраны, физико-химические характеристики которых представлены в табл. 10, а изображение поверхности, полученное

Таблица 10

Элементный состав и физико-химические характеристики мембраны на основе твердого остатка кислотного выщелачивания продукта автоклавирования золошлаковых отходов

Параметр	Значение
Площадь удельной поверхности $S_{уд}$, $m^2 \cdot g^{-1}$	2.5
Удельный объем $V_{уд}$, $cm^3 \cdot g^{-1}$	0.016
Диаметр пор d , нм	23.0–24.0
Объем «ловушки» позитрония V_{Ps} , Å^3	268.0
Объем «ловушки» позитрона V_{e^+} , Å^3	185.0
Радиус ловушки позитрония R_{Ps} , Å	4.2
Твердость по Бринеллю, $kg \cdot cm^{-2}$	320.0
Производительность, $ml \cdot min^{-1}$	6.5
Прочность, $kg \cdot cm^{-2}$	450.0
Содержание элементов, мас%:	
Si	26.24
Na	7.16
Al	3.11
Fe	1.51
Ca	0.63
Mg	0.35
K	0.15
Ti	0.2



10 мкм

Рис. 5. Изображение поверхности мембраны на основе твердого остатка кислотного выщелачивания продукта автоклавирования золошлаковых отходов, полученное методом сканирующей электронной микроскопии.

методом сканирующей электронной микроскопии, — на рис. 5.

Приведенные данные о пористости, твердости и производительности полученных керамических мембранных материалов (табл. 10) свидетельствуют о возможности их использования в фильтрационных процессах для очистки растворов от коллоидных частиц и органических веществ с высокой молекулярной массой, а также в качестве прочных высокопропускаемых подложек для нанесения полимерных слоев при получении многослойных мембран [15], что и будет являться предметом дальнейших исследований.

Выводы

Предложенная технологическая схема переработки золошлаковых отходов показала возможность при относительно невысоких энергетических затратах (нагрев до 210°C, давление в пределах 1.24 МПа) получать SiO_2 и Al_2O_3 в количествах 65 и 46% со-

ответственно от их начального содержания в исходной массе золы, при этом из твердой фазы извлекается около 42% от общего количества РЗЭ. Образовавшиеся в результате реализации данной технологической схемы отходы, содержащие силикаты Na, Al и Fe, являются материалом для получения керамических мембран.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

Н. П. Шапкин — выполнение отдельных стадий разложения золошлаковых отходов: разложение щелочного плава со смесью карбонатов путем обработки водой и кислотами, выделение кремнекислоты и гидроксида алюминия из продуктов выщелачивания, переосаждение гидроксида алюминия для его очистки; А. Л. Шкуратов — сплавление проб в муфельных печах, осаждение элементов при различных значениях рН, изготовление мембранных материалов, выполнение атомно-эмиссионного анализа; А. В. Таскин — отбор проб золошлаковых отходов на полигоне, механохимическая подготовка и обогащение золошлаковых отходов, обработка проб в автоклаве; И. Г. Хальченко — выполнение стадий кислотного и водного выщелачивания продукта автоклавирования золошлаковых отходов, определение эксплуатационных характеристик мембран; Н. В. Маслова — определение элементного состава некоторых проб; А. Н. Федорец — получение изображений поверхности методом сканирующей электронной микроскопии, выполнение рентгенофазового анализа.

Информация об авторах

Шапкин Николай Павлович, д.х.н., проф. Департамента химии и материалов Института наукоемких технологий и материалов ДВФУ
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4287-8917>
SPIN-код: 9135-8524
AuthorID: 55596

Шкуратов Антон Леонидович, к.х.н., доцент Департамента химии и материалов Института наукоемких технологий и передовых материалов ДВФУ
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5603-8222>
SPIN-код: 3753-5395
AuthorID: 977398

Таскин Андрей Васильевич, к.х.н., заведующий лабораторией, сотрудник научно-организационного управления Международного центра обогащения минерального сырья и использования вторичных ресурсов Политехнического института ДВФУ
SPIN-код: 1222-4432
AuthorID: 973841

Хальченко Ирина Григорьевна, к.х.н., доцент Департамента химии и материалов Института наукоемких технологий и передовых материалов ДВФУ
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5541-2200>
SPIN-код: 7271-0428
AuthorID: 760328

Маслова Наталья Валерьевна, ведущий инженер Департамента химии и материалов Института наукоемких технологий и передовых материалов ДВФУ
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1814-0234>

Федорец Александр Николаевич, ассистент, заведующий лабораторией методов обучения Департамента информационных и компьютерных систем Института математики и компьютерных технологий ДВФУ
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9007-3171>
SPIN-код: 7738-6340
AuthorID: 1147161

Список литературы

- [1] *Hower J. C., Groppo J. G., Joshi P., Dai S., Moecher D. P., Johnston M. N.* Location of cerium in coal-combustion fly ashes: Implications for recovery of lanthanides // *Coal Combust. Gas. Prod.* 2013. V. 5. P. 73–78. <http://doi.org/10.4177/CCGP-D13-00007.1>
- [2] *Досмухамедов Н. К., Каплан В. А., Даруеш Г. С.* Инновационная технология комплексной переработки золы от сжигания угля // *Уголь.* 2020. № 1. С. 58–62. <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2020-1-58-63>
- [3] *Ding J., Ma S., Shen S., Xie Z., Zheng S., Zhang Y.* Research and industrialization progress of recovering alumina from fly ash: A Concise review // *Waste Manage.* 2017. V. 60. P. 375–387. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.009>
- [4] *Bai G., Qiao Y., Shen B., Chen S.* Thermal decomposition of coal fly ash by concentrated sulfuric acid and alumina extraction process based on it // *Fuel Process. Technol.* 2011. V. 92. P. 1213–1219. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.01.017>
- [5] *Nayak N., Panda C. R.* Aluminium extraction and leaching characteristics of Talcher thermal power station fly ash with sulphuric acid // *Fuel.* 2010. V. 89. P. 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.07.019>
- [6] *Rayzman V. L., Shcherban S. A., Dworkin R. S.* Technology for chemical metallurgical coal ash

- utilization // *Energy Fuels*. 1997. V. 11. P. 761–773. <https://doi.org/10.1021/ef960190s>
- [7] Yao Z. T., Xia M. S., Sarker P. K., Chen T. A Review of the alumina recovery from coal fly ash with a focus in China // *Fuel*. 2014. V. 120. P. 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.12.003>
- [8] Bai G.-H., Teng W., Wang X.-G., Qin J.-G., Xu P., Li P.-C. Alkali desilicated coal fly ash as substitute of bauxite in lime-soda sintering process for aluminum production // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2010. V. 20. P. 169–175. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(10\)60034-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60034-9)
- [9] Guo Y., Li Y., Cheng F., Wang M., Wang X. Role of additives in improved thermal activation of coal fly ash for alumina extraction // *Fuel Process. Technol.* 2013. V. 110. P. 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.12.003>
- [10] Tang M., Zhou C., Pan J., Zhang N., Liu C., Cao S., Hu T., Ji W. Study on extraction of rare earth elements from coal fly ash through alkali fusion — acid leaching // *Miner. Eng.* 2019. V. 136. P. 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.01.027>
- [11] Taggart R. K., Hower J. C., Hsu-Kim H. Effects of roasting additives and leaching parameters on extraction of rare earth elements from coal fly ash // *Int. J. Coal Geol.* 2018. V. 196. P. 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.06.021>
- [12] Mondal S., Ghar A., Satpati A. K., Sinharoy P., Singh D. K., Sharma J. N., Sreenivas T., Kain V. Recovery of rare earth elements from coal fly ash using TEHDGA impregnated resin // *Hydrometallurgy*. 2019. V. 185. P. 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.02.005>
- [13] Черкасова Т. Г., Васильева Е. В., Тихомирова А. В., Бобровникова А. А., Неведров А. В., Папин А. В. Угольные отходы как сырье для получения редких и рассеянных элементов // *Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та*. 2016. № 6. С. 185–189.
- [14] Пат. РФ 213839 (опубл. 1999). Способ подготовки золы-уноса от сжигания углей для использования в качестве строительных материалов.
- [15] Новиков В. И., Крячко В. В., Тарасов Ю. И., Церенчимейд С., Алентьев А. Ю. Многослойные металлокерамические российские мембраны. Структура, применение и перспективы // *Мембраны и мембран. технологии*. 2019. Т. 9. № 3. С. 155–164. <http://dx.doi.org/10.1134/S2218117219030039> [Novikov V. I., Kryachko V. V., Tarasov Yu. I., Tserenchimed S., Alentiev A. Yu. Russian multilayer metal-ceramic membranes: Structure, application, and perspectives // *Membr. Membr. Technol.* 2019. V. 1. P. 127–136. <https://doi.org/10.1134/S251775161903003X>].
-