Код МРНТИ 38.33.15

Ж. С. Кенжетаев[1], *К. С. Тогизов[2], Қ. А. Жапабаев[1]
[1]ТОО «АСкоре» (г. Алматы, Республика Казахстан),
[2]Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Республика Казахстан)

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ТИПИЗАЦИИ УРАНОВЫХ РУД КАЗАХСТАНА

Аннотация. В статье рассмотрено распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) в урановых рудах песчаникового типа Казахстана и их значение для геохимической типизации уранового сырья. Исследование основано на определении содержаний РЗЭ методом ИСП-МС после микроволнового разложения керновых материалов. Для сопоставления использованы сертифицированные сравнительные материалы OREAS 120, OREAS 100a и OREAS 105. Показано, что песчаниковые урановые руды Казахстана характеризуются накоплением легких РЗЭ, слабой отрицательной европиевой аномалией и сглаженным распределением средних и тяжелых лантаноидов. Отношения ***La/Yb***, ***Gd/Yb***, ***Eu/Eu**** и ***Ce/Ce**** могут применяться как дополнительные геохимические критерии для типизации урановых руд, реконструкции условий рудообразования и оценки источников вещества.
Ключевые слова: *редкоземельные элементы, урановые руды, геохимическая типизация, песчаниковые месторождения, ИСП-МС, хондрит-нормированные спектры, европиевая аномалия.*

Сирекжер элементтері Қазақстанның уран кендерін типтеудің геохимиялық индикаторлары ретінде

Аңдатпа. Мақалада Қазақстанның құмтасты типтегі уран кендеріндегі сирекжер элементтерінің таралуы және олардың уран шикізатын геохимиялық типтеудегі маңызы қарастырылды. Зерттеу керндік материалдарды микротолқынды ыдыратудан кейін сирекжер элементтерін ИБП-МС әдісімен анықтауға негізделген. Салыстыру үшін OREAS 120, OREAS 100a және OREAS 105 сертификатталған салыстырмалы материалдары қолданылды. Қазақстанның құмтасты уран кендері жеңіл сирекжер элементтерінің жинақталуымен, әлсіз теріс европий аномалиясымен және орташа әрі ауыр лантаноидтардың тегістелген таралуымен сипатталатыны көрсетілді. ***La/Yb***, ***Gd/Yb***, ***Eu/Eu**** және ***Ce/Ce**** қатынастары уран кендерін типтеу, кен түзілу жағдайларын қайта құру және зат көздерін бағалау үшін қосымша геохимиялық критерийлер ретінде қолданылуы мүмкін.
Түйінді сөздер: *сирекжер элементтері, уран кендері, геохимиялық типтеу, құмтасты кен орындары, ИБП-МС, хондрит бойынша нормаланған спектрлер, европий аномалиясы.*

Rare earth elements as geochemical indicators for the typification of uranium ores in Kazakhstan

Abstract. The article examines the distribution of rare earth elements (REE) in sandstone-type uranium ores of Kazakhstan and their role in the geochemical typification of uranium raw materials. The study is based on ICP-MS determination of REE contents after microwave digestion of core samples. Certified reference materials OREAS 120, OREAS 100a and OREAS 105 were used for comparison. It is shown that sandstone-type uranium ores of Kazakhstan are characterized by enrichment in light REEs, a weak negative europium anomaly, and a smoothed distribution of middle and heavy lanthanides. The ratios ***La/Yb***, ***Gd/Yb***, ***Eu/Eu**** and ***Ce/Ce**** may be used as additional geochemical criteria for uranium ore typification, reconstruction of ore-forming conditions and assessment of material sources.
Key words: *rare earth elements, uranium ores, geochemical typification, sandstone deposits, ICP-MS, chondrite-normalized patterns, europium anomaly.*

Введение

Редкоземельные элементы (РЗЭ) широко используются в геохимических исследованиях как индикаторы состава исходных пород, условий минералообразования и последующих преобразований рудного вещества. Их распределение в урановых рудах отражает особенности миграции минерализующих растворов, окислительно-восстановительный режим среды и участие различных минеральных фаз. Благодаря устойчивости относительных соотношений РЗЭ к вторичным изменениям они могут рассматриваться как геохимическая «сигнатура» уранового сырья [1].

Для Казахстана изучение РЗЭ в урановых рудах имеет особое значение, поскольку значительная часть промышленных запасов связана с песчаниковыми пластово-инфильтрационными месторождениями. Формирование таких месторождений происходит при переносе урана кислородсодержащими подземными водами и его осаждении на восстановительных геохимических барьерах [2, 3]. Минералогический состав урановых руд, включая настуран, коффинит и сопутствующие акцессорные минералы, влияет на накопление и перераспределение РЗЭ [4].

Распределение РЗЭ позволяет различать песчаниковые, гранитные и гидротермально измененные типы урановой минерализации. Для осадочных систем характерны более сглаженные спектры РЗЭ, связанные с составом областей сноса и сорбционными процессами [5], тогда как гранитные и гидротермальные руды часто демонстрируют более выраженное фракционирование и ***Eu***-аномалию. В связи с этим РЗЭ-сигнатуры могут использоваться как дополнительные критерии геохимической типизации урановых руд.

Целью работы является оценка информативности распределения редкоземельных элементов как геохимических индикаторов типизации урановых руд Казахстана на основе хондрит-нормированных спектров РЗЭ, отношений ***La/Yb и Gd/Yb***, а также аномалий ***Eu*** и ***Ce***.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись керновые материалы урановых месторождений песчаникового типа Казахстана. Для сравнительной оценки использованы сертифицированные материалы урановых руд OREAS 120, OREAS 100a и OREAS 105, представляющие различные геолого-генетические типы урановой минерализации.

Определение редкоземельных элементов проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой после микроволнового разложения образцов в системе MARS-6. Пробоподготовка включала кислотное разложение навески руды смесью HNO_3, ***HCl*** и ***HF*** с последующим связыванием остаточной фтороводородной кислоты борной кислотой. Данный подход обеспечивает перевод силикатной матрицы и труднорастворимых минеральных фаз в раствор, пригодный для ИСП-МС анализа [6, 7].

Для геохимической интерпретации использовали хондрит-нормированные содержания РЗЭ [8]. В качестве диагностических параметров рассматривались отношения $(La/Yb)_N$ и $(Gd/Yb)_N$, характеризующие степень фракцио-

нирования легких и тяжелых лантаноидов, а также европиевая и цериевая аномалии.

Аномалии ***Eu*** и ***Ce*** рассчитывали по формулам:

$$Eu/Eu^* = \frac{Eu_N}{\sqrt{Sm_N \times Gd_N}}$$

$$Ce/Ce^* = \frac{2Ce_N}{La_N + Pr_N},$$

где индекс ***N*** – содержание элемента, нормированное на хондрит.

Результаты и обсуждение

Аналитическая оценка определения РЗЭ в урановых рудах

Использование сертифицированного материала OREAS 120 позволило оценить корректность пробоподготовки и определения РЗЭ методом ИСП-МС. Полученные значения по большинству элементов согласуются с аттестованными данными в пределах допустимых интервалов, что подтверждает полноту разложения урановой руды песчаникового типа и применимость выбранной схемы анализа для керновых материалов.

Стадийное кислотное разложение обеспечивает перевод силикатной матрицы и труднорастворимых минеральных фаз в раствор. Применение борной кислоты на завершающей стадии снижает риск образования труднорастворимых фторидов, что особенно важно при определении РЗЭ, поскольку их потери могут искажать форму хондрит-нормированных спектров.

Геохимические особенности песчаниковых урановых руд Казахстана

Хондрит-нормированные спектры РЗЭ керновых материалов урановых месторождений Казахстана характеризуются преобладанием легких лантаноидов над тяжелыми. Для большинства изученных проб отношение $(La/Yb)_N$ находится в интервале примерно от 3 до 6, что указывает на умеренное фракционирование легких и тяжелых РЗЭ. Отношение $(Gd/Yb)_N$ изменяется в пределах около 1,0–1,9, что свидетельствует об отсутствии резкой дифференциации средних и тяжелых РЗЭ.

Характер распределения редкоземельных элементов в керновых материалах урановых месторождений Казахстана представлен на рис. 1.

Такая форма спектров типична для осадочных и переотложенных систем, где состав РЗЭ определяется не только первичным источником вещества, но и процессами переноса, сорбции и осаждения. В условиях песчаниковых урановых месторождений Казахстана РЗЭ могут быть связаны с глинистыми минералами, фосфатами, акцессорными минералами, органическим веществом и тонкодисперсными урановыми фазами. При этом низкотемпературные подземные воды не создают условий для столь выраженного фракционирования РЗЭ, как в магматических и высокотемпературных гидротермальных системах.

Важным признаком исследованных песчаниковых руд является слабая отрицательная европиевая аномалия. Значения ***Eu/Eu**** в среднем близки к 0,7 условных единиц, что указывает на умеренное обеднение европием. Такая

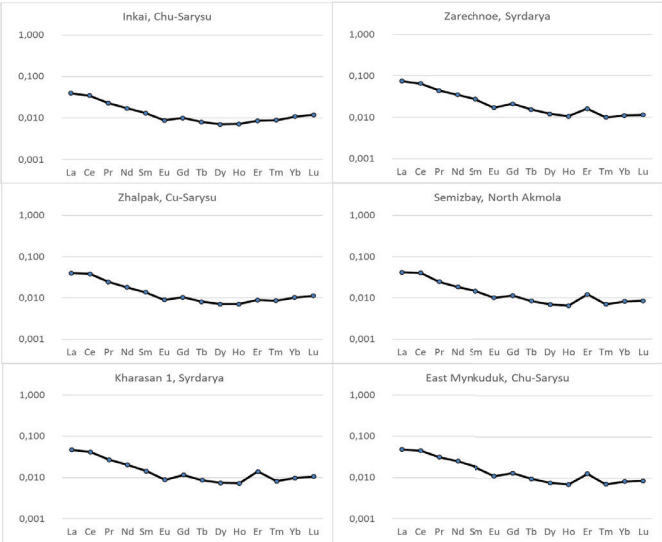

Рис. 1. Хондрит-нормированные спектры распределения РЗЭ в керновых материалах урановых месторождений Казахстана.
Сурет 1. Қазақстанның уран кен орындарының керндік материалдарындағы сирекжер элементтері таралуының хондрит бойынша нормаланған спектрлері.
Figure 1. Chondrite-normalized rare earth element distribution patterns in core materials from uranium deposits of Kazakhstan.

аномалия может отражать участие кислых пород в области сноса, а также наследование особенностей исходного обломочного материала. В отличие от гранитных систем, где отрицательная ***Eu***-аномалия часто связана с активной кристаллизацией плагиоклаза, в песчаниковых рудах она выражена слабее и имеет более сглаженный характер.

Отсутствие выраженной дифференциации средних и тяжелых РЗЭ также согласуется с моделью пластово-инфильтрационного рудообразования. Урановая минерализация в таких системах формируется при переносе урана окислительными водами и его осаждении на восстановительном геохимическом барьере. РЗЭ при этом могут мигрировать в виде комплексов, сорбироваться на поверхности минералов или фиксироваться в составе вторичных фаз, однако их распределение в целом сохраняет признаки осадочного источника.

Сравнение с урановыми рудами гранитного и гидротермального типов

Сравнение с материалами OREAS 100a и OREAS 105 показывает, что урановые руды различного генетического типа имеют заметно отличающиеся РЗЭ-сигнатуры. Для сопоставления песчаникового и гранитного типов урановой минерализации использованы хондрит-нормированные спектры сертифицированных материалов OREAS 120, OREAS 100a и OREAS 105, представленные на рис. 2.

Стандарт OREAS 120, относящийся к песчаниковому типу, демонстрирует выраженное накопление легких РЗЭ и постепенное снижение содержаний от ***La*** к ***Lu***. При этом отношение $(La/Yb)_N$ для него выше, чем для большинства казахстанских песчаниковых проб, что может отражать

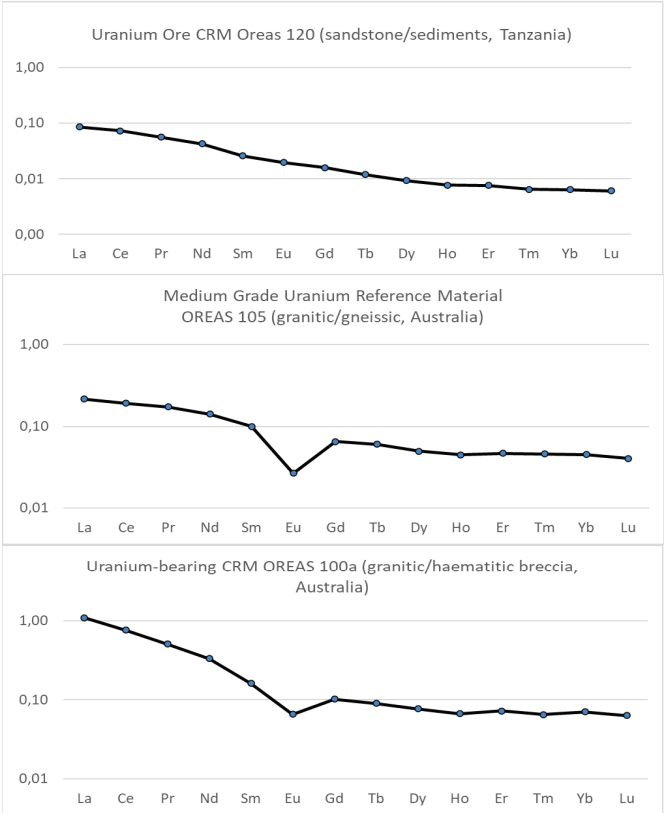

Рис. 2. Хондрит-нормированные спектры распределения РЗЭ в сертифицированных материалах урановых руд OREAS 120, OREAS 100a и OREAS 105.
Сурет 2. OREAS 120, OREAS 100a және OREAS 105 уран кендерінің сертификатталған материалдарындағы сирекжер элементтері таралуының хондрит бойынша нормаланған спектрлері.
Figure 2. Chondrite-normalized rare earth element distribution patterns in certified uranium ore materials OREAS 120, OREAS 100a and OREAS 105.

особенности состава исходного материала и условий формирования конкретного месторождения.

Материалы OREAS 100a и OREAS 105, связанные с гранитными и гидротермально измененными породами Австралии, характеризуются более отчетливой отрицательной ***Eu***-аномалией. Это объясняется поведением европия в магматических системах. В восстановительных условиях ***Eu*** может существовать в двухвалентной форме и изоморфно замещать ***Ca*** в кристаллической решетке плагиоклаза. В результате ранняя кристаллизация плагиоклаза приводит к обеднению остаточного расплава европием, что затем фиксируется в РЗЭ-спектрах гранитных и связанных с ними урановых руд.

Для гранитных урановых руд также характерно участие акцессорных минералов, таких как монацит, ксенотим, апатит, алланит, циркон и браннерит. Эти минералы способны концентрировать различные группы редкоземельных элементов, что приводит к более сложным профилям распределения РЗЭ. В урановых минералах и связанных с ними фазах могут преимущественно накапливаться элементы, имеющие ионные радиусы, близкие к U^{4+}, что дополнительно влияет на распределение средних и тяжелых лантаноидов [9].

Таким образом, различия между песчаниковыми и гранитными урановыми рудами проявляются не только в абсолютных содержаниях РЗЭ, но и в форме хондрит-нормированных спектров, степени фракционирования легких и тяжелых лантаноидов, выраженности ***Eu***-аномалии и характере корреляций между ураном и отдельными группами РЗЭ.

Диагностическое значение отношений La/Yb, Gd/Yb, Eu/Eu* и Ce/Ce*

Для типизации урановых руд наиболее информативными являются не только абсолютные концентрации РЗЭ, но и их относительные соотношения. Отношение $(La/Yb)_N$ отражает степень обогащения легкими редкоземельными элементами относительно тяжелых. Повышенные значения этого показателя указывают на преобладание легких РЗЭ (LREE) и могут быть связаны с участием кислого обломочного материала, а также с особенностями сорбции и осаждения РЗЭ в осадочной среде.

Отношение $(Gd/Yb)_N$ характеризует распределение средних и тяжелых РЗЭ. Небольшие значения этого показателя в казахстанских песчаниковых рудах свидетельствуют о слабой дифференциации средних и тяжелых РЗЭ (MREE и HREE). Это отличает их от некоторых гидротермальных и метаморфогенных систем, где средние редкоземельные элементы могут концентрироваться в результате структурного контроля минералов или изменения физико-химических параметров флюида.

Европиевая аномалия ***Eu/Eu**** является одним из наиболее важных индикаторов магматической предыстории вещества. Выраженная отрицательная ***Eu***-аномалия часто указывает на фракционирование плагиоклаза, тогда как слабая или сглаженная ***Eu***-аномалия характерна для осадочных систем и руд, сформированных при низкотемпературном гидрогенном переносе.

Цериевая аномалия ***Ce/Ce**** может использоваться для оценки окислительно-восстановительных условий, поскольку церий способен переходить из трехвалентного в четырехвалентное состояние. При окислительных условиях Ce^{4+} может фиксироваться в минеральных фазах иначе, чем соседние лантаноиды ***La*** и ***Pr***. Поэтому поведение церия имеет значение при интерпретации условий формирования урановой минерализации и процессов вторичного преобразования руд.

Для обобщения диагностических признаков РЗЭ, применяемых при типизации урановых руд, основные геохимические показатели представлены в таблице 1.

РЗЭ-сигнатуры как инструмент геохимической типизации

Распределение редкоземельных элементов может рассматриваться как один из критериев геохимической типизации урановых руд. В отличие от главных элементов, концентрации которых могут существенно изменяться при выветривании, переработке или технологическом воздействии, относительные соотношения РЗЭ часто сохраняют информацию о геологическом источнике вещества и условиях формирования минерализации [10].

Для песчаниковых урановых руд Казахстана характерны следующие признаки: умеренное обогащение легкими

Таблица 1

Диагностическое значение геохимических показателей РЗЭ при типизации урановых руд

Кесте 1

Уран кендерін типтеу кезіндегі сирекжер элементтері геохимиялық көрсеткіштерінің диагностикалық маңызы

Table 1

Diagnostic significance of REE geochemical indicators in the typification of uranium ores

Геохимический показатель	Диагностическое значение	Возможная интерпретация для урановых руд
$(La/Yb)_N$	Соотношение легких и тяжелых РЗЭ	Степень фракционирования легких РЗЭ (LREE) и тяжелых РЗЭ (HREE), состав источника вещества
$(Gd/Yb)_N$	Соотношение средних и тяжелых РЗЭ	Наличие или отсутствие дифференциации средних РЗЭ (MREE) и тяжелых РЗЭ (HREE)
Eu/Eu*	Европиевая аномалия	Магматическая предыстория, кристаллизация плагиоклаза, участие кислых пород
Ce/Ce*	Цериевая аномалия	Окислительно-восстановительные условия и поведение Ce в системе

Примечание:

LREE – легкие редкоземельные элементы (Light Rare Earth Elements), MREE – средние редкоземельные элементы (Middle Rare Earth Elements), HREE – тяжелые редкоземельные элементы (Heavy Rare Earth Elements)

РЗЭ, слабая отрицательная ***Eu***-аномалия, сглаженное распределение средних и тяжелых лантаноидов и отсутствие резких локальных максимумов на хондрит-нормированных спектрах. Эти признаки указывают на осадочный характер рудовмещающих пород, участие обломочного материала преимущественно кислого состава и низкотемпературные условия миграции урана и сопутствующих элементов.

Для гранитных и гидротермально измененных урановых руд характерны более выраженные геохимические контрасты: сильная отрицательная ***Eu***-аномалия, более сложное распределение средних и тяжелых РЗЭ, а также влияние акцессорных минералов гранитоидов. Такие различия позволяют использовать РЗЭ-сигнатуры для сопоставления руд разных типов и определения вероятной геолого-генетической принадлежности неизвестных образцов.

Дополнительное значение данный подход имеет для ядерной криминалистики. В комплексе с изотопным составом урана, содержанием следовых элементов, фазовым составом и морфологией частиц РЗЭ-профили могут использоваться для формирования ядерно-криминалистического «отпечатка» материала [11]. Создание региональных баз данных по распределению РЗЭ в урановых рудах Казахстана может повысить точность идентификации происхождения уранового сырья и способствовать развитию систем ядерной безопасности [12].

Заключение

Распределение редкоземельных элементов является информативным геохимическим критерием для типизации урановых руд Казахстана. Хондрит-нормированные спектры РЗЭ позволяют выявлять различия между песчаниковыми, гранитными и гидротермально измененными типами урановой минерализации, а также оценивать вклад исходных пород, условий переноса и процессов осаждения.

Урановые руды песчаникового типа Казахстана характеризуются умеренным накоплением легких РЗЭ, слабой отрицательной европиевой аномалией и относительно сглаженным распределением средних и тяжелых лантаноидов. Эти признаки отражают осадочное происхождение рудовмещающих пород, участие кислого обломочного материала и формирование урановой минерализации в условиях низкотемпературного гидрогенного переноса.

Сравнение с сертифицированными материалами OREAS 100a и OREAS 105 показывает, что гранитные и гидротермально измененные урановые руды отличаются более выраженным фракционированием РЗЭ и заметной отрицательной ***Eu***-аномалией, связанной с магматической дифференциацией и кристаллизацией плагиоклаза.

Отношения $(La/Yb)_N$, $(Gd/Yb)_N$, ***Eu/Eu**** и ***Ce/Ce**** могут использоваться как дополнительные диагностические показатели при геохимической типизации урановых руд, реконструкции условий рудообразования и идентификации источников вещества. Полученные закономерности имеют значение не только для геологии урановых месторождений, но и для формирования референсных баз данных, применимых в аналитическом контроле и ядерной криминалистике.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение базы данных РЗЭ-профилей урановых руд Казахстана, включение большего числа месторождений и сопоставление РЗЭ-сигнатур с изотопными, минералогическими и технологическими характеристиками уранового сырья.

Благодарность

Данная статья финансировалась Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме AP22785533 «Разработка эффективной технологии извлечения скандия из технологических растворов скважинной добычи».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Происхождение урановых месторождений, выявленное по их сигнатуре редкоземельных элементов / J. Mercadier [и др.] // Terra Nova. – 2011. – Т. 23. – № 4. – С. 264–269 (на английском языке)*
2. *Строение и история ураноносных палеоцен-эоценовых отложений, сформированных на восточной окраине Пери-Тетиса (Чу-Сарысуйский бассейн, Южный Казахстан) / A. Dillinger [и др.] // Sedimentary Geology. – 2024. – Т. 468. – Ст. 106677 (на английском языке)*
3. *Афанасьев Г. В., Миронов Ю. Б., Пинский Э. М. Новые аспекты формирования урановых месторождений песчаникового типа // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 59. – С. 89–96 (на русском языке)*
4. *Язиков Е. Г. Минералогия урана: учебное пособие. – Томск: Томский политехнический университет, 2010. – 143 с. (на русском языке)*
5. *Медведева С. А. Характер распределения редкоземельных элементов в мезозойских осадочных породах Нижнего Приамурья // Региональные проблемы. – 2021. – Т. 24. – № 4. – С. 25–34 (на русском языке)*
6. *Пат. на полезную модель № 4046 Респ. Казахстан. Способ подготовки проб урановых руд и керновых материалов песчаникового типа для спектрометрического анализа / Б. Ж. Токсанбаев, А. К. Торебеков; заявитель и патентообладатель ТОО «Институт высоких технологий». – № 2019/0191.2; заявл. 28.02.2019; опубл. 07.06.2019, Бюл. № 23 (на русском языке)*
7. *Метод микроволнового разложения для анализа редкоземельных элементов, тория и урана в геохимических сертифицированных стандартных образцах и почвах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой / S. Kasar [и др.] // Molecules. – 2020. – Т. 25. – № 21. – Ст. 5178 (на английском языке)*
8. *Bau M., Möller P. Фракционирование редкоземельных элементов в метаморфогенных гидротермальных кальците, магнезите и сидерите // Mineralogy and Petrology. – 1992. – Т. 45. – С. 231–246 (на английском языке)*
9. *Finch R., Murakami T. Систематика и парагенезис минералов урана // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 1999. – Т. 38. – С. 91–180 (на английском языке)*
10. *Новый инструмент ядерной криминалистики, основанный на нормализованных по типу месторождения сигнатурах редкоземельных элементов / T. L. Spano [и др.] // Terra Nova. – 2017. – Т. 29. – № 5. – С. 294–305 (на английском языке)*
11. *Zheltova G. A., Glushchenko V. N., Kips R., Krasnopyorova M. V., Zheltov D. A., Milts O. S., Silachyov I. Yu., Panova E. N., Toksanbayev B. Zh., Baltabayev A. Zh., Blynskiy P. A. Комплекс методов аналитического исследования урансодержащего сырья для целей ядерной криминалистики // Сборник тезисов 2-й Международной конференции по радиоаналитической и ядерной химии. – Будапешт, Венгрия, 2019. – С. 141 (на английском языке)*
12. *Токсанбаев Б. Ж., Жапабаев Қ. А., Төребеков А. Қ. Изучение методов идентификации сигнатур урановых концентратов // Труды XI Международной научно-практической конференции «Развитие урановой и редкометалльной промышленности». – Алматы, 2024. – С. 82–85 (на русском языке)*

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Уран кен орындарының шығу тегін олардың сирекжер элементтері сигнатуралары бойынша анықтау / J. Mercadier [және т. б.] // Terra Nova. – 2011. – Т. 23. – № 4. – Б. 264–269 (ағылшын тілінде)*
2. *Пери-Тетистің шығыс жиегінде қалыптасқан уранды палеоцен-эоцен шөгінділерінің құрылысы мен даму тарихы (Шу-Сарысу бассейні, Оңтүстік Қазақстан) / A. Dillinger [және т. б.] // Sedimentary Geology. – 2024. – Т. 468. – 106677 (ағылшын тілінде)*
3. *Афанасьев Г. В., Миронов Ю. Б., Пинский Э. М. Құмтасты типтегі уран кен орындарының қалыптасуының жаңа аспектілері // Өңірлік геология және металлогения. – 2014. – № 59. – Б. 89–96 (орыс тілінде)*
4. *Язиков Е. Г. Уран минералогиясы: оқу құралы. – Томск: Томск политехникалық университеті, 2010. – 143 б. (орыс тілінде)*
5. *Медведева С. А. Төменгі Амур маңының мезозойлық шөгінді жыныстарындағы сирекжер элементтерінің таралу сипаты // Өңірлік мәселелер. – 2021. – Т. 24. – № 4. – Б. 25–34 (орыс тілінде)*
6. *Пайдалы модельге пат. № 4046 Қазақстан Республикасы. Құмтасты типтегі уран кендері мен керндік материалдарының үлгілерін спектрометриялық талдауға дайындау тәсілі / Б. Ж. Токсанбаев, А. Қ. Төребеков; өтінім беруші және патент иесі: «Жоғары технологиялар институты» ЖШС (KZ). – № 2019/0191.2; өтінім берілген 28.02.2019; жарияланған 07.06.2019, Бюл. № 23 (орыс тілінде)*
7. *Геохимиялық сертификатталған стандартты үлгілер мен топырақтардағы сирекжер элементтерін, торий мен уранды индуктивті байланысқан плазмалы масс-спектрометрия әдісімен талдауға арналған микротолқынды ыдырату әдісі / S. Kasar [және т. б.] // Molecules. – 2020. – Т. 25. – № 21. – 5178 (ағылшын тілінде)*
8. *Bau M., Möller P. Метаморфогендік гидротермалдық кальцитте, магнезитте және сидеритте сирекжер элементтерінің фракциялануы // Mineralogy and Petrology. – 1992. – Т. 45. – Б. 231–246 (ағылшын тілінде)*
9. *Finch R., Murakami T. Уран минералдарының жүйеленуі мен парагенезисі // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 1999. – Т. 38. – Б. 91–180 (ағылшын тілінде)*
10. *Кен орнының типі бойынша нормаланған сирекжер элементтері сигнатураларына негізделген ядролық криминалистиканың жаңа құралы / T. L. Spano [және т. б.] // Terra Nova. – 2017. – Т. 29. – № 5. – Б. 294–305 (ағылшын тілінде)*
11. *Zheltova G. A., Glushchenko V. N., Kips R., Krasnopyorova M. V., Zheltov D. A., Milts O. S., Silachyov I. Yu., Panova E. N., Toksanbayev B. Zh., Baltabayev A. Zh., Blynskiy P. A. Ядролық криминалистика мақсатында құрамында уран бар шикізатты аналитикалық зерттеу әдістерінің кешені // Радиоаналитикалық және ядролық химия бойынша 2-ші халықаралық конференцияның тезистер жинағы. – Будапешт, Венгрия, 2019. – 141 б. (ағылшын тілінде)*

12. *Токсанбаев Б. Ж., Жапабаев Қ. А., Төребеков А. Қ. Уран концентраттарының сигнатураларын сәйкестендіру әдістерін зерттеу // «Уран және сирекметалл өнеркәсібін дамыту» XI халықаралық ғылыми-практикалық конференциясының еңбектері. – Алматы, 2024. – Б. 82–85 (орыс тілінде)*

REFERENCES

1. *Origin of Uranium Deposits Revealed by Their Rare Earth Element Signature / J. Mercadier et al. // Terra Nova. – 2011. – Vol. 23. – No. 4. – P. 264–269 (in English)*
2. *Architecture and History of Uranium-Bearing Palaeocene-Eocene Strata Deposited on the Eastern Margin of the Peri-Tethys (Chu-Sarysu Basin, South Kazakhstan) / A. Dillinger et al. // Sedimentary Geology. – 2024. – Vol. 468. – Article 106677 (in English)*
3. *Afanasyev G. V., Mironov Yu. B., Pinsky E. M. Novye aspekty formirovaniya uranovykh mestorozhdenii peschannikovogo tipa [New Aspects of the Formation of Sandstone-Type Uranium Deposits]. Regionalnaya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]. – 2014. – No. 59. – P. 89–96 (in Russian)*
4. *Yazikov E. G. Mineralogiya urana: uchebnoe posobie [Mineralogy of Uranium: Textbook]. – Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet, 2010. – 143 p. (in Russian)*
5. *Medvedeva S. A. Kharakter raspredeleniia redkozemelnykh elementov v mezozoiskikh osadochnykh porodakh Nizhnego Priamuria [Distribution Pattern of Rare Earth Elements in Mesozoic Sedimentary Rocks of the Lower Amur Region]. Regionalnye problemy [Regional Problems]. – 2021. – Vol. 24. – No. 4. – P. 25–34 (in Russian)*
6. *Pat. for Utility Model No. 4046, Republic of Kazakhstan. Sposob podgotovki prob uranovykh rud i kernovykh materialov peschanikovogo tipa dlia spektrometricheskogo analiza [Method for Preparing Sandstone-Type Uranium Ore and Core Samples for Spectrometric Analysis] / B. Zh. Toksanbaev, A. K. Torebekov; applicant and patent holder: Institute of High Technologies LLP (KZ). – No. 2019/0191.2; appl. 28.02.2019; publ. 07.06.2019, Bull. No. 23 (in Russian)*
7. *A Microwave Digestion Technique for the Analysis of Rare Earth Elements, Thorium and Uranium in Geochemical Certified Reference Materials and Soils by ICP-MS / S. Kasar et al. // Molecules. – 2020. – Vol. 25. – No. 21. – Article 5178 (in English)*
8. *Bau M., Möller P. Rare Earth Element Fractionation in Metamorphogenic Hydrothermal Calcite, Magnesite and Siderite // Mineralogy and Petrology. – 1992. – Vol. 45. – P. 231–246 (in English)*
9. *Finch R., Murakami T. Systematics and Paragenesis of Uranium Minerals // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 1999. – Vol. 38. – P. 91–180 (in English)*
10. *A Novel Nuclear Forensic Tool Involving Deposit Type Normalized Rare Earth Element Signatures / T. L. Spano et al. // Terra Nova. – 2017. – Vol. 29. – No. 5. – P. 294–305 (in English)*
11. *Zheltova G. A., Glushchenko V. N., Kips R., Krasnopyorova M. V., Zheltov D. A., Milts O. S., Silachyov I. Yu., Panova E. N., Toksanbayev B. Zh., Baltabayev A. Zh., Blynskiy P. A. Complex of Methods for Analytical Study of Uranium-Containing Raw Materials for Nuclear Forensics Purposes // In: Book of Abstracts of the 2nd International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – Budapest, Hungary, 2019. – P. 141 (in English)*
12. *Toksanbaev B. Zh., Zhapabaev K. A., Torebekov A. K. Izuchenie metodov identifikatsii signatur uranovykh kontsentratov [Study of Methods for Identifying Signatures of Uranium Concentrates] // In: Trudy XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razvitie uranovoi i redkometall'noi promyshlennosti» [Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference «Development of the Uranium and Rare-Metal Industry»]. – Almaty, 2024. – P. 82–85 (in Russian)*

Сведения об авторах:
Кенжетаев Ж. С., Ph.D, руководитель проекта, ТОО «АСкоре» (г. Алматы, Казахстан), *kzhiger@yahoo.com;* https://orcid.org/0000-0003-2009-6655
Тогизов К. С., Ph.D, ассоциированный профессор, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), *k.togizov@satbayev.university;* https://orcid.org/0000-0002-4830-405X
Жапабаев Қ. А., научный сотрудник, ТОО «АСкоре» (г. Алматы, Казахстан), *zhapabaev.kudaibergen@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0001-8285-9545

Авторлар туралы мәліметтер:
Кенжетаев Ж. С., Ph.D, жоба жетекшісі, «АСкоре» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)
Тогизов К. С., Сәтбаев университетінің Ph.D докторы, қауымдастық профессоры (Алматы қ., Қазақстан)
Жапабаев Қ. А., ғылыми қызметкер, «АСкоре» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:
Kenzhetayev Zh. S., Ph.D, Project Manager, AScore LLP (Almaty, Kazakhstan)
Togizov K. S., Ph.D, associate professor, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)
Zhapabayev K. A., research associate, AScore LLP (Almaty, Kazakhstan)