



Научная статья

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Гаухар К. Бишимбаева¹ , доктор технических наук, Сауле М. Нурмакова^{*1} кандидат технических наук, Рустем В. Шарипов¹ , Карлыгаш Ж. Буленова² , Закен А. Искаков² , Айдана А. Мырзабекова¹ , Амантай Далбанбай¹ , Ербол М. Карманов¹ , Магзум Ж. Садыков¹

¹ НАО «Казахский Национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева» (Satbayev University), Алматы, Казахстан; g.bishimbayeva@satbayev.university (Г.К.Б.), s.nurmakova@satbayev.university (С.М.Н.), s.rustemy@gmail.com (Р.В.Ш.), kbulenova73@mail.ru (К.Ж.Б.), zaken.is@mail.ru (З.А.И.), Myrzabekova.inp@gmail.com (А.А.М.), a.dalbanbay@satbayev.university (А.Д.), Yerposhock@gmail.com (Е.М.К.), Magzumych@mail.ru (М.Ж.С.)

² ТОО "Институт высоких технологий", Алматы, Казахстан, kbulenova73@mail.ru (К.Ж.Б.), zaken.is@mail.ru (З.А.И.),

* Автор корреспонденции: Сауле М. Нурмакова, s.nurmakova@satbayev.university, mnurma@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

редкоземельные элементы, урановые месторождения, керновые пробы, техногенные образования, минералогический анализ, шлиховое обогащение, монацит, редкометаллическая минерализация, тяжелая фракция

АБСТРАКТ

В работе выполнено минералого-геохимическое исследование редкоземельных элементов в отработанных керновых пробах уранового месторождения Казахстана. Объектом исследования являлись пробы керна, отобранные из рудных, подрудных и нерудных интервалов скважин. Для оценки вещественного состава применён комплекс методов, включающий шлиховое обогащение, гравитационное разделение в тяжелой жидкости, магнитную сепарацию, а также минералогический, иммерсионный, капельно-микрохимический, люминесцентный и микрозондовый анализы. Установлено, что керновый материал представлен преимущественно глинистыми породами с включениями кварцевых песков и сульфидной минерализацией (пирит, марказит), а также минералами урана. В тяжелой фракции шлиховых проб выявлены минералы, потенциально концентрирующие редкоземельные элементы, включая монацит, сфен (титанит) и гранат. Монацит зафиксирован во всех исследованных пробах в виде редких и единичных зёрен, его содержание, как правило, не превышает 0,01 г. Дополнительно выявлены минералы тантало-ниобиевой группы, шеелит и акцессорные минералы (циркон, рутил, апатит, анатаз). Полученные результаты свидетельствуют о наличии редкоземельной минерализации в отработанном керна и указывают на его потенциальную перспективность как объекта для дальнейших геохимических исследований и оценки распределения РЗЭ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Мировое научное сообщество проявляет значительный интерес к вопросам добычи и производства редкоземельных элементов (РЗЭ), что обусловлено их высокой экономической значимостью для высокотехнологичных отраслей промышленности и рисками нестабильности поставок на мировой рынок. Европейский союз отнёс РЗЭ к категории критически важных сырьевых материалов, поскольку их трудно заменить в современных технологических устройствах без потери эффективности. В этих условиях извлечение РЗЭ из различных источников сырья приобретает особую актуальность в контексте устойчивого развития и перехода к принципам циркулярной экономики. Вовлечение техногенных отходов в переработку соответствует принципам устойчивого развития [1].

По статье:

Получено: 06.05.2026

Пересмотрено: 15.06.2026

Принято: 23.06.2026

Опубликовано: 01.10.2026

Для цитирования:

Бишимбаева Г.К.,
Нурмакова С.М., Шарипов
Р.В., Буленова К.Ж.,
Искаков З.А., Мырзабекова
А.А., Далбанбай А.,
Карманов Е.М., Садыков
М.Ж., Минералого-
геохимический анализ
редкоземельного
потенциала техногенных
отходов урановых
месторождений//
Гидрометеорология и
экология, 123 (3), 2026, 193-
203.

Широкое применение РЗЭ определяет их ключевую роль в развитии высокотехнологичных и низкоуглеродных отраслей. Они используются при производстве ветровых генераторов, электромобилей, катализаторов для снижения выбросов, энергоэффективных источников света и других экологически ориентированных технологий. Благодаря этому РЗЭ часто называют «зелёными металлами». На их основе получают легированные материалы, постоянные магниты, люминофоры и другие функциональные продукты, обладающие уникальными оптическими, электрическими, каталитическими и магнитными свойствами. Во многих странах РЗЭ рассматриваются как стратегический ресурс, нередко обозначаемый как «промышленное золото», поскольку они обеспечивают развитие высокотехнологичного производства и экономики.

Одним из ключевых факторов роста спроса на РЗЭ является развитие электрического транспорта. Производство гибридных (HEV) и полностью электрических автомобилей (EV) связано с использованием постоянных магнитов на основе неодима, функционирующих при повышенных температурах и требующих легирования диспрозием для обеспечения высокой коэрцитивной силы. Согласно прогнозным оценкам, к 2030 году ожидается значительный рост производства электромобилей, что обуславливает увеличение спроса на РЗЭ [2]. В контексте энергетического перехода и декарбонизации особое значение приобретают неодим, диспрозий, тербий, иттрий и европий. РЗЭ широко применяются в производстве люминофоров, стекла специального назначения, устойчивых к различным видам излучения, а также огнеупорных материалов. Многие их соединения характеризуются высокой температурой плавления и химической устойчивостью [3].

Экономически рентабельные месторождения РЗЭ ограничены и сосредоточены в небольшом числе стран. Содержание РЗЭ в земной коре составляет 130...240 мкг/г [4]. Основным мировым производителем на сегодняшний день остается Китай, обеспечивающий около 70 ...90 % добычи РЗЭ [5...7]. Развитие технологий переработки, а также меры экспортного регулирования позволяют стране оказывать определяющее влияние на глобальные поставки редкоземельного сырья [8...11].

РЗЭ широко распространены в земной коре, однако месторождения с промышленными концентрациями встречаются значительно реже. Согласно отчёту Европейской комиссии «Strengthening the European rare earths supply chain» доступные ресурсы РЗЭ существенно превышают текущие объёмы их добычи [12]. Руды характеризуются сложным и многокомпонентным составом и содержат наряду с РЗЭ ниобий, тантал, железо, алюминий и другие элементы. Известно более 250 минералов содержащих РЗЭ, включая монацит, ксенотим, бастнезит и другие. В большинстве случаев преобладают лёгкие РЗЭ (LREE) по сравнению с тяжёлыми (HREE). Это определяет необходимость разработки новых технологий комплексной переработки сложного сырья [13].

В последние годы возрастает интерес к извлечению РЗЭ из альтернативных источников, включая техногенные образования: хвосты обогащения, шлаки, золошлаковые отвалы, фосфогипс и отработанные ядерные материалы. Эти объекты рассматриваются как потенциальные источники РЗЭ требующие детального минералого-геохимического изучения [14].

В данной работе исследуются отработанные ядерные пробы, отобранные из скважин уранового месторождения, с целью выявления признаков рудоносности, рудообразования и минералогических особенностей распределения РЗЭ.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исследуемого материала использованы 31 представительная проба ядерного материала уранового месторождения Казахстана, отобранные для изучения распределения РЗЭ. Отбор осуществлялся из рудных, околорудных и вмещающих интервалов скважин с повышенными концентрациями полезных компонентов, определёнными по данным каротажных исследований. Перед проведением аналитических исследований кер-

новый материал подвергался поэтапному обогащению и фракционированию с целью концентрирования тяжёлых минеральных фаз потенциально содержащих РЗЭ. Составные пробы kernового материала из трёх скважин были усреднены путём объединения квартованных навесок с последующим интенсивным перемешиванием до получения однородной массы. Полученный материал подвергали сухому ситовому анализу с использованием сита с размером ячейки 0,5 мм, с выделением двух классов крупности: крупного ($> 0,5$ мм) и мелкого ($< 0,5$ мм). Обе фракции взвешивались для определения гранулометрического распределения.

Мелкая фракция ($< 0,5$ мм) подвергалась ручному отмучиванию и промывке с получением шлиховых концентратов, которые затем высушивались и взвешивались. Далее осуществлялось разделение концентратов по плотности с использованием бромформа (CHBr_3 , плотность $2,90 \text{ г/см}^3$), в результате чего получали тяжёлую и лёгкую фракции. Обе фракции промывались этанолом, высушивались и взвешивались отдельно. Тяжёлая фракция дополнительно подвергалась магнитной сепарации с использованием ручных постоянных магнитов и последующему разделению многополюсным электромагнитом по методике А.Я. Сочнева. В результате выделялись магнитная, электромагнитная и немагнитная фракции.

Все последующие исследования проводились на фракционированных и обогащённых пробах kernового материала. Минералогическое изучение РЗЭ-содержащих фаз выполнялось на шлиховых концентратах крупностью $< 0,5 - > 0,1$ мм. Морфологические и физико-оптические свойства зерен изучались под бинокулярным микроскопом МБС-9 при увеличении $\times 25$. Идентификация минералов осуществлялась с применением капельно-микрохимических реакций и иммерсионного метода с подбором жидкостей по показателям преломления. Исследования проводились на поляризационном микроскопе Leica DM 2500P в проходящем свете. Дополнительная диагностика элементного и фазового состава минералов выполнялась с использованием электронного микрозонда JEOL Superprobe-733 (Япония). Люминесцентные свойства минералов немагнитной фракции исследовались методом катодолюминесценции на установке «Люменскоп». Регистрировались характеристики свечения минералов при электронном возбуждении, что использовалось для дополнительной минералогической идентификации.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследований проанализированы 31 проба отработанного kernового материала из трёх скважин уранового месторождения Казахстана с целью оценки минерального состава и выявления фаз, потенциально концентрирующих РЗЭ. Минералогический анализ обогащённой фракции крупностью $> 0,5$ мм показал, что исследуемый материал представлен преимущественно рыхлыми, слабосцементированными и слабослюдистыми глинистыми породами. В ряде образцов фиксируются слабокарбонатизированные глины различной зернистости (средне-, мелко- и тонкозернистые) с прослоями кварцевых песков. Цветовая вариация глинистого материала отражает его минеральный и геохимический состав и включает светло-серые, зеленовато-голубые, тёмно-серые, пепельно-серые и локально ожезнённые разновидности (жёлто-бурые и красновато-бурые окраски, связанные с присутствием гидроксидов железа).

В составе рудных минералов во всех изученных пробах установлено присутствие урановых минералов, представленных свободными зёрнами, микровкраплениями и дисперсной пропиткой в глинистой матрице. Из сульфидной ассоциации повсеместно фиксируется пирит. Свободные зёрна золота в изученном материале не обнаружены.

Для фракции крупностью $< 0,5 \dots 0,1$ мм был получен шлиховый концентрат, подвергнутый дальнейшему разделению по плотности и магнитным свойствам. Разделение в тяжёлой жидкости (бромформ, плотность $2,90 \text{ г/см}^3$) позволило выделить тяжёлую и лёгкую фракции. Тяжёлая фракция дополнительно была разделена магнитной сепарацией на магнитную, электромагнитную и немагнитную составляющие. Результаты массопереноса и распределения фракций приведены в таблице 1.

Таблица 1*Результаты по разделению керновых проб размером ($d \ll 0,5 \text{ мм} - + 0,1 \text{ мм}$) на фракции*

№	№ обогащенных проб керна	Вес дробленых проб $d \ll 0,5 - 0,1$ мм, г	Вес шлиха (концентрата) $d \ll 0,5 - 0,1$ мм, г	Выход тяжелой фракции, г	Вес магнитной фракции, г	Вес электромагнитной фракции, г	Вес немагнитной фракции, г	Выход легкой фракции, г
Скважина 1								
1	Пр.3-2-2	1 795,45	25,40	0,36	зн	0,30	0,05	24,70
2	Пр.3-2-8	1 884,70	22,70	0,09	незн	0,05	0,03	22,45
3	Пр.5-2-0	1 043,78	13,90	0,26	зн	0,09	0,16	13,60
4	Пр.5-2-2	914,70	16,95	0,21	зн	0,02	0,18	13,40
5	Пр.5-2-0	986,30	18,25	0,12	незн	0,09	0,03	17,90
6	Пр.6-2-4	1 023,35	14,75	0,75	зн	0,03	0,72	13,00
7	Пр.6-2-6	1 647,20	14,65	2,70	зн	0,035	2,66	11,60
8	Пр.6-2-8	1 950,55	17,40	1,20	незн	0,09	1,10	15,90
9	Пр.6-2-9	917,07	12,55	0,31	зн	0,06	0,23	12,25
10	Пр.7-2-0	611,65	15,95	0,71	незн	0,07	0,62	13,80
Скважина 2								
11	Пр.13-1-5	180,60	30,20	0,76	зн	0,04	0,71	29,40
12	Пр.13-1-7	862,45	14,85	0,60	зн	0,05	0,54	14,00
13	Пр.13-1-9	998,00	24,45	0,56	зн	0,035	0,52	8,60
14	Пр.14-1-0	224,00	11,55	0,16	незн	0,03	0,12	7,10
15	Пр.14-1-5	980,00	24,90	0,19	зн	0,10	0,08	8,55
16	Пр.14-1-6	626,10	14,55	0,40	зн	0,16	0,33	7,80
17	Пр.14-1-8	144,10	11,20	0,17	зн	0,04	0,12	6,00
18	Пр.15-1-4	123,20	18,75	0,22	< 0,01	0,05	0,16	8,20
19	Пр.16-1-4	965,70	17,15	0,10	< 0,01	0,04	0,04	7,20
20	Пр.16-1-6	649,10	19,20	0,44	< 0,01	0,04	0,36	7,20
21	Пр.16-1-7	156,50	23,80	0,10	зн	0,02	0,07	10,10
Скважина 3								
22	Пр.22-3-7	32,0	14,75	0,13	зн	0,05	0,07	7,80
23	Пр.23-3-0	314,50	21,40	0,19	зн	0,02	0,16	6,85
24	Пр.23-3-2	1 483,50	32,70	0,40	незн	0,08	0,29	9,10
25	Пр.23-3-4	33,0	11,65	0,20	ед зн	0,03	0,15	7,0
26	Пр.23-3-6	224,40	17,05	0,80	< 0,01	0,15	0,62	8,0
27	Пр.23-3-8	79,00	16,35	0,28	0,01	0,08	0,16	9,60
28	Пр.24-3-3	594,50	11,70	0,22	незн	0,07	0,13	11,40
29	Пр.24-3-6	441,20	11,80	3,06	< 0,01	0,02	2,97	8,30
30	Пр.24-3-8	302,40	14,10	0,13	зн	0,02	0,08	10,50
31	Пр.24-3-9	101,00	7,90	0,40	незн	0,04	0,35	7,20

Примечание: зн – значительное, незн – незначительное; ед зн – единичное значение

В целом установлено:

- по Скважине 1 выход тяжелой фракции варьировал в пределах 0,09...2,70 г, при выходе легкой фракции 11,6 – 24,7 г;
- по Скважине 2 – 0,10 – 0,76 г и 6,0 – 29,4 г соответственно;
- по Скважине 3 – 0,13 – 3,06 г и 6,85 – 11,4 г соответственно.

Максимальные значения выхода тяжелой фракции фиксируются локально, что указывает на неравномерное распределение тяжелых минералов в пределах разреза и возможную линзовидную природу их концентрации.

Комплекс минералогических, иммерсионных, капельно-микрохимических, люминесцентных и рентгеноспектральных (микрозондовых) исследований позволил установить сложный полиминеральный состав тяжелой фракции и выделить группы минералов, потенциально связанных с концентрацией РЗЭ. Результаты количественного распределения минералов и фазового состава, полученные различными аналитическими методами, представлены на рисунке 1.

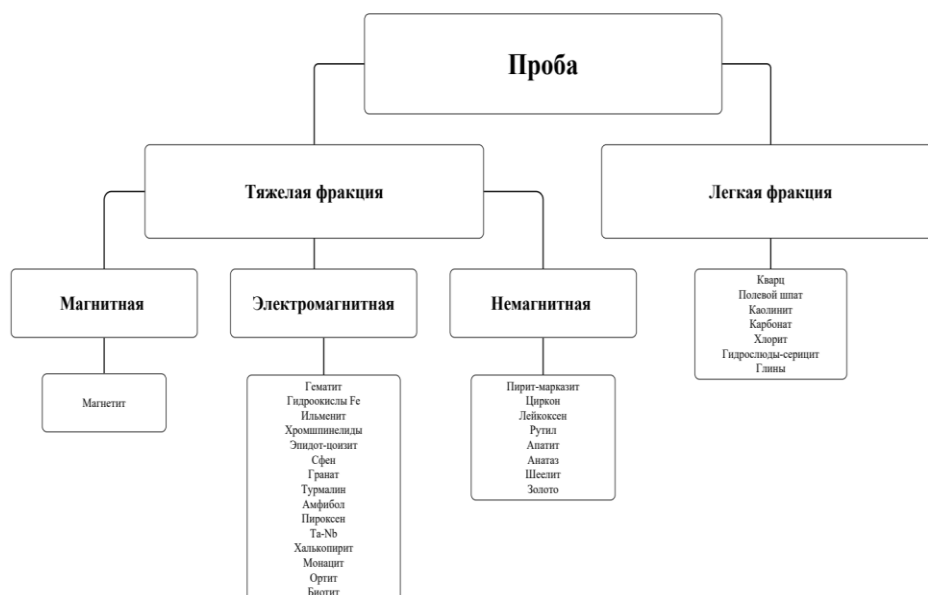


Рисунок 1. Минералы тяжелой и легкой фракции шлиховых проб обогащённого керна на месторождении урановой промышленности РК

Как следует из рисунка 1, в тяжелой электромагнитной фракции идентифицированы монацит, сфен (титанит) и гранат, которые рассматриваются как потенциальные носители тяжелых РЗЭ (HREE).

Минералогический анализ магнитной фракции показал, что основным компонентом является магнетит, однако его содержание носит подчинённый характер. Магнетит представлен преимущественно изометричными зёрнами черного цвета. В ряде случаев фиксируются гематитизированные и мартитизированные разности, характеризующиеся тёмно-бурой и рыжевато-бурой окраской, что отражает процессы окислительного преобразования первичного магнетита.

Электромагнитная фракция отличается наиболее сложным минеральным составом. Доминирующую роль играют эпидот-цоизитовые агрегаты, содержание которых достигает до 90 %. Данные минералы присутствуют практически во всех исследованных пробах и местами демонстрируют признаки интенсивных вторичных преобразований. Визуально они характеризуются бледно-зеленой окраской с фисташковым оттенком.

В подчинённых количествах в составе силикатной части электромагнитной фракции присутствуют акцессорные минералы: сфен (бурого цвета) (рисунок 2), гранат (розовых и светло-розовых, реже желтоватых оттенков) (рисунок 3), турмалин (темно-зеленый), а также единичные зёрна амфибола, пироксена, биотита и ортита.

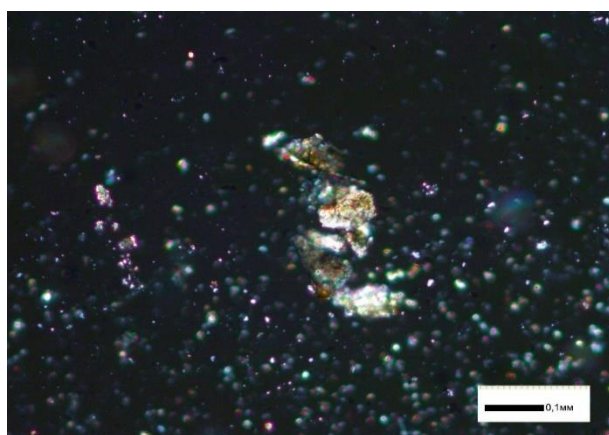


Рисунок 2. Сфен бурый (увеличение 100-ное в иммерсии)

Сопоставление данных показывает, что основная масса потенциально рудоносных компонентов концентрируется в тяжелой и электромагнитной фракциях, что подтверждает эффективность примененной схемы гравитационно-магнитного обогащения для выделения минералов-индикаторов РЗЭ. Люминесцентные исследования немагнитной фракции выявили вариации свечения, указывающие на неоднородность минерального состава и присутствие минералов с различными центрами активации, что дополнительно подтверждает сложный генетический характер исследуемого материала.

Сфен (титанит) является типичным акцессорным минералом магматических и метаморфических пород и рассматривается как важный концентратор РЗЭ, где они изоморфно замещают Са в кристаллической решетке. В ряде исследований показано, что содержание РЗЭ в титаните может достигать нескольких мас. %, при этом распределение элементов зависит от условий кристаллизации и состава материнской системы

Литературные данные [15] подтверждают, что титанит является одним из ключевых минералов-носителей легких РЗЭ (LREE), особенно в магматических породах, где наблюдается их преобладание над тяжелыми РЗЭ (HREE). При метаморфических и метасоматических процессах соотношение LREE/HREE может существенно изменяться вплоть до преобладания HREE, что определяется парагенетической ассоциацией минералов [16]. Фракционирование РЗЭ в титаните контролируется совокупностью физико-химических параметров, включая температуру, давление и минеральный парагенезис [17,18]. При этом распределение РЗЭ в титаните метасоматических систем остается недостаточно изученным, что повышает значимость полученных данных.

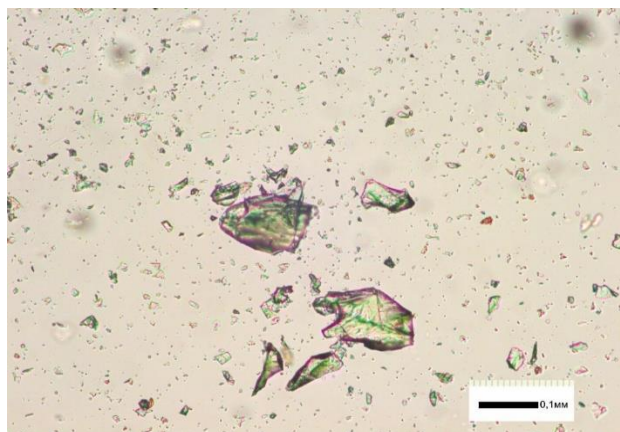


Рисунок 3. Гранат (увеличение 100-кратное в иммерсии)

Гранат также рассматривается как потенциальный концентратор тяжелых РЗЭ (HREE). Согласно [19-21], в ряде типов пород гранаты могут выступать основными носителями РЗЭ и иттрия (Y), при этом суммарное содержание РЗЭ может превышать 10 000 ppm. Существенным преимуществом граната как потенциального носителя РЗЭ является его слабая ассоциация с ураном и торием, в отличие от монацита. Среди оксидных минералов в исследованных фракциях установлены гематит и ильменит. Хромшпинелиды встречаются во всех пробах в единичных зернах, представлены хорошо ограниченными октаэдрическими кристаллами черного цвета. Минералы тантало-ниобиевой группы выявлены в трех пробах и представлены мелкими призматическими зернами. Гидроксиды железа присутствуют во всех исследованных образцах в переменных количествах и отражают процессы вторичного окисления первичных сульфидов.

Особое внимание привлекает присутствие монацита – фосфата РЗЭ. Во всех пробах он фиксируется в виде редких и единичных зерен, реже его содержание достигает < 0,01 г. Морфологически монацит представлен плоско-таблитчатыми непрозрачными зернами желтовато-бурой и красновато-бурой окраски. Диагностика минерала подтверждена иммерсионными методами (проба № 7-2-0, рисунок 4) и данными микрозондового анализа (проба № 23-3-2).

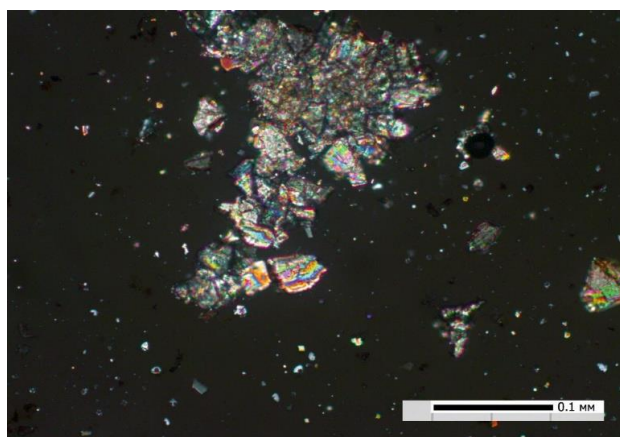


Рисунок 4. Моноцит (увеличение 200-кратное в иммерсии)

Немагнитная фракция характеризуется относительно однородным составом. Основу составляет пирит-марказитовая ассоциация, представленная зернами различной морфологии: игольчатой, копьевидной и агрегатной, часто с включениями глинистого вещества. В отдельных случаях фиксируются признаки окислительного изменения сульфидов, а также глобулярные формы. В подчиненных количествах присутствуют циркон, лейкоксен; реже встречаются рутил, апатит и анатаз (проба № 16-1-4). В пробе № 7-2-0 установлено единичное зерно золота ($0,07 \times 0,075$ мм), представленное тонкопластинчатой формой с ровными краями и золотисто-желтой окраской (рисунок 5).

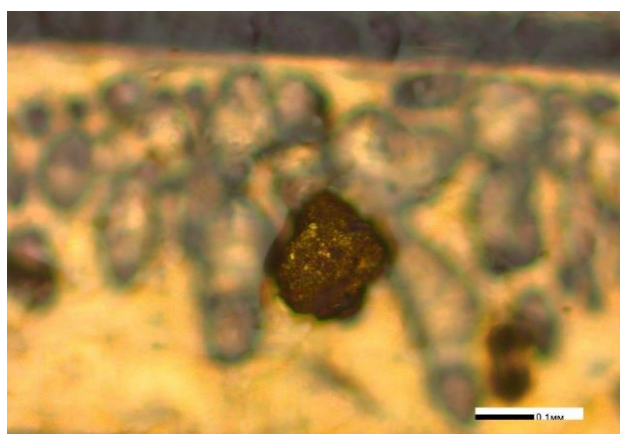


Рисунок 5. Золото (Копейка, увеличение 100-кратное)

Морфология золота указывает на ограниченную транспортировку и слабую степень переотложения. Несмотря на редкость, выявление монацита имеет принципиальное значение, поскольку данный минерал является одним из основных носителей РЗЭ. Его локализация в электромагнитной фракции подтверждает принадлежность к тяжелой силикатной ассоциации и может указывать на участие магматических или метасоматических процессов в формировании рудной системы.

Наличие монацита даже в следовых количествах свидетельствует о редкоземельной специализации разреза и обосновывает необходимость дальнейших геохимических исследований с акцентом на количественное определение РЗЭ. Монацит относится к группе безводных фосфатов РЗЭ и тория с общей формулой $(Ce, La, Nd, Th)PO_4$. Его кристаллохимия характеризуется широким развитием изоморфных замещений в катионной подрешетке, включая гетеровалентные схемы замещения Th^{4+} и РЗЭ (REE^{3+}) с участием P^{5+} и Si^{4+} .

Содержание ThO_2 в монаците варьирует в пределах 3,5...10 %, U_3O_8 ...0,1...0,4 %. Суммарное содержание РЗЭ (Ce, La, Nd) составляет 55...74 %, тогда как доля иттрия (Y) и тяжелых РЗЭ (HREE) обычно не превышает 1...8 %. Содержание P_2O_5 изменяется от 18,4

до 31,5 % [22]. Монацит впервые описан Г. Брейтгауптом в 1829 году как самостоятельный минерал, встречающийся в виде обособленных зерен [23]. В природных условиях он широко распространен как акцессорный минерал гранитов, преимущественно биотитовых, где характеризуется преобладанием легких РЗЭ (LREE) и повышенным содержанием тория. Монацит из основных пород изучен существенно слабее [24].

С технологической точки зрения монацит относится к труднорастворимым фосфатам РЗЭ, что требует предварительного вскрытия его кристаллической структуры. Основными промышленными методами переработки являются кислотное и щелочное вскрытие. Кислотные методы основаны на обработке концентрированной серной кислотой при повышенных температурах с последующим переводом РЗЭ в растворимые формы и последующим их разделением (экстракция, ионный обмен) [25...27]. Щелочное вскрытие осуществляется растворами NaOH при высоких температурах с образованием гидроксидов РЗЭ и растворимых фосфатов натрия.

Кислотные методы характеризуются высокой степенью извлечения, но сопровождаются коррозионной нагрузкой и образованием радиоактивных отходов. Щелочные методы обеспечивают более эффективное разделение тория и РЗЭ, но требуют высоких энергозатрат. Выбор технологической схемы определяется минеральным составом сырья, содержанием тория, гранулометрией и экономическими параметрами переработки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность полученных минералогических и аналитических данных позволяет рассматривать выявленные особенности распределения минеральных ассоциаций не только как характеристику вещественного состава отработанного kernового материала, но и как индикатор скрытой редкоземельной специализации разреза уранового месторождения. Установлено, что даже при низкой концентрации рудных фаз фиксируется устойчивая ассоциация акцессорных минералов (сфен, гранат, эпидот-цоизитовые агрегаты) традиционно рассматриваемых как потенциальные носители РЗЭ. Особое значение имеет идентификация монацита, присутствующего в единичных зернах, что, несмотря на его низкую распространённость, подтверждает наличие фосфатной формы концентрирования РЗЭ в пределах исследуемой системы.

Полученные результаты указывают, что отработанный kernовый материал уранового месторождения не является геохимически инертным субстратом, а сохраняет признаки наследованной редкоземельной минерализации пространственно связанной с урановой и сульфидной ассоциациями.

Таким образом, выявленная минеральная парагенетическая связь (U–Fe–REE–Ti–Nb–Ta системы) позволяет рассматривать исследуемый объект как потенциальный источник комплексной редкометальной минерализации, требующий дальнейшей количественной геохимической оценки и уточнения форм нахождения РЗЭ.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании получены авторами из различных источников, включая собственные исследования.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – ГKB.; Управление данными – РВШ.; Формальный анализ – HCM., КЖБ; Методология-КЖБ, ЗАИ; Программное обеспечение – ЕМК; Отслеживание – ЗАИ; Визуализация – ААМ, АД; Написание исходного проекта – ГKB, CMH, ЕМК; Написание и редактирование – ГKB, CMH, ЕМК.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант AP23490633 «Извлечение попутных ценных компонентов из технологических растворов в гидрометаллургическом производстве»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rezaei, M., Sanchez-Lecuona, G., & Abdolazimi, O. (2025). A cross-disciplinary review of rare earth elements: Deposit types, mineralogy, machine learning, environmental impact, and recycling. *Minerals*, 15(7), Article 720. <https://doi.org/10.3390/min15070720>
2. Goodenough, K. M., Wall, F., & Merriman, D. (2018). The rare earth elements: Demand, global resources, and challenges for resourcing future generations. *Natural Resources Research*, 27(2), 201–216. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9336-5>

3. Крюков В.А., Яценко В.А., Крюков Я.В. Редкоземельная промышленность...реализовать имеющиеся возможности. Горная промышленность. 2020;(5):68–84. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-5-68-84.
4. Zepf, V. (2013). Rare earth elements: What and where they are. In *Rare Earth Elements* (pp. 11–39). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35458-8_2
5. Mancheri, N. (2012). Chinese monopoly in rare earth elements: Supply–demand and industrial applications. *China Report*, 48(4), 449–468. <https://doi.org/10.1177/0009445512466621>
6. Liang, T., Li, K., & Wang, L. (2014). State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China. *Environmental monitoring and assessment*, 186(3), 1499–1513. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3469-8>
7. Patil, A. B., Paetzel, V., Struis, R. P. W. J., & Ludwig, C. (2022). Separation and Recycling Potential of Rare Earth Elements from Energy Systems: Feed and Economic Viability Review. *Separations*, 9(3), 56. <https://doi.org/10.3390/separations9030056>
8. Hayes-Labruzzo, L., Schillebeeckx, S. J., Workman, M., & Shah, N. (2013). Contrasting perspectives on China's rare earths policies: Reframing the debate through a stakeholder lens. *Energy Policy*, 63, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.121>
9. Wübbecke, J. (2013). Rare earth elements in China: Policies and narratives of reinventing an industry. *Resources Policy*, 38(3), 384–394. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.05.005>
10. Han, A., Ge, J., & Lei, Y. (2015). An adjustment in regulation policies and its effects on market supply: Game analysis for China's rare earths. *Resources Policy*, 46(2), 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.07.007>
11. Hu, X., Sun, B., Wang, C., Lim, M. K., Wang, P., Geng, X., Yao, C., & Chen, W.-Q. (2023). Impacts of China's exports decline in rare earth primary materials from a trade network-based perspective. *Resources Policy*, 81, Article 103321. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103321>.
12. Kooroshy, J., Tiess, G., Tukker, A., & Walton, A. (Eds.). (2015). Strengthening the European rare earths supply chain: Challenges and policy options: A report by the European Rare Earths Competency Network (ERECON) (Ref. Ares (2015)2544417). European Commission. https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon_en
13. Б.К.Кенжалиев, Т.Ю. Суркова, Э.А. Пирматов, С.Б. Юлусов, Д.М. Есимова Извлечение редких и редкоземельных элементов из минерального и техногенного сырья. - Алматы, 2025. 358 с.
14. Bea, F. (1996). Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths; implications for the chemistry of crustal melts. *Journal of Petrology*, 37(3), 521–552. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.3.52>
15. Михайленко Д.С., Губанов Н.В., Подугольников Е.Е., Корсаков А.В., Сюй Ю.-Г., Степанов А.С. Ключевые минералы-концентраторы редкоземельных элементов в эклогитах из кимберлитов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. Т. 19. С. 217–221. <https://doi.org/10.31241/FNS.2022.19.040>
16. Стативко В.С., Кузнецов А.Б., Смоленский В.В., Ризванова Н.Г., Сергеева Н.А. Геохимические особенности титанита и U-Pb возраст граната из минеральных копей Южного Урала // Записки Горного института. 2025. Т. 274. № 16495. С. 76-94. EDN TLQGYR
17. Garber, J. M., Hacker, B. R., Kylander-Clark, A. R. C., Stearns, M., & Seward, G. (2017). Controls on trace element uptake in metamorphic titanite: Implications for petrochronology. *Journal of Petrology*, 58(6), 1031–1057. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx046>
18. Alex Zirakparvar, N. (2022). Industrial garnet as an unconventional heavy rare earth element resource: Preliminary insights from a literature survey of worldwide garnet trace element concentrations. *Ore Geology Reviews*, 148, Article 105033. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105033>.
19. Klimpel, F., Bau, M., & Graupner, T. (2021). Potential of garnet sand as an unconventional resource of the critical high-technology metals scandium and rare earth elements. *Scientific Reports*, 11, Article 5306. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84614-x>
20. Hönl, S., Čopjaková, R., Škoda, R., Novák, M., Dolejš, D., Leichmann, J., & Galiová, M. V. (2014). Garnet as a major carrier of the Y and REE in the granitic rocks: An example from the layered anorogenic granite in the Brno Batholith, Czech Republic. *American Mineralogist*, 99(10), 1922–1941. <https://doi.org/10.2138/am-2014-4728>
21. Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов. Т. 2. Минералогия рудных элементов / Под ред. К.А.Власова. М.: Наука, 1964. 830 с.
22. Юшкин Н.П., Иванов О.К., Попов В.А. Введение в топоминералогия Урала. М.: Наука, 1986. 294 с.
23. С. Г. Ковалев, Е. А. Тимофеева, Е. О. Пиндюрина. Монацитовая минерализация западного склона южного урала Геологический сборник № 8. Информационные материалы, Институт геологии Уфимского научного центра РАН 21_02_09 с.138-144
24. Alves, R. C., Nascimento, M., Paulino, J. F., & Afonso, J. C. (2021). Selection of a hydrometallurgical process for rare earths extraction from a Brazilian monazite. *Hydrometallurgy*, 200, Article 105556. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105556>
25. Sadri, F., Nazari, A. M., & Ghahreman, A. (2017). A review on the cracking, baking and leaching processes of rare earth element concentrates. *Journal of Rare Earths*, 35(8), 739–752. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(17\)60971-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(17)60971-2).
26. Watts, H., & Fisher, T. (2021). Leaching the Unleachable Mineral: Rare Earth Dissolution from Monazite Ore in Condensed Phosphoric Acid. *Minerals*, 11(9), 931. <https://doi.org/10.3390/min11090931>.
27. Yang, X., Rozelle, P. L., & Pisupati, S. V. (2021). The effect of caustic soda treatment to recover rare earth elements from secondary feedstocks with low concentrations. *Minerals Engineering*, 173, Article <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107184>.

REFERENCES

1. Rezaei, M., Sanchez-Lecuona, G., & Abdolazimi, O. (2025). A cross-disciplinary review of rare earth elements: Deposit types, mineralogy, machine learning, environmental impact, and recycling. *Minerals*, 15(7), Article 720. <https://doi.org/10.3390/min15070720>
2. Goodenough, K. M., Wall, F., & Merriman, D. (2018). The rare earth elements: Demand, global resources, and challenges for resourcing future generations. *Natural Resources Research*, 27(2), 201–216. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9336-5>
3. Kryukov, V. A., Yatsenko, V. A., & Kryukov, Ya. V. (2020). Redkozemel'naya promyshlennost...realizovat imeyushchiesya vozmozhnosti [Rare earth industry: Realizing existing opportunities]. *Gornaya promyshlennost*, (5), 68–84. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-5-68-84> [in Russian].
4. Zepf, V. (2013). Rare earth elements: What and where they are. In *Rare Earth Elements* (pp. 11–39). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35458-8_2
5. Mancheri, N. (2012). Chinese monopoly in rare earth elements: Supply–demand and industrial applications. *China Report*, 48(4), 449–468. <https://doi.org/10.1177/0009445512466621>
6. Liang, T., Li, K., & Wang, L. (2014). State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(3), 1499–1513. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3469-8>
7. Patil, A. B., Paetzel, V., Struis, R. P. W. J., & Ludwig, C. (2022). Separation and recycling potential of rare earth elements from energy systems: Feed and economic viability review. *Separations*, 9(3), Article 56. <https://doi.org/10.3390/separations9030056>

8. Hayes-Labruto, L., Schillebeeckx, S. J., Workman, M., & Shah, N. (2013). Contrasting perspectives on China's rare earths policies: Reframing the debate through a stakeholder lens. *Energy Policy*, 63, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.121>
9. Wübbike, J. (2013). Rare earth elements in China: Policies and narratives of reinventing an industry. *Resources Policy*, 38(3), 384–394. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.05.005>
10. Han, A., Ge, J., & Lei, Y. (2015). An adjustment in regulation policies and its effects on market supply: Game analysis for China's rare earths. *Resources Policy*, 46, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.07.007>
11. Hu, X., Sun, B., Wang, C., Lim, M. K., Wang, P., Geng, X., Yao, C., & Chen, W.-Q. (2023). Impacts of China's exports decline in rare earth primary materials from a trade network-based perspective. *Resources Policy*, 81, Article 103321. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103321>
12. Kooroshy, J., Tiess, G., Tukker, A., & Walton, A. (Eds.). (2015). Strengthening the European rare earths supply chain: Challenges and policy options: A report by the European Rare Earths Competency Network (ERECON) (Ref. Ares (2015)2544417). European Commission. https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon_en
13. Kenzhaliev, B. K., Surkova, T. Yu., Pirmatov, E. A., Yulusov, S. B., & Esimova, D. M. (2025). Izvlechenie redkikh i redkozemelnykh elementov iz mineralnogo i tekhnogenogo syrya [Extraction of rare and rare earth elements from mineral and technogenic raw materials]. *Almaty*. 358 p. [in Russian].
14. Bea, F. (1996). Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths: Implications for the chemistry of crustal melts. *Journal of Petrology*, 37(3), 521–552. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.3.521>
15. Mikhailenko, D. S., Gubanov, N. V., Podugolnikova, E. E., Korsakov, A. V., Xu, Y.-G., & Stepanov, A. S. (2022). Klyuchevye mineraly-kontsentratory redkozemelnykh elementov v eklogitakh iz kimberlitov [Key mineral concentrators of rare earth elements in eclogites from kimberlites]. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN*, 19, 217–221. <https://doi.org/10.31241/FNS.2022.19.040> [in Russian].
16. Stativko, V. S., Kuznetsov, A. B., Smolenskii, V. V., Rizvanova, N. G., & Sergeeva, N. A. (2025). Geokhimicheskie osobennosti titanita i U-Pb vozrast granata iz mineralnykh kopei Yuzhnogo Urala [Geochemical features of titanite and U-Pb age of garnet from mineral mines of the Southern Urals]. *Zapiski Gornogo instituta*, 274(16495), 76–94. EDN TLQGY [in Russian].
17. Garber, J. M., Hacker, B. R., Kylander-Clark, A. R. C., Stearns, M., & Seward, G. (2017). Controls on trace element uptake in metamorphic titanite: Implications for petrochronology. *Journal of Petrology*, 58(6), 1031–1057. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx046>
18. Zirakparvar, N. A. (2022). Industrial garnet as an unconventional heavy rare earth element resource: Preliminary insights from a literature survey of worldwide garnet trace element concentrations. *Ore Geology Reviews*, 148, Article 105033. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105033>
19. Klimpel, F., Bau, M., & Graupner, T. (2021). Potential of garnet sand as an unconventional resource of the critical high-technology metals scandium and rare earth elements. *Scientific Reports*, 11, Article 5306. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84614-x>
20. Hönl, S., Čopjaková, R., Škoda, R., Novák, M., Dolejš, D., Leichmann, J., & Galiová, M. V. (2014). Garnet as a major carrier of the Y and REE in the granitic rocks: An example from the layered anorogenic granite in the Brno Batholith, Czech Republic. *American Mineralogist*, 99(10), 1922–1941. <https://doi.org/10.2138/am-2014-4728>
21. Vlasov, K. A. (Ed.). (1964). *Geokhimiya, mineralogiya i geneticheskie tipy mestorozhdenii redkikh elementov*. T. 2. Mineralogiya rudnykh elementov [Geochemistry, mineralogy and genetic types of deposits of rare elements. Vol. 2. Mineralogy of ore elements]. Moscow: Nauka. 830 p. [in Russian].
22. Yushkin, N. P., Ivanov, O. K., & Popov, V. A. (1986). *Vvedenie v topomineralogiyu Urala* [Introduction to the topomineralogy of the Urals]. Moscow: Nauka. 294 p. [in Russian].
23. Kovalev, S. G., Timofeeva, E. A., & Pindyurina, E. O. (2009). Monazitovaya mineralizatsiya zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala [Monazite mineralization of the western slope of the Southern Urals]. *Geologicheskii sbornik № 8. Informatsionnye materialy, Institut geologii Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 138–144 [in Russian].
24. Alves, R. C., Nascimento, M., Paulino, J. F., & Afonso, J. C. (2021). Selection of a hydrometallurgical process for rare earths extraction from a Brazilian monazite. *Hydrometallurgy*, 200, Article 105556. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105556>
25. Sadri, F., Nazari, A. M., & Ghahreman, A. (2017). A review on the cracking, baking and leaching processes of rare earth element concentrates. *Journal of Rare Earths*, 35(8), 739–752. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(17\)60971-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(17)60971-2)
26. Watts, H., & Fisher, T. (2021). Leaching the unleachable mineral: Rare earth dissolution from monazite ore in condensed phosphoric acid. *Minerals*, 11(9), Article 931. <https://doi.org/10.3390/min11090931>
27. Yang, X., Rozelle, P. L., & Pisupati, S. V. (2021). The effect of caustic soda treatment to recover rare earth elements from secondary feedstocks with low concentrations. *Minerals Engineering*, 173, Article 107184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107184>

УРАН КЕН ОРЫНДАРЫНЫҢ ТЕХНОГЕНДІК ҚАЛДЫҚТАРЫНЫҢ СІРЕК ЖЕР ЭЛЕМЕНТТЕРІ ӘЛЕУЕТІН МИНЕРАЛОГИЯЛЫҚ-ГЕОХИМИЯЛЫҚ ТАЛДАУ

Гаухар К. Бишимбаева¹ техника ғылымдарының докторы, Сауле М. Нурмакова¹ техника ғылымдарының кандидаты, Рустем В. Шарипов¹, Карлыгаш Ж. Буленова², Закен А. Искаков², Айдана А. Мырзабекова¹, Амантай Далбанбай¹, Ербол М. Карманов¹, Магзум Ж. Садыков¹

¹ КеАҚ «Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» (Satbayev University), Алматы, Қазақстан; g.bishimbayeva@satbayev.university (ГКБ), s.nurmakova@satbayev.university (СМН), s.rustemv@gmail.com (РБИ), kbulenova73@mail.ru (КЖБ), zaken.is@mail.ru (ЗАИ), a.dalbanbay@satbayev.university (АД) Myrzabekova.inp@gmail.com (ААМ), Yerposhock@gmail.com (ЕМК), Magzumych@mail.ru (МЖС)

² «Жоғары технологиялар институты» ЖШС, Алматы, Қазақстан, kbulenova73@mail.ru (КЖБ), zaken.is@mail.ru (ЗАИ)

*Автор корреспонденции: Сауле М. Нурмакова, s.nurmakova@satbayev.university, mnurma@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

сирек жер элементтері, уран кен орындары, кен үлгілері, техногендік түзілімдер, минералогиялық талдау, шлихтық байыту, монацит, сирек металды минералдану, ауыр фракция

Мақала жайында:

Алынды: 06.05.2026

Қайта қаралды: 15.06.2026

Қабылданды: 23.06.2026

Жарияланды: 01.10.2026

АБСТРАКТ

Бұл жұмыста Қазақстандағы уран кен орнының пайдаланылған кен үлгілеріндегі сирек жер элементтеріне минералогиялық-геохимиялық зерттеу жүргізілді. Зерттеу нысаны ретінде ұңғымалардың кенді, кенасты және кенсіз интервалдарынан алынған 31 кен үлгісі қарастырылды. Зерттеу барысында шлихтық байыту, ауыр сұйықтықта бөлу, магниттік сепарация, сондай-ақ минералогиялық, иммерсиялық, тамшылы-микрохимиялық, люминесценттік және микрозондтық талдау әдістері қолданылды. Зерттелген кен негізінен сазды жыныстардан, кварцты құм қабаттарынан және сульфидті минералданудан (пирит, марказит), сондай-ақ уран минералдарынан тұратыны анықталды. Ауыр фракция құрамында сирек жер элементтерін шоғырландыра алатын минералдар — монацит, сфен (титанит) және гранат анықталды. Монацит барлық үлгілерде сирек және жеке түйірлер түрінде кездеседі, оның мөлшері, әдетте, 0,01 г-дан аспайды. Сонымен қатар тантал-ниобий тобының минералдары, шеелит және қосалқы минералдар (циркон, рутил, апатит, анатаз) анықталды. Алынған нәтижелер пайдаланылған кен материалында сирек жер элементтерінің минералдануы бар екенін көрсетеді және оны әрі қарай геохимиялық зерттеулер жүргізу үшін перспективалы объект ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL ANALYSIS OF THE RARE EARTH POTENTIAL OF TECHNOGENIC WASTES FROM URANIUM DEPOSITS

Gaukhar K. Bishimbayeva¹, Saule M. Nurmakova¹, Rustem V. Sharipov¹, Karlygash Zh. Bulenova², Zaken A. Iskakov², Aidana Myrzabekova¹, Amantay Dalbanbay¹, Yerbol M. Karmanov¹, Magzum Zh. Sadykov¹

¹ NPJSC “Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev” (Satbayev University), Almaty, Kazakhstan; g.bishimbayeva@satbayev.university (GKB), s.nurmakova@satbayev.university (SMN), s.rustemv@gmail.com (RVSh), Myrzabekova.inp@gmail.com (AAM), a.dalbanbay@satbayev.university (AD), Yerposhock@gmail.com (YMK), Magzumych@mail.ru (MZHS)

² “Institute of High Technologies” LLP, Almaty, Kazakhstan, kbulenova73@mail.ru (KZhB), zaken.is@mail.ru (ZAI),

*Author correspondent: Saule M. Nurmakova, s.nurmakova@satbayev.university, mnurma@mail.ru

KEY WORDS

rare earth elements, uranium deposits, core samples, technogenic formations, mineralogical analysis, gravity concentration (panning), monazite, rare-metal mineralization, heavy fraction

About article:

Received: 06.05.2026

Revised: 15.06.2026

Accepted: 23.06.2026

Published: 01.10.2026

ABSTRACT

This study presents a mineralogical and geochemical investigation of rare earth elements (REE) in leached core samples from a uranium deposit in Kazakhstan. A total of 31 samples were collected from ore-bearing, sub-ore, and barren intervals of boreholes. The analytical workflow included gravity concentration (panning), heavy liquid separation, magnetic separation, and a combination of mineralogical, immersion, microchemical, luminescence, and electron microprobe analyses. The core material is predominantly composed of clay-rich sediments with quartz interlayers and sulfide mineralization (pyrite, marcasite), along with uranium-bearing phases. The heavy fraction contains minerals capable of hosting REE, including monazite, titanite (sphene), and garnet. Monazite, identified in all samples as sparse and isolated grains, represents the principal REE-bearing phase, although its abundance is generally low (<0.01 g). Additional associated minerals include Nb–Ta phases, scheelite, and accessory minerals such as zircon, rutile, apatite, and anatase. The results indicate the presence of REE mineralization within the leached core material and suggest its potential relevance for further geochemical assessment.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).