

P18-2026-12

С. П. Каплина<sup>1,\*</sup>, М. В. Густова<sup>1</sup>, Н. Балжинням<sup>2</sup>,  
А. Ундармаа<sup>2</sup>, С. Унур-Одонтуяа<sup>2</sup>, Н. Сандагдорж<sup>3</sup>,  
С. И. Алексеев<sup>1</sup>, А. Ю. Бодров<sup>1</sup>, Н. В. Аксенов<sup>1</sup>

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ, ТОРИЯ И УРАНА  
В УГЛЯХ И ИХ ЗОЛАХ РАЗНЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ МОНГОЛИИ

Направлено в журнал «Химия твердого топлива»

---

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup> Геологический центр исследований и анализа, Улан-Батор, Монголия

<sup>3</sup> ООО «Эрдэнэс Монгол», Улан-Батор, Монголия

\* E-mail: svkap@jinr.ru

Каплина С. П. и др.

P18-2026-12

Оценка содержания редкоземельных элементов, тория и урана в углях и их золах разных месторождений Монголии

Изучено содержание редкоземельных элементов (РЗЭ), тория и урана в углях и золах углей месторождений Багануур, Шивээ-Овоо, Баянбогд с использованием современных аналитических методов: масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, рентгенофлуоресцентного и гамма-активационного анализов. Проведена геохимическая оценка уровня концентраций исследуемых элементов. Угли изученных месторождений обогащены легкими лантаноидами. Установлены корреляционные связи между содержанием РЗЭ и тория, урана. Проведена первичная оценка ресурсного потенциала содержащихся РЗЭ, оценка с использованием коэффициента перспективности ( $K_{\text{пер}}$ ), которая показала, что зола углей с изученных месторождений может рассматриваться в качестве перспективного источника получения РЗЭ. Показано, что при сжигании угля на Улан-Баторской ТЭС-4 происходит концентрирование РЗЭ в различных фракциях золы (шлаке и золе-уносе). Обогащение РЗЭ, такими как Sc, Y, La, Ce, Nd, золошлаковых отходов — в 2,6–9,7 раза по сравнению с исходным углем.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2026

Kaplina S. P. et al.

P18-2026-12

Assessment of the Content of Rare Earth Elements, Thorium and Uranium in Coals and Ashes from Different Deposits in Mongolia

The content of rare earth elements (REEs), thorium and uranium in the coals and coal ashes of the Baganuur, Shivee-Ovoo, and Bayanbogd deposits was studied using current analytical methods: inductively coupled plasma mass spectrometry, X-ray fluorescence, and gamma activation analysis. A geochemical assessment of the concentrations of the studied elements was carried out. The coals of the studied deposits are enriched with light lanthanides. Correlations between the content of REEs and thorium, as well as uranium, have been established. A primary assessment of the resource potential of the contained REEs was carried out, an assessment using the perspective coefficient ( $K_{\text{per}}$ ), which showed that the ash of coal from the studied deposits can be considered as a promising source for obtaining REEs. It has been shown that when coal is burned at the Ulaanbaatar Thermal Power Plant-4, REEs are concentrated in various ash fractions (slag and fly ash). The enrichment of ash and slag waste with REEs such as Sc, Y, La, Ce, and Nd is 2.6–9.7 times higher than that of the original coal.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2026

## ВВЕДЕНИЕ

Монголия богата полезными ископаемыми, горнодобывающая отрасль является основным сектором экономики [1]. В мире растет спрос на редкоземельные элементы (РЗЭ), которые имеют ценность для производства высокотехнологичной продукции, объемы которой со временем будут только возрастать. РЗЭ часто входят в списки стратегических типов минерального сырья разных стран как наиболее важные для обеспечения национальной безопасности и развития экономики. Данные элементы необходимы в микроэлектронике, металлургии, химической, стекольной, аэрокосмической и оборонной промышленности [1]. Редкоземельные элементы используются при производстве солнечных батарей, ветрогенераторов, электродвигателей транспортных средств и т. д., при этом прогнозируется увеличение объемов их производства в связи с активным освоением альтернативных источников энергии [2, 3].

В настоящее время широко используется разделение РЗЭ по их экстракционному поведению, согласно которому выделяют легкую (La, Ce, Pr, Nd), среднюю (Sm, Eu, Gd) и тяжелую (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y) группы РЗЭ. Две последние группы иногда объединяют в среднетяжелую группу (Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y) [2, 3]. Скандий (Sc) в соответствии с общепринятой практикой не относится ни к одной из групп и рассматривается отдельно. Необходимо отметить, что в разных странах существуют различные определения групп легких РЗЭ и тяжелых РЗЭ. Например, согласно классификации IUPAC (Международного союза теоретической и прикладной химии), элементы от La до Eu относятся к легкой группе, а элементы от Gd до Lu и Y — к тяжелой; в Европе легкую группу часто определяют как элементы от La до Sm, а тяжелую — как элементы от Eu до Lu и Y; в Китае Sm рассматривается как тяжелый РЗЭ [4].

Редкоземельные элементы встречаются в составе различных минералов чаще в низких концентрациях. Менее десяти минералов имеют экономическую ценность. К ним относятся бастнезит  $[\text{PZЭCO}_3(\text{F,OH})]$ , паризит  $[\text{CaPZЭ}_2(\text{CO}_3)_3(\text{F,OH})_2]$ , синхизит  $[\text{CaPZЭ}(\text{CO}_3)_2(\text{F,OH})]$ , Ва-РЗЭфторкарбонаты  $[\text{Ba}_x\text{PZЭ}_y(\text{CO}_3)_{x+y}\text{F}_y]$ , монацит  $[(\text{PZЭ,Th,Ca,Sr})(\text{P,Si,S})\text{O}_4]$ , ксенотим  $[(\text{PZЭ,Zr})(\text{P,Si})\text{O}_4]$ , черчит  $[\text{PZЭPO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ , фергусонит  $[\text{PZЭNbO}_4]$  и лопарит  $[(\text{Na,PZЭ,Ca})(\text{Ti,Nb})\text{O}_3]$  [5, 6]. Суммарное содержание РЗЭ

в верхней континентальной земной коре составляет 168 г/т [7]. Легкие РЗЭ относительно распространены по сравнению с тяжелыми. Среднее содержание РЗЭ в земной коре колеблется от 66 г/т для Се, 40 г/т для Nd, 35 г/т для La до 0,5 г/т для Tm и  $\leq 0,1$  г/т для Lu [8]. Из рудного сырья получают редкоземельный концентрат, который поступает на разделение для получения индивидуальных элементов [2]. Извлечение и разделение РЗЭ как из природного, так и из техногенного сырья и получение отдельных элементов в чистом виде связаны с технологическими трудностями [9].

Мировым лидером по добыче, переработке и экспорту РЗЭ является Китай, где на границе с Монголией (Внутренняя Монголия) расположено крупнейшее в мире известное месторождение редкоземельных элементов Баян-Обо, в котором, по оценкам, содержится более 44 млн тонн РЗЭ.

Рост мирового спроса на редкоземельные элементы приводит к поиску альтернативных источников их получения. Многие научные исследования [6, 10–18] показали, что уголь может содержать потенциально значительные количества РЗЭ, в связи с этим отходы переработки угля и золошлаковые отходы, образующиеся в результате сжигания угля на тепловых электростанциях, привлекают особое внимание из-за ценности РЗЭ, которые они могут содержать. Состав золошлаковых отходов сильно зависит от состава исходного угля и может варьироваться в широких пределах. Процессы сжигания угля приводят к обогащению золы редкоземельными элементами в 6–10 раз по сравнению с исходным углем [12, 19]. В работе [20] проведена оценка содержания РЗЭ в углях США, Китая и ряда других стран, а также рассчитано среднее содержание всех индивидуальных редкоземельных элементов в углях мира и их золах. Среднемировое значение суммарного содержания РЗЭ для бурых углей составляет 69,37 г/т, для зол бурых углей — 368,4 г/т.

Монголия по запасам твердых горючих ископаемых занимает десятое место в мире, располагая, по разным оценкам, от 150 до 175 млрд тонн углей. Основную часть запасов (80%) составляют бурые и низкотемпературные каменные угли [21]. В буром угле высокое содержание фракции органического вещества, включая гуминовые кислоты, которые аккумулируют различные элементы-примеси, в том числе редкоземельные элементы, образует комплексные соединения. Буроугольные месторождения сосредоточены в восточном и центральном экономических районах страны.

Бурый уголь в основном используется для внутреннего потребления, в то время как каменный уголь идет на экспорт. В энергобалансе Монголии уголь доминирует, на его долю приходится почти 90% электрогенерации, для сравнения: в мире доля угольной энергетики составляет 34%, в России — около 19%, в Китае — 61%, в Индии — 74% [22]. На теплоэлектростанциях (ТЭС) в качестве основного топлива используется уголь из монгольских месторождений, после его сжигания образуются золошлаковые отходы, которые могут рассматриваться в качестве потенциальных вторичных материальных ресурсов и вовлекаться в хозяйственный оборот.

Только на крупнейшей тепловой электростанции ТЭС-4 (749 МВт), расположенной в Улан-Баторе, в год сжигается примерно 2,4 млн тонн угля, на ее долю приходится более 70% мощности центральной энергосистемы, в структуру энергоснабжения которой входят пять угольных теплоэлектростанций [23–25].

На электростанциях могут сжигать как уголь из одного месторождения, так и смесь углей из нескольких источников. Наличие различных элементов-примесей, например урана, тория, мышьяка, ванадия, свинца и др., ограничивает возможность использования золошлаковых отходов в дорожной, строительной индустрии и сельском хозяйстве. Возможность использования золошлаковых отходов угольных ТЭС для производства концентратов редкоземельных элементов представляется особо актуальной. Вовлечение в переработку техногенного сырья также поможет решить экологические проблемы, связанные с золошлаковыми отвалами, так как утилизация таких отходов позволит снизить негативное воздействие на окружающую среду. В США, странах ЕС и других промышленно развитых странах уровень переработки золошлаков составляет более 60%, в Индии — 100%, в Китае — 60%, в России — около 19% [26].

Целью настоящего исследования является оценка содержания редкоземельных элементов в углях и их золах месторождений Монголии для выявления потенциальных источников их получения, а также выявление корреляций между содержанием РЗЭ и тория (урана) в углях исследуемых месторождений.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

В исследовании были использованы пробы углей, отобранные на трех месторождениях Монголии: Багануур, Шивээ-Овоо и Баянбогд. Всего было проанализировано 42 образца углей и их зол. Также в работе были использованы образцы угля, шлака и золы-уноса, отобранные в 2018 г. на ТЭС-4 (Улан-Батор).

Месторождение Багануур расположено примерно в 130 км к востоку от Улан-Батора, на территории сомона Баянцагаан Центрального аймака Монголии. Его геологические запасы угля оцениваются в 812 млн тонн, ежегодно здесь добывается порядка 3,5–4,4 млн тонн. Багануурский угольный разрез играет ключевую роль в энергетической безопасности Монголии, обеспечивая до 70% потребности ТЭС столицы в угле [27].

Месторождение Шивээ-Овоо находится на территории сомона Шивээговь аймака Говь-Сумбер, в 260–265 км к юго-востоку от Улан-Батора, геологические запасы здесь оцениваются в 2,7 млрд тонн, годовая добыча составляет примерно 2 млн тонн. Угольный разрез Шивээ-Овоо является стратегически важным объектом Монголии, обеспечивающим около 30% национальной электроэнергетики [27].

Месторождение Баянбогд расположено на территории сомона Улаанбадрах аймака Дорноговь, гора Баянбогд. Общие запасы угля здесь оцениваются около 3 млрд тонн, из них производственные (экономически

целесообразные) — примерно 1,1 млрд тонн. Уголь требует переработки и обогащения. Месторождение является важнейшим ресурсом для долгосрочной энергетической и промышленной стратегии Монголии и отнесено к «особым государственным нуждам» [28].

Образцы углей были высушены при температуре 105 °С, измельчены до 200 меш (74 мкм) и гомогенизированы. В работе использовался комплекс современных аналитических методов. Определение содержания редкоземельных элементов, а также тория и урана в пробах проводилось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на приборе NexION 2000 ICP-MS в лаборатории Геологического центра исследований и анализа (Улан-Батор). Данным методом были проанализированы золы углей, для этого пробы углей озоляли в муфельной печи, золу обрабатывали кислотами и переводили в раствор.

Метод ИСП-МС позволяет определить низкие концентрации практически всех химических элементов и широко используется в качестве аналитического метода. Однако он требует специальной подготовки проб и их перевода в жидкую фракцию, что может приводить к определенным потерям элементов. На основе полученных результатов из каждого месторождения были отобраны пробы с повышенным содержанием тория и урана, а также РЗЭ, которые были проанализированы в ЛЯР ОИЯИ (Дубна) с применением ядерно-физических методов: рентгенофлуоресцентного (РФА) и гамма-активационного (ГАА) анализов. Были проанализированы образцы как зол углей, так и самих углей.

РФА позволяет с высокой точностью определить широкий спектр элементов без разрушения образца. Для возбуждения рентгеновского излучения использовали стандартные радиоизотопные источники  $^{109}\text{Cd}$  ( $E = 22,16$  кэВ,  $T_{1/2} = 453$  сут) с активностью 0,2 ГБк и  $^{241}\text{Am}$  ( $E = 59,6$  кэВ,  $T_{1/2} = 458$  лет) с общей активностью 27,3 ГБк. Характеристическое рентгеновское излучение регистрировали полупроводниковым Si(Li)-детектором с разрешением 145 эВ на линии  $\text{Fe}_{K\alpha}$  (6,4 кэВ). Время измерений варьировалось от 10 до 15 мин. Обработку спектров проводили с помощью программного обеспечения WinAxil Canberra. В качестве эталонных образцов использовали стандартные образцы МАГАТЭ, России и Монголии, близкие по матричным эффектам к анализируемым образцам: IAEA Soil-5 (почва Перу), СП-1 (курский чернозем), СГ-1А (горная порода, альбитизированный гранит), CGL 208 (летучая зола угля), CGL 008 (гранит), CGL 503 (урановая руда) и др. Для определения элементов, отсутствующих в эталонных образцах, была использована методика одновременного определения в насыщенных слоях вещества всех элементов, возбуждаемых радиоизотопным источником, по единой калибровочной кривой [29].

Для проведения ГАА измельченные образцы и эталоны помещали в полиэтиленовые цилиндрические кассеты диаметром 35 мм и высотой 5 мм, закрытые с торцов лавсановой пленкой толщиной 6 мкм. В качестве эталонов использовали стандартные образцы CGL 208 (летучую золу угля) и CGL 008 (гранит). Общее количество образцов и эталонов, облучаемых

при одном сеансе, составляло не более 12 шт. Каждый сеанс облучения проводили в течение 4 ч, источником тормозного гамма-излучения служил микротрон МТ-25, энергия электронов  $E_e = 23$  МэВ, средний ток электронов 10 мкА. Распределение потока гамма-квантов по сборке из кассет определяли с использованием мониторов, изготовленных из медной фольги [30]. Гамма-спектрометрические измерения образцов проводили с помощью многоканального амплитудного анализатора импульсов фирмы Canberra с HPGe-детектором с разрешением 1,5 кэВ и эффективностью регистрации гамма-излучения порядка 1% на линии 1,33 МэВ ( $^{60}\text{Co}$ ). Для определения содержания урана и тория в образцах использовали реакции  $^{238}\text{U}(\gamma, n)^{237}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 6,8$  сут,  $E_\gamma = 208$  кэВ),  $^{232}\text{Th}(\gamma, n)^{231}\text{Th}$  ( $T_{1/2} = 25,5$  ч,  $E_\gamma = 84,17$  кэВ). Время измерений варьировалось от 300 до 3600 с. Обработку спектров проводили с помощью программного обеспечения Genie 2000. Погрешность измерений в зависимости от интенсивности гамма-линий определяемых радионуклидов составила 3–5%.

Оценка уровня концентраций исследуемых элементов в углях и золах проводилась путем их сравнения с угольными кларками или кларками зол углей. Сопоставление с кларками позволяет сравнить концентрации тех или иных элементов изучаемых углей конкретного месторождения в геохимическом аспекте. В данной работе использовались общепринятые кларки для бурых углей и их зол, рассчитанные в работе [20]. Суммарное содержание РЗЭ в углях и золах оценивалось в сопоставлении с предлагаемыми в работе [31] минимальными промышленными содержаниями: Sc в угле 5–10 г/т, РЗЭ + Y в угле 34–68 г/т, РЗЭ + Y в золе угля 340 г/т.

На основе полученных данных проведена оценка ресурсного потенциала редкоземельных металлов в исследуемых угольных месторождениях по формуле  $P = QM_{\text{ср}}$ , где  $Q$  — запасы угля в месторождении, т;  $M_{\text{ср}}$  — среднее содержание элемента в угле, г/т. Использовалась методика укрупненной геолого-экономической оценки редкометалльно-угольных месторождений, предложенная в работе [31].

Предварительная оценка буроугольных месторождений по содержанию редкоземельных элементов проведена с использованием метода, предложенного для первичной оценки перспективности редкоземельных руд В. В. Серединым в работе [32]. Предложенный метод базируется на соотношении спроса и предложения на индивидуальные РЗЭ. Выделены три группы элементов: дефицитные и потенциально дефицитные (Nd, Eu, Tb, Dy, Er, Y), недефицитные (La, Pr, Sm, Gd), избыточные (Ce, Ho, Tm, Yb, Lu). В качестве коэффициента перспективности ( $K_{\text{пер}}$ ) индивидуального состава РЗЭ-сырья выбрано отношение доли дефицитных металлов в сумме всех РЗЭ к доле избыточных. Чем выше значение этого коэффициента, тем более перспективно РЗЭ-сырье с точки зрения его востребованности современной промышленностью.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В целом результаты исследования, полученные разными методами, показали удовлетворительную сходимость. Результаты содержания редкоземельных элементов, тория и урана в золах углей месторождений Монголии представлены в табл. 1.

Таблица 1. Содержание редкоземельных элементов, тория и урана в золах углей различных месторождений Монголии в г/т

Элемент	Месторождение		
	Багануур	Шивээ-Овоо	Баянбогд
Sc	6,36–55,24 (20,34)	7,02–16,98 (10,93)	9,07–18,43 (13,40)
Y	24,05–136,00 (52,32)	28,03–68,51 (51,36)	19,11–44,15 (31,33)
La	25,89–59,87 (35,13)	39,27–126,00 (90,31)	23,38–55,56 (40,20)
Ce	56,97–143,00 (78,84)	74,44–239,00 (177,69)	46,91–132,00 (89,20)
Pr	6,96–16,59 (9,47)	7,92–22,17 (16,85)	5,87–13,03 (9,47)
Nd	22,70–65,94 (33,52)	25,78–81,59 (61,54)	17,87–47,42 (32,93)
Sm	5,96–17,25 (8,55)	5,56–13,83 (10,87)	4,65–9,87 (7,46)
Eu	0,92–3,57 (1,69)	0,99–2,32 (1,82)	0,99–1,97 (1,52)
Gd	5,56–21,23 (9,07)	5,24–15,42 (11,96)	3,60–10,23 (6,99)
Tb	0,94–4,62 (1,90)	0,96–2,08 (1,62)	0,77–1,57 (1,21)
Dy	4,68–21,61 (8,53)	4,36–9,43 (7,51)	3,60–7,54 (5,56)
Ho	1,00–5,07 (2,02)	1,05–1,95 (1,62)	0,84–1,55 (1,24)
Er	3,11–13,45 (5,52)	3,33–6,52 (5,11)	2,53–4,66 (3,58)
Tm	0,42–2,11 (0,84)	0,48–0,93 (0,73)	0,38–0,65 (0,52)
Yb	2,95–12,33 (5,10)	3,31–6,76 (5,05)	2,50–4,21 (3,39)
Lu	0,42–2,25 (0,92)	0,58–1,10 (0,84)	0,41–0,79 (0,55)
Th*	11,89–73,13	13,84–94,95	17,47–30,36
U*	9,42–112,50	6,46–39,57	4,82–5,93

*Примечание.* В скобках указано среднее значение, \* — по данным ГАА.

**Месторождение Багануур.** Результаты анализа методом ИСП-МС (см. табл. 1) показывают, что в золах углей месторождения Багануур среднее содержание редкоземельных элементов, таких как Er и Y, в 1,2 раза выше среднемировых значений, принятых для зол бурых углей; Sc, Tb, Yb имеют околоториевые содержания, в то время как La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Tm, Lu ниже среднемировых значений в 1,2–2,1 раза. Суммарное содержание в золах углей редкоземельных элементов от La до Lu, Sc и Y составило от 181 до 580 г/т, из которых 49–66 % приходится на элементы легкой группы (La, Ce, Pr, Nd). В отдельных пробах суммарное содержание РЗЭ выше, чем их минимальные промышленные содержания. Анализ данных показал сильную положительную корреляционную связь между содержанием всех изученных редкоземельных элементов в угольной золе ( $r = 0,92–0,99$ ).

В месторождении Багануур обращает на себя внимание образец золы BN-02, в котором содержание РЗЭ значительно выше, чем в других исследованных образцах данного месторождения. Суммарное содержание РЗЭ составило 580 г/т, что в 1,6 раза выше среднемирового значения для зол бурых углей (368,4 г/т) [20]. В данном образце содержание Sc составляет 55,24 г/т, что в 2,4 раза выше принятого кларка (23 г/т). Содержание элементов легкой группы: La — 59,87 г/т, что не превышает кларк (61 г/т); Ce — 143 г/т, что в 1,2 раза выше, чем кларк (120 г/т); Pr — 16,59 г/т, что в 1,2 раза выше кларка (13 г/т); Nd — 65,94 г/т, что в 1,1 раза выше, чем кларк (58 г/т), и в 2 раза выше, чем в остальных пробах. Содержание элементов средней группы: Sm — 17,25 г/т, что в 1,5 раза выше кларка (11 г/т) и в 2 раза выше, чем в остальных пробах; Eu — 3,57 г/т, что в 1,5 раза выше, чем кларк (2,3 г/т); Gd — 21,23 г/т, что в 1,3 раза выше, чем кларк (16 г/т), и в 3 раза выше, чем в остальных пробах. Содержание элементов тяжелой группы: Y — 136 г/т, что в 3 раза выше кларка (44 г/т) и в 3,2 раза выше, чем в остальных пробах; Tb — 4,63 г/т, что в 2,3 раза выше, чем кларк (2 г/т), и в 2,5 раза выше, чем в остальных пробах; Dy — 21,61 г/т, что в 1,8 раз выше, чем кларк (12 г/т), и в 3,8 раза выше, чем в остальных пробах; Ho — 5,07 г/т, что в 1,6 раза выше кларка (3,1 г/т) и в 3 раза выше, чем в остальных пробах; Er — 13,45 г/т, что в 2,9 раза выше, чем кларк (4,6 г/т), и в 3,4 раза выше, чем в остальных пробах; Yb — 12,33 г/т, что в 2,3 раза выше, чем кларк (5,5 г/т), и в 3,4 раза выше, чем в остальных пробах; Lu — 2,25 г/т, что в 2 раза выше, чем кларк (1,1 г/т), и в 2,4 раза выше, чем в остальных пробах.

Образцы углей и их зол были также проанализированы ядерно-физическими методами. В качестве примера регистрируемого рентгенофлуоресцентного спектра на рис. 1 представлен спектр образца золы угля.

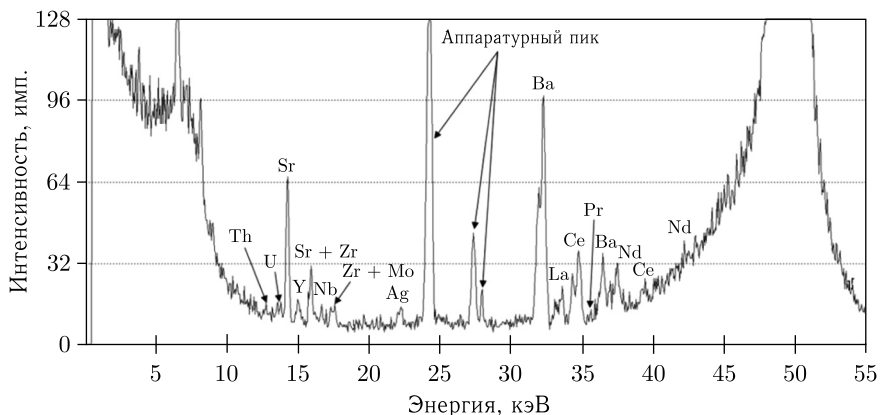


Рис. 1. РФА-спектр образца золы угля месторождения Багануур (BN-02), источник возбуждения —  $^{241}\text{Am}$ , время измерения — 900 с

В исследованных углях и золах месторождения Багануур было обнаружено восемь редкоземельных элементов, а также торий и уран.

Содержание Sc в углях колеблется от 0,8 до 9,9 г/т, в среднем составляет 4,7 г/т, что незначительно выше кларка, в угольной золе происходит концентрирование в среднем в 8,2 раза по сравнению с исходным углем. Содержание Y в углях колеблется от 2 до 12 г/т, в среднем составляет 10 г/т, что в 1,2 раза превышает кларк, в угольной золе иттрий концентрируется в среднем в 6,9 раза. Содержание La в углях колеблется в диапазоне от 5 до 16 г/т, в среднем составляет 9 г/т, что не превышает кларк, в угольной золе лантан концентрируется в среднем в 5 раз. Содержание Ce в углях варьируется в широких пределах — от 5 до 39 г/т, в среднем составляет 19 г/т, что не превышает кларк, в угольной золе церий концентрируется в среднем в 7,1 раза. Содержание Pr в углях колеблется от 7 до 15 г/т, в среднем составляет 10 г/т, что в 2,8 раза превышает кларк, в угольной золе празеодим концентрируется в среднем в 2 раза. Содержание Nd в углях колеблется от 7 до 18 г/т, в среднем составляет 13 г/т, что в 1,2 раза превышает кларковое значение, в угольной золе неодим концентрируется в среднем в 4,7 раза. Содержание Sm в углях колеблется от 0,5 до 2,7 г/т, в среднем составляет 1,4 г/т, что на уровне кларка, в угольной золе происходит концентрирование в среднем в 8,8 раза по сравнению с углем. Содержание Gd в углях варьируется в широких пределах — от 0,5 до 6,5 г/т, в среднем составляет 4,4 г/т, что в 1,7 раза выше принятого кларка, в угольной золе гадолиний концентрируется в среднем в 11 раз.

Суммарное содержание в углях месторождения Багануур редкоземельных элементов Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm и Gd составило от 31 до 113 г/т, что в большинстве проб превышает кларк суммы этих элементов (63,7 г/т) и несколько выше, чем минимальные промышленные содержания.

Содержание Th в бурых углях из месторождения Багануур колеблется в широких пределах — от 0,9 до 16,2 г/т, в среднем составляет 6,2 г/т, что в 1,9 раза выше принятого кларка (3,3 г/т). Содержание тория в золах углей колеблется от 11,89 до 73,13 г/т, максимальное содержание в 3,8 раза выше кларка наблюдалось в образце BN-02. В угольной золе происходит концентрирование тория в среднем в 10 раз по сравнению с исходным углем.

Содержание U в бурых углях из месторождения Багануур варьируется в широких пределах — от 0,6 до 11,3 г/т, в среднем составляет 6,7 г/т, что в 2,3 раза выше кларка. Содержание урана в золах углей колеблется от 9,42 до 112,5 г/т, максимальное содержание отмечается в образце BN-02, что в 7 раз превышает кларк, принятый для зол бурых углей (16 г/т). В угольной золе происходит концентрирование в среднем в 9,4 раза по сравнению с исходным углем.

Таким образом, по данным, полученным с применением ядерно-физических методов, в углях месторождения Багануур среднее содержание редкоземельных элементов Y, Pr, Nd, Gd выше среднемировых значений, принятых для бурых углей, в 1,2–2,8 раза; Sc, La, Ce, Sm имеют околослар-

ковые содержания. В золах углей происходит концентрирование элементов по сравнению с исходным углем в среднем: Sc — в 8,2 раза, Y — в 6,9 раза, La — в 5 раз, Ce — в 7,1 раза, Pr — в 2 раза, Nd — в 4,7 раза, Sm — в 8,8 раза, Gd — в 11 раз. Также отмечено высокое содержание тория и урана и их концентрирование в золе в 10 и 9,4 раза соответственно.

Изучение корреляционной связи между РЗЭ и торием (ураном) имеет практическое значение в исследовании месторождений редкоземельных элементов и месторождений радиоактивных элементов. По результатам анализа выявлена сильная корреляционная связь между суммарным содержанием редкоземельных элементов и содержанием тория в углях и их золах, коэффициенты корреляции составляют 0,91 и 0,87 соответственно, между суммарным содержанием РЗЭ и содержанием урана в углях — 0,91, в золах углей — 0,98.

**Месторождение Шивээ-Овоо.** Результаты исследования методом ИСП-МС показали (см. табл.1), что в золах углей месторождения Шивээ-Овоо среднее содержание редкоземельных элементов Y, La, Ce и Pr в 1,2–1,5 раза выше среднемировых значений для зол бурых углей; Nd, Sm, Er, Yb имеют околочларковые содержания; Sc, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Tm, Lu ниже среднемировых значений в 1,2–2,1 раза. Суммарное содержание редкоземельных элементов от La до Lu, Sc и Y в золах углей месторождения Шивээ-Овоо составило от 208 до 604 г/т, из которых 71–78% приходится на элементы легкой группы (La, Ce, Pr, Nd). В большинстве проб суммарное содержание РЗЭ выше, чем минимальные промышленные содержания. Анализ данных показал сильную положительную корреляционную связь между содержанием всех изученных редкоземельных элементов в угольной золе, коэффициенты корреляции составляют от 0,83 до 0,99.

Особо следует обратить внимание на образцы ШО-II-V-3 и ШО-III-II-5, в которых суммарное содержание РЗЭ составило 595 и 604 г/т соответственно, что в 1,6 раза выше среднемирового значения [21]. В данных образцах отмечаются максимальные значения редкоземельных элементов легкой группы, таких как La и Ce (в 2 раза выше кларка), Pr (в 1,6 раза выше кларка), Nd (в 1,4 раза выше кларка), а также элементов средней и тяжелой группы, таких как Sm, Er и Yb (в 1,2 раза выше кларка), Y (в 1,3 раза выше кларка).

По данным, полученным с применением ядерно-физических методов ГАА и РФА, в углях месторождения Шивээ-Овоо содержание Sc колеблется от 0,8 до 4,7 г/т, в среднем составляет 2,8 г/т, что не превышает кларк; в угольной золе происходит концентрирование в среднем в 4,6 раза по сравнению с исходным углем. Содержание Y в углях колеблется от 4 до 18 г/т, в среднем составляет 11 г/т, что в 1,3 раза превышает кларк, в угольной золе иттрий концентрируется в среднем в 5 раз. Содержание La в углях колеблется в широком диапазоне — от 6 до 35 г/т, в среднем составляет 18 г/т, что в 1,8 раза превышает кларк, в угольной золе лантан концентрируется в среднем в 5 раз. Содержание Ce в углях варьируется в широких пределах — от 9 до 53 г/т, в среднем составляет 38 г/т, что

в 1,7 раза выше принятого кларка, в угольной золе церий концентрируется в среднем в 6,9 раза по сравнению с углем. Содержание Pr в углях колеблется незначительно — от 6 до 8 г/т, в среднем составляет 7 г/т, что в 2 раза превышает кларк, в угольной золе празеодим концентрируется в среднем в 2,4 раза. Содержание Nd в углях колеблется от 11 до 24 г/т, в среднем составляет 17 г/т, что в 1,5 раза превышает кларковое значение, в угольной золе неодим концентрируется в среднем в 4 раза. Содержание Sm в углях варьируется в широких пределах — от 0,1 до 3,9 г/т, в среднем составляет 2,1 г/т, что на уровне кларка, в угольной золе происходит концентрирование в среднем в 6 раз. Содержание Gd в углях колеблется от 3 до 6,5 г/т, в среднем составляет 4,2 г/т, что в 1,6 раза выше принятого кларка, в угольной золе гадолиний концентрируется в среднем в 4,4 раза по сравнению с исходным углем.

Суммарное содержание редкоземельных элементов Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm и Gd в углях месторождения Шивээ-Овоо составило от 41 до 165 г/т, что в большинстве проб превышает кларк суммы этих элементов и несколько выше, чем минимальные промышленные содержания.

Содержание Th в бурых углях из месторождения Шивээ-Овоо колеблется в широких пределах — от 1,2 до 20,5 г/т, в среднем составляет 10,6 г/т, что в 3 раза выше принятого кларка. Содержание тория в золах углей колеблется от 13,84 до 94,95 г/т. Максимальное содержание наблюдалось в образце ШО-III-II-5, в 5 раз выше кларка, принятого для зол бурых углей (19 г/т). В угольной золе происходит концентрирование тория в среднем в 10 раз по сравнению с исходным углем.

Содержание U в бурых углях из месторождения Шивээ-Овоо колеблется в широких пределах — от 0,9 до 11,5 г/т, в среднем составляет 5,2 г/т, что в 1,8 раза выше кларка. Содержание урана в золах углей колеблется от 6,46 до 39,57 г/т. Максимальные содержания отмечаются в образцах ШО-II-V-3 и ШО-III-II-5, что превышает кларк, принятый для зол бурых углей, в 2,5 и 2 раза соответственно. В угольной золе происходит концентрирование в среднем в 5,7 раза по сравнению с исходным углем.

Таким образом, по данным, полученным с применением ядерно-физических методов, в углях месторождения Шивээ-Овоо среднее содержание редкоземельных элементов Y, La, Ce, Pr, Nd и Gd в 1,3–2 раза выше среднемировых значений, принятых для бурых углей, Sm — на уровне кларка, Sc — в 1,4 раза ниже среднемирового значения.

В золах углей происходит концентрирование элементов по сравнению с исходным углем в среднем: Sc — в 4,6 раза, Y — в 5 раз, La — в 5 раз, Ce — в 6,9 раза, Pr — в 2,4 раза, Nd — в 4 раза, Sm — в 6 раз, Gd — в 4,4 раза. Также отмечено высокое содержание тория и урана, и их концентрирование в золе составляет в 10 и 5,7 раз соответственно.

Выявлена сильная корреляционная связь между суммарным содержанием РЗЭ и содержанием тория в углях и их золах, коэффициенты корреляции составляют 0,97 и 0,82 соответственно. Коэффициенты корреляции между суммарным содержанием РЗЭ и содержанием урана в углях и их

золах составляют 0,96 и 0,82 соответственно, что характеризуется как сильная корреляционная связь.

**Месторождение Баянбогд.** Результаты исследования методом ИСП-МС показали (см. табл.1), что в золах углей месторождения Баянбогд среднее содержание всех исследованных редкоземельных элементов Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu ниже среднемировых значений в 1,3–3,4 раза. Суммарное содержание в редкоземельных элементах от La до Lu, Sc и Y в золах бурых углей составило от 143 до 345 г/т, из которых 65–72% приходится на элементы легкой группы (La, Ce, Pr, Nd), что ниже или около минимальных промышленных содержаний. Анализ данных показал сильную положительную корреляционную связь между содержанием всех изученных редкоземельных элементов (кроме пар Sc–Eu, La–Eu, Ce–Eu) в угольной золе ( $r = 0,70–0,99$ ).

По данным, полученным с применением ядерно-физических методов, содержание Sc в углях месторождения Баянбогд колеблется от 1,8 до 3,2 г/т, в среднем составляет 2,6 г/т, что не превышает кларк, в угольной золе происходит концентрирование в среднем в 6,6 раза по сравнению с исходным углем. Содержание Y в углях колеблется незначительно — от 6 до 9 г/т, в среднем составляет 8 г/т, что не превышает кларк, в угольной золе иттрий концентрируется в среднем в 5 раз по сравнению с исходным углем. Содержание La в углях колеблется в диапазоне от 8 до 13 г/т, в среднем составляет 10 г/т, что на уровне кларка, в угольной золе лантан концентрируется в среднем в 4,4 раза по сравнению с исходным углем. Содержание Ce в углях варьируется от 18 до 34 г/т, в среднем составляет 24 г/т, что незначительно выше принятого кларка, в угольной золе церий концентрируется в среднем в 4,8 раза по сравнению с исходным углем. Содержание Pr в углях колеблется незначительно — от 4 до 6 г/т, в среднем составляет 5 г/т, что в 1,4 раза превышает кларк, в угольной золе празеодим концентрируется в среднем в 3,3 раза по сравнению с исходным углем. Содержание Nd в углях колеблется от 10 до 17 г/т, в среднем составляет 13 г/т, что в 1,2 раза превышает кларковое значение, в угольной золе неодим концентрируется в среднем в 3,9 раза по сравнению с исходным углем. Содержание Sm в углях колеблется от 0,5 до 1,9 г/т, в среднем составляет 1,1 г/т, что в 1,9 раза ниже кларка, в угольной золе происходит концентрирование в среднем в 7,9 раза по сравнению с исходным углем. Содержание Gd в углях колеблется от 0,6 до 2,0 г/т, в среднем составляет 1,4 г/т, что не превышает кларк, в угольной золе гадолиний концентрируется в среднем в 7,4 раза по сравнению с исходным углем.

Суммарное содержание в углях редкоземельных элементов Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm и Gd составило от 51 до 83 г/т, что в большинстве проб не превышает кларк суммы этих элементов и несколько выше, чем минимальные промышленные содержания.

Содержание Th в углях из месторождения Баянбогд колеблется от 2,5 до 3,8 г/т, в среднем составляет 3,0 г/т, что не превышает кларк. Содер-

жание тория в золах углей колеблется от 17,47 до 30,36 г/т, максимальное содержание в 1,6 раза выше кларка наблюдалось в образце BUDH-023-T1. В угольной золе происходит концентрирование тория в среднем в 8 раз по сравнению с исходным углем.

Содержание U в углях из месторождения Баянбогд колеблется от 0,7 до 1,3 г/т, в среднем составляет 1,1 г/т, что не превышает кларк. Содержание урана в золах углей колеблется незначительно — от 4,82 до 5,93 г/т, что не превышает кларк, принятый для зол бурых углей (16 г/т). В угольной золе происходит концентрирование в среднем в 5,3 раза по сравнению с исходным углем.

Таким образом, по данным, полученным с применением ядерно-физических методов, в углях месторождения Баянбогд среднее содержание редкоземельных элементов Pr и Nd в 1,2–1,4 раза выше среднемировых значений, принятых для бурых углей; Y, La, Ce — на уровне кларка; Sc, Sm и Gd — в 1,6–1,9 раза ниже среднемирового значения.

В золах углей происходит концентрирование элементов по сравнению с исходным углем в среднем: Sc — в 6,6 раза, Y — в 5 раз, La — в 4,4 раза, Ce — в 4,8 раза, Pr — в 3,3 раза, Nd — в 3,9 раза, Sm — в 7,9 раза, Gd — в 7,4 раза. Содержание тория и урана в углях не превышает среднемировых значений, их концентрирование в золе составляет в 8 и 5,3 раза соответственно.

Выявлена сильная корреляционная связь между суммарным содержанием редкоземельных элементов и содержанием тория в углях месторождения Баянбогд, коэффициент корреляции составляет 0,89, в угольной золе корреляционной связи не выявлено. Корреляционных связей между суммарным содержанием редкоземельных элементов и содержанием урана в углях и угольной золе из месторождения Баянбогд не выявлено.

В углях изученных месторождений между суммарным содержанием РЗЭ (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm и Gd) в диапазоне от 30 до 170 г/т и содержанием тория от 1 до 25 г/т, а также их золах с суммарным содержанием РЗЭ в диапазоне от 170 до 700 г/т и содержанием тория от 10 до 100 г/т существует удовлетворительная линейная корреляционная связь (рис. 2).

**Оценка ресурсного потенциала.** На основе полученных данных по содержанию отдельных редкоземельных элементов в углях была проведена оценка их ресурсного потенциала (табл. 2). Однако необходимо иметь в виду, что рассчитанные запасы можно рассматривать только при условии, что среднее содержание элементов отмечается по всей территории изученных месторождений.

При средней зольности углей изученных месторождений, принятой равной 13%, с учетом геологических запасов угля и средних концентраций редкоземельных элементов в золе углей, указанных в табл. 1, была проведена оценка ресурсного потенциала золошлакового материала, образующегося в случае сжигания угля на тепловых электростанциях, как возможного источника для получения высокотехнологичного сырья.

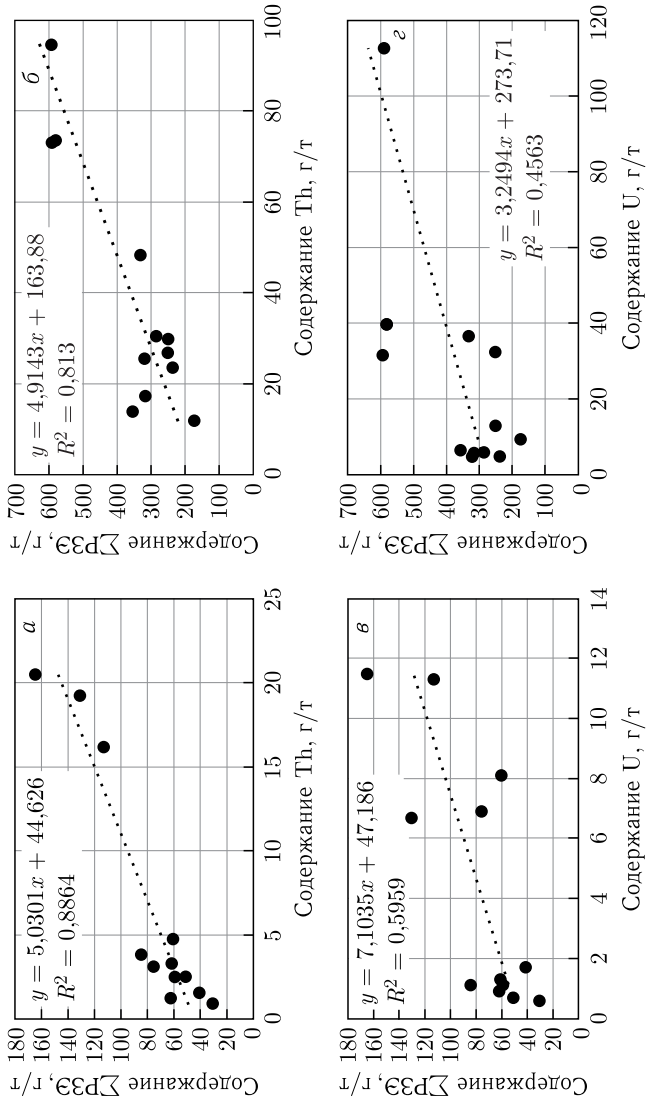


Рис. 2. Зависимость между суммарным содержанием  $P_{3\alpha}$  и содержанием тория в угле (а), тория в золе углей (б), урана в угле (в), урана в золе углей (г)

Таблица 2. **Ресурсный потенциал содержащихся редкоземельных элементов в угольных месторождениях в тоннах**

Элемент	Месторождение		
	Багануур	Шивээ-Овоо	Баянбогд
Sc	3816	7560	2860
Y	8120	29700	8800
La	7308	48600	11000
Ce	15428	102600	26400
Pr	8120	18900	5500
Nd	10556	45900	14300
Sm	1136	5670	1210
Gd	3572	11340	1540

Ресурсный потенциал содержащихся редкоземельных элементов, тория и урана в золах углей представлен в табл. 3.

Таблица 3. **Ресурсный потенциал содержащихся редкоземельных элементов, тория и урана в золе углей в тоннах**

Элемент	Месторождение		
	Багануур	Шивээ-Овоо	Баянбогд
Sc	2147	3836	1916
Y	5523	18028	4480
La	3708	31699	5748
Ce	8322	62368	12756
Pr	1000	5913	1354
Nd	3539	21601	4709
Sm	902	3817	1066
Eu	179	640	217
Gd	958	4199	999
Tb	201	567	173
Dy	900	2637	796
Ho	213	567	177
Er	583	1792	512
Tm	88	256	74
Yb	539	1772	485
Lu	98	294	79
Th	3431	20988	2330
U	8015	15928	579

Анализ содержания редкоземельных элементов в золах углей изученных месторождений с использованием коэффициента перспективности ( $K_{пер}$ ) [32] показал, что дефицитные металлы (Nd, Eu, Tb, Dy, Er, Y) в общей сумме РЗЭ составляют: для месторождения Багануур — от 32 до

42%,  $K_{\text{пер}}$  варьируется от 0,89 до 1,49; для Шивээ-Овоо — от 27 до 30%,  $K_{\text{пер}}$  варьируется от 0,65 до 0,75; для Баянбогд — от 29 до 32%,  $K_{\text{пер}}$  варьируется от 0,73 до 0,89.

**Угольная тепловая электростанция ТЭС-4 (Улан-Батор).** Содержание РЗЭ в золошлаковых отходах зависит не только от их содержания в используемом угле на тепловой электростанции, но и от технологий его приготовления (переработки) и сжигания, а также от работы газоочистного оборудования. Результаты исследования образцов угля, поступающего непосредственно в топку (смесь углей) ТЭС-4 (Улан-Батор), шлака и золы-уноса, полученные с применением ядерно-физических методов ГАА и РФА, представлены в табл. 4. Данная электростанция работает на буром угле, который поставляется из близлежащих монгольских месторождений Багануур и Шивээ-Овоо. Этот уголь, как правило, низкого качества, с высоким содержанием золы и серы, что приводит к большому объему отходов.

Таблица 4. **Содержание отдельных РЗЭ, тория и урана в образцах угля, шлака и золы-уноса ТЭС-4 (Улан-Батор) в г/т**

Элемент	Уголь	Шлак	Зола-унос	Шлак/уголь	Зола-унос/уголь
Sc	1,9 ± 0,3	11,0 ± 0,9	11,5 ± 1,1	5,8	6,0
Y	8 ± 1	21 ± 5	38 ± 5	2,6	4,7
La	8 ± 1	28 ± 1	49 ± 2	3,5	6,1
Ce	12 ± 1	73 ± 2	116 ± 2	6,1	9,7
Nd	8 ± 1	37 ± 2	49 ± 2	4,6	6,1
Th	2,5 ± 0,1	10,6 ± 0,3	14,6 ± 0,4	4,2	5,8
U	5,2 ± 0,1	19,3 ± 0,3	22,5 ± 0,4	3,7	4,3

Анализ данных показал, что при сжигании бурого угля на ТЭС-4 происходит концентрирование редкоземельных элементов в различных фракциях золы (шлаке и золе-уносе). Обогащение редкоземельными элементами, такими как Sc, Y, La, Ce, Nd, золошлаковых отходов составляет в 2,6–9,7 раза по сравнению с углем. Используемый на электростанции уголь по содержанию урана почти в 2 раза превышает среднее значение, принятое для бурых углей, содержание тория не превышает кларк. Концентрирование урана и тория происходит как в шлаке (в 3,7 и 4,2 раза соответственно), так и в золе-уносе (в 4,3 и 5,8 раза соответственно). Повышенное содержание урана и тория в золошлаковых отходах не позволяет использовать их непосредственно в качестве строительного материала, без предварительного извлечения.

После сжигания топлива зола-унос, уловленная фильтрами, и зольный остаток смешиваются с водой, образуют шламовую пульпу, которая перекачивается по трубопроводам на места хранения. Золошлакоотвалы расположены в 3,6 км к западу от теплоэлектростанции, рядом с рекой Туул, что создает высокий риск загрязнения грунтовых и поверхностных вод

вследствие выщелачивания. Всего для складирования золы используется шесть прудов-отстойников. В засушливые и ветреные сезоны высохшая поверхность золоотвалов становится источником поступления в атмосферный воздух взвешенных частиц  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ . Ежегодно на ТЭС-4 образуется от 500 тыс. до 600 тыс. тонн твердых зольных отходов, которые подлежат размещению в золоотвалах. Ресурсный потенциал содержащихся элементов в золошлаковых отходах Улан-Баторской ТЭС-4 в год составляет: Sc — 5,5 т, Y — 14,75 т, La — 19,25 т, Ce — 47,25 т, Nd — 21,5 т, Th — 6,3 т, U — 20,9 т.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с увеличением мирового спроса на редкоземельные элементы поиск источников их получения представляет особый интерес. Извлечение РЗЭ из вторичных ресурсов является одним из хороших решений и альтернативных вариантов. Использование отходов от сжигания угля, образующихся на тепловых электростанциях, представляется особо перспективным направлением, так как золошлаковые отходы обладают высоким ресурсным потенциалом для извлечения редкоземельных элементов. Проведенная предварительная оценка содержания редкоземельных элементов, тория и урана в углях трех месторождений Монголии показала, что суммарное содержание редкоземельных элементов (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm и Gd) в большинстве проб несколько выше, чем минимальные промышленные содержания, и составляет для месторождений Багануур — 31–113 г/т, Шивээ-Овоо — 41–165 г/т, Баянбогд — 51–83 г/т.

В золах углей происходит концентрирование элементов по сравнению с исходным углем в среднем: Sc — в 4,6–8,2 раза, Y — в 5,0–6,9 раза, La — в 4,4–5,0 раза, Ce — в 4,8–7,1 раза, Pr — в 2,0–3,3 раза, Nd — в 3,9–4,7 раза, Sm — в 6,0–8,8 раза, Gd — в 4,4–11,0 раза, Th — в 8–10 раз, U — в 5,3–9,4 раза.

Анализ содержания редкоземельных элементов в золах углей изученных месторождений показал, что дефицитные металлы (Nd, Eu, Tb, Dy, Er и Y) в общей сумме РЗЭ составляют для Багануур — от 32 до 42%,  $K_{пер}$  варьируется от 0,89 до 1,49; для Шивээ-Овоо — от 27 до 30%,  $K_{пер}$  варьируется от 0,65 до 0,75; для Баянбогд — от 29 до 32%,  $K_{пер}$  варьируется от 0,73 до 0,89.

Таким образом, золошлаковые отходы от сжигания углей с изученных месторождений представляют промышленный интерес как источник получения редкоземельных элементов, а процесс сжигания угля на тепловых электростанциях можно рассматривать как способ концентрирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Р. Р., Хутмуллин А. Р. Монголия как новый центр борьбы за ресурсы: Перспективы российско-монгольского сотрудничества в области атомной энергетики, освоения и добычи полезных ископаемых. Научный центр междунар.

- исследований «ПИР». Сер. «Доклады ПИР-Центра. № 41». М.: ПИР-Центр, 2024. 43 с.
2. ИТС 24–2020. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство редких и редкоземельных металлов. М.: Бюро НДТ, 2020. 329 с.
  3. Яценко В. А., Лебедева М. Е. Прогноз динамики спроса на мировом рынке редкоземельных металлов // Мир экономики и управления. 2021. № 4. С. 124–145; doi: 10.25205/2542-0429-2021-21-4-124-145.
  4. Binnemans K., Jones P. T., Müller T., Yurramendi L. Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? // J. Sustainable Metallurgy. 2018. V. 4. P. 126–146; doi: 10.1007/s40831-018-0162-8.
  5. Migaszewski Z., Gatuszka A. The Characteristics, Occurrence, and Geochemical Behavior of Rare Earth Elements in the Environment: A Review // Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 2015. V. 45, No. 5. P. 429–471; doi: 10.1080/10643389.2013.866622.
  6. Радомская В. И., Сорокин А. П., Шумилова Л. П. Перевод в раствор редкоземельных элементов из углей Сергеевского месторождения // Горный информ.-аналит. бюл. 2024. № 7-1. С. 148–158; doi: 10.25018/0236\_1493\_2024\_71\_0\_148.
  7. Taylor S. R., McLennan S. M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell Sci., 1985. 312 p.
  8. Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов: Справ. Кн. 6: Редкие *f*-элементы. М.: Экология, 1997. 607 с.
  9. Череповицын А. Е., Соловьева В. М. Концептуальные подходы к формированию промышленной политики развития отрасли редкоземельных металлов // Изв. Урал. гос. горного ун-та. 2022. № 2(66). С. 122–134.
  10. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Ценные элементы-примеси в углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 538 с.
  11. Шпирт М. Я., Рашевский В. В. Микроэлементы горючих ископаемых. Т. 5, кн. 4. М.: Кучково поле, 2010. 384 с.
  12. Seregin V. V., Dai S. Coal Deposits as Potential Alternative Sources for Lanthanides and Yttrium // Intern. J. Coal Geol. 2012. V. 94. P. 67–93.
  13. Shifeng Dai, Xiaoyun Yan, Ward C. R., Hower J. C., Lei Zhao, Xibo Wang, Lixin Zhao, Deyi Ren, Finkelman R. B. Valuable Elements in Chinese Coals: A Review // Intern. Geol. Rev. 2016. V. 60, No. 5–6. P. 1–31; doi: 10.1080/00206814.2016.1197802.
  14. Арбузов С. И., Чекрыжов И. Ю., Юйчжуан Сунь, Цунлян Жао, Машенькин В. С., Ильенок С. С., Иванов В. В., Блохин М. Г., Зарубина Н. В. Редкоземельные элементы (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) в углях Северной Азии (Сибирь, российский Дальний Восток, Северный Китай, Монголия, Казахстан) // Гео-сфер. исслед. 2017. № 4. С. 6–27.
  15. Mukhanova G. Zh., Portnov V. S., Vyzhva S. A., Reva N. V., Maussymbayeva A. D. The Analysis of Distribution of Rare Elements in Coals and Ashes the Field of Kazakhstan // Bull. Karaganda Univ. Phys. Ser. 2017. V. 86, No. 2. P. 54–61.
  16. Вялов В. И., Наставкин А. В. Уровни содержания промышленно ценных микроэлементов в углях // Химия твердого топлива. 2019. № 5. С. 63–67; doi: 10.1134/S0023117719050116.

17. Черкасова Т.Г., Исакова И.В., Тихомирова А.В., Черкасова Е.В., Головачев А.А. Определение промышленно значимых кондиций редких элементов в золошлаковых отходах Кузбасса // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. 2021. № 5(147). С. 37–44; doi: 10.26730/1999-4125-2021-5-37-44.
18. Арбузов С.И., Чекрыжов И.Ю., Тарасенко И.А. Редкометалльный потенциал углей Сибири и Дальнего Востока России и перспективы его освоения // Вестн. Дальневосточного отд-ния РАН. 2023. № 5(231). С. 31–51; doi: 10.37102/0869-7698\_2023\_231\_05\_3.
19. Okeme I. C., Martin P. G., Jones C., Crane R. A., Ojonimi T. I., Ignatyev K., Scott T. B. An Advanced Analytical Assessment of Rare Earth Element Concentration, Distribution, Speciation, Crystallography and Solid-State Chemistry in Fly Ash // Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy. 2020. V. 177. P. 105950; doi: 10.1016/j.sab.2020.105950.
20. Ketris M. P., Yudovich Ya. E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous Biolithes: World Averages for Trace Element Contents in Black Shales and Coals // Intern. J. Coal Geol. 2009. V. 78, No. 2. P. 135–148; doi: 10.1016/j.coal.2009.01.002.
21. Подгаецкий А.В., Горр Д.А., Жуков Е.Б. Научно-практические направления расширения и комплексного освоения угольной сырьевой базы Монголии // Химия твердого топлива. 2022. № 4. С. 62–72; doi: 10.31857/S0023117722040077.
22. Глобальная энергия. <https://globalenergyprize.org/ru/2024/02/08/kitaj-rezkov-elichil-vvod-moshhnostiugolnyh-tjes/> (дата обращения: 24.12.2025).
23. Батсамбуу У., Дудолин А.А. Проблемы и перспективы технического перевооружения электростанций Монголии // Вестн. Моск. энергет. ин-та. 2018. № 1. С. 16–21; doi: 10.24160/1993-6982-2018-1-16-21.
24. Такайшвили Л.Н., Соколов А.Д., Батхуяг Содовын. Перспективы развития угольной энергетики Монголии // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2019. Т. 23, № 1. С. 137–147; doi: 10.21285/1814-3520-2019-1-137-1.
25. Gustova M. V., Kaplina S. P., Gustova N. S., Baljinnyam N., Badamgarav Ch. Pollution Risk Assessment in the Area of an Operating Coal-Fired Thermal Power Plant // Solid Fuel Chem. 2022. V. 56. P. 462–470; doi: 10.3103/S0361521922060040.
26. Путилова И.В. Предложения по реализации комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ). 2025. № 2. С. 121–132; doi: 10.15518/isjaee.2025.02.121-132.
27. 17th EITI Reconciliation Report 2022. Ulaanbaatar: Mongolia EITI Secretariat, 2023. 148 p.
28. Erdenes Bayanbogd LLC. (n.d.). About Us / Company Overview. <https://erdenes-bayanbogd.mn> (дата обращения: 03.12.2025).
29. Стандарт предприятия СТП 104-2002. Многокомпонентный инструментальный рентгенофлуоресцентный анализ почв и других объектов окружающей среды на токсичные и сопутствующие элементы. ОИЯИ, 6-8092. Дубна, 2002. 16 с.
30. Стандарт предприятия СТП 105-2004. Многокомпонентный инструментальный гамма-активационный анализ почв и других объектов окружающей среды на токсичные и сопутствующие элементы. ОИЯИ, 6-8233. Дубна, 2004. 15 с.

31. *Неженский И. А., Вялов В. И., Мирхалевская Н. В., Чернышев А. А.* Геолого-экономическая оценка редкометалльно-угольных месторождений перспективного геолого-промышленного типа // Регион. геология и металлогения. 2013. № 54. С. 99–108.
32. *Середин В. В.* Новый метод первичной оценки перспективности редкоземельных руд // Геология рудных месторождений. 2010. Т. 52, № 5. С. 475–480.

Получено 4 марта 2026 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 10.04.2026.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,41. Тираж 105 экз. Заказ № 61295.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)