

**РЕДКОЗЕМЕЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В АРГИЛЛИЗИРОВАННЫХ ГРАНИТАХ  
ЮЖНОГО ПРИМОРЬЯ (НОВЫЕ ДАННЫЕ)**

*А.А. Черепанов, Н.В. Бердников, И.А. Астапов*

*ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000;  
e-mail: [nick@itig.as.khb.ru](mailto:nick@itig.as.khb.ru)*

Поступила в редакцию 29 марта 2021 г.

Редкоземельное оруденение в выветрелых гранитах Приморья локализуется в деформированных новейшей тектоникой и проработанных аргиллизитовым метасоматозом породах фундамента и обрамления угленосных впадин. Показано, что глинистый материал из зон интенсивной аргиллизации может служить легко обогатимым источником дефицитных редкоземельных элементов и иттрия. Ионно-сорбционная и карбонатная формы нахождения в них РЗЭ+У в совокупности с глинистым составом большей части руд позволяет использовать при обогащении методы кучного выщелачивания дешевыми и малотоксичными солевыми и солянокислыми растворами.

**Ключевые слова:** редкоземельные элементы, граниты, зоны аргиллизации, гидрофосфаты, фторкарбонаты, Приморье, Дальний Восток России.

Обеспеченность российской промышленности собственными ресурсами редкоземельных элементов (РЗЭ) может быть повышена за счет открытия новых территориально доступных месторождений с легко обогатимыми рудами. Предварительные исследования [10] показали, что зоны интенсивной аргиллизации, наложенные на выветрелые магматические и метаморфические породы южного Приморья, содержат повышенные концентрации РЗЭ в ионно-сорбционной форме. Такие руды могут быть эффективно переработаны с применением достаточно простой и дешевой технологии [12, 13].

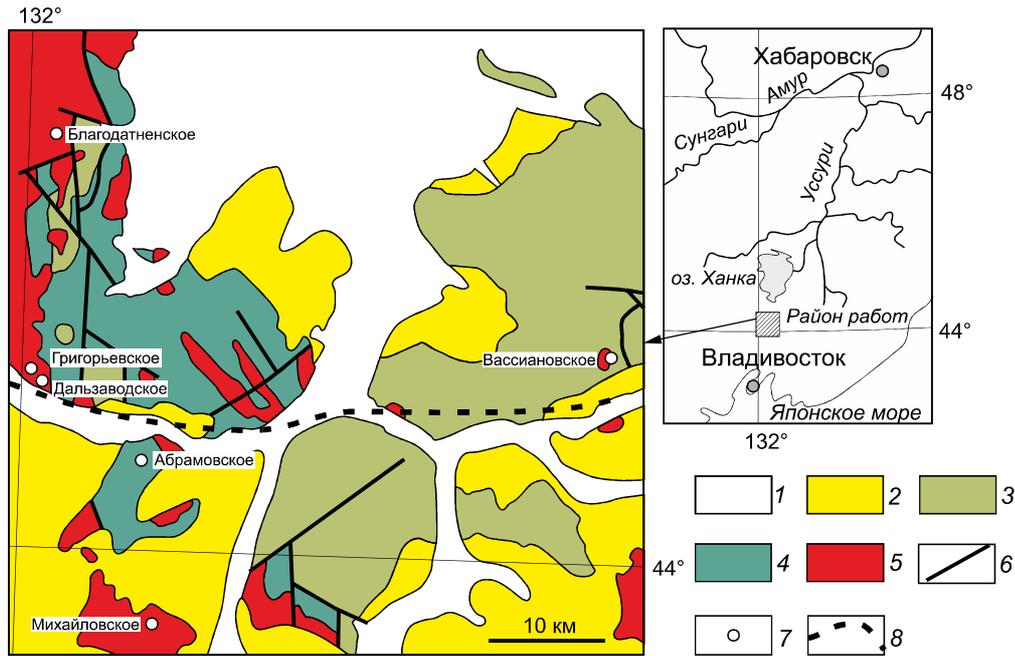
Потенциально перспективные проявления редкоземельной минерализации обнаружены и предварительно изучены в Вознесенском и Синегорском рудных районах южной части Приморского края ([5, 8–10], материалы поисково-разведочных работ ВСЕГЕИ, ИМГРЭ, Приморгеология 2008, 2014 гг.). Они локализованы в породах кайнозойских угленосных впадин, вмещающих Павловское, Раковское, Ретиховское и Ванчинское месторождения углей. В фундаменте впадин это аргиллизированные базитовые дайки, гидротермальные брекчии, алевропесчаники и граниты, в наполнении впадин – стратиформные горизонты в угольных пластах [5]. По данным [5, 7], в Абрамовском, Григорьевском и Чапаевском проявлениях редкоземельная минерализация представлена водными карбонатами, фторкарбонатами,

фосфатами и оксидами РЗЭ. Руды проявлений легко обогатимы, преимущественно сорбционные [5, 9], содержания РЗЭ+У достигают 11.2 мас. %. На проявлениях проведены поисково-оценочные работы. Ресурсы категорий Р1 и Р2 составили на Абрамовском проявлении 0.35 тыс. т, на Григорьевском – 0.45 тыс. т, на Чапаевском – 20.39 тыс. т РЗЭ+У. Кроме того, заслуживают внимания проявления РЗЭ в зонах интенсивной аргиллизации, наложенных на выветрелые граниты обрамления угленосных впадин, в аргиллизированных прослоях туфов и в зонах эксфильтрационной минерализации в угольных пластах перечисленных выше месторождений [14].

Настоящая статья содержит новые данные исследования редкоземельной минерализации в зонах интенсивной аргиллизации, наложенных на выветрелые породы района. Обсуждаются формы нахождения РЗЭ в рудах, особенности их образования и возможность обогащения.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Пробоподготовка и анализ каменного материала проведены в Хабаровском инновационно-аналитическом центре ИТиГ ДВО РАН, Хабаровск. Методом ICP-MS (прибор ELAN 9000, Перкин Элмер, Канада, аналитик В.О. Крутикова) определены концентрации редкоземельных элементов и иттрия, с помощью электронной сканирующей микроскопии (микроскоп



**Рис. 1.** Геологическая схема района проявлений редкоземельной минерализации, по [2], с упрощениями.

1 – четвертичные отложения; 2 – неогеновые вулканогенно-осадочные толщи; 3 – палеозойские вулканогенно-осадочные толщи; 4 – кембрийские карбонатно-сланцевые толщи; 5 – палеозойские граниты; 6 – разломы; 7 – проявления РЗЭ+У; 8 – зона Вассиановского глубинного разлома.

VEGA 3 LMN, TESCAN, Чехия, с энергодисперсионным спектрометром X-max 80, Оксфорд, Великобритания, оператор Н.С. Коновалова) изучены состав глинистого материала, формы выделения и состав минералов-носителей полезных компонентов. Рентгенофазовые исследования продуктов выветривания проведены с помощью дифрактометра Miniflex II (Ригаку, Япония,  $\text{CuK}\alpha$ -излучение). Для идентификации глинистых минералов применялась съемка спектра на углах  $5\text{--}10^\circ$   $2\theta$  с малым шагом сканирования и увеличенной экспозицией в точке (шаг сканирования  $0.025^\circ$ , экспозиция 5 с). При составлении спайдер-диаграмм распределения РЗЭ+У нормирование производилось на средние значения концентраций в верхних горизонтах континентальной коры (AUCC) [17].

#### ПРОЯВЛЕНИЯ РЗЭ В ЗОНАХ ИНТЕНСИВНОЙ АРГИЛЛИЗАЦИИ

Изученные проявления редкоземельной минерализации приурочены к южной части Ханкайского массива (территория Вознесенского и Синегорского рудных районов, рис. 1).

Здесь известны уран-редкометалльно-редкоземельные проявления каледонского возраста. Они распространены в пределах Вознесенской и Куйбышевской интрузивно-купольных структур, сформированных силурийскими лейкогранитами, специализированными на широкий спектр элементов (РЗЭ+У, U, Th, Ta, Nb и др.) [1, 3]. Выявлены также многочисленные проявления плейстоценового уран-редкоземельного оруденения [3] в ареалах влияния Эхилкан-Ханкайского и Вассиановского долгоживущих глубинных раз-

ломов (рис. 1). По данным [5], эти проявления могут содержать промышленную РЗЭ+У минерализацию.

Проявления контролируются малоамплитудными разрывными дислокациями, наложенными на кору выветривания гранитов, начавшую формироваться еще до углеобразования [3]. Разрывы инициируют развитие в выветрелых гранитах и секущих их базитовых дайках наложенных зон интенсивной аргиллизации. Большинство таких зон крутонаклонные ( $60\text{--}80^\circ$ ), их мощность варьирует от первых десятков сантиметров до 12 м, протяженность достигает 200 м. С глубиной мощность зон уменьшается вплоть до выклинивания, к поверхности происходит их ветвление, изменение простирания и углов падения вплоть до горизонтальных. В осевой части зон фиксируются трещины с зеркалами и бороздами скольжения, от оси к периферии зон интенсивность аргиллизации снижается. В пределах зон полевой шпат гранитов частично или полностью замещается белым или фиштакково-зеленым глинистым материалом, который вдоль осевых трещин нередко образует сплошные скопления мощностью 5–10 см.

В пределах изученной территории нами опробовано 5 проявлений с редкоземельной минерализацией, представленных зонами интенсивной аргиллизации, наложенных на выветрелые граниты (рис. 1). Название Григорьевскому проявлению дано изучавшими его геологами [9, 10], названия других проявлений, используемые в данной статье, даны нами по названиям близлежащих населенных пунктов.

Вассиановское проявление расположено в 15 км южнее с. Вассиановка в карьерной выработке



**Рис. 2.** Зоны интенсивной аргиллизации в выветрелых гранитах Вассиановского (а) и Дальзаводского (б) проявлений.

по выветрелым гранитам куйбышевского комплекса (рис. 2, а).

Граниты в пределах карьера выветрелы, осветлены и рассечены шестью зонами интенсивных вторичных изменений с трещинами и бороздами скольжения в осевой части. Мощность таких зон 2–10 м, протяженность достигает 200 м.

Григорьевское проявление вскрыто придорожными карьерами в 1 км южнее с. Григорьевка (рис. 1). Для обнажающихся здесь гранитов гродековского комплекса, рассеченных дайками базитов, характерны широкие (30–40 м) области выветривания протяженностью более 250 м. В пределах областей выветривания развиты субширотные зоны интенсивной аргиллизации мощностью 3–5 м, выделяющиеся белесой окраской, трещинами и зеркалами скольжения. В восточном направлении мощность таких зон уменьшается.

Дальзаводское проявление расположено на северном борту Раковской впадины (рис. 1) в выветрелых гранитах гродековского комплекса. В них также зафиксирована зона интенсивной аргиллизации северо-западного простирания мощностью от 1 до 8 м. В осевой части зоны проходит трещина с зеркалами скольжения, дроблением гранитного материала и прерывистыми полосками зеленоватой глинки мощностью 2–5 см (рис. 2, б). Зона пересекается более поздней зоной меньшей мощности.

Благодатненское проявление расположено в 3 км севернее с. Благодатное. Здесь придорожным карьером вскрыты слабо выветрелые граниты вознесенского комплекса, пересеченные полого залегающей

дайкой базитов. В гранитах и дайке развиты субвертикальные зоны интенсивной аргиллизации и трещиноватости с зеркалами скольжения мощностью 0.5–2 м.

Проявление Михайловское расположено на южной окраине Раковской угленосной впадины (рис. 1). Здесь выветрелые граниты гродековского комплекса пересекаются маломощными зонками интенсивной аргиллизации с зеркалами скольжения.

#### СОДЕРЖАНИЕ РЗЭ+У В ПОРОДАХ ИЗУЧЕННЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ

В таблице 1 приведены содержания РЗЭ+У в породах из зон вторичных изменений изученных проявлений.

Содержание РЗЭ+У в выветрелых гранитах Вассиановского проявления составляет 187–291 г/т, в материале из зон интенсивной аргиллизации оно возрастает до 260–476 г/т. При этом на долю иттрия в гранитах и глинистом материале приходится 24 и 24 %, церия 28 и 35 %, легких РЗЭ (сумма La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) 61 и 61 %, тяжелых РЗЭ (сумма Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) 15 и 16 % от суммы РЗЭ+У, соответственно. Для распределения РЗЭ+У в этих породах характерно незначительное обогащение относительно АУСС тяжелыми РЗЭ и У и отчетливый европиевый минимум (рис. 3, а). Глинистый материал из зон интенсивной аргиллизации содержит больше РЗЭ (особенно Ce), чем выветрелые граниты. Характер распределения РЗЭ в породах проявления сходен с таковым для кор выветривания гранитов месторождения Лонгнан в Южном Китае [10, 13].

Таблица 1. Средние содержания РЗЭ+У (г/т) в изученных проявлениях.

Элемент	Васиановское		Григорьевское		Дальзаводское		Благодатненское	Михайловское
	1 (3)	2 (5)	3 (5)	4 (2)	5 (5)	6 (2)	7 (4)	8 (3)
La	44.13	52.87	30.62	342.35	31.17	281.32	39.37	33.57
Ce	72.07	138.44	64.79	588.23	39.52	322.38	75.84	66.12
Pr	8.58	10.52	7.65	79.46	7.93	69.81	9.66	8.33
Nd	25.62	32.59	26.33	287.40	30.22	267.72	35.78	27.76
Sm	5.81	7.74	5.41	58.21	6.37	53.05	6.79	6.11
Eu	0.06	0.13	0.25	3.61	0.79	5.27	0.62	0.15
Gd	6.72	9.85	6.00	63.26	7.05	52.34	7.13	6.99
Tb	1.31	2.01	0.92	8.88	1.09	6.97	0.97	1.11
Dy	8.68	15.17	5.42	44.51	6.27	32.57	5.00	6.74
Ho	2.19	3.54	1.13	8.26	1.32	5.68	1.03	1.41
Er	7.58	12.63	3.55	22.20	3.91	14.52	3.05	4.51
Tm	1.34	2.24	0.57	2.90	0.60	1.80	0.43	0.72
Yb	8.33	15.88	3.87	17.61	3.94	10.74	2.79	4.96
Lu	1.37	2.23	0.59	2.62	0.62	1.56	0.42	0.74
Y	61.41	94.09	29.22	234.81	38.50	146.04	27.60	37.36
РЗЭ+У	255.21	399.92	186.32	1764.31	179.29	1271.76	216.48	206.60

Примечание. 1, 3, 5, 7, 8 – выветрелые граниты; 2, 4, 6 – пробы из зон интенсивной аргиллизации. Цифры в скобках – количество проб.

Отобранные в карьерах Григорьевского проявления пробы выветрелых гранитов содержат 97–270 г/т, а материал из зон интенсивной аргиллизации 519–3170 г/т РЗЭ+У. Иттрий в гранитах и глинистом материале составляет 16 и 13 %, церий 35 и 33 %, легкие РЗЭ 73 и 77 %, тяжелые РЗЭ 12 и 10 % от суммы РЗЭ+У, соответственно. Диаграммы распределения РЗЭ+У характеризуются значительным обогащением глинистого материала из зон интенсивной аргиллизации относительно АУСС всеми РЗЭ и иттрием и отрицательной аномалией Eu (рис. 3, б).

Содержание РЗЭ+У в выветрелых гранитах Дальзаводского проявления составляет 97–210 г/т, а в глинистом материале из зон интенсивной аргиллизации 1116–1426 г/т. Концентрация иттрия в выветрелых гранитах и глинистом материале составляет 2 и 11 %, церия 22 и 25 %, легких РЗЭ 65 и 79 %, тяжелых РЗЭ 14 и 10 % от суммы РЗЭ+У, соответственно. Характер распределения РЗЭ+У в этих породах сходен с таковым для пород Григорьевского проявления (рис. 3, в).

Количество РЗЭ+У в аргиллизированных гранитах Благодатненского и Михайловского проявлений достигает 318 и 230 г/т, доля иттрия составляет в них 13 и 18 %, церия 35 и 32 %, легких РЗЭ 78 и 69 %, тяжелых РЗЭ 10 и 13 % от суммы РЗЭ+У, соответственно. Для распределения РЗЭ+У характерно наличие отрицательной европиевой аномалии, незначительное обогащение тяжелыми РЗЭ относительно АУСС (рис. 3, г) и общее сходство с таковым для месторождений из коры выветривания провинции Лонгнан в КНР [10, 13].

#### ГЛИНИСТЫЙ МАТЕРИАЛ И МИНЕРАЛЫ-НОСИТЕЛИ РЗЭ

Основным фактором выветривания гранитов изученных проявлений является замещение полевого шпата глинистыми минералами, среди которых рентгенофазовым анализом диагностированы вермикулит, монтмориллонит и каолинит (рис. 4). По-видимому, изученный глинистый материал представляет собой смесь как этих, так и, возможно, других глинистых минералов [15], к которым наряду с породообразующими минералами гранитов примешиваются гидроксиды железа и марганца.

Для химического состава глинистого материала характерно значительное преобладание калия над натрием (табл. 2).

По данным ICP-MS анализа, этот материал содержит на порядок больше РЗЭ+У, чем выветрелые граниты, по которым развиваются зоны интенсивной аргиллизации (260–3170 и 97–318 г/т, соответственно). В нем присутствуют две группы содержащих РЗЭ+У минералов: первично-магматическая, образовавшаяся при кристаллизации гранитов, и вторичная, образовавшаяся при их выветривании. К первой группе относятся акцессорные циркон (У до 2.4 %), монацит и ксенотим (рис. 5, а). РЗЭ+У минералы второй группы концентрируются в глинистом материале, где ассоциируют с глинистыми минералами, гидроксидами железа и марганца (рис. 5, б–е). Они в виде мелких зерен (от первых микрометров до 50 мкм) и агрегатов распределены в массе породы (рис. 5, б), образуют отдельные скопления в межзерновом про-

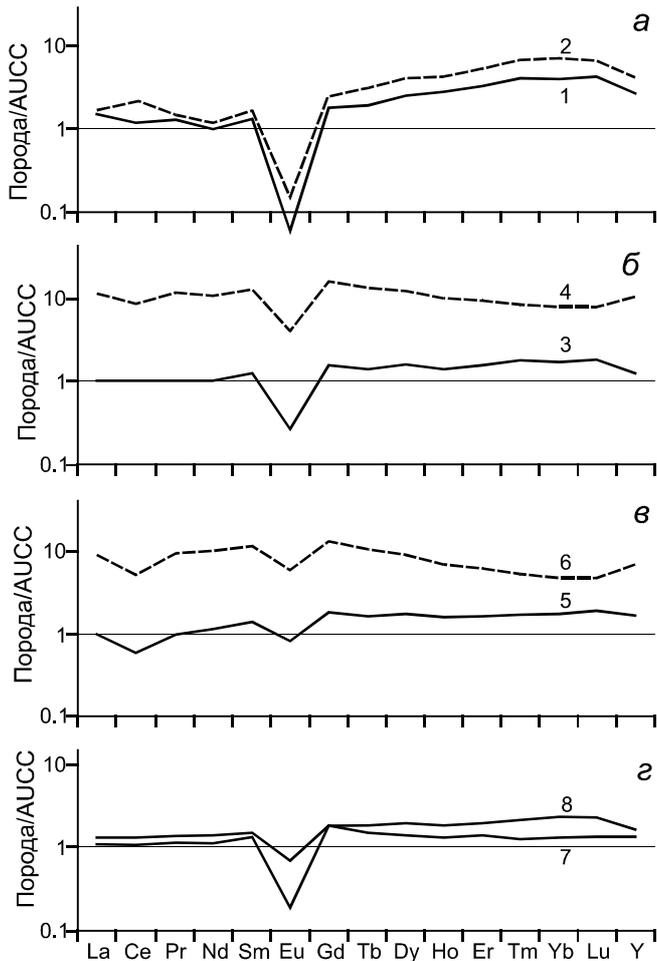


Рис. 3. Спайдер-диаграммы распределения РЗЭ+У в породах изученных проявлений.

а – Вассиановское, б – Григорьевское, в – Дальзаводское, г – Благодатненское и Михайловское. Сплошные линии – выветрелые граниты, пунктирные – материал из зон интенсивной аргиллизации. Цифры у линий соответствуют номерам столбцов в табл. 1.

странстве, иногда цепочки зерен вдоль микротрещин (рис. 5, в), заполненных глинистым материалом. На Дальзаводском проявлении зафиксированы скопления микрокристаллов игольчатой формы, отложившихся в полости (рис. 5, з, д). Местами отмечается рост нитевидных и удлинённых новообразований на крупных зернах, представляющих собой более позднюю генерацию этих минералов (рис. 5, е).

В таблице 3 приведен химический состав зерен РЗЭ+У содержащих минералов по данным энергодисперсионного микроанализа. Как видно из таблицы, в состав этих минералов нередко входят уран и торий.

Учитывая детальные исследования подобных образований [5–8], мы предполагаем, что изученные нами минералы относятся к водным фосфатам, которые при высоком содержании иттрия соответствуют чёрчиту, и к водным фторкарбонатам типа бастнезита с высоким содержанием церия и примесью других РЗЭ (лантан-неодимовый тип). Высокие валовые содержания РЗЭ+У в глинистом материале свидетельствуют в пользу присутствия в нем ионно-сорбционной формы РЗЭ.

#### ИСТОЧНИК И ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕЗИСА РЕДКОЗЕМЕЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

В Синегорском районе известны проявления уран-редкометалльно-редкоземельной минерализации, образовавшиеся в процессе внедрения силурийских лейкогранитов в протерозойские-раннепалеозойские метаморфиты [2, 3]. В кайнозое этот комплекс пород служил фундаментом для формирующихся здесь угленосных впадин. Образование впадин сопровождалось тектоническими подвижками, наиболее интенсивно проявившимися в их обрамлении.

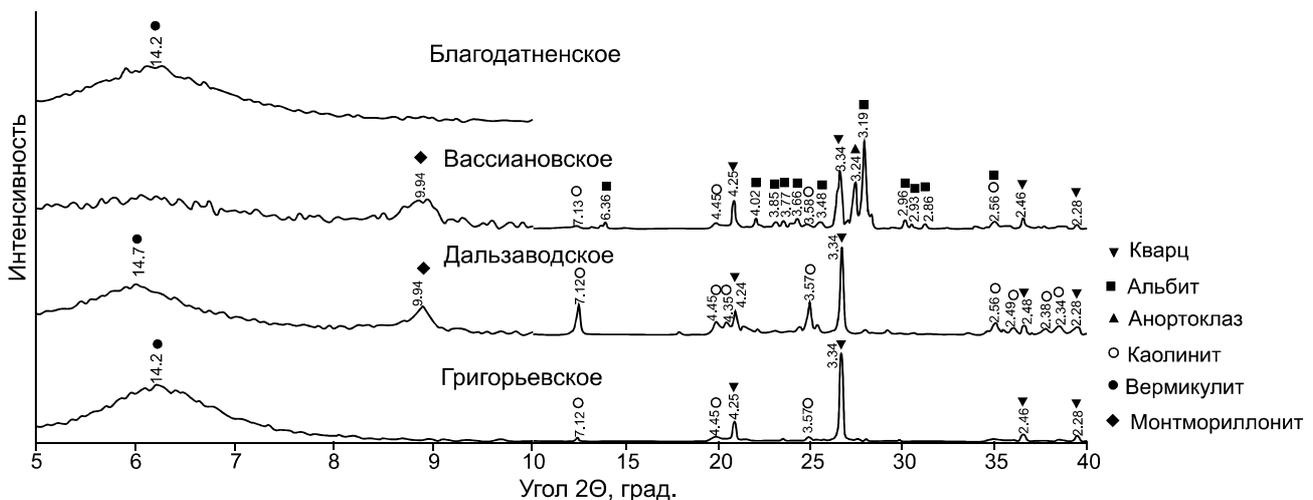


Рис. 4. Рентгенограммы глинистого материала из зон интенсивной аргиллизации.

Цифры у символов минералов – межплоскостные расстояния, Å.

Таблица 2. Состав глинистого материала из зон интенсивной аргиллизации по данным энергодисперсионного микроанализа.

Проявления	Содержание, вес. %							
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Вассиановское	55.69	0.00	30.95	3.02	2.71	0.34	0.91	8.18
Григорьевское	68.55	0.81	18.14	8.95	1.07	1.16	0.09	1.26
Благодатненское	58.81	2.67	21.85	9.07	2.21	1.39	0.50	3.38
Дальзаводское	60.74	0.46	26.11	5.14	0.60	2.56	1.68	3.73

Таблица 3. Химический состав зерен РЗЭ+У содержащих минералов из глинистого материала изученных проявлений (вес. %).

Элементы	Вассиановское		Благодатненское		Григорьевское		Михайловское		Дальзаводское	
C	8.11	8.77	7.96		9.43		8.77		8.90	8.64
O	30.11	44.67	30.74		37.64		28.44		44.05	31.30
F	5.81	-	-		-		-		-	-
P	-	8.05	10.69		8.80		8.45		6.62	10.66
Al	3.98	5.94	0.69		0.85		1.85		2.06	
Si	3.96	6.74	1.57		2.76		4.31		2.74	2.07
Ca	-	-	-		2.18		1.51		1.03	1.64
La	12.59	-	11.92		4.42		9.82		5.06	13.02
Ce	24.17	-	22.36		11.21		9.47		7.70	-
Pr	1.88	-	1.70		1.04		3.37		1.53	5.00
Nd	7.06	-	8.45		4.60		12.19		5.77	19.19
Sm	1.44	-	1.37		-		2.70		1.21	4.04
Gd	0.89	1.12	1.21		-		1.74		0.90	2.02
Dy	-	3.09	-		-		-		-	-
Er	-	2.47	-		-		-		-	-
Yb	-	2.68	-		-		-		-	-
Y	-	16.47	-		-		-		1.42	-
Th	-	-	-		11.43		5.85		3.21	-
U	-	-	-		3.27		-		1.58	-

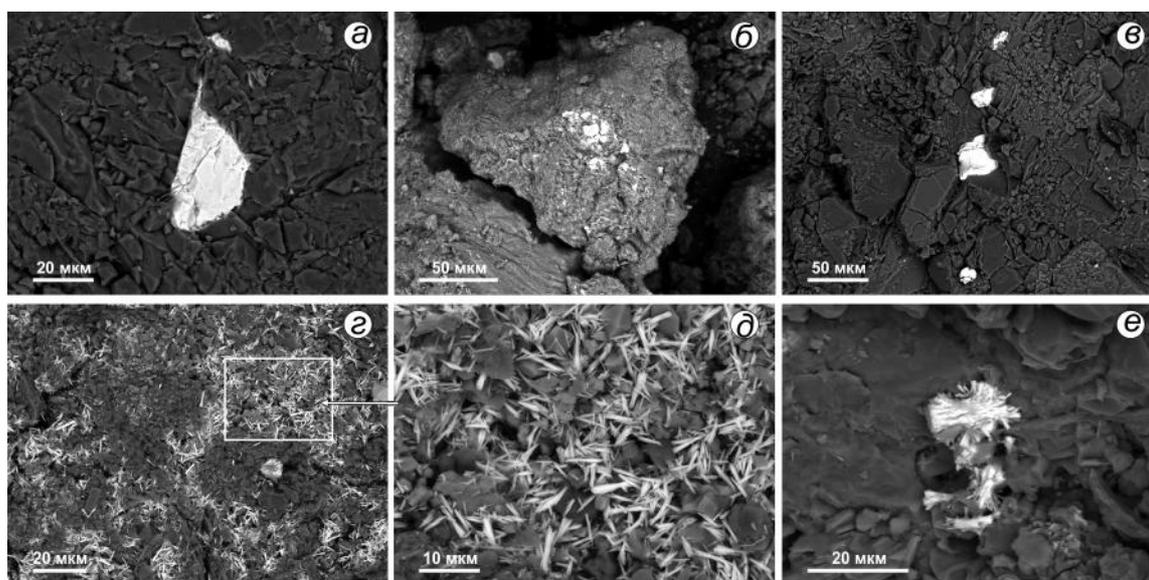


Рис. 5. Минералы-носители РЗЭ(+У).

*a* – зерно монацита в ортоклазе гранита; *б* – микрозерна и агрегаты; *в* – зерна вдоль микротрещины; *г*, *д* – игольчатые кристаллы; *е* – удлиненные новообразования поздней генерации. СЭМ изображения в режиме обратно рассеянных электронов.

Таблица 4. Результаты извлечения РЗЭ+У соляной кислотой из рудного материала изученных проявлений (г/т).

№ серии опытов	Количество опытов	Среднее содержание РЗЭ+У в глинистом материале	Среднее содержание РЗЭ+У в осадке	Среднее содержание РЗЭ+У в фильтрате	Средняя извлекаемость, %
1	8	200.7	104.0	96.6	50.9
2	6	409.2	122.0	287.2	69.5
3	6	2206.3	1293.6	912.6	47.0

Движение растворов по системам трещин, сопровождающим подвижки, приводило к ремобилизации металлов из герцинских проявлений и к их осаждению в приповерхностных условиях в системах трещинно-инфильтрационного и палеодолинного типа [2, 16]. Осаждению способствовало смешение металлоносных растворов с поверхностными водами и изменение их состава при взаимодействии с вмещающими алюмосиликатными породами [16].

Инфильтрация растворов во вмещающие граниты сопровождалась интенсивной аргиллизацией последних. При этом в зонах аргиллизации формировались богатые РЗЭ+У вторичные минералы (гидрофосфаты и фторкарбонаты), а глинистое вещество аргиллизитов и позднейшие гидроксиды Mn и Fe концентрировали РЗЭ в ионно-сорбционной форме [4, 15]. По-видимому, эти процессы происходили пульсационно и характеризовались сменой физико-химических характеристик минералообразующих растворов, что привело к многообразию минеральных форм (рис. 5).

#### О ВОЗМОЖНОСТИ ОБОГАЩЕНИЯ И ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЗЭ ИЗ РУД ПРОЯВЛЕНИЙ

Тесная ассоциация минералов РЗЭ+У с глинистыми минералами обуславливает перспективу эффективного обогащения рудного материала изученных проявлений. Глинистый материал легко отделяется от минералов гранитов при стандартном дроблении до +2.0 мм и концентрируется в легкой фракции после гравитационного разделения. Как показали наши исследования, глинистый материал содержит на порядок больше РЗЭ+У, чем вмещающие граниты. Доля первичных монацита и ксенотима (аксессуарные гранитов) в этом материале не превышает 1–2 % [3], а более 85 % РЗЭ+У в нем находится в легко вскрываемой форме (гидрофосфаты, фторкарбонаты, оксиды, ионно-сорбционные композиты).

По данным [5], материал выветривания гранитов Приморья близок к ионно-сорбционным рудам Южного Китая и может обогащаться по упрощенной технологии [12, 13]. Его обработка одномолярной соляной кислотой дала извлечение в раствор от 50 до 100 % РЗЭ при модальном значении 65–80 % [5–7].

Для оценки извлекаемости РЗЭ+У из глинистого материала изученных проявлений навески 10 г исти-

рались, перемешивались и заливались одномолярной соляной кислотой на сутки. Анализу подвергались исходные пробы, осадок после фильтрования и фильтрат. Разница между содержанием РЗЭ+У в исходной пробе и в осадке считалась показателем извлечения. Анализ фильтрата использовался для контроля. Извлечение РЗЭ+У из гидрослюдистого материала в солянокислый раствор по результатам опытов составило от 40 до 95 %, усредненные результаты приведены в табл. 4.

В пробах с относительно невысоким содержанием РЗЭ+У (серии опытов № 1 и 2) извлекаемость составила 50.9–69.5 %, при этом ее значения в конкретных пробах отличались незначительно. В серии опытов № 3 извлекаемость варьировала в широких пределах от 19 до 90 %. В этой серии для проб с низким показателем извлечения характерно преобладание среди минералов РЗЭ+У гидрофосфатов, растворимость которых в соляной кислоте ниже, чем у фторкарбонатов. Эти же пробы имели наибольшее содержание глинистых минералов, которые могли сорбировать РЗЭ+У из раствора («обратное извлечение»). Это подтверждается наличием повышенных количеств РЗЭ+У в фильтрате после повторной обработки осадка соляной кислотой.

Бифторидная обработка, показавшая хорошие результаты по извлечению РЗЭ+У из углеродистых сланцев [11], привела к извлечению из проб глинистого концентрата от 40 до 86 % РЗЭ+У.

#### ВЫВОДЫ

Редкоземельное оруденение в выветрелых гранитах Приморья локализуется в деформированных новейшей тектоникой и проработанных аргиллизитовым метасоматозом породах фундамента и обрамления угленосных впадин. РЗЭ+У в основном привносятся из герцинских проявлений Синегорской рудно-магматической системы с осаждением в приповерхностных частях трещинно-инфильтрационной сети [3, 16]. Образующиеся при этом зоны интенсивной аргиллизации с редкоземельной минерализацией могут служить легко обогатимым источником дефицитных редкоземельных элементов и иттрия. Ионно-сорбционная и карбонатная формы нахождения в них РЗЭ+У в совокупности с глинистым составом большей части руд позволяет использовать при этом методы кучного

выщелачивания дешевыми и малотоксичными солевыми и солянокислыми растворами. Отсутствие вредных примесей, низкие содержания радиоактивных элементов и малозатратная технология обогащения позволяет рассматривать их в качестве перспективного сырья для получения иттрий-редкоземельного концентрата.

Приведенные данные свидетельствуют в пользу целесообразности дополнительного геологического изучения зоны Вассиановского разлома с аргиллизированными гранитами. Небольшие ресурсы локализованных здесь проявлений могут служить источником РЗЭ+У для малых предприятий, способных освоить малозатратные технологии обогащения.

Авторы благодарны А.А. Коковкину за любезно предоставленные образцы для исследований и ценные консультации по геологическому положению изученных зон вторичных изменений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горошко М.В., Малышев Ю.Ф., Кирилов В.Е. Металлогения урана Дальнего Востока России. М.: Наука, 2006. 372 с.
2. Государственная геологическая карта РФ. 1:500 000. ФГУП Приморская ГСЭ. 2003.
3. Коковкин А.А. Эоцен-голоценовая эволюция Синегорской рудно-магматической системы (Южное Приморье) // Региональная геология и металлогения. 2014. № 59. С. 80–88.
4. Плюснин А.М. Редкие земли в приповерхностных и подземных водах на территории размещения вольфрамодобывающего производства Забайкалья // Геохимия. 2020. Т. 65, № 7. С. 711–728.
5. Середин В.В. Au-PGE минерализация на территории Павловского буроугольного месторождения // Геология руд. месторождений. 2004. Т. 46, № 1. С. 43–73.
6. Середин В.В., Кременецкий А.А., Трач Г.Н., Коваленко С.В., Семенов Е.Ф. Новый потенциально промышленный тип иттриевоземельной минерализации в Юго-западном Приморье // Разведка и охрана недр. 2006. № 9–10. С. 37–42.
7. Середин В.В., Кременецкий А.А., Трач Г.Н., Томсон И.Н. Новые данные об иттриевоземельных гидротермальных рудах с ураганскими концентрациями РЗЭ // Докл. РАН. 2009. Т. 425, № 3. С. 378–383.
8. Середин В.В., Чекрыжев И.Ю. Рудоносность Ванчинского грабена (Приморье) // Геология руд. месторождений. 2011. Т. 53, № 3. С. 230–249.
9. Чекрыжев И.Ю., Трач Г.Н., Нечаев В.П., Высоцкий С.В., Трач Д.А. Редкоземельное оруденение в угленосных районах Южного Приморья // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит: Материалы III Всерос. конф. с междунар. участием, г. Владивосток, 20–22 сентября 2016. Владивосток, 2016. С. 381–383.
10. Чекрыжев И.Ю., Трач Г.Н., Нечаев В.П., Трач Д.А. Проявления редкоземельной минерализации в южной части Приморского края // Горный журнал. 2018. № 9. С. 35–40.
11. Черепанов А.А., Гостищев В.В. Углеродистые сланцы Буреинского массива как возможный источник редкоземельных металлов // Руды и металлы. 2017. № 3. С. 68–76.
12. Черепанов А.А. Оценка возможности применения технологии переработки «ионных» руд для извлечения редкоземельных элементов из пород Дальнего Востока Азии: Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии: X Косыгинские чтения. Материалы Всерос. конф. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2019. С. 236–239.
13. Bao Z., Zhao Z. Geochemistry and mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China // Ore Geology Reviews. 2008. V. 33. P. 519–535.
14. Dai S., Chekryzhov I.Yu., Seredin V.V., Nechaev V.P., Wang X., Ward C.R., Hower J.C., Graham I.T., Ren D. Metalliferous coal deposits in East Asia (Primorye of Russia and South China): A review of geodynamic controls and styles of mineralization // Gondwana Research, 2016. V. 29. P. 60–82.
15. Mukai H., Kon Y., Sanematsu K., Takahashi Y., Ito M. Microscopic analyses of weathered granite in ion-adsorption rare earth deposit of Jianxi Province, China. Scientific Reports, 2020. 10(1). doi:10.1038/s41598-020-76981-8
16. Nechaev V.P., Chekryzhov I.Yu., Vysotskiy S.V., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Tarasenko I.A., Agoshkov A.I. Isotopic signatures of REY mineralization associated with lignite basins in South Primorye, Russian Far East. Ore Geology Reviews. 2018. 103. P. 68–77.
17. Taylor S.R., McLennan S.M. The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks // Phil. Trans. R. Soc. 1981. A301. P. 381–399.

*Рекомендована к печати А.А. Сорокиным  
после доработки 15.06.2021 г.  
принята к печати 11.11.2021 г.*

*A.A. Cherepanov, N.V. Berdnikov, I.A. Astapov*

#### **Rare earth element mineralization in argillized granites of southern Primorye (new data)**

Rare earth element (REE) mineralization in the weathered granites of Primorye is localized in the basement rocks and rocks along the periphery of the coal-bearing basins, which have been recently tectonically faulted and folded and have undergone argillite metasomatism. It was shown that the clay material from the zones of intense argillization can be a source of scarce REE and yttrium. The ion-sorption and carbonate forms of REE+Y in them in combination with the clay composition of most of the ores make it possible to use cheap and low-toxic salt and hydrochloric acid solutions during heap leaching.

**Key words:** rare earth elements, granites, argillization zones, hydrogen phosphates, fluorocarbonates, Primorye, Russian Far East.