

ПЕРЕВОД В РАСТВОР РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ УГЛЕЙ СЕРГЕЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В.И. Радомская¹, А.П. Сорокин¹, Л.П. Шумилова¹

¹ Институт геологии и природопользования Дальневосточное отделение РАН,
Благовещенск, Россия, e-mail: radomskaya@ascnet.ru

Аннотация: Образцы бурого угля Сергеевского месторождения (Приамурье) были подвергнуты серии экспериментов по одностадийному выщелачиванию редкоземельных элементов соляной и уксусной кислотами с целью определения рабочих параметров, которые включали тип кислоты, ее концентрацию и время контакта кислоты с углем. Выщелачивание проводили при варьировании времени контакта от 15 мин до 48 ч при постоянном перемешивании. Концентрации использованной соляной кислоты составляли 1 М, 3 М и 4,8 М. Высокий процент редкоземельных элементов (74—97%) экстрагируется слабо концентрированной соляной кислотой (1 М). Это указывает на то, что основная часть редкоземельных элементов в исследуемом угле представлена в виде комплексных соединений с фульво- и гуминовыми кислотами или солей, которые растворимы в растворах кислот. Извлечение скандия при комнатной температуре значительно меньше, чем иттрия и лантаноидов, что обусловлено формой нахождения скандия, так как он в основном связан с силикатными минеральными формами. Извлечение скандия увеличивается почти в 2 раза до 88,7% при нагревании до 75 °С. Угли Сергеевского месторождения могут быть использованы в качестве источника редкоземельных элементов.

Ключевые слова: Сергеевское месторождение, бурые угли, редкоземельные элементы, выщелачивание, соляная кислота, уксусная кислота, время контакта, формы нахождения.

Благодарность: Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00116; <https://tscf.ru/project/22-27-00116/>.

Для цитирования: Радомская В. И., Сорокин А. П., Шумилова Л. П. Перевод в раствор редкоземельных элементов из углей Сергеевского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7-1. – С. 148–158. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_148.

Transfer of rare-earth elements from coals of the Sergeevskoe deposit in solution

V.I. Radomskaya¹, A.P. Sorokin¹, L.P. Shumilova¹

¹ Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch
of Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russia,

Abstract: Samples of brown coal from the Sergeevskoe deposit (Amur region) were subjected to a series of experiments on one-stage leaching of rare earth elements with hydrochloric and acetic acids in order to determine operating parameters, which included the type of acid, its

concentration and the time of contact of the acid with the coal. Extraction was carried out by varying the contact time from 15 minutes to 48 hours with constant stirring. The concentrations of hydrochloric acid used were 1 M, 3 M and 4.8 M. A high percentage of rare earth elements (74–97%) are extracted with weakly concentrated hydrochloric acid (1 M). This indicates that the main part of rare earth elements in the coal under study is presented in the form of complex compounds with fulvic and humic acids or salts that are soluble in acid solutions. The recovery of scandium at room temperature is significantly less than that of yttrium and lanthanides, which is due to the form of scandium, since it is mainly associated with silicate mineral forms. Scandium extraction almost doubles to 88.7% when heated to 75 °C. Coals from the Sergeevskoye deposit can be used as a source of rare earth elements.

Key words: Sergeevskoye deposit, brown coals, rare earth elements, leaching, hydrochloric acid, acetic acid, contact time, forms of occurrence.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 22-27-00116.

For citation: Radomskaya V. I., Sorokin A. P., Shumilova L. P. Transfer of rare-earth elements from coals of the Sergeevskoye deposit in solution. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7-1):148-158. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_148.

Введение

Комплексное использование углей является важным направлением повышения эффективности угледобывающих и перерабатывающих предприятий, это ведет к увеличению ассортимента вырабатываемой продукции, повышению их рентабельности. Кроме того, что уголь обеспечивает существенную часть энергопотребления, в настоящее время он выступает в качестве потенциального источника различных элементов [1, 2], однако до конца металлоносность углей не раскрыта [3, 4]. В соответствии с постановлением Правительства РФ от 2022 г. № 2473-р цветные, редкие, редкоземельные, благородные элементы причислены к минеральному сырью стратегического назначения. В настоящее время промышленность РФ собственными редкоземельными элементами (РЗЭ) обеспечена недостаточно.

В группу РЗЭ входят 15 элементов, имеющих атомные номера 57–71 (лантан-лютеций), и два дополнительных элемента — иттрий и скандий. РЗЭ делятся на тяжелые и легкие в зависи-

мости от их атомных масс и радиусов. Легкие РЗЭ (ЛРЗЭ) включают элементы: лантан (La), церий (Ce), празеодим (Pr), прометий (Pm), самарий (Sm) и европий (Eu). В группу тяжелых РЗЭ (ТРЗЭ) входят гадолиний (Gd), тербий (Tb), диспрозий (Dy), гольмий (Ho), эрбий (Er), тулий (Tm), иттербий (Yb), лютеций (Lu), скандий (Sc) и иттрий (Y). Эти 17 элементов образуют группу со схожими химическими свойствами и часто встречаются вместе в месторождениях полезных ископаемых [5, 6]. Средняя концентрация РЗЭ в верхней континентальной коре довольно высокая. Церий является двадцать пятым по распространенности элементом, превосходящим Cu и Pb. Редкоземельные элементы, за исключением Pm, встречаются чаще, чем Ag, Au, Hg, Cd и Se. Структура распределения РЗЭ отражает правило Оддо — Гаркина: элементы с четными атомными номерами более распространены, чем соседние элементы с нечетными номерами, и характеризуются большим количеством изотопов.

РЗЭ практически не образуют месторождений полезных ископаемых. Наиболее крупные месторождения связаны с карбонатитами и щелочно-силикатными породами гидротермального происхождения. РЗЭ являются литофильными элементами и замещают другие катионы сопоставимого радиуса и заряда в минеральных структурах силикатов, карбонатов, оксидов, фосфатов. Более 200 минералов содержат значительные количества лантаноидов и Y. Однако экономическую и промышленную ценность имеют только некоторые, например, бастнезит $(Ce, La, Y)CO_3F$, паризит $Ca(Ce, La)_2(CO_3)_3F_2$, синхизит $CaCe(CO_3)_2F$, фторкарбонаты Ва-РЗЭ, монацит $(Ce, La)PO_4$, ксенотим YPO_4 , фергюсонит $РЗЭNbO_4$, лопарит $(Na, Ce, Sr)(Ce, Th)_2(Ti, Nb)_2O_6$ и др. Самый большой процент мировых экономических запасов РЗЭ составляют месторождения бастнезита, месторождения монацита являются вторыми.

Основным производителем редкоземельных элементов считается Китай — отсюда на мировой рынок поступает 97% РЗЭ. За последнее время потребление РЗЭ в промышленности и других отраслях значительно возросло.

Годовое потребление РЗЭ резко увеличилось с 30 тыс. т в 1980 г. до 135 тыс. т в 2015 г., к 2021 г. эта цифра составляла 280 тыс. т [7, 8]. РЗЭ являются ценным сырьем, пользующимся большим спросом в современных наукоемких производствах. РЗЭ широко используют в области здравоохранения, транспорта, нефтехимии, металлургии и оборонной промышленности, они незаменимы при изготовлении керамики, стекла и магнитов, а также в сельском хозяйстве. Редкоземельные металлы являются основными составляющими при изготовлении твердых сплавов, используемых в военной промышленности, в частности для снарядов, бронетехники, высо-

коточного оружия. Они находят применение при изготовлении очков ночного видения, аккумуляторов, оборудования связи, GPS и прочей оборонной электроники [9–13].

Существенное сокращение экспортных квот Китаем, ведущим производителем редкоземельных элементов, привело к поиску новых источников сырья РЗЭ по всему миру [14]. Освоение альтернативных источников РЗЭ зависит от разработки эффективных подходов и технологий, определяется в большей степени скоростью извлечения редкоземельных металлов, поэтому металлоносные угли стали объектом пристального внимания.

В Приамурье угли с повышенными концентрациями РЗЭ выявлены в Ерковецком, Райчихинском, Архаро-Богучанском палеогеновых и в Свободненском, Сергеевском, Тыгдинском нижне-среднемиоценовых месторождениях [15].

В углях Сергеевского месторождения содержание РЗЭ в среднем составляет 100 мг/кг [16, 17], что в полтора раза выше среднемирового значения [18]. Сергеевское месторождение расположено на левом берегу р. Амур в 60 км к северу от г. Благовещенска, в юго-западной части Амуро-Зейской впадины. Вмещающие породы месторождения представлены итикутской и пояровской (нижний мел), цагайской (верхний мел), бузулинской, сазанковской (миоцен) и белогорской (неоген-квартер) свитами. Итикутская и пояровская свиты сложены вулканогенными (риолиты, андезиты, базальты, туфы) и осадочными (алевролиты, аргиллиты, песчаники) породами. В более молодых верхнемеловых и неоген-четвертичных комплексах встречаются только осадочные породы (алевриты, глины, пески, галька и т.д.). Пояровская, бузулинская и сазанковская свиты в различной степени угленосны. На Сергеевском месторождении

пласты угля залегают практически горизонтально на небольшой глубине, характеризуются простым строением и по горнотехническим и геологическим условиям месторождения являются благоприятными для разработки открытым способом.

Учитывая тот факт, что содержание редкоземельных элементов в отдельных углях выше, чем в редкоземельных рудах, угольные месторождения могут стать альтернативным источником РЗЭ, и технологии их извлечения из угля будут востребованы в обозримом будущем [19]. Один из этапов извлечения РЗЭ — перевод элементов в раствор, поэтому поиск эффективных выщелачивающих реагентов для упрощения процесса экстракции РЗЭ из углей является актуальной задачей. Целью исследований явилось изучение кислотного выщелачивания РЗЭ из угля Сергеевского месторождения.

Экспериментальная часть

Извлечение РЗЭ осуществляли однократной кислотной обработкой из угля (проба У-0), отобранного на Сергеевском месторождении (Амурская обл.). По данным ICP-MS, валовое содержание лантана в исследуемой пробе угля не превышало 17,0 мг/кг, церия — 36,3 мг/кг. Суммарное содержание ЛРЗЭ составляло 74,57 мг/кг, ТРЗЭ — 24,03 мг/кг.

Следует отметить, что концентрация РЗЭ зависит не только от местоположения угольных пластов, их возраста, но и от разреза угленосной толщи, поэтому необходимо выявить наиболее перспективные горизонты концентрирования РЗЭ.

Для выщелачивания применяли соляную кислоту различной концентрации (1 М; 3 М; 4,8 М) и 10%-ную уксусную кислоту. Высушенный измельченный до зерен диаметром <0,1 мм уголь обрабатывали 1 М соляной кислотой при температуре 25 °С в течение 15 мин, 1 и 2 сут. при регулярном перемешивании.

Выщелачивание 3 М HCl вели 1 ч при 25 °С. При использовании HCl в концентрациях 1 М и 3 М соотношение массы угля к раствору кислоты составляло 1:10. При использовании более концентрированной соляной кислоты (4,8 М) перевод РЗЭ в раствор осуществляли в течение 1 ч при температуре 75 °С, соотношение твердого к жидкому 1:40.

Выщелачивание угля 10%-ной уксусной кислотой проводили при температуре 25 °С, соотношение Т:Ж = 1:30, время контакта 0,5 ч. По окончании экстрагирования взвесь фильтровали. Твердый остаток промывали дистиллированной водой, сушили, взвешивали. Концентрацию РЗЭ в твердом остатке и растворе определяли с помощью масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в сертификационном испытательном центре ИПТМ РАН (г. Черноголовка). Расчет процентного извлечения РЗЭ проводили по концентрации РЗЭ в исходном и выщелочном углях с учетом потери массы выщелачиваемой пробы угля.

Идентификацию основных минералов угля проводили методом рентгеновской дифракционной спектрометрии (XRD) на дифрактометре Bruker D2 Phaser с использованием Cu-K α излучения (НИ ТПУ, г. Томск).

Акцессорные минералы в угле были идентифицированы в ИГиП ДВО РАН (г. Благовещенск). Пробы угля промывались проточной водой и разделялись на электромагнитную, магнитную, немагнитную легкую и тяжелую фракции. Минералы идентифицировались с помощью стереомикроскопа МБС-10М (ЛЗОС, Россия) (аналитик Е.Н. Воропаева).

Автоматизированный поиск минеральных микрозерен РЗЭ был проведен в ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) при помощи сканирующего электронного микроскопа LYRA 3 XMN (Чехия) с энергодисперсионным спектрометром.

Результаты и их обсуждение

Уголь — это осадочная горная порода, которая преимущественно состоит из углеродсодержащего вещества, неорганических минералов и влаги. В углях Сергеевского месторождения, согласно данным XRD, преобладают глинистые минералы. Количество каолинита достигает 58% от общего содержания минеральной составляющей угля. Отмечено существенное содержание кварца (11,2%), кристобаллита (12,4%) и тридимита (18,3%).

С помощью шлихового метода были идентифицированы еще 30 второстепенных минералов и три самородных элемента — золото, свинец и медь. Были определены минералы: магнетит, гематит, лимонит, эпидот, ставролит, апатит, сфен, циркон, гранат, ильменит, корунд и др. (таблица).

Минералогический состав угля определяет характер взаимодействия с экстрагентами. По данным [21], в кислотах, в основном при нагревании, могут растворяться полностью или частично следующие минералы, идентифицированные в углях Сергеевского месторождения: магнетит, ильменит, гематит, лимонит, эпидот, ставролит, карбонат, пироксен, кальцит, пирит, галенит, гранат, сфен, апатит, арсенопирит.

Минералы, содержащие РЗЭ, были обнаружены и идентифицированы с помощью сканирующей электронной мик-

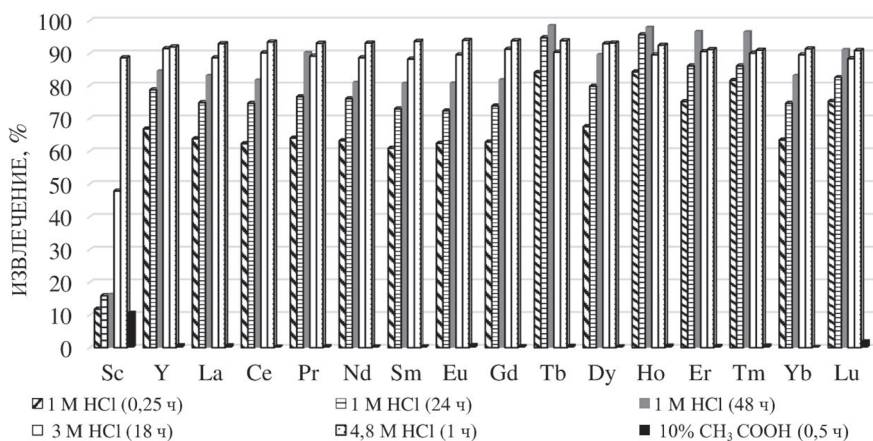
роскопии. Они имели размеры 1,5–7,5 мкм и были представлены в основном фосфатами РЗЭ: цериевой подгруппы — близкие по составу к монациту, иттриевой подгруппы — к ксенотиму. Также были обнаружены силикатные и фторидные минералы РЗЭ [16, 17]. Можно предположить, что фосфаты РЗЭ, имеющие наноразмерность, характеризуются значительно большей площадью поверхности, вследствие чего будут легче взаимодействовать с кислотами, чем крупные труднорастворимые минеральные зерна.

Разработка процессов извлечения РЗЭ должна сопровождаться предварительным изучением форм нахождения элементов в углях. Было установлено, что РЗЭ в углях Сергеевского месторождения присутствуют в виде соединений с фульво- и гуминовыми кислотами [17]. Содержание лантаноидов и иттрия в этой фракции достигает 90%, концентрация скандия не выше 74% от валового. На долю ионообменной, силикатной и дисульфидной форм лантаноидов и иттрия приходится не более 5% от валового содержания, в то время как содержание скандия в составе алюмосиликатных минеральных образований достигает 22%. Оставшаяся часть РЗЭ (4–5%) относится к нерастворимой фракции. РЗЭ, образующие с фульво- и гуминовыми кислотами соли или комплексные соединения, хорошо переводятся в ра-

Минералы, идентифицированные в угле Сергеевского месторождения *Minerals identified in coal from the Sergeevskoe deposit*

Минерал / Формула [20]	Растворимость по [21]
Каолинит / $Al_2S_2O_5(OH)_4$	растворим в концентрированной серной кислоте при нагревании до паров SO_3
Тридимит / SiO_2	в кислотах, кроме HF, не растворим; растворяется в концентрированных растворах щелочей при нагревании
Кристобалит / SiO_2	растворяется в растворе соды при нагревании, в HF и в расплаве щелочей
Магнетит / Fe_3O_4	растворим в соляной и азотной кислотах

Ильменит / FeTiO_3	растворяется частично в соляной кислоте при нагревании
Гематит / Fe_2O_3	растворяется в концентрированной соляной кислоте
Лимонит / $\text{HFeO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	разлагается под действием горячей соляной кислоты
Эпидот / $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})_3\text{Si}_3\text{O}_{12}[\text{OH}]$	плохо растворяется в кислотах
Ставролит / $\text{Fe}^{2+}\text{Al}_4[\text{SiO}_4]_2[\text{OH}]_2$	под действием серной кислоты частично разлагается; в остальных кислотах не растворяется
Дистен / Al_2SiO_5	нерастворим в минеральных кислотах
Циркон / ZrSiO_4	нерастворим в минеральных кислотах
Корунд / Al_2O_3	нерастворим в минеральных кислотах
Лейкоксен / $\text{TiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	—
Анализ / TiO_2	нерастворим в минеральных кислотах
Карбонат / $\text{Me}^{2+}\text{CO}_3$	разлагается минеральными кислотами
Кварц / SiO_2	нерастворим в минеральных кислотах; реагирует со щелочами
Полевой шпат / $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	не разлагается минеральными кислотами
Слюда / $\text{KMg}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH}, \text{F})_2$	—
Пирит / FeS_2	разлагается минеральными кислотами
Галенит / PbS	разлагается минеральными кислотами
Гранат / $\text{R}_3\text{R}_2[\text{SiO}_4]_3$, где $\text{R}_3 = \text{Ca}, \text{Mg}, \text{Mn}$; $\text{R}_2 = \text{Al}, \text{Fe}$	в HCl с трудом растворяется только андрадит
Амфибол / $\text{R}_7(\text{OH})_2[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2$	не разлагается в минеральных кислотах
Пироксен / $\text{XY}[\text{Z}_2\text{O}_6]$, где $\text{X} = \text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Ca}, \text{Mn}^{2+}, \text{Na}, \text{Li}$; $\text{Y} = \text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti}^{4+}$; $\text{Z} = \text{Si}, \text{Al}$ (редко $\text{Fe}^{3+}, \text{Ti}^{3+}, \text{Ti}^{1+}$)	растворимы в горячей $\text{HCl}, \text{H}_2\text{SO}_4$
Турмалин / $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Mg}, \text{Al})_6[\text{Si}_6\text{Al}_3\text{B}_3(\text{O}, \text{OH})_{30}]$	нерастворим в кислотах
Силлиманит / $(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{SiO}_2)$	не растворяется в кислотах
Андалузит / Al_2SiO_5	не растворяется в кислотах
Ставролит / $\text{Fe}^{2+}\text{Al}_3\text{Si}_4\text{O}_{23}(\text{OH})$	частично разлагается серной кислотой
Рутил / TiO_2	не растворяется в кислотах
Сфен / CaTiSiO_5	разлагается в кислотах при нагревании
Кальцит / CaCO_3	в кислотах растворяется
Шпинель / MgAl_2O_4	с кислотами не реагирует
Апатит / $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$	растворим в кислотах
Медь / Cu	растворяется в разбавленной азотной кислоте
Золото / Au	растворяется в царской водке
Арсенопирит / FeAsS	разрушается в азотной кислоте и царской водке
Свинец / Pb	—
Примечание: «—» — нет данных.	



Степень извлечения редкоземельных элементов при различных условиях выщелачивания
The degree of extraction of the rare earth elements under different leaching conditions

створ кислотами, поэтому исследуемый уголь обрабатывали растворами соляной и уксусной кислот. Кислоты были выбраны, исходя из частоты их использования в обогащении полезных ископаемых и относительно низкой их стоимости, которая может обеспечить экономически выгодный процесс. Предварительными опытами было установлено, что изменение соотношения Т:Ж оказывает относительно небольшое влияние на степень перехода РЗЭ в раствор при кислотной обработке. В этой работе приведены данные опытов с максимальными выходами в раствор РЗЭ.

Из рисунка видно, что соляная кислота была наиболее эффективной кислотой для каждого РЗЭ по сравнению с уксусной, даже при наименьшем времени контакта. При минимальном времени взаимодействия эффективность экстракции РЗЭ (кроме скандия) 1 М НСl составляла 60–80%, Sc – 12%. Доля РЗЭ, экстрагированных уксусной кислотой, была меньше 10%. Большая разница в степени извлечения, возможно, связана с различной кислотностью выщелачивающих растворов. При концентрации НСl, равной 1 моль/дм³, водородный показатель рН равен нулю, СН₃СООН депротонируется частично, что обуслав-

ливает рН = 2,15. Низкая кислотность СН₃СООН уменьшает эффективность экстракции.

Степень извлечения зависит от времени контакта. Увеличение времени взаимодействия способствует повышенному извлечению. Извлечение лантаноидов и иттрия за 48 ч контакта составило 81–99%. Выщелачивание скандия, в отличие от остальных РЗЭ, составило 16%. Неизвлекаемые РЗЭ в твердом остатке, скорее всего, представлены в виде фосфатов, силикатов и других нерастворимых в соляной кислоте формах.

Использование концентрированной 3 М соляной кислоты при времени контакта 18 ч при температуре 25 °С существенно увеличивало выщелачивание редкоземельных металлов (без Sc) по сравнению с 1 М НСl и временем взаимодействия 48 ч. Различия в извлечении скандия между концентрациями 1 М и 3 М являются значительными, с более чем двукратным увеличением экстракции при более коротком времени контакта.

Так как часть минералов в составе угля растворяется при нагревании, было проведено выщелачивание при более высокой концентрации соляной кислоты (4,8 М) и температуре 75 °С в течение

1 ч. Перевод лантаноидов и иттрия в раствор при такой обработке увеличился лишь на 1–5% по сравнению с 3 М соляной кислотой и составил 91–94%, а извлечение скандия увеличилось почти в 2 раза, до 88,7%. Таким образом, процесс выщелачивания РЗЭ, связанных с гумусовыми кислотами, в исследуемых бурых углях практически не зависит от температуры. Увеличение извлечения Sc связано с разрушением силикатных минералов.

Выводы


Проведена серия экспериментов по выщелачиванию для получения информации об эффективности извлечения РЗЭ из бурых углей Сергеевского месторождения кислыми растворами и вы-

бора оптимальных рабочих параметров. Полученные данные четко показывают разницу в эффективности извлечения от типа кислот и условий проведения эксперимента. Установлено, что около 72–97% лантаноидов и иттрий извлекаются 1 М раствором соляной кислоты при температуре 25 °С и времени взаимодействия 24–48 ч. Более высокая концентрация соляной кислоты и температура незначительно увеличивают степень извлечения лантаноидов и иттрия. Максимальное извлечение скандия, напротив, зависит от температуры и концентрации кислоты.

Наибольший выход (88,7%) в раствор наблюдался при использовании концентрированной кислоты (4,8 М) и нагревании до 75 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dai S., Finkelman R. B. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects // *International Journal of Coal Geology*. 2018, vol. 186, pp. 155–164. DOI: 10.1016/J.COAL.2017.06.005.
2. Popov N. Yu., Chekryzhov I. Yu., Tarasenko I. A., Kasatkin S. A., Kholodov A. S. Structural and geochemical features of coal-bearing sediments and sources of rare element impurities in coals of the Rakovka depression (Primorsky Krai, Russia) // *International Journal of Coal Science & Technology*. 2022, vol. 9, article 14. DOI: 10.1007/s40789-022-00486-0.
3. Вялов В. И., Наставкин А. В., Шишов Е. П., Чернышев А. А. Прогнозно-поисковые критерии выявления металлоносных углей на Дальнем Востоке России // *Геосферные исследования*. — 2023. — № 2. — С. 33–48. DOI: 10.17223/25421379/27/4.
4. Арбузов С. И., Чекрыжов И. Ю., Тарасенко И. А. Редкометалльный потенциал углей Сибири и Дальнего Востока России и перспективы его освоения // *Вестник ДВО РАН*. — 2023. — № 5. — С. 31–51. DOI: 10.37102/0869-7698_2023_231_05_3.
5. Вялов В. И., Наставкин А. В., Шишов Е. П. Новые данные о металлоносности углей Сахалина // *Химия твердого топлива*. — 2022. — № 6. — С. 25–29. DOI: 10.31857/S0023117722060123.
6. Yue T., Lu S., Chong F., Rongyi Y., Jianhua Q., Hanxun J., Ying Z. Distribution of rare earth elements (REEs) and their roles in plant growth: A review // *Environmental Pollution*. 2022, vol. 298, article 118540. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118540.
7. Sun G., Li Z., Liu T., Chen J., Wu T., Feng X. Rare earth elements in street dust and associated health risk in a municipal industrial base of central China // *Environmental Geochemistry and Health*. 2017, vol. 39, no. 6, pp. 1469–1486. DOI: 10.1007/s10653-017-9982-x.
8. Нечаев А. В., Поляков Е. Г. Существующий и перспективный баланс производства и потребления редкоземельных металлов в России // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. — 2020. — № 2. — С. 49–53.
9. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact // *Geoscience Frontiers*. 2019, vol. 10, no. 4, pp. 1285–1303. DOI: 10.1016/j.gsf.2018.12.005.

10. Migaszewski Z. M., Galuszka A. The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: A review // *Critical Reviews In Environmental Science and Technology*. 2015, vol. 45, pp. 429–471. DOI: 10.1080/10643389.2013.866622.
11. He M. L., Ranz D., Rambeck W. A. Study on the performance enhancing effect of rare earth elements in growing and fattening pigs // *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2001, vol. 85, no. 7-8, pp. 263–270. DOI: 10.1046/j.1439-0396.2001.00327.x.
12. Voncken J. H. L. The rare earth elements – an introduction. Netherlands, Springer, 2016, 127 p. DOI: 10.1007/978-3-319-26809-5.
13. Goodenough K. M., Wall F., Merriman D. The rare earth elements: demand, global resources, and challenges for resourcing future generations // *Natural Resources Research*. 2018, vol. 27, pp. 201–216. DOI: 10.1007/s11053-017-9336-5.
14. Gaustad G., Williams E., Leader A. Rare earth metals from secondary sources: Review of potential supply from waste and byproducts // *Resources, Conservation and Recycling*. 2021, vol. 167, article 105213. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105213.
15. Сорокин А. П., Агеев О. А., Дугин С. В., Попов А. А. Металлоносность бурых углей Райчихинского месторождения (Приамурье, Дальний Восток): условия накопления, распределения, перспективы освоения (обзор) // *Химия твердого топлива*. – 2023. – № 1. – С. 13–31. DOI: 10.31857/S0023117723010097.
16. Радомская В. И., Шумилова Л. П., Носкова Л. П., Сорокин А. П., Павлова Л. М., Иванов В. В. Локализация редкоземельных элементов в углях Сергеевского месторождения (Приамурье) // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. – 2022. – Т. 507. – № 2. – С. 217–223. DOI: 10.31857/S2686739722601776.
17. Радомская В. И., Шумилова Л. П., Носкова Л. П., Сорокин А. П., Павлова Л. М., Дугин С. В., Соктоев Б. Р., Поселужная А. В., Иванов В. В. Формы нахождения редкоземельных элементов в миоценовых бурых углях Сергеевского месторождения (Приамурье, Дальний Восток) // *Химия твердого топлива*. – 2023. – № 1. – С. 32–46. DOI: 10.31857/S0023117723010061.
18. Ketris M. P., Yudovich Y. E. Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals // *International Journal of Coal Geology*. 2009, vol. 78, no. 2, pp. 135–148. DOI: 10.1016/j.coal.2009.01.002.
19. Имаш А. А., Кайдар Б. Б., Жуматаев Е. А., Смагулова Г. Т. Пути комплексной переработки углей // *Горение и плазмохимия*. – 2021. – Т. 19. – № 4. – С. 327–338.
20. Миловский А. В. Минералогия и петрография. – М.: Недра, 1985. – 432 с.
21. Аренс В. Ж. Физико-химическая геотехнология. – М.: Изд-во Московского горного ун-та, 2001. – 656 с. 

REFERENCES

1. Dai S., Finkelman R. B. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects. *International Journal of Coal Geology*. 2018, vol. 186, pp. 155–164. DOI: 10.1016/J.COAL.2017.06.005.
2. Popov N. Yu., Chekryzhov I. Yu., Tarasenko I. A., Kasatkin S. A., Kholodov A. S. Structural and geochemical features of coal-bearing sediments and sources of rare element impurities in coals of the Rakovka depression (Primorsky Krai, Russia). *International Journal of Coal Science & Technology*. 2022, vol. 9, article 14. DOI: 10.1007/s40789-022-00486-0.
3. Vyalov V. I., Nastavkin A. V., Shishov E. P., Chernyshev A. A. The criteria for predicting and prospecting of metal-bearing coals in the Far East of Russia. *Geosfernye issledovaniya*. 2023, no. 2, pp. 33–48. [In Russ]. DOI: 10.17223/25421379/27/4.
4. Arbutov S. I., Chekryzhov I. Yu., Tarasenko I. A. Rare metal potential of coals of Siberia and the Russian Far East and prospects for its development. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2023, no. 5, pp. 31–51. [In Russ]. DOI: 10.37102/0869-7698_2023_231_05_3.
5. Vyalov V. I., Nastavkin A. V., Shishov E. P. New data on the metal content of Sakhalin coals. *Khimiya tverdogo topliva*. 2022, no. 6, pp. 25–29. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0023117722060123.
6. Yue T., Lu S., Chong F., Rongyi Y., Jianhua Q., Hanxun J., Ying Z. Distribution of rare earth elements (REEs) and their roles in plant growth: A review. *Environmental Pollution*. 2022, vol. 298, article 118540. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118540.

7. Sun G., Li Z., Liu T., Chen J., Wu T., Feng X. Rare earth elements in street dust and associated health risk in a municipal industrial base of central China. *Environmental Geochemistry and Health*. 2017, vol. 39, no. 6, pp. 1469–1486. DOI: 10.1007/s10653-017-9982-x.
8. Nechaev A. V., Polyakov E. G. Current and future balance of production and consumption of rare earth metals in Russia. *Mineral resources of Russia. Economics & management*. 2020, no. 2, pp. 49–53. [In Russ].
9. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*. 2019, vol. 10, no. 4, pp. 1285–1303. DOI: 10.1016/j.gsf.2018.12.005.
10. Migaszewski Z. M., Galuszka A. The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: A review. *Critical Reviews In Environmental Science and Technology*. 2015, vol. 45, pp. 429–471. DOI: 10.1080/10643389.2013.866622.
11. He M. L., Ranz D., Rambeck W. A. Study on the performance enhancing effect of rare earth elements in growing and fattening pigs. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2001, vol. 85, no. 7-8, pp. 263–270. DOI: 10.1046/j.1439-0396.2001.00327.x.
12. Voncken J. H. L. *The rare earth elements – an introduction*. Netherlands, Springer, 2016, 127 p. DOI: 10.1007/978-3-319-26809-5.
13. Goodenough K. M., Wall F., Merriman D. The rare earth elements: demand, global resources, and challenges for resourcing future generations. *Natural Resources Research*. 2018, vol. 27, pp. 201–216. DOI: 10.1007/s11053-017-9336-5.
14. Gaustad G., Williams E., Leader A. Rare earth metals from secondary sources: Review of potential supply from waste and byproducts. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021, vol. 167, article 105213. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105213.
15. Sorokin A. P., Ageev O. A., Dugin S. V., Popov A. A. Metal content of brown coals of the Raychikhinsky deposit (Amur region, Far East): conditions of accumulation, distribution, development prospects (review). *Khimiya tverdogo topliva*. 2023, no. 1, pp. 13–31. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0023117723010097.
16. Radomskaya V. I., Shumilova L. P., Noskova L. P., Sorokin A. P., Pavlova L. M., Ivanov V. V. Localization of rare-earth elements in coals of the Sergeevskoye deposit (Amur region). *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2022, vol. 507, no. 2, pp. 217–223. [In Russ]. DOI: 10.31857/S2686739722601776.
17. Radomskaya V. I., Shumilova L. P., Noskova L. P., Sorokin A. P., Pavlova L. M., Dugin S. V., Soktoev B. R., Poselyuzhnaya A. V., Ivanov V. V. Forms of occurrence of rare earth elements in Miocene brown coals of the Sergeevskoe deposit (Amur Region, Far East). *Khimiya tverdogo topliva*. 2023, no. 1, pp. 32–46. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0023117723010061.
18. Ketris M. P., Yudovich Y. E. Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*. 2009, vol. 78, no. 2, pp. 135–148. DOI: 10.1016/j.coal.2009.01.002.
19. Imash A. A., Kajdar B. B., Zhumataev E. A., Smagulova G. T. Ways of complex processing of coal. *Gorenie i plazmohimiya*. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 327–338. [In Russ].
20. Milovskiy A. V. *Mineralogiya i petrografiya* [Mineralogy and petrography], Moscow, Nedra, 1985, 432 p.
21. Arens V. Zh. *Fiziko-khimicheskaya geotekhnologiya* [Physical and chemical geotechnology], Moscow, 2001, 656 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Радомская Валентина Ивановна¹ — канд. хим. наук,
 ведущий научный сотрудник,
 e-mail: radomskaya@ascnet.ru,
 ORCID ID: 0000-0002-3023-7565,
 Сорокин Анатолий Петрович¹ — чл.-корр. РАН,
 главный научный сотрудник,
 e-mail: sorokinap@ignm.ru,
 ORCID ID: 0000-0001-8918-3787,

Шумилова Людмила Павловна¹ – канд. биол. наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: shumilova.85@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4128-9157,
¹ Институт геологии и природопользования,
Дальневосточное отделение РАН.
Для контактов: Радомская В.И., e-mail: radomskaya@ascnet.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.I. Radomskaya*¹, Cand. Sci. (Chem.),
Leading Researcher,
e-mail: radomskaya@ascnet.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3023-7565,
*A.P. Sorokin*¹, Corresponding Member of
Russian Academy of Sciences,
Chief Researcher,
e-mail: sorokinap@ignm.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8918-3787,
*L.P. Shumilova*¹, Dr. Sci. (Biol.),
Senior Researcher,
e-mail: shumilova.85@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4128-9157,

¹ Institute of Geology and Nature Management,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
675000, Blagoveshchensk, Russia.

Corresponding author: V.I. Radomskaya, e-mail: radomskaya@ascnet.ru.

Получена редакцией 07.03.2024; получена после рецензии 23.05.2024; принята к печати 10.06.2024.
Received by the editors 07.03.2024; received after the review 23.05.2024; accepted for printing 10.06.2024.

