



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669; 66.061.34; 66.065.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-61-70

ПОПУТНОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ФОСФОГИПСА КАРБОНАТНО-ЩЕЛОЧНЫМ МЕТОДОМ

Герасёв С.А., Глазова К.Д., Курочкин И.О., Кузнецов В.В., Литвинова Т.Е.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В отвалах на территории России находится по меньшей мере 500 млн т фосфогипса – отхода производства фосфорной кислоты и фосфатных удобрений. В большинстве случаев распространено его хранение открытым способом, следовательно, загрязнение окружающей среды, нарушение естественного ландшафта и потеря ценных компонентов неизбежны. По известным данным, уровень утилизации фосфогипса сегодня составляет приблизительно 1%. Фосфогипс может содержать от 0,1 до 0,9% редкоземельных элементов, что позволяет рассматривать его как доступный вторичный источник этих металлов. **Цель работы.** Повышение комплексности переработки фосфогипса карбонатно-щелочным методом за счет появления дополнительного продукта в виде соединений редкоземельных металлов. **Используемые методы.** Химический состав образцов фосфогипса и продуктивных растворов определен методом атомно-эмиссионной спектроскопии, морфология фосфогипса – методом сканирующей электронной микроскопии, идентификация осадков редкоземельных металлов – методом рентгенофлуоресцентного анализа. **Новизна.** Произведена апробация карбонатно-щелочного метода на образцах фосфогипса различного генеза (образованного из фосфорита и апатита; полученного по дигидратной и полугидратной технологии; отвального и свежеполученного). **Результат.** Определены значения степени конверсии сульфата кальция в карбонат кальция для образцов техногенного фосфогипса (96,4–98,4%); на основании экспериментальных данных рассчитаны степени извлечения редкоземельных металлов в раствор (степень извлечения суммы редкоземельных металлов составила 58,6–68,2%); предложены варианты дальнейшего выделения редкоземельных металлов из раствора выщелачивания за счет осаждения шавелевой или фосфорной кислотой. **Практическая значимость.** Результаты исследований могут быть применены для разработки технологии утилизации фосфогипса карбонатно-щелочным методом.

Ключевые слова: фосфогипс, редкоземельные элементы, лантаноиды, карбонатные комплексы, конверсия, выщелачивание

© Герасёв С.А., Глазова К.Д., Курочкин И.О., Кузнецов В.В., Литвинова Т.Е., 2025

Для цитирования

Попутное извлечение редкоземельных элементов из фосфогипса карбонатно-щелочным методом / С.А. Герасёв, К.Д. Глазова, И.О. Курочкин, В.В. Кузнецов, Т.Е. Литвинова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 61-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-61-70>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ASSOCIATED RARE EARTH ELEMENTS EXTRACTION FROM PHOSPHOGYPSUM BY CARBONATE-ALKALINE METHOD

Gerasev S.A., Glazova K.D., Kurochkin I.O., Kuznetsov V.V., Litvinova T.E.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). At least 500 million tonnes of phosphogypsum (by-product of phosphoric acid and phosphate fertilizer technology) are in Russian dumps. In most cases, it is common to store phosphogypsum by open method, which inevitably leads to environmental pollution, disturbance of the natural landscape and loss of valuable components. According to literary data, the level of phosphogypsum utilization today is approximately 1 %. Phosphogypsum consists of from 0.1 % to 0.9 % of the rare earths, consequently it is an available secondary source of these metals. **Objective** is an increasing of phosphogypsum processing level by carbonate-alkaline method due to obtaining an additional rare earth product. **Methods Applied.** Chemical composition of phosphogypsum samples and productive solutions was determined by ICP analysis, the morphology of phosphogypsum – by SEM, and the rare earth metal sediments identification – by XRF analysis. **Originality.** Carbonate-alkaline method approbation was carried using different originated phosphogypsum samples (formed from phosphorite and apatite; obtained by dihydrate and semi-hydrate technology; dumped and freshly obtained). **Result.** Conversion level of calcium sulphate into calcium carbonate was determined for technogenic phosphogypsum samples and was 96.4–98.4%; based on experimental data obtained degree of rare earth metals extraction into solution was 56.8–68.2% for sum rare earth; variants of further rare earth metals extraction from leaching solution by sedimentation with oxalic or phosphoric acid were proposed. **Practical Relevance.** Scientific results can be applied for development of phosphogypsum utilization technology by carbonate-alkaline method.

Keywords: phosphogypsum, rare earth elements, lanthanides, carbonate complexes, conversion, leaching

For citation

Gerasev S.A., Glazova K.D., Kurochkin I.O., Kuznetsov V.V., Litvinova T.E. Associated Rare Earth Elements Extraction from Phosphogypsum by Carbonate-Alkaline Method. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 61–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-61-70>

Введение

К представителям редкоземельных элементов (РЗЭ) относятся лантаноиды, иттрий и скандий [1, 2]. На основании Распоряжения Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р эти металлы включены в перечень основных видов стратегического минерального сырья, что указывает на приоритетность развития технологий получения РЗЭ для обеспечения бесперебойной работы оборонного сектора, энергетики и промышленности в целом [3, 4].

Отечественная минерально-сырьевая база РЗЭ располагает относительно большими запасами: примерно 27 млн т (в пересчете на оксиды) – третье место в мире, при этом доля мирового производства составляет не более 0,9 % [5, 6]. К причинам столь низкого уровня производства можно отнести неразвитую инфраструктуру вблизи богатых месторождений (например, самые богатые участки рудного массива Томтор насчитывают 8-9 % РЗЭ в пересчете на оксиды, однако месторождение недоступно [7, 8]), ориентация на импорт редкоземельной продукции из Китая (доля импорта составляет 85-90 %) [9, 10].

Один из способов снижения импортозависимости – вовлечение в производство техногенного сырья, в состав которого входят редкоземельные металлы [11, 12]. Согласно современной классификации РЗЭ, учи-

тывающей соотношение спроса и предложения, их подразделяют на три группы по важности [13, 14]:

- 1) критические (неодим, европий, тербий, диспрозий, иттрий, эрбий);
- 2) некритические (лантан, празеодим, самарий, гадолиний);
- 3) избыточные (церий, гольмий, тулий, иттербий, лютеций).

Переработка апатита и фосфорита в фосфорную кислоту и фосфатные удобрения приводит к образованию крупнотоннажного отхода фосфогипса (ФГ) – $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$: при $n = 0,5$ – полугидрат, при $n = 2$ – дигидрат [15, 16]. ФГ содержит в качестве примесей от 0,1 до 0,9% критических, некритических и избыточных РЗЭ, таким образом, он представляется перспективным сырьевым источником [17, 18].

В мировой практике исследования в области утилизации ФГ ведутся по трем укрупненным направлениям [19]:

- 1) применение в сельском хозяйстве (известкование почвы) [20, 21];
- 2) применение в строительстве (строительные смеси, дорожные покрытия) [22, 23];
- 3) химическая переработка органическими или неорганическими реагентами (конверсионные методы, термические методы и др.) [24, 25].

Наиболее известным вариантом извлечения РЗЭ из ФГ считается сернокислотный метод, позволяю-

щий очистить гипс от РЗЭ при добавлении к нему H_2SO_4 (концентрация H_2SO_4 20–25 %, отношение ж:т = 2–3, температура 80°C). Тем не менее при таком подходе исключена переработка сульфата кальция. Рациональным и экологически безопасным вариантом утилизации ФГ является переработка методом карбонатно-щелочной конверсии, цель которого, прежде всего, превратить основной компонент (сульфат кальция) в коммерчески ценный карбонат кальция по уравнению (1). Осуществить процесс возможно при обработке пульпы ФГ раствором карбоната щелочного металла при температуре 70–90°C [26].



Форма существования РЗЭ в ФГ зависит от природы исходного сырья, способа его переработки и условий хранения (в случае отвального ФГ). Так, среди возможных фаз встречаются фосфаты, фториды и сульфаты РЗЭ, при этом фосфаты обладают меньшей растворимостью в воде и хуже поддаются выщелачиванию [27, 28]. По этой причине ранние исследования были направлены на изучение растворимости синтетических фосфатов РЗЭ в среде карбонат-иона. Установлено, что переход РЗЭ из твердой в жидкую фазу осуществим под действием CO_3^{2-} и сопровождается образованием растворимых карбонатных комплексов вида $\text{Ln}(\text{CO}_3)_n^{3-2n}$ (при $n = 1; 2$). Результаты термодинамического и кинетического анализа системы $\text{LnPO}_4 - \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ служат основой для реализации попутного извлечения РЗЭ в раствор при карбонатно-щелочной переработке ФГ в конверсионный мел [29].

Ограничение в применении карбонатно-щелочного метода – присутствие в ФГ соединений тория и урана, которые под действием карбонат-иона, так же как и РЗЭ, способны переходить в раствор, что является актуальным, например, для ФГ, расположенного на Африканском континенте [30–32].

Для последующего выделения РЗЭ из водной фазы традиционно используют экстракционные, сорбционные и осадительные методы, однако большинство из них апробировано только для кислых и нейтральных сред [33–35]. Таким образом, извлечение

РЗЭ из щелочных (карбонатно-щелочных) растворов остается все еще нерешенной задачей.

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований в области попутного извлечения РЗЭ из отечественного ФГ различного происхождения раствором карбоната калия с получением растворимых карбонатных комплексов. Также рассмотрена возможность их дальнейшего выделения осадительными методами. В качестве осадителей использовали щавелевую кислоту, оксалат натрия и фосфорную кислоту.

Материалы и методы исследования

Конверсию ФГ проводили раствором карбоната калия в реакторной системе HEL Automate в изотермических условиях при заданной скорости перемешивания. Процесс исследован на 4-х образцах техногенного фосфогипса, производимого следующими компаниями:

1) «ЕвроХим» («Фосфорит», г. Кингисепп) – 1 образец свежеполученного и 1 образец отвального ФГ, образованного по дигидратному методу из фосфоритового концентрата;

2) «ФосАгро» («Апатит», г. Череповец) – 2 образца свежеполученного ФГ, образованного по полу-гидратному и дигидратному методу из апатитового концентрата.

Состав проб ФГ и продуктивных растворов установлен методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на оборудовании ICPE-9000 (Shimadzu). Порошки ФГ предварительно были переведены в форму азотно-кислотной вытяжки, их состав приведен в **табл. 1**. Так, Се, Dy, La, Nd и Y были обнаружены во всех четырех материалах, Er – только в образцах 1 и 2, Yb – в образцах 3 и 4. Содержание РЗЭ в образцах ФГ представлено в **табл. 2**.

Снимки использованных в исследовании порошков получены методом сканирующей электронной микроскопии науглероженных материалов на оборудовании Tescan Vega 3 и показаны на **рис. 1**.

Таблица 1. Химический состав образцов фосфогипса различного генеза, мас. %

Table 1. Chemical composition of different originated phosphogypsum samples, wt. %

| Номер образца | Регион | Особенности | Химический состав, мас. % | | | | | | |
|---------------|-----------|------------------------------|---------------------------|-----------------|-------------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | CaO | SO ₃ | P ₂ O ₅ | SrO | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | Ln ₂ O ₃ |
| 1 | Кингисепп | Дигидрат (отвальный) | 41,39 | 55,97 | 1,73 | 0,22 | 0,19 | 0,18 | 0,32 |
| 2 | Кингисепп | Дигидрат (свежеполученный) | 41,01 | 55,68 | 2,49 | 0,20 | 0,19 | 0,10 | 0,33 |
| 3 | Череповец | Полугидрат (свежеполученный) | 38,70 | 58,39 | 1,62 | 0,57 | 0,40 | 0,11 | 0,21 |
| 4 | Череповец | Дигидрат (свежеполученный) | 38,59 | 58,52 | 1,67 | 0,51 | 0,42 | 0,11 | 0,18 |

Таблица 2. Содержание редкоземельных элементов в образцах фосфогипса различного генеза, мас. %
Table 2. Rare earth elements content in different originated phosphogypsum samples, wt. %

| Номер образца | Регион | Особенности | Содержание редкоземельных элементов, мас. % | | | | | | |
|---------------|-----------|------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | Ce ₂ O ₃ | Dy ₂ O ₃ | La ₂ O ₃ | Nd ₂ O ₃ | Y ₂ O ₃ | Er ₂ O ₃ | Yb ₂ O ₃ |
| 1 | Кингисепп | Дигидрат (отвальный) | 0,10 | 0,09 | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,01 | - |
| 2 | Кингисепп | Дигидрат (свежеполученный) | 0,09 | 0,09 | 0,03 | 0,03 | 0,06 | 0,03 | - |
| 3 | Череповец | Полугидрат (свежеполученный) | 0,08 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,05 | - | 0,03 |
| 4 | Череповец | Дигидрат (свежеполученный) | 0,07 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | - | 0,02 |

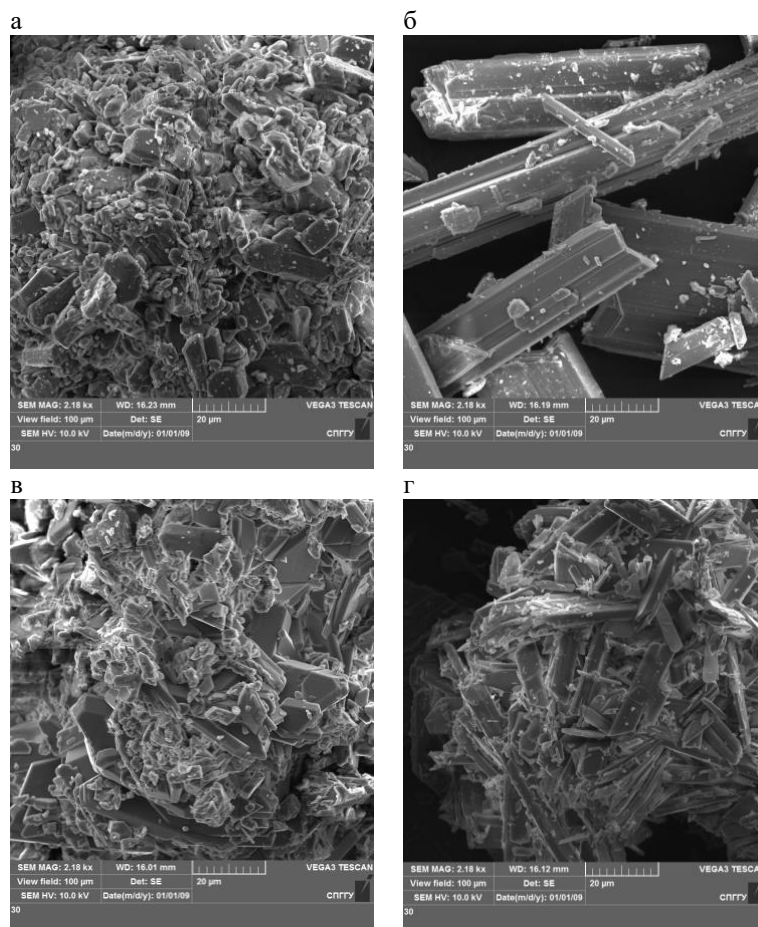


Рис. 1. Снимки образцов фосфогипса различного генеза: а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 4

Fig. 1. Images of different originated phosphogypsum samples: а is sample 1; б is sample 2; в is sample 3; г is sample 4

Согласно исследованию морфологии порошков ФГ, частицы объединены в зернистые агрегаты и отличаются друг от друга степенью кристалличности. Образец 2 является наиболее кристаллизованным, он состоит из множества столбчатых кристаллов, обладающих преимущественно призматическим и ромбоэдрическим габитусом. Агрегаты образцов 3 и 4 представляют собой зерна неправильной формы в комбинации с пластинчатыми кристаллами. Среди рассмотренных порошков образец 1 характеризуется меньшей кристалличностью: мелкозернистый агрегат,

содержащий незначительное количество столбчатых кристаллов.

Степень конверсии α сульфата кальция в карбонат кальция рассчитана как отношение общей массы серы в продуктивном растворе к общей массе серы в исходном образце ФГ по формуле

$$\alpha = \frac{m(S)_{\text{ж}}}{m(S)_{\text{т}}} \cdot 100\% . \quad (2)$$

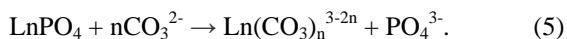
Степень извлечения РЗЭ из ФГ в раствор вычислена как для каждого отдельного металла (Ln), так и для суммы РЗЭ (ΣLn) аналогичного расчету степени конверсии и представлена формулами

$$E = \frac{m(\text{Ln})_{\text{ж}}}{m(\text{Ln})_{\text{т}}} \cdot 100\%; \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{m(\Sigma \text{Ln})_{\text{ж}}}{m(\Sigma \text{Ln})_{\text{т}}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

С целью обоснования отсутствия или наличия необходимости барботирования углекислым газом пульпы фосфогипса в ходе конверсии проведена серия экспериментов по установлению влияния pH на степень извлечения РЗЭ в раствор из синтетических фосфатов в среде карбонат-иона.

Варианты последующего выделения РЗЭ из растворов опробованы на модельных карбонатных комплексах, полученных из фосфатов церия и иттербия по уравнению



В качестве осадителей РЗЭ были применены насыщенные при стандартных условиях растворы щавелевой кислоты и оксалата натрия, а также раствор фосфорной кислоты концентрацией 5 моль/л. Элементный состав осадков определяли методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на оборудовании Epsilon 3.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты экспериментов по установлению влияния pH на степень извлечения некоторых РЗЭ (рис. 2) проведены с использованием 2 М раствора K_2CO_3 при температуре 90°C и времени, необходимом для достижения состояния, близкого к равновесному. pH раствора изменяли за счет дополнительного внесения гидроксида калия или соляной кислоты. При pH более 12,5 наблюдается снижение степени извлечения РЗЭ из-за образования малорастворимых гидроксидов. При подкислении раствора степень извлечения РЗЭ также снижается, из чего следует, что образующиеся гидрокарбонат-анионы не способствуют лучшему протеканию процесса комплексообразования. В этой связи барботирование углекислым газом, часто применяемое при организации процесса конверсии по газожидкостному варианту, не приведет к положительному эффекту.

Конверсию фосфогипса проводили раствором карбоната калия концентрацией 4 М при перемешивании в течение 3 ч, при температуре 90°C и межфазном отношении 100 мл на 1 г ФГ. Степень превращения сульфата кальция в мел составила более 96% для каждого из четырех образцов (табл. 3).

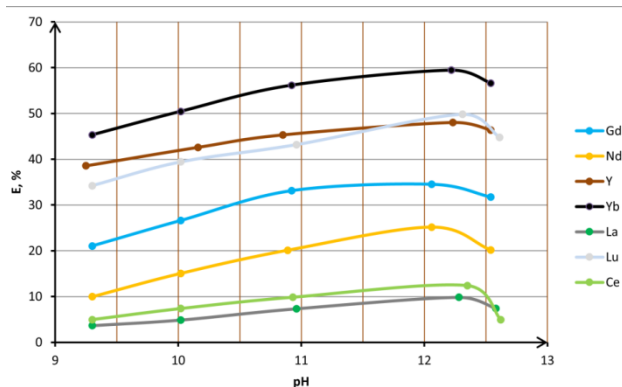


Рис. 2. Влияние pH на степень извлечения редкоземельных металлов из их фосфатов

Fig. 2. The influence of pH on the degree of rare earth metals extraction from phosphates

Таблица 3. Степень конверсии сульфата кальция, %
Table 3. Calcium sulphate conversion level, %

| Номер образца | Регион | Особенности | Степень конверсии α , % |
|---------------|-----------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | Кингисепп | Дигидрат (отвальный) | 96,4 |
| 2 | Кингисепп | Дигидрат (свежеполученный) | 98,4 |
| 3 | Череповец | Полугидрат (свежеполученный) | 98,0 |
| 4 | Череповец | Дигидрат (свежеполученный) | 97,3 |

Согласно полученным значениям, конверсия отвального фосфогипса (образец 1) протекает чуть хуже, чем свежеполученных образцов. На основании сопоставления структуры образцов ФГ (см. рис. 1) и степени конверсии можно сделать вывод о том, что порошки 2, 3 и 4 превращаются в мел лучше из-за более выраженной кристалличности, в то время как образец 1 является мелкозернистым агрегатом, содержащим незначительное количество столбчатых кристаллов. Изменение морфологии образца 1 в процессе нахождения в отвале, вероятно, связано с воздействием условий окружающей среды, что косвенно подтверждается отличием оттенков исходных порошков: образец 1 – темно-серый, образцы 2–4 – светло-серые.

Попутное извлечение РЗЭ в раствор представлено в виде диаграммы (рис. 3). Степень извлечения составила: La – 40,1%, Ce – 58,2%, Nd – 62,5%, Dy – 64,0%, Er – 66,4%, Y – 72,9%, Yb – 76,8%.

Таким образом, выщелачиванию лучше поддаются представители тяжелых РЗЭ. Полученные данные коррелируют с ранее проведенными экспериментами по растворению синтетических осадков в среде карбонат-иона. Общий процент извлечения из ФГ составил: из образца 1 – 58,6%, из образца 2 – 64,6%, из образца 3 – 67,4%, из образца 4 – 68,2%. Процент выщелачивания РЗЭ из отвального ФГ ниже, чем из свежеполученных образцов.

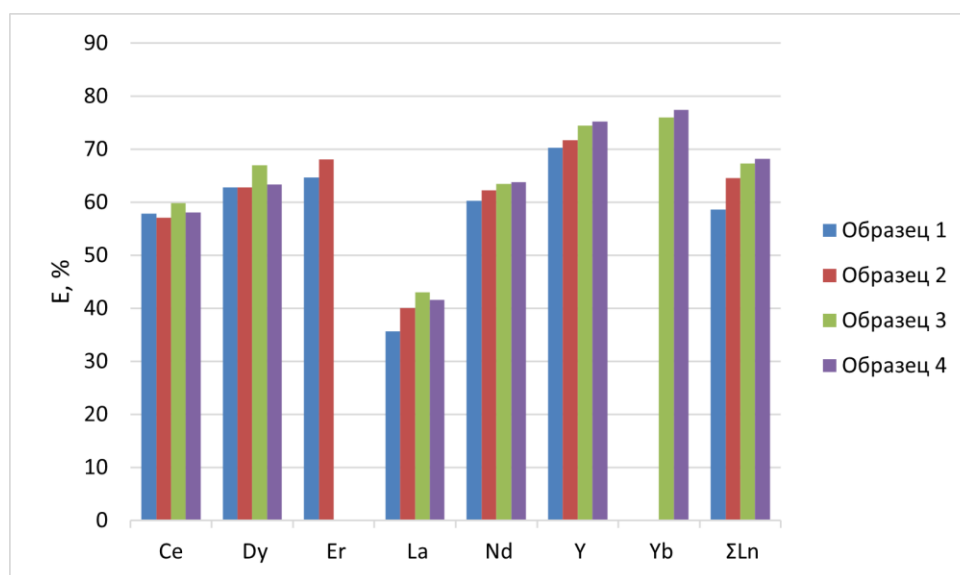


Рис. 3. Степень извлечения редкоземельных металлов из фосфогипса различного генеза
Fig. 3. Degree of rare earth metals extraction from different originated phosphogypsum

Осадительные методы исследованы на примере карбонатного комплекса церия и основаны на разрушении структуры комплексного иона, причем использование оксалата натрия не привело к образованию осадка, в то время как применение щавелевой и фосфорной кислоты позволило произвести осаждение РЗЭ. Из чего следует, что разрушение карбонатных комплексов происходит под действием H^+ с переходом $Ln(CO_3)_n^{3-2n}$ в форму Ln^{3+} с последующим связыванием с анионом осадителя.

Так, под действием насыщенного раствора щавелевой кислоты наблюдается образование нерастворимого оксалата церия (III) (результаты рентгенофлуоресцентного анализа представлены на **рис. 4**), под действием 5 М фосфорной кислоты – нерастворимого

фосфата церия (III) (результаты рентгенофлуоресцентного анализа приведены на **рис. 5**). Подтверждением служат соответствующие спектральные пики: Ce, LA; Ce, LB1; Ce, LB2; Ce, LB3; Ce, LG и Ce, LA; Ce, LB1; Ce, LB2; Ce, LB3; P, KA.

Для самых распространенных комплексных ионов ($Ln(CO_3)_2^-$ и $LnCO_3^+$) взаимодействие с щавелевой и фосфорной кислотами описано уравнениями

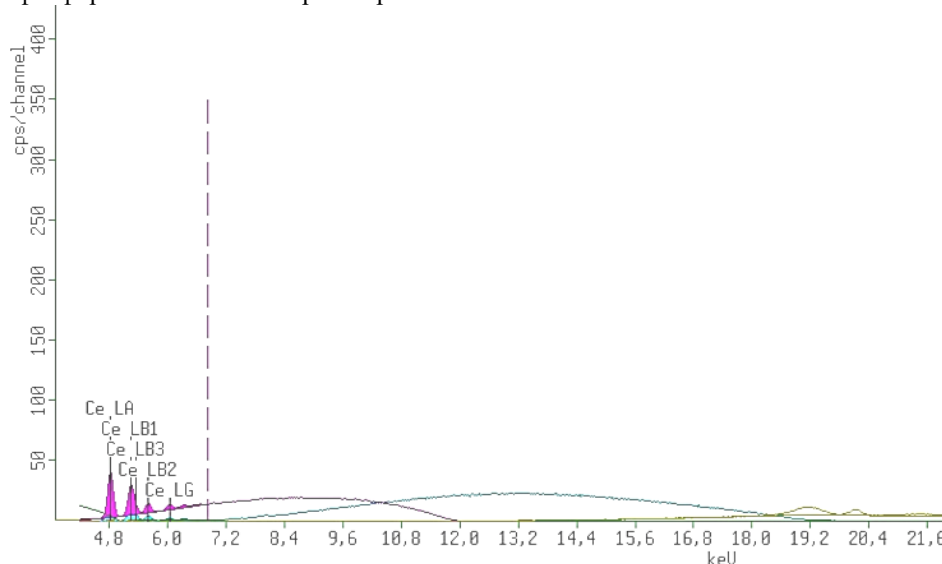
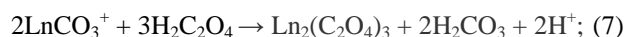
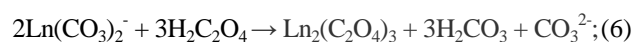
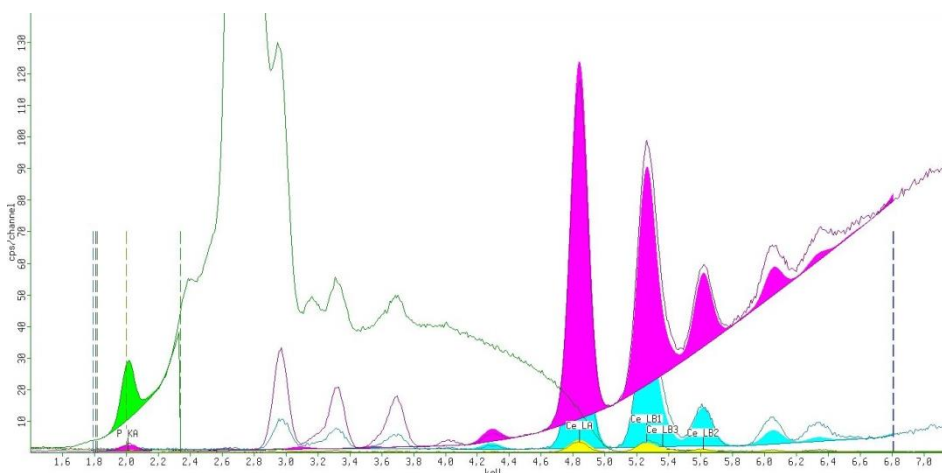


Рис. 4. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа осадка $Ce_2(C_2O_4)_3$
Fig. 4. The results of X-ray fluorescence analysis of $Ce_2(C_2O_4)_3$ precipitate

Рис. 5. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа осадка CePO_4 Fig. 5. The results of X-ray fluorescence analysis of CePO_4 precipitate

Заключение

Таким образом, карбонатно-щелочной метод позволяет комплексно перерабатывать фосфогипс различного генеза вне зависимости от типа исходного сырья (апатит или фосфорит), технологии его образования (дигидрат или полугидрат) и времени от момента его возникновения (свежеполученный или отвальный). Однако в случае отвального ФГ для увеличения степени конверсии сульфата кальция и степени извлечения РЗЭ необходимо применение механической активации ввиду изменения морфологии при нахождении в отвале под действием условий окружающей среды: УФ-излучение, изменение температуры, изменение влажности.

Для последующего выделения РЗЭ из растворов выщелачивания технически осуществимы осадительные методы, например оксалатный или фосфатный вариант. В случае коллективного осаждения РЗЭ в виде оксалатов представляется целесообразным их последующее прокаливание для получения концентрата оксидов РЗЭ с дальнейшим разделением на группы или индивидуальные компоненты по традиционной нитратной или хлоридной схеме.

Фосфатный вариант выделения РЗЭ может быть применен для создания изоляционных материалов для хранения радиоактивных отходов на основе LnPO_4 благодаря их химической инертности и устойчивости при изменении температуры.

Список литературы

- Ogata T., Narita H. Separation of Adjacent Light Rare Earth Elements Using Silica Gel Modified with Diglycolamic Acid. *Materials*. 2024, 17, 2648. <https://doi.org/10.3390/ma17112648>
- Di J., Ding X. Complexation of REE in Hydrothermal Fluids and Its Significance on REE Mineralization. *Minerals*. 2024, 14, 531. <https://doi.org/10.3390/min14060531>
- Podmiljšak B., Saje B., Jenuš P., Tomše T., Kobe S., Žužek K., Šturm S. The Future of Permanent-Magnet-Based Electric Motors: How Will Rare Earths Affect

- Electrification? *Materials*. 2024, 17, 848. <https://doi.org/10.3390/ma17040848>
- Behrsing T., Blair V.L., Jaroschik F., Deacon G.B., Junk P.C. Rare Earths—The Answer to Everything. *Molecules*. 2024, 29, 688. <https://doi.org/10.3390/molecules29030688>
- Pathapati S.V.S.H., Free M.L., Sarswat P.K. A Comparative Study on Recent Developments for Individual Rare Earth Elements Separation. *Processes*. 2023, 11, 2070. <https://doi.org/10.3390/pr11072070>
- Cherepovitsyn A., Solovyova V., Dmitrieva D. New challenges for the sustainable development of the rare-earth metals sector in Russia: Transforming industrial policies. *Resources Policy*. 2023, 81, 103347. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103347>
- Okrugin A., Zhuravlev A. Mineralogical and Geochemical Evidence of Paragenetic Unity of Igneous Silicate and Carbonate Rocks of the Tomtor Massif in the North-East of the Siberian Platform. *Minerals*. 2023, 13, 211. <https://doi.org/10.3390/min13020211>
- Lutskiy D.S., Lukyantseva E. S., Mikheeva V.Y., Grigorieva L.V. Investigation of the extraction of samarium and gadolinium from leaching solutions of phosphorus-containing raw materials using solid extractants. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*. 2023, 30(1), 68–73. <https://doi.org/10.1080/25765299.2022.2157954>
- Ormerod J., Karati A., Baghel A.P.S., Prodius D., Nlebedim I.C. Sourcing, Refining and Recycling of Rare-Earth Magnets. *Sustainability*. 2023, 15, 14901. <https://doi.org/10.3390/su152014901>
- Papagianni S., Moschovi A.M., Sakkas K.M., Chalaris M., Yakoumis I. Preprocessing and Leaching Methods for Extraction of REE from Permanent Magnets: A Scoping Review. *AppliedChem*. 2022, 2, 199–212. <https://doi.org/10.3390/appliedchem2040014>
- Akcil A., Swami K.R., Gardas R.L., Hazrati E., Dembele S. Overview on Hydrometallurgical Recovery of Rare-Earth Metals from Red Mud. *Minerals*. 2024, 14, 587. <https://doi.org/10.3390/min14060587>
- Pirzada M.D.S. Alternative Resources of Rare Earth Elements in Pakistan. *Mater. Proc.* 2024, 17, 26. <https://doi.org/10.3390/materproc2024017026>

13. Mukaba J.-L., Eze C.P., Pereao O., Petrik L.F. Rare Earths' Recovery from Phosphogypsum: An Overview on Direct and Indirect Leaching Techniques. *Minerals*. 2021 11, 1051. <https://doi.org/10.3390/min11101051>
14. Amirshahi S., Jorjani E. Preliminary Flowsheet Development for Mixed Rare Earth Elements Production from Apatite Leaching Aqueous Solution Using Biosorption and Precipitation. *Minerals*. 2023, 13, 909. <https://doi.org/10.3390/min13070909>
15. Levickaya K., Alfimova N., Nikulin I., Kozhukhova N., Buryanov A. The Use of Phosphogypsum as a Source of Raw Materials for Gypsum-Based Materials. *Resources*. 2024, 13, 69. <https://doi.org/10.3390/resources13050069>
16. Пашкевич М.А., Данилов А.С. Экологическая безопасность и устойчивое развитие // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 153-154.
17. Pliaka, M., Gaidajis, G. Potential uses of phosphogypsum: A review. *Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering*. 2022, 57(9), 746–763. <https://doi.org/10.1080/10934529.2022.2105632>
18. Al-Thyabat S., Zhang P. Extraction of rare earth elements from upgraded phosphate flotation tailings. *Minerals & Metallurgical Processing*. 2016, 33 (1). <https://doi.org/10.19150/mmp.6464>
19. Семячков А.И., Почечун В.А., Семячков К.А. Гидрогео-экологические условия техногенных подземных вод в объектах размещения отходов // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 168-179. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.24>
20. Ribeiro P.G., Dinali G.S., Boldrin P.F. et al. Rare Earth Elements (REEs) Rich-Phosphate Fertilizers Used in Brazil are More Effective in Increasing Legume Crops Yield Than Their REEs-Poor Counterparts. *Int. J. Plant Prod.* 2021, 15, 1–1. <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00129-5>
21. Ramos S.J., Dinali G.S., Carvalho T.S., Chaves L.C., Siqueira J.O., Guilherme L.R. Rare earth elements in raw materials and products of the phosphate fertilizer industry in South America: Content, signature, and crystalline phases. *Journal of Geochemical Exploration*. 2016, 168, 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.06.009>
22. Wen F., Fan Y., Wu J., Yao W. Analysis of the Mechanical Properties of Cured Sludge by Alkaline Excitation of Phosphogypsum. *Buildings*. 2024, 14, 646. <https://doi.org/10.3390/buildings14030646>
23. Levickaya K., Alfimova N., Nikulin I., Kozhukhova N., Buryanov A. The Use of Phosphogypsum as a Source of Raw Materials for Gypsum-Based Materials. *Resources*. 2024, 13, 69. <https://doi.org/10.3390/resources13050069>
24. Pyagai I., Zubkova O., Babykin R., Toropchina M., Fediuk R. Influence of Impurities on the Process of Obtaining Calcium Carbonate during the Processing of Phosphogypsum. *Materials*. 2022, 15, 4335. <https://doi.org/10.3390/ma15124335>
25. Chen Y., Fan X., Zhao B., Zhang L. Numerical Simulation of Pre-Reduction for a New Process of Acid Production from Phosphogypsum by Gas Sulfur Reduction. *Processes*. 2023, 11, 972. <https://doi.org/10.3390/pr11030972>
26. Kang C.-U., Ji S.-W., Jo H. Recycling of Industrial Waste Gypsum Using Mineral Carbonation. *Sustainability*. 2022, 14, 4436. <https://doi.org/10.3390/su14084436>
27. Zhou Q., Liao J., Liao C., Zhao B. Phase Equilibrium Study of Rare Earth Oxide–Fluoride Salt System: A Review. *Metals*. 2024, 14, 314. <https://doi.org/10.3390/met14030314>
28. Han J., Wang Y., Liu R. et al. Theoretical and experimental investigation of Xenotime-type rare earth phosphate REPO₄, (RE=Lu, Yb, Er, Y and Sc) for potential environmental barrier coating applications. *Sci Rep.* 2020, 10, 13681. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70648-0>
29. Экогeотехнология добычи бедных руд с созданием условий для попутной утилизации отходов горного производства / Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Рожков А.А., Соломеин Ю.М. // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 289-296. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.21>
30. Yang Y., Zhang X., Li L., Wei T., Li K. Metastable Dissolution Regularity of Nd³⁺ in Na₂CO₃ Solution and Mechanism. *ACS Omega*. 2019, 4, pp. 9160-9168. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00453>
31. Уран в антропогенных карбонатах на территории Уфы / Фархутдинов И.М., Хайруллин Р.Р., Соктоев Б.Р., Злобина А.Н., Чесалова Е.И., Фархутдинов А.М., Ткачев А.В. // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 226-237. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.4>
32. Chernysh Y., Chubur V., Abdieva I., Skvortsova P., Yakhsenkov O., Skydanenko M., Plyatsuk L., Roubík H. Soil Contamination by Heavy Metals and Radionuclides and Related Bioremediation Techniques: A Review. *Soil Syst.* 2024, 8, 36. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8020036>
33. Cheremisina O., Ponomareva M., Sergeev V., Mashukova Y., Balandinsky D. Extraction of Rare Earth Metals by Solid-Phase Extractants from Phosphoric Acid Solution. *Metals*. 2021, 11, 991. <https://doi.org/10.3390/met11060991>
34. Lobacheva O.L. Ion Flotation of Ytterbium Water-Salt Systems—An Innovative Aspect of the Modern Industry. *Water*. 2021, 13, 3493. <https://doi.org/10.3390/w13243493>
35. Сорбционная очистка вод кислотонакопителя от железа и титана на органических полимерных материалах / Черемисина О.В., Пономарева М.А., Молотилова А.Ю., Машукова Ю.А., Соловьев М.А. // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 971-980. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.28>

References

1. Ogata T., Narita H. Separation of Adjacent Light Rare Earth Elements Using Silica Gel Modified with Diglycolamic Acid. *Materials*. 2024;17;2648. <https://doi.org/10.3390/ma17112648>
2. Di J., Ding, X. Complexation of REE in Hydrothermal Fluids and Its Significance on REE Mineralization. *Minerals*. 2024;14:531. <https://doi.org/10.3390/min14060531>
3. Podmiljšak B., Saje B., Jenuš P., Tomše T., Kobe S., Žužek K., Šturm S. The Future of Permanent-Magnet-Based Electric Motors: How Will Rare Earths Affect Electrification? *Materials*. 2024;17:848. <https://doi.org/10.3390/ma17040>
4. Behrsing T., Blair V.L., Jaroschik F., Deacon G.B., Junk P.C. Rare Earths - The Answer to Everything. *Molecules*. 2024;29:688. <https://doi.org/10.3390/molecules29030688>
5. Pathapati S.V.S.H., Free M.L., Sarwat P.K. A Comparative Study on Recent Developments for Individual Rare

- Earth Elements Separation. Processes. 2023;11:2070. <https://doi.org/10.3390/pr11072070>
6. Cherepovitsyn A., Solovyova V., Dmitrieva D. New challenges for the sustainable development of the rare-earth metals sector in Russia: Transforming industrial policies. *Resources Policy*. 2023;81:103347b. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103347>
 7. Okrugin A., Zhuravlev A. Mineralogical and Geochemical Evidence of Paragenetic Unity of Igneous Silicate and Carbonatite Rocks of the Tomtor Massif in the North-East of the Siberian Platform. *Minerals*. 2023;13:211. <https://doi.org/10.3390/min13020211>
 8. Lutskiy D. S., Lukyantseva E. S., Mikheeva V. Y., Grigorieva L. V. Investigation of the extraction of samarium and gadolinium from leaching solutions of phosphorus-containing raw materials using solid extractants. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*. 2023;30(1):68-73. <https://doi.org/10.1080/25765299.2022.2157954>
 9. Ormerod J., Karati A., Baghel A.P.S., Prodius D., Nlebedim I.C. Sourcing, Refining and Recycling of Rare-Earth Magnets. *Sustainability*. 2023;15:14901. <https://doi.org/10.3390/su152014901>
 10. Papagianni S., Moschovi A.M., Sakkas K.M., Chalaris M., Yakoumis, I. Preprocessing and Leaching Methods for Extraction of REE from Permanent Magnets: A Scoping Review. *AppliedChem*. 2022;2:199-212. <https://doi.org/10.3390/appliedchem2040014>
 11. Akcil A., Swami K.R., Gardas R.L., Hazrati E., Dembele S. Overview on Hydrometallurgical Recovery of Rare-Earth Metals from Red Mud. *Minerals*. 2024;14:587. <https://doi.org/10.3390/min14060587>
 12. Pirzada M.D.S. Alternative Resources of Rare Earth Elements in Pakistan. *Mater. Proc.* 2024;17:26. <https://doi.org/10.3390/materproc2024017026>
 13. Mukaba J.-L., Eze C.P., Pereao O., Petrik L.F. Rare Earths' Recovery from Phosphogypsum: An Overview on Direct and Indirect Leaching Techniques. *Minerals*. 2021;11:1051. <https://doi.org/10.3390/min11101051>
 14. Amirshahi S., Jorjani E. Preliminary Flowsheet Development for Mixed Rare Earth Elements Production from Apatite Leaching Aqueous Solution Using Biosorption and Precipitation. *Minerals*. 2023;13:909. <https://doi.org/10.3390/min13070909>
 15. Levickaya K., Alfimova N., Nikulin I., Kozhukhova N., Buryanov A. The Use of Phosphogypsum as a Source of Raw Materials for Gypsum-Based Materials. *Resources*. 2024;13:69. <https://doi.org/10.3390/resources13050069>
 16. Pashkevich M.A., Danilov A.S. Ecological security and sustainability. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2023;260:153-154. (In Russ.)
 17. Pliaka M., Gaidajis G. Potential uses of phosphogypsum: A review. *Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering*. 2022;57(9):746-763. <https://doi.org/10.1080/10934529.2022.2105632>
 18. Al-Thyabat S., Zhang P. Extraction of rare earth elements from upgraded phosphate flotation tailings. *Minerals & Metallurgical Processing*. 2016;33(1). <https://doi.org/10.19150/mmp.6464>
 19. Semyachkov A.I., Pochechun V.A., Semyachkov K.A. Hydrogeoecological conditions of technogenic groundwater in waste disposal sites. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2023;260:168-179. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.24>
 20. Ribeiro P.G., Dinali G.S., Boldrin P.F., et al. Rare Earth Elements (REEs) Rich-Phosphate Fertilizers Used in Brazil are More Effective in Increasing Legume Crops Yield Than Their REEs-Poor Counterparts. *Int. J. Plant Prod.* 2021;15:1-1. <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00129-5>
 21. Ramos S.J., Dinali G.S., Carvalho T.S., Chaves L.C., Siqueira J.O., Guilherme L.R. Rare earth elements in raw materials and products of the phosphate fertilizer industry in South America: Content, signature, and crystalline phases. *Journal of Geochemical Exploration*. 2016;168:177-186. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.06.009>
 22. Wen F., Fan Y., Wu J., Yao W. Analysis of the Mechanical Properties of Cured Sludge by Alkaline Excitation of Phosphogypsum. *Buildings*. 2024;14:646. <https://doi.org/10.3390/buildings14030646>
 23. Levickaya K., Alfimova N., Nikulin I., Kozhukhova N., Buryanov A. The Use of Phosphogypsum as a Source of Raw Materials for Gypsum-Based Materials. *Resources*. 2024;13:69. <https://doi.org/10.3390/resources13050069>
 24. Pyagai I., Zubkova O., Babykin R., Toropchina M., Fediuk R. Influence of Impurities on the Process of Obtaining Calcium Carbonate during the Processing of Phosphogypsum. *Materials*. 2022;15:4335. <https://doi.org/10.3390/ma15124335>
 25. Chen Y., Fan X., Zhao B., Zhang L. Numerical Simulation of Pre-Reduction for a New Process of Acid Production from Phosphogypsum by Gas Sulfur Reduction. *Processes*. 2023;11:972. <https://doi.org/10.3390/pr11030972>
 26. Kang C.-U., Ji S.-W., Jo H. Recycling of Industrial Waste Gypsum Using Mineral Carbonation. *Sustainability*. 2022;14:4436. <https://doi.org/10.3390/su14084436>
 27. Zhou Q., Liao J., Liao C., Zhao B. Phase Equilibrium Study of Rare Earth Oxide-Fluoride Salt System: A Review. *Metals*. 2024;14:314. <https://doi.org/10.3390/met14030314>
 28. Han J., Wang Y., Liu R. et al. Theoretical and experimental investigation of Xenotime-type rare earth phosphate REPO₄ (RE = Lu, Yb, Er, Y and Sc) for potential environmental barrier coating applications. *Sci Rep*. 2020;10:13681. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70648-0>
 29. Sokolov I.V., Antipin Y.G., Rozhkov A.A., Solomein Y.M. Environmental geotechnology for low-grade ore mining with the creation of conditions for the concurrent disposal of mining waste. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2023;260:289-296. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.21>
 30. Yang Y., Zhang X., Li L., Wei T., Li K. Metastable Dis-solution Regularity of Nd³⁺ in Na₂CO₃ Solution and Mechanism. *ACS Omega*. 2019;4:9160-9168. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00453>
 31. Farkhutdinov I.M., Khayrullin R.R., Soktoev B.R., Zlobina A.N., Chesalova E.I., Farkhutdinov A.M., Tkachev A.V. Uranium in man-made carbonates on the territory of Ufa. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2023;260:226-237. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.4>
 32. Chernysh Y., Chubur V., Ablieieva I., Skvortsova P., Yakhnenko O., Skydanenko M., Plyatsuk L., Roubik H. Soil Contamination by Heavy Metals and Radionuclides and Related Bioremediation Techniques: A Review. *Soil Syst*. 2024;8:36. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8020036>

33. Cheremisina O., Ponomareva M., Sergeev V., Mashukova Y., Balandinsky D. Extraction of Rare Earth Metals by Solid-Phase Extractants from Phosphoric Acid Solution. *Metals*. 2021;11:991. <https://doi.org/10.3390/met11060991>
34. Lobacheva O.L. Ion Flotation of Ytterbium Water-Salt Systems - An Innovative Aspect of the Modern Industry. *Water*. 2021;13:3493. <https://doi.org/10.3390/w13243493>
35. Cheremisina O.V., Ponomareva M.A., Molotilova A.Y., Mashukova Y.A., Soloviev M.A. Sorption purification of acid storage facility water from iron and titanium on organic polymeric materials. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2023;264:971-980. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.28>

Поступила 09.09.2024; принята к публикации 29.10.2024; опубликована 30.06.2025
Submitted 09/09/2024; revised 29/10/2024; published 30/06/2025

Герасёв Степан Алексеевич – аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.
Email: gerashev111@mail.ru. ORCID 0000-0003-0612-7283

Глазова Ксения Дмитриевна – студент,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.
Email: glazova29@gmail.com

Курочкин Илья Олегович – студент,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.
Email: s220629@stud.spmi.ru

Кузнецов Владимир Владимирович – студент,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.
Email: s220627@stud.spmi.ru

Литвинова Татьяна Евгеньевна – доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.
Email: viritsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-0133-3400

Stepan A. Gerashev – Postgraduate Student,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: gerashev111@mail.ru. ORCID 0000-0003-0612-7283

Ksenia D. Glazova – Student,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: glazova29@gmail.com

Ilya O. Kurochkin – Student,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: s220629@stud.spmi.ru

Vladimir V. Kuznetsov – Student,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: s220627@stud.spmi.ru

Tatiana E. Litvinova – DrSc (Eng.), Professor,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: viritsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-0133-3400