ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геология*

Перспективы редкоземельной рудоносности кор выветривания по гранито-гнейсам Соуктальского плутонического комплекса (Северный Казахстан)

М.А.Джунусов[1], **К.Р.Регми**[1], **Е.В.Климова**[2]✉, **А.В.Резник**[3]
[1] *Назарбаевский университет, Астана, Казахстан*
[2] *Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия*
[3] *Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия*

Как цитировать эту статью: Джунусов М.А., Регми К.Р., Климова Е.В., Резник А.В. Перспективы редкоземельной рудоносности кор выветривания по гранито-гнейсам Соуктальского плутонического комплекса (Северный Казахстан) // Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 45-54. EDN TBOUJQ

Аннотация
Изучены уникальные образцы коры выветривания наиболее выветренных образцов профиля выветривания (30-43 м) из двух буровых скважин. Минеральный состав образцов представлен кварцем, каолинитом, микроклином, мусковитом и плагиоклазом, что определено с помощью поляризационного микроскопа и подтверждено рентгеноструктурным анализом. Образцы из коры выветривания по гранито-гнейсам Соуктальского плутонического комплекса Северного Казахстана подвергнуты последовательному извлечению редкоземельных элементов (РЗЭ). Содержание РЗЭ оценивалось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) после двухступенчатой процедуры последовательного выщелачивания растворами хлорида гидроксиламиния и гидроксида натрия (0,2 моль $NH_2OH{\cdot}HCl$ и 1 моль NaOH). Эксперименты по последовательному выщелачиванию образцов позволили эффективно извлечь РЗЭ из коры выветривания Соуктальского плутонического комплекса. Эффективность извлечения (РЗЭ + Sc + Y) составляет от 4,1 до 7,8 г/т. Суммарное содержание легких РЗЭ составляет от 3,5 до 5,9 г/т, тяжелых – от 0,2 до 0,7 г/т. Результаты изучения образцов из коры выветривания по гранито-гнейсам позволяют отнести объект к ионно-адсорбционному типу месторождения РЗЭ коры выветривания. Полученные результаты демонстрируют эффективность последовательного извлечения РЗЭ и свидетельствуют о перспективности изучаемой территории для месторождения РЗЭ. Ионно-адсорбционный тип месторождений РЗЭ является новым для Казахстана и может способствовать развитию промышленной отрасли.

Ключевые слова
редкоземельные элементы; кора выветривания; месторождения РЗЭ; Соуктал; Казахстан

Финансирование
Работа выполнена в рамках темы 064.01.00 (SPG) Назарбаевского университета и темы НИР ИГГД РАН FMUW 2025-0003 (FMUW 2022-0004).

Поступила: 09.12.2024 ***Принята: 02.07.2025*** ***Онлайн: 25.11.2025*** ***Опубликована: 27.02.2026***

Введение

Интерес к редкоземельным элементам (РЗЭ) возрастает ежегодно, так как они играют важную роль в различных отраслях промышленности, включая электронику, авиацию, автомобилестроение, энергетику и др. Несмотря на то, что редкоземельные элементы присутствуют во многих минералах, их средняя концентрация в земной коре достаточно низка, а количество содержащих РЗЭ месторождений ограничено [1, 2]. Редкоземельные элементы играют важную роль в современной индустрии и обладают большим потенциалом для развития новых технологий и инноваций. Поэтому в настоящее время ведется поиск новых источников добычи и технологий переработки РЗЭ. Редкие и редкоземельные элементы весьма информативны при решении различных генетических вопросов, в том числе на минеральном уровне [3-5]. Последними исследованиями установлено, что элементы-примеси могут выступать чувствительными индикаторами редкометалльного оруденения [6, 7]. Таким образом, изучение распределения редких и редкоземельных элементов

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

предоставляет возможность использовать полученные данные для выявления месторождений и анализа их генезиса. Метод подходит как для научных исследований, так и для практических задач в области геосервисов, включая поиск и добычу минеральных ресурсов [8]. Основными источниками РЗЭ являются минералы: бастнезит, монацит, лопарит, ксенотим, ионно-адсорбционные глины [9].

Процессы выветривания приводят к выщелачиванию РЗЭ из минералов, а их последующая адсорбция – к образованию рудоносных кор выветривания ионно-адсорбционного типа [10]. Такие месторождения широко распространены в Южном Китае и являются одним из основных источников тяжелых редкоземельных элементов (ТРЗЭ) в мире [11]. Помимо фракционирования РЗЭ за счет растворения РЗЭ-содержащих минералов [12] другие механизмы формирования отложений включают комплексообразование с органическими и неорганическими лигандами [13], адсорбцию минералами [14], поверхностные осадки [15], и окислительно-восстановительные реакции [16]. Эти характеристики делают РЗЭ ценными индикаторами для изучения геохимических особенностей пород. Мировые запасы РЗЭ составляют около 120 млн т, в основном они распределены в Китае, Бразилии, России, Индии и Австралии. Наиболее продуктивные месторождения РЗЭ связаны с карбонатитами, щелочными породами и корами выветривания [17, 18].

Большие успехи в разделении РЗЭ достигнуты благодаря применению методов ионного обмена [19, 20] и экстракции [21]. Последовательное химическое выщелачивание, или экстракция – это высокоэффективный метод для изучения поведения РЗЭ [22, 23], широко используемый для фракционирования элементов в почвах и осадках [24, 25].

Казахстан обладает большим потенциалом для выявления месторождений РЗЭ благодаря значительным неразведанным ресурсам. В Казахстане на 160 участках зарегистрированы 384 месторождения карбонатитового, щелочного магматического, метаморфического, метасоматического, осадочного типов, а также коры выветривания [26]. Одним из малоизученных месторождений коры выветривания является Соуктал, расположенный в северной части страны. Определение концентраций РЗЭ в коре выветривания по гранито-гнейсам Соуктала с использованием метода двухстадийной последовательной химической экстракции является актуальной задачей.

Геологическая характеристика района исследования

Район исследований расположен на юго-восточной границе Костанайской обл., Северный Казахстан. В структурном отношении территория участка находится в области, испытавшей тектономагматическую активизацию, соответствует узлу сочленения региональной зоны смятия субмеридионального простирания и разрывных структур субширотного и субмеридионального простираний глубинного заложения, предопределяющих развитие кварц-полевошпатового метасоматоза с редкометалльной специализацией (Sn, W, Be, Ta, Nb и др.) и линейных кор выветривания. В геологическом строении Соуктальского массива наиболее древние породы представлены гранито-гнейсами протерозойского возраста (γ_2 PR_2). Состав гранитоидов Соуктальского массива пестрый. В основном это крупнозернистые гранито-гнейсы, слагающие большую часть его площади и окруженные ореолом полосчатых микроклиновых гнейсов [27]. Протерозойские породы (PR) слагают осевую часть мезозойской Улытауской антиклинали, по которой происходила эксгумация и выветривание Соуктальского гранито-гнейсового комплекса [27]. Мощность коры выветривания по гранито-гнейсам варьируется от 23 до 85 м [27]. Также на территории района присутствуют нижне-среднепротерозойские (PR_{1-2}) зеленые сланцы и туфы. Общая мощность протерозойской толщи составляет 5400-5700 м. Протерозойские и палеозойские породы образуют складчатый фундамент, а мезозойские и кайнозойские рыхлые отложения – платформенный чехол. Палеозойские толщи на территории исследования встречаются редко. Терригенные толщи девона состоят из красноцветных аркозовых песчаников, алевролитов, грубозернистых песчаников и конгломератов. Верхняя часть разреза характеризуется мелкозернистыми переслаивающимися красными песчаниками, алевролитами и розовато-серыми известковистыми песчаниками. Общая мощность составляет 150 м. Девонские толщи имеют резкое угловое несогласие с палеозойскими основными интрузиями (габбро) и протерозойскими сланцами [27].

По профилю выветривания выделяются четыре зоны коры выветривания: зона дезинтеграции гранито-гнейсов по трещинам, заполненным Mn-оксидами и Fe-гидроксидами; каолинит-монтмориллонитовая, состоящая из пестро окрашенных глин преимущественно светло-зеленого,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

зеленовато-светло-серого, серого и черного цветов; красновато-серая каолинитовая, состоящая из каолинита, кварца, железа и гидроксидов; белая каолинитовая, состоящая из каолинита и кварца. Гипергенные образования перекрываются кайнозойскими и четвертичными отложениями. Осадочные породы представлены в основном песками, суглинками, алевритами, эоловыми и аллювиальными отложениями мощностью до 70 м [27].

Отбор проб и аналитические методы

Отбор проб производился из двух скважин С-15 (49°31'32.82"N-66°38'18.72"E) и С-18 (49°31'32.84"N-66°38'24.30"E). Глубина скважины С-15 составляла 43 м, а скважины С-18 – 30 м. Вес каждого отобранного образца равнялся примерно 1 кг.

Минеральный состав коры выветривания изучался на просвечивающем микроскопе (Zeiss Primotech) для предварительной оптической диагностики, а в дальнейшем определялся с помощью рентгенофазового анализа. Рентгенофазовый анализ (XRD) проводился на приборе Rigaku Smart Lab с источником рентгеновского излучения CuKα для образцов при напряжении на рентгеновской трубке 30 кВ, силе тока 15 мА, с фиксированной системой щелей, диапазоном сканирования от 3 до 90°, минимальным шагом 0,020 и скоростью съемки 2 об/мин. Образцы коры выветривания тщательно измельчены, пульверизированы, перемешаны на лабораторной дробилке Retsch TM 300 DrumMill при 80 об/мин в течение 10-20 мин, а затем на ситовочной машине Retsch AS 300 Control отобрана фракция зерен с размерностью менее 74 мкм. Далее к 10 г образца добавлены 25 г дистиллированной воды, которые затем оставлены в укупоренной мензурке в равновесии на двое суток в комнатных условиях. pH полученных растворов измерялся pH-метром ISOLAB. Далее образцы высушены в печи при 60 °C и измельчены в агатовой ступке.

В рамках исследования проведены эксперименты методом двухстадийной последовательной химической экстракции [28, 29] для определения концентраций РЗЭ в образцах коры выветривания месторождения Соуктал. Эксперименты проводились в два этапа:

1. К 1 г измельченного образца (74 мкм) добавляли 10 мл раствора $NH_2OH{\cdot}HCl$ (0,2 моль, pH = 5,0) [30, 31] и встряхивали в течение 3 ч. Суспензию нагревали на водяной бане при температуре 95 °C 4 ч и одновременно перемешивали нагревательной магнитной мешалкой (250 об/мин). После центрифугирования и фильтрования собирали экспериментальный раствор.

2. К полученному экспериментальному раствору добавляли 10 мл 1 моль NaOH, затем перемешивали с помощью магнитной мешалки (350 об/мин) и одновременно нагревали на водяной бане при температуре 75 °C в течение 1 ч.

Все полученные из двух стадий экспериментальные растворы анализировались на содержание РЗЭ методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Концентрации РЗЭ определялись методом ICP-MS на приборе Thermo Fisher Scientific iCAP RQ. Для построения калибровочных кривых и оценки достоверности полученных результатов использовался калибровочный стандарт IV-STOCK-26-125ML. Пределы обнаружения для всех элементов рассчитывались по калибровочным линиям и составляли менее 0,0005 мкг/л.

Все аналитические исследования проводились в Назарбаевском университете (Астана, Казахстан).

Результаты исследований

Минеральный состав пород. Образец из скважины С-15 представлен глиной красновато-коричневого цвета, слегка липкий, а образец из скважины С-18 – желтовато-коричневой глиной, легкий и хрупкий. Оба образца представлены сильно выветренными гранито-гнейсами, которые сложены мусковитом, калиевым полевым шпатом, кварцем, плагиоклазом, каолинитом, апатитом и минералом гидроксида Fe (рис.1). Рентгенофазовое изучение образцов подтвердило наличие калиевого полевого шпата, кварца, плагиоклаза с незначительным количеством мусковита и каолинита, а минерал гидроксида Fe в спектрах рентгеноструктурного анализа не обнаружен (рис.2). Соотношение минералов в образце из скважины С-15, об.%: 42,7 кварца, 54,3 каолинита и 3 гидроксидов железа, а в образце из скважины С-18, об.%: 47,8 кварца, 35 каолинита, 8,3 калиевого полевого шпата, 5,4 мусковита, 3,5 плагиоклаза и незначительное количество аморфных минералов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 45-54
© М.А.Джунусов, К.Р.Регми, Е.В.Климова, А.В.Резник, 2025

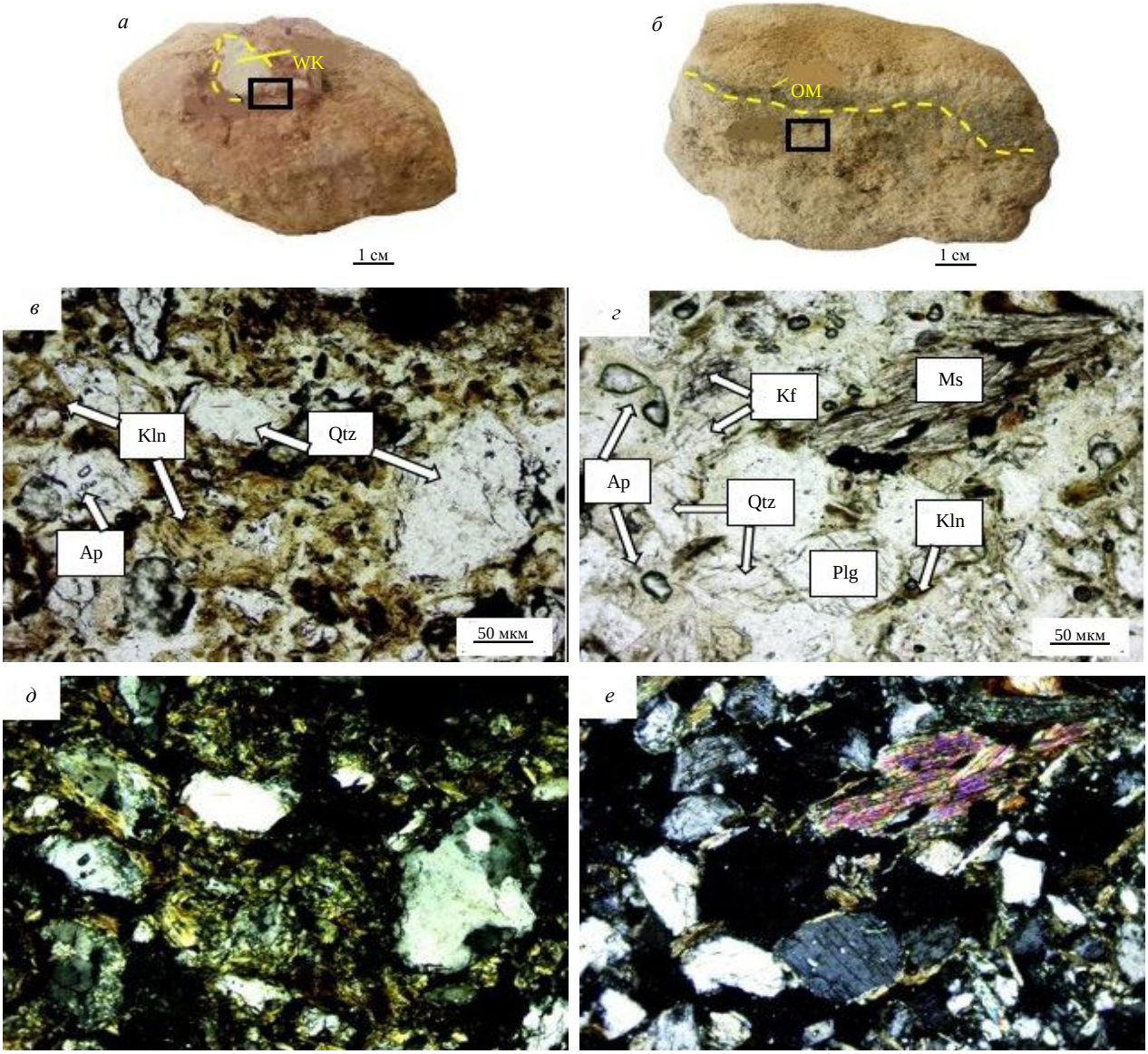


Рис.1. Фрагменты коры выветривания, образец С-15 – фрагменты белого каолинита WK в красновато-коричневой глинистой породе (*а*); образец С-18 – желтовато-серая хрупкая глинистая порода, переслаивающаяся с органическим веществом OM (*б*); микрофотографии без анализатора (*в, г*); с анализатором (*д, е*); зерна кварца, сцементированные каолинитом с гидроксидом железа (*в, д*); зерна кварца, полевого шпата, апатита, каолинита и мусковита (*г, е*). Сокращения минералов по Р.Кретцу [32]

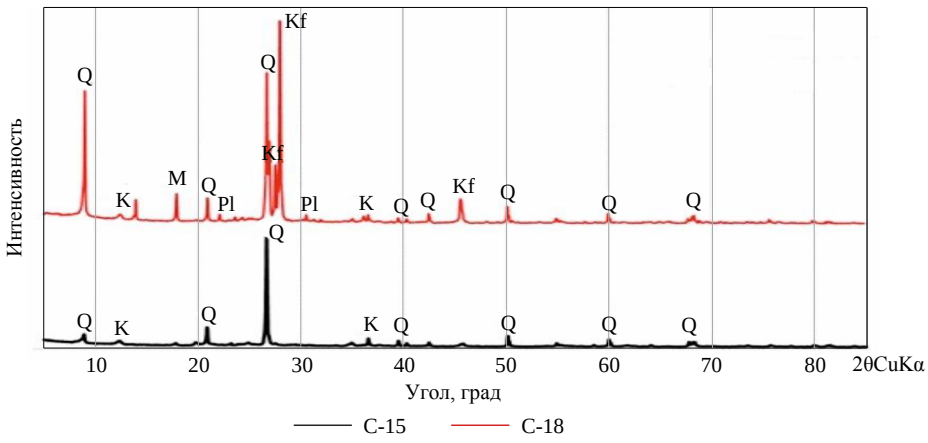


Рис.2. Спектры рентгеновской дифракции (XRD) образцов:
M – мусковит; Kf – калиевый полевой шпат; Q – кварц; K – каолинит; Pl – плагиоклаз

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

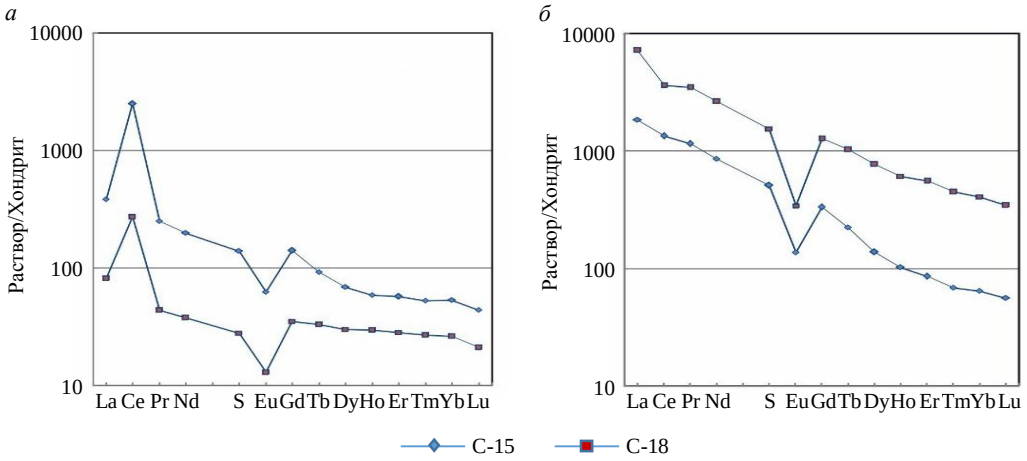


Рис.3. Распределение РЗЭ в экспериментальных растворах на первой стадии выщелачивания (*а*); на второй стадии выщелачивания (*б*)

Последовательное экспериментальное выщелачивание. Все РЗЭ, включая Y и Sc, за исключением Pm, успешно извлечены в процессе последовательного выщелачивания (рис.3).

На первой стадии выщелачивания из образца С-15 извлечены Ce, La, Nd, Y, Sc, Gd и Sm в относительно больших количествах, а Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Yb и Tm – в значительно меньших (см. таблицу). Из образца С-18 извлечено сравнительно небольшое количество РЗЭ.

Содержание РЗЭ в экспериментальных растворах (ICP-MS)

Элемент	Образец С-15		Образец С-18	
	1-я стадия $NH_2OH{\cdot}HCl$, мкг/л	2-я стадия NaOH, мкг/л	1-я стадия $NH_2OH{\cdot}HCl$, мкг/л	2-я стадия NaOH, мкг/л
Sc	26,71	98,11	< предела обнаружения	146,32
Y	59,16	116,88	38,32	1072,88
La	90,27	435,86	19,16	1692,78
Ce	1513,07	815,03	165,15	2214,96
Pr	23,08	106,18	4,04	320,80
Nd	90,50	391,20	17,22	1195,81
Sm	20,64	75,11	4,13	227,78
Eu	3,51	7,72	0,72	19,31
Gd	27,88	65,88	7,02	251,70
Tb	3,32	8,07	1,19	37,05
Dy	16,89	33,81	7,40	188,67
Ho	3,21	5,59	1,61	33,33
Er	9,09	13,67	4,53	88,54
Tm	1,30	1,69	0,66	11,04
Yb	8,55	10,42	4,20	65,73
Lu	1,07	1,38	0,52	8,48
ΣРЗЭ	1812	1971	237	6351
La/Yb	10,55	41,83	4,56	25,76
Ce/Ce*	2,83	0,96	2,13	0,85
Σ образца, г/т	1,8	2,3	0,2	6,3
Общая Σ РЗЭ, г/т	4,1		6,5	
ΣРЗЭ + Sc + Y	4,1		7,8	

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На второй стадии выщелачивания (остаток РЗЭ от 1-ой стадии экстракции) из образца С-15 получены высокие концентрации Ce, La, Nd, Y, Pr, Sc и Lu, а из образца С-18 выщелочились наиболее высокие концентрации РЗЭ (см. таблицу).

На первой стадии выщелачивания в образце С-15 наиболее богатым извлекаемым элементом является Ce, за ним следует Nd и La, тогда как в образце С-18 порядок Ce > Y > La, а на второй стадии выщелачивания извлекаемое количество Ce > La > Nd > Y во всех образцах (см. таблицу). Очевидно, что Ce имеет наибольшие, а Tm наименьшие концентрации в процессе извлечения.

Результаты лабораторных экспериментов показали, что полученные растворы характеризуются повышенными значениями легких РЗЭ (ЛРЗЭ) относительно ТРЗЭ. Значение La/Yb в экспериментальных растворах на первой стадии выщелачивания составляет 10,5 и 4,6 в образцах С-15 и С-18 соответственно. Значение La/Yb в С-15 и С-18 на второй стадии выщелачивания выше и составляет 41,8 и 25,8. Суммарное извлечение РЗЭ, включая Sc и Y, при двухступенчатом последовательном выщелачивании из пробы С-15 составило 4,1 г/т, из пробы С-18 – 7,8 г/т (см. таблицу).

В экспериментальных растворах на первой стадии выщелачивания получены максимальные значения Ce-аномалии – 2,83 в образце из скважины С-15 и 2,13 в образце из скважины С-18. Минимальные значения Ce/Ce* получены на второй стадии выщелачивания – 0,96 и 0,85 из образцов скважин С-15 и С-18 соответственно (см. таблицу).

Результаты лабораторных экспериментов показали отрицательную Eu-аномалию на двух стадиях эксперимента (рис.3).

Результаты измерения pH показали, что в скважине С-18 pH составляет 5,03, а в скважине С-15 ниже, чем в С-18 – 4,85.

Обсуждение

Происхождение РЗЭ в ионно-адсорбционной форме в коре выветривания гранито-гнейсов. Изучение образцов из коры выветривания гранито-гнейсов Соуктальского плутонического комплекса показало, что они сложены кварцем, полевым шпатом, слюдами и каолинитом. Кварц как наиболее устойчивый минерал присутствует во всех зонах кор выветривания, часто выщелоченный, угловатый, со следами слюд и примазками глинистых агрегатов, реже с включениями железистых минералов черного цвета [27]. Полевые шпаты и листовато-угловатые обломки светлых, зеленоватых слюд в основном встречаются в глинисто-слюдистых зонах. В изученных образцах полевые шпаты замещаются каолинитом. Минералы часто пропитаны гидроокислами железа и марганца [27]. Во всех изученных образцах каолинит тесно связан с гидроксидами Fe (см. рис.1). Однако гидроксиды Fe не обнаружены в спектрах XRD, это связано с тем, что они могут присутствовать в аморфном или в слабо раскристаллизованном состоянии [33]. Результаты исследований показали, что основные минералы, концентрирующие РЗЭ в коре выветривания, – это каолинит, слюды, гидроксиды железа, полевые шпаты и апатит. РЗЭ в образцах коры выветривания гранито-гнейсов Соуктальского месторождения имеют ионно-адсорбционное происхождение. К ионно-адсорбционному типу относятся такие месторождения РЗЭ, в которых РЗЭ адсорбируются в глинистых минералах осадочных пород за счет электростатического притяжения в ионной форме [34]. Впервые месторождение такого типа было открыто в Китае (в 1969 г.) в профиле выветривания гранитов в Лунгнане (провинция Цзянси) [35, 36]. Позже подобные месторождения были обнаружены и в других районах. Большинство исследователей считает, что образование этих месторождений связано с обогащением РЗЭ в наиболее выветренных зонах коры выветривания по магматическому субстрату. Содержание глинистых минералов в корах выветривания месторождений колеблется от 40 до 70 %, а содержание ионообменных РЗЭ в образцах обычно составляет от 50 до 70 % [37-39].

Минералы, содержащие РЗЭ в горных породах, можно разделить на два типа – акцессорные с рудными (силикаты, например циркон, алланит, титанит, гранат; фосфаты, например ксенотим, апатит, монацит; фторкарбонаты, например бастнезит, синхизит, паризит; танталониобаты, флюорит) и породообразующие (полевой шпат, кварц, мусковит, биотит, амфибол и др.) [40-42]. Примерно 78 % РЗЭ в породах связаны с акцессорными минералами. Хотя породообразующие и могут содержать небольшие количества РЗЭ, их вклад в общее содержание РЗЭ в породах незначителен по сравнению с акцессорными (~22 %) [12, 24]. Отмечается также, что решающую роль в увеличении концентраций РЗЭ играют процесс распада акцессорных минералов и степень выветренности

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

минералов в профиле выветривания [24, 40]. Для месторождений в корах выветривания Северного Казахстана характерно преобладание суммы цериевого ряда над иттриевым [43]. Распространенность РЗЭ довольно значительна, но распределение их крайне неравномерно по простиранию и по падению в профиле выветривания [27]. В коре выветривания Соуктальского массива основными концентраторами иттрия и РЗЭ являются каолинит, мусковит и в меньшей степени плагиоклаз [25].

Кроме того, глинистые минералы указывают и на степень выветривания пород, причем полностью выветренный слой в основном представлен превращением полевого шпата в каолинит [24, 44]. По профилю выветривания от материнской породы до глины, РЗЭ переносятся в зону активного выщелачивания материнских пород, а затем с увеличением pH сорбираются в участках наиболее выветренных горизонтов. Общее количество извлеченных РЗЭ в образце С-18 составляет 6,5 г/т, в образце С-15 ниже – 4,1 г/т. Эти данные могут быть полезны для поиска более обогащенных зон коры выветривания в пределах изучаемого участка.

Надежность выбранных реагентов для выщелачивания. Как показали ранее проведенные исследования [45], первичные РЗЭ-содержащие минералы разрушаются в процессе выветривания с выделением растворимых ионов РЗЭ. Эти ионы взаимодействуют с глинистыми минералами и другими отложениями, образуя ионообменные комплексы, которые легко выщелачиваются или извлекаются [38, 39]. С целью повышения эффективности процесса извлечения РЗЭ проведено большое число исследований экстракции из кор выветривания редкоземельных элементов, отложившихся в результате выщелачивания материнских пород [46]. Выделение ионов РЗЭ, адсорбированных на глинистых минералах, может быть десорбировано путем ионного обмена катионами, в том числе Na^+, Ca^{2+}, NH_4 [20, 38, 47]. Результаты экспериментов двухстадийного выщелачивания образцов из коры выветривания по гранито-гнейсам Соуктальского плутонического комплекса Северного Казахстана показали успешное извлечение РЗЭ с применением $NH_2OH{\cdot}HCl$ и NaOH, поэтому процедура выщелачивания с использованием этих реагентов надежна для извлечения ионных элементов РЗЭ.

Характер распределения редкоземельных элементов. Во всех изученных образцах ЛРЗЭ (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu и Sc) извлекаются в пять раз больше, чем ТРЗЭ (Y, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu и Gd). Месторождение, богатое ЛРЗЭ, наблюдалось в регионе Цзянси (Китай) в корах выветривания по гранит-порфирам [48]. Признаком химического выветривания является обогащение РЗЭ в коре выветривания относительно субстрата [49]. При этом для кор выветривания по гранитоидному субстрату характерно обогащение тяжелыми РЗЭ [50]. Результаты лабораторных экспериментов показали, что ЛРЗЭ в растворах после выщелачивания преобладают над ТРЗЭ, La/Yb на первой стадии выщелачивания составляет 10,5 и 4,6 в образцах С-15 и С-18, на второй стадии – 41,8 и 25,8 (см. таблицу). Проведенные в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН лабораторные эксперименты подтверждают возможность удаления легких РЗЭ из профиля выветривания при выщелачивании докембрийских пород гранитоидного состава. Результаты экспериментов показали, что в растворах, полученных после взаимодействия слабокислого раствора серной кислоты с палеопротерозойскими гранито-гнейсами Фенноскандинавского щита, происходит прогрессивное обогащение легкими относительно тяжелых РЗЭ по мере увеличения времени взаимодействия раствора с породой [51]. Аналогичные данные получены ранее при экспериментах по селективному выщелачиванию РЗЭ из морских осадков с использованием соляной кислоты [52].

Из редкоземельных элементов европий может менять степень окисления. Отрицательная Eu-аномалия (рис.3) характерна для наиболее выветренных пород из профиля выветривания, в которых Eu^{3+} выщелачивается из системы в окислительных условиях [52].

Среди редкоземельных элементов церий в гипергенных условиях может находиться в состоянии окисления Ce^{4+} и Ce^{3+}. Возможность существования церия в форме Ce^{4+} и Ce^{3+} в природных водах современных аквафаций очевидна и подтверждается отрицательной цериевой аномалией в оксигенизированных водах, тогда как в бескислородных водах аномалия положительна, т.е. имеет место обогащение церием относительно лантана и неодима (празеодима). Поскольку величина pH в колонне океанической воды изменяется незначительно и может быть измерена или рассчитана для каждого конкретного случая, величина парциального давления кислорода может быть определена на основе содержания церия. В дренажных растворах зоны гипергенеза величина водородного показателя более изменчива и меняется на различных стадиях континентального выветривания [51, 52]. Существует много факторов, влияющих на поведение Ce [13, 53, 54]. Условия

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

pH-Eh среды – главные факторы, определяющие распределение церия между твердой и жидкими фазами [55]. Также одним из важнейших факторов, влияющих на поведение Ce, является интенсивность дренирования профиля выветривания [52]. Цериевая аномалия на первой стадии выщелачивания положительная, а на второй стадии отрицательная, что может быть связано с разным pH. Результаты экспериментальных исследований показали, что церий имеет большую относительную концентрацию среди РЗЭ (рис.3), при этом на первой стадии выщелачивания кислым раствором Ce-аномалия положительная, а на стадии выщелачивания щелочным раствором – отрицательная. Результаты петрографических исследований показывают, что гидроксиды Fe ассоциируют с каолинитом (см. рис.1). Исследования других авторов [45, 56, 57] показали, что гидрооксиды Fe играют решающую роль в формировании положительных Ce-аномалий во многих геолого-географических обстановках. На долю этих гидроксидов Fe приходится около 95 % общего содержания Ce, потому что оксиды Fe также могут адсорбировать РЗЭ и обычно ассоциируют с глинистыми минералами [50, 52]. Результаты экспериментальных работ по сорбции/соосаждению РЗЭ на гидроксидах железа показали положительную Ce-аномалию в растворах как следствие окисления на твердой фазе [50]. Эти представления согласуются с полученными данными о положительной Ce-аномалии (Ce/Ce* = 2,83 и 2,13 на первой стадии выщелачивания).

Выводы

Результаты петрографических и геохимических исследований показывают, что профиль выветривания массива Соуктал имеет потенциал для дальнейших поисков месторождений и рудопроявлений РЗЭ. Проведенные исследования подтверждают, что массив Соуктал относится к ионно-адсорбционному типу месторождений РЗЭ коры выветривания по гранито-гнейсам. Последовательные процедуры выщелачивания позволили эффективно извлечь РЗЭ из образцов месторождения. Содержание РЗЭ при выщелачивании проб свидетельствует о том, что они находятся в ионообменной форме, причем извлечение (РЗЭ + Sc + Y) составляет от 4,1 до 7,8 г/т. Суммарное содержание ЛРЗЭ составляет от 3,5 до 5,9 г/т, ТРЗЭ от 0,2 до 0,7 г/т. Положительная цериевая аномалия в профиле выветривания массива Соуктал обосновывается тем, что каолинит ассоциирует с гидроксидами Fe. В связи с этим рекомендуется дальнейшее изучение участка до глубины залегания фундамента около 100 м.

Эти данные могут быть использованы для изучения процессов выветривания, в том числе условий формирования коры выветривания, а также для оценки потенциала месторождения Соуктал на редкоземельные элементы. Полученные данные не только расширяют понимание геологических процессов, но и могут оказать практическое значение для промышленного освоения месторождений РЗЭ в регионе.

Авторы выражают благодарность сотрудникам факультета горного дела и наук о Земле, а также Core Facilities Назарбаевского университета за предоставленную возможность проведения аналитической работы. Благодарим Д.Бралину, Е.Сатая и К.Гудун за помощь в подготовке проб и приготовлении химических экспериментов; Е.Сугурбекова за помощь в проведении рентгеновского анализа; К.Ахметову и А.Бельдеубаева за помощь в проведении химических анализов на определение концентраций РЗЭ (ICP-MS) в лаборатории. Также авторы выражают благодарность промышленной компании за предоставленные образцы и полевые данные.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Binnemans K., Jones P.T.* Rare Earths and the Balance Problem // Journal of Sustainable Metallurgy. 2015. Vol. 1. Iss. 1. P. 29-38. DOI: 10.1007/s40831-014-0005-1

2. *Takeda O., Okabe T.H.* Current Status on Resource and Recycling Technology for Rare Earths // Metallurgical and Materials Transactions E. 2014. Vol. 1. Iss. 2. P. 160-173. DOI: 10.1007/s40553-014-0016-7

3. *Рогова И.В., Стативко В.С., Петров Д.А., Скублов С.Г.* Редкоэлементный состав циркона из гранитов рапакиви Губановской интрузии, Выборгский массив, как отражение флюидонасыщенности расплава // Геохимия. 2024. Т. 69. № 11. С. 975-991. DOI: 10.31857/S0016752524110024

4. *Skublov S.G., Petrov D.A., Galankina O.L. et al.* Th-Rich Zircon from a Pegmatite Vein Hosted in the Wiborg Rapakivi Granite Massif // Geosciences. 2023. Vol. 13. Iss. 12. № 362. DOI: 10.3390/geosciences13120362

5. *Salimgaraeva L., Berezin A., Sergeev S. et al.* Zircons from Eclogite-Associated Rocks of the Marun–Keu Complex, the Polar Urals: Trace Elements and U–Pb Dating // Geosciences. 2024. Vol. 14. Iss. 8. № 206. DOI: 10.3390/geosciences14080206

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

6. *Skublov S.G., Hamdard N., Ivanov M.A., Stativko V.S.* Trace element zoning of colorless beryl from spodumene pegmatites of Pashki deposit (Nuristan province, Afghanistan) // Frontiers in Earth Science. 2024. Vol. 12. № 1432222. DOI: 10.3389/feart.2024.1432222

7. *Левашова Е.В., Скублов С.Г., Хамдард Н. и др.* Геохимия циркона из пегматитоносных лейкогранитов комплекса Лагман, провинция Нуристан, Афганистан // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24. № 2. № ES2011. DOI: 10.2205/2024ES000916

8. *Евдокимов А.Н., Пхарое Б.Л.* Индикаторная роль редких и редкоземельных элементов Северо-Западного рудопроявления марганца (ЮАР) в генетической модели гипергенных марганцевых месторождений // Записки Горного института. 2021. Том 252. С. 814-825. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.4

9. *Shijie Wang.* Rare Earth Metals: Resourcefulness and Recovery // JOM. 2013. Vol. 65. Iss. 10. P. 1317-1320. DOI: 10.1007/s11837-013-0732-y

10. *Yan Hei Martin Li, Wen Winston Zhao, Mei-Fu Zhou.* Nature of parent rocks, mineralization styles and ore genesis of regolith-hosted REE deposits in South China: An integrated genetic model // Journal of Asian Earth Sciences. 2017. Vol. 148. P. 65-95. DOI: 10.1016/j.jseaes.2017.08.004

11. *Zhiwei Bao, Zhenhua Zhao.* Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China // Ore Geology Reviews. 2008. Vol. 33. Iss. 3-4. P. 519-535. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2007.03.005

12. *Bosia C., Chabaux F., Pelt E. et al.* U–Th–Ra variations in Himalayan river sediments (Gandak river, India): Weathering fractionation and/or grain-size sorting? // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2016. Vol. 193. P. 176-196. DOI: 10.1016/j.gca.2016.08.026

13. *Davranche M., Pourret O., Gruau G., Dia A.* Impact of humate complexation on the adsorption of REE onto Fe oxyhydroxide // Journal of Colloid and Interface Science. 2004. Vol. 277. Iss. 2. P. 271-279. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.04.007

14. *Piasecki W., Sverjensky D.A.* Speciation of adsorbed yttrium and rare earth elements on oxide surfaces // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2008. Vol. 72. Iss. 16. P. 3964-3979. DOI: 10.1016/j.gca.2008.05.049

15. *Dardenne K., Schäfer T., Lindqvist-Reis P. et al.* Low Temperature XAFS Investigation on the Lutetium Binding Changes during the 2-Line Ferrihydrite Alteration Process // Environmental Science & Technology. 2002. Vol. 36. Iss. 23. P. 5092-5099. DOI: 10.1021/es025513f

16. *Bau M., Koschinsky A.* Oxidative scavenging of cerium on hydrous Fe oxide: Evidence from the distribution of rare earth elements and yttrium between Fe oxides and Mn oxides in hydrogenetic ferromanganese crusts // Geochemical Journal. 2009. Vol. 43. Iss. 1. P. 37-47. DOI: 10.2343/geochemj.1.0005

17. *Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневская Н.А.* Основные черты исторической металлогении редкоземельных элементов // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. № 3. С. 209-246. DOI: 10.31857/S0016777022030066

18. *Yufeng Huang, Hongping He, Xiaoliang Liang et al.* Characteristics and genesis of ion adsorption type REE deposits in the weathering crusts of metamorphic rocks in Ningdu, Ganzhou, China // Ore Geology Reviews. 2021. Vol. 135. № 104173. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104173

19. *Spedding F.H., Voigt A.F., Gladrow E.M, Sleight N.R.* The Separation of Rare Earths by Ion Exchange. I. Cerium and Yttrium // Journal of the American Chemical Society. 1947. Vol. 69. Iss. 11. P. 2777-2781. DOI: 10.1021/ja01203a058

20. *Spedding F.H., Voigt A.F., Gladrow E.M. et al.* The Separation of Rare Earths by Ion Exchange. II. Neodymium and Praseodymium // Journal of the American Chemical Society. 1947. Vol. 69. Iss. 11. P. 2786-2792. DOI: 10.1021/ja01203a060

21. *Зимина Г.В., Николаева И.И., Таук М.В., Цыганкова М.В.* Экстракционные схемы разделения редкоземельных металлов // Цветные металлы. 2015. № 4. С. 23-27. DOI: 10.17580/tsm.2015.04.04

22. *Land M., Öhlander B., Ingri J., Thunberg J.* Solid speciation and fractionation of rare earth elements in a spodosol profile from northern Sweden as revealed by sequential extraction // Chemical Geology. 1999. Vol. 160. Iss. 1-2. P. 121-138. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00064-9

23. *Estrade G., Marquis E., Smith M. et al.* REE concentration processes in ion adsorption deposits: Evidence from the Ambohimirahavavy alkaline complex in Madagascar // Ore Geology Reviews. 2019. Vol. 112. № 103027. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.103027

24. *Denys A., Janots E., Auzende A.-L. et al.* Evaluation of selectivity of sequential extraction procedure applied to REE speciation in laterite // Chemical Geology. 2021. Vol. 559. № 119954. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2020.119954

25. *Zhenxiao Wu, Yu Chen, Yang Wang et al.* Review of rare earth element (REE) adsorption on and desorption from clay minerals: Application to formation and mining of ion-adsorption REE deposits // Ore Geology Reviews. 2023. Vol. 157. № 105446. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2023.105446

26. *Mihalasky M.J., Tucker R.D., Renaud K., Verstraeten I.M.* Rare earth element and rare metal inventory of central Asia: Fact Sheet 2017–3089. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2018. 4 p. DOI: 10.3133/fs20173089

27. *Исаева Л.Д., Дюсембаева К.Ш., Кембаев М.К., Юсупова У.* Редкоземельные элементы и формы их нахождения в коре выветривания рудопроявления Талайрык (Северный Казахстан) // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2015. Т. 6. № 414. С. 57-65.

28. *Setiawan I.* The sequential REE (Rare Earth Elements) extraction of weathered crusts of granitoids from Sibolga, Indonesia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 882. № 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/882/1/012020

29. *Junussov M., Mádai F., Földessy J., Hámor-Vidó M.* The Role of Organic Matter in Gold Occurrence: Insights from Western Mecsek Uranium Ore Deposit // Economic and Environmental Geology. 2024. Vol. 57. Iss. 4. P. 371-386. DOI: 10.9719/EEG.2024.57.4.371

30. *Junussov M., Mustapayeva S.* Preliminary XRF Analysis of Coal Ash from Jurassic and Carboniferous Coals at Five Kazakh Mines: Industrial and Environmental Comparisons // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Iss. 22. № 10586. DOI: 10.3390/app142210586

31. *Junussov M., Madai F., Kristály F. et al.* Preliminary analysis on roles of metal–organic compounds in the formation of invisible gold // Acta Geochimica. 2021. Vol. 40. Iss. 6. P. 1050-1072. DOI: 10.1007/s11631-021-00494-y

32. *Kretz R.* Symbols for rock-forming minerals // American Mineralogist. 1983. Vol. 68. № 1-2. P. 277-279.

33. *Shi-Yong Wei, Fan Liu, Xiong-Han Feng et al.* Formation and Transformation of Iron Oxide–Kaolinite Associations in the Presence of Iron(II) // Soil Science Society of America Journal. 2011. Vol. 75. Iss. 1. P. 45-55. DOI: 10.2136/sssaj2010.0175

34. *Sababa E., Essomba Owona L.G., Temga J.P., Ndjigui P.-D.* Petrology of weathering materials developed on granites in Biou area, North-Cameroon: implication for rare-earth elements (REE) exploration in semi-arid regions // Heliyon. 2021. Vol. 7. Iss. 12. № e08581. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e08581

35. *Deng-hong Wang, Zhi Zhao, Yang Yu et al.* Exploration and research progress on ion-adsorption type REE deposit in South China // China Geology. 2018. Vol. 1. Iss. 3. P. 415-424. DOI: 10.31035/cg2018022

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

36. *Wang Zhen, Chen Zhen Yu, Zhao Zhi et al.* REE mineral and geochemical characteristics of Neoproterozoic metamorphic rocks in South Jiangxi Province // Mineral Deposits. 2019. Vol. 38. № 4. P. 837-850 (in Chinese). DOI: 10.16111/j.0258-7106.2019.04.010

37. *Sanematsu K., Kon Y.* Geochemical characteristics determined by multiple extraction from ion-adsorption type REE ores in Dingnan County of Jiangxi Province, South China // Bulletin of the Geological Survey of Japan. 2013. Vol. 64. № 11/12. P. 313-330.

38. *Li M.Y.H., Mei-Fu Zhou, Williams-Jones A.E.* The Genesis of Regolith-Hosted Heavy Rare Earth Element Deposits: Insights from the World-Class Zudong Deposit in Jiangxi Province, South China // Economic Geology. 2019. Vol. 114. № 3. P. 541-568. DOI: 10.5382/econgeo.4642

39. *Li M.Y.H., Mei-Fu Zhou.* The role of clay minerals in formation of the regolith-hosted heavy rare earth element deposits // American Mineralogist. 2020. Vol. 105. № 1. P. 92-108. DOI: 10.2138/am-2020-7061

40. *Yuejun Wang, Weiming Fan, Guowei Zhang, Yanhua Zhang.* Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies // Gondwana Research. 2013. Vol. 23. Iss. 4. P. 1273-1305. DOI: 10.1016/j.gr.2012.02.019

41. *Bern C.R., Shah A.K., Benzel W.M., Lowers H.A.* The distribution and composition of REE-bearing minerals in placers of the Atlantic and Gulf coastal plains, USA // Journal Geochemical Exploration. 2016. Vol. 162. P. 50-61. DOI: 10.1016/j.gexplo.2015.12.011

42. *Xiangping Zhu, Bin Zhang, Guotao Ma et al.* Mineralization of ion-adsorption type rare earth deposits in Western Yunnan, China // Ore Geology Reviews. 2022. Vol. 148. № 104984. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104984

43. *Исаева Л.Д., Дюсембаева К.Ш., Кембаев М.К. и др.* Формы нахождения редкоземельных элементов в коре выветривания месторождения Кундыбай (Северный Казахстан) // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2015. Т. 2. № 410. С. 23-30.

44. *Alshameri A., Hongping He, Chen Xin et al.* Understanding the role of natural clay minerals as effective adsorbents and alternative source of rare earth elements: Adsorption operative parameters // Hydrometallurgy. 2019. Vol. 185. P. 149-161. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.02.016

45. *Meijun Yang, Xiaoliang Liang, Lingya Ma et al.* Adsorption of REEs on kaolinite and halloysite: A link to the REE distribution on clays in the weathering crust of granite // Chemical Geology. 2019. Vol. 525. P. 210-217. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.07.024

46. *Zhenyue Zhang, Changyu Zhou, Wendou Chen et al.* Effects of Ammonium Salts on Rare Earth Leaching Process of Weathered Crust Elution-Deposited Rare Earth Ores // Metals. 2023. Vol. 13. Iss. 6. № 1112. DOI: 10.3390/met13061112

47. *Lifen Yang, Cuicui Li, Dashan Wang et al.* Leaching ion adsorption rare earth by aluminum sulfate for increasing efficiency and lowering the environmental impact // Journal of Rare Earths. 2019. Vol. 37. Iss. 4. P. 429-436. DOI: 10.1016/j.jre.2018.08.012

48. *Zhi Zhao, Denghong Wang, Leon Bagas, Zhenyu Chen.* Geochemical and REE mineralogical characteristics of the Zhaibei Granite in Jiangxi Province, southern China, and a model for the genesis of ion-adsorption REE deposits // Ore Geology Reviews. 2022. Vol. 140. № 104579. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104579

49. *Nesbitt H.W.* Chapter 6 – Diagenesis and metasomatism of weathering profiles, with emphasis on Precambrian paleosols // Developments in Earth Surface Processes. Elsevier, 1992. Vol. 2: Weathering, Soils & Paleosols. P. 127-152. DOI: 10.1016/B978-0-444-89198-3.50011-8

50. *Chaoxi Fan, Cheng Xu, Aiguo Shi et al.* Origin of heavy rare earth elements in highly fractionated peraluminous granites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2023. Vol. 343. P. 371-383. DOI: 10.1016/j.gca.2022.12.019

51. *Фелицын С.Б., Алфимова Н.А., Климова Е.В.* Фракционирование РЗЭ при кислотном выщелачивании гранитоидов // Литология и полезные ископаемые. 2011. № 4. С. 439-442.

52. *Дубинин А.В.* Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.

53. Developments in Geochemistry / *P.Henderson*. Elsevier, 1984. Vol. 2: Rare Earth Element Geochemistry. 522 p.

54. *Матреничев В.А., Климова Е.В.* Экспериментальное моделирование условий формирования докембрийских кор выветривания. Особенности дренажных растворов и перераспределение лантаноидов в гипергенном профиле // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2017. Т. 62. № 4. С. 389-408. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2017.405

55. *De Baar H.J.W., Bacon M.P., Brewer P.G., Bruland K.W.* Rare earth elements in the Pacific and Atlantic Oceans // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1985. Vol. 49. Iss. 9. P. 1943-1959. DOI: 10.1016/0016-7037(85)90089-4

56. *Li M.Y.H., Mei-Fu Zhou, Williams-Jones A.E.* Controls on the Dynamics of Rare Earth Elements During Subtropical Hillslope Processes and Formation of Regolith-Hosted Deposits // Economic Geology. 2020. Vol. 115. № 5. P. 1097-1118. DOI: 10.5382/econgeo.4727

57. *Ni Su, Shouye Yang, Yulong Guo et al.* Revisit of rare earth element fractionation during chemical weathering and river sediment transport // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2017. Vol. 18. Iss. 3. P. 935-955. DOI: 10.1002/2016GC006659

***Авторы*: Медет Адилгазиевич Джунусов,** *PhD, пост-докторант* (*Назарбаевский университет, Астана, Казахстан*), *https://orcid.org/0000-0002-1379-5952*, **Камал Радж Регми,** *PhD, доцент* (*Назарбаевский университет, Астана, Казахстан*), *https://orcid.org/0000-0003-1207-9118*, **Екатерина Владимировна Климова,** *младший научный сотрудник* (*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия*), *katya_kli@list.ru*, *https://orcid.org/0000-0002-9771-9518*, **Александр Владиславович Резник,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник* (*Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия*), *http://orcid.org/0000-0002-0077-3404*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0