

Научная статья

УДК 553.08

DOI: 10.31857/S0869769824050044

EDN: HPVXEC

Формы нахождения редкоземельных элементов в туфогенных породах из районов активной геофагии в горах Сихотэ-Алиня (Приморский край, Россия)

А.В. Руслан[✉], И.Ю. Чекрыжов, А.М. Паничев, Н.Ю. Попов

Алексей Валерьевич Руслан

кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

aleksei_ruslan@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-4034-2251>

Игорь Юрьевич Чекрыжов

научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

chekr2004@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-0319-8759>

Александр Михайлович Паничев

доктор биологических наук, кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

sikhote@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-5223-443X>

Никита Юрьевич Попов

младший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

popov_ni22@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3401-2849>

Аннотация. На сканирующем электронном микроскопе с аналитической приставкой проведен анализ основных минеральных форм нахождения редкоземельных элементов (РЗЭ) в образцах туфов из трех районов активной геофагии в пределах Сихотэ-Алиня. Установлен рассеянно-вкрапленный характер концентрации фаз РЗЭ размером от единиц до сотен микрометров во вмещающей, преимущественно алюмосиликатной, матрице. Выявленные РЗЭ-фазы представлены фосфатами, силикатами и карбонатами с явным преобладанием в них элементов цериевой подгруппы. Выделены две генерации минералов РЗЭ: эндогенная (монацит, ксенотим и алланит) и гипергенная (рабдофан, бастнезит и калкинсит).

Ключевые слова: редкоземельные элементы, туфы, геофагия, солонцы-кудуры, Сихотэ-Алинь

Для цитирования: Руслан А.В., Чекрызов И.Ю., Паничев А.М., Попов Н.Ю. Формы нахождения редкоземельных элементов в туфогенных породах из районов активной геофагии в горах Сихотэ-Алиня (Приморский край, Россия) // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 5. С. 51–61. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824050044>

Original article

Occurrence forms of rare-earth elements in tuffogenic rocks from active geofacies areas in the Sikhote-Alin Mountains (Primorsky Krai, Russia)

A.V. Ruslan, I.Yu. Chekryzhov, A.M. Panichev, N.Yu. Popov

Alexei V. Ruslan

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Junior Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
aleksei_ruslan@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-4034-2251>

Igor Yu. Chekryzhov

Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
chekr2004@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-0319-8759>

Alexander M. Panichev

Doctor of Science in Biology, Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy,
Leading Researcher
Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
sikhote@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-5223-443X>

Nikita Yu. Popov

Junior Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
popov_ni22@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-3401-2849>

Abstract. The main mineral occurrence forms of rare-earth elements (REE) in tuff samples from three areas of active geophagy at three sites within Sikhote-Alin were analyzed using scanning electron microscope with analytical attachment. It was established that the concentration of REE phases ranging in size from units to hundreds of microns in the host, mainly, aluminosilicate matrix is scattered and disseminated. The revealed REE phases are represented by phosphates, silicates and carbonates with clear predominance of cerium subgroup elements. Two generations of REE minerals are distinguished: endogenous (monazite, xenotime, and allanite) and hypergenic (rhabdophane, bastnaesite and calkinsite).

Keywords: rare-earth elements, tuffs, geophagy, mineral licks-kudurs, Sikhote-Alin

For citation: Ruslan A.V., Chekryzhov I.Yu., Panichev A.M., Popov N.Yu. Occurrence forms of rare-earth elements in tuffogenic rocks from active geofacies areas in the Sikhote-Alin Mountains (Primorsky Krai, Russia). *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(5):51–61. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824050044>

Введение

В местах регулярного поедания дикими и домашними животными горных пород формируются характерные, легко узнаваемые ландшафтные комплексы, которые в русскоязычной литературе принято называть природными солонцами. Во избежание терминологической путаницы с солонцами и солончаками из почвоведения, а также в связи с тем, что данные объекты чаще всего содержат ничтожные количества растворимых солей, с 2013 г. в научных публикациях мы используем для их обозначения термин «кудур» [1], заимствованный из лексики тюркских пастухов, или иногда двойной термин – «солонец-кудур». Производный термин «кудурит» обозначает минеральные грунты, потребляемые животными на кудурах.

Проведенные ранее исследования в Сихотэ-Алине [2] позволили выявить в пределах территории Приморского края семь районов активной геофагии, где дикие животные (преимущественно копытные) регулярно употребляют грунты (кудуриты). Общими геологическими характеристиками для всех этих районов являются наличие ранне-среднекайнозойских вулканитов риолит-дацитового состава с характерной поствулканической цеолит-сметитовой минерализацией, а также редкометалльная (в том числе редкоземельная) и золото-серебряная рудная металлогеническая специализация.

Ранее, основываясь на результатах анализа собственных, а также опубликованных данных других исследователей по геохимии кудуритов в различных регионах мира, была предложена гипотеза о том, что причина геофагии может быть как-то связана с редкоземельными элементами (РЗЭ) [3]. Позднее, после детального геолого-geoхимического изучения двух районов активной геофагии в Сихотэ-Алине нами впервые были выявлены ландшафтные аномалии РЗЭ, подтверждаемые повышенными концентрациями этих элементов в горных породах, почвах, поверхностных водах, растительности, а также в тканях животных-геофагов [4].

В настоящей статье акцентируется внимание на данных электронно-микроскопических исследований образцов туфогенных пород (слагающих природные солонцы-кудуры), собранных в трех районах на территории Сихотэ-Алиня с целью изучения форм нахождения и элементного состава РЗЭ-фаз, которые могут быть причиной отмечаемой там активной геофагии.

Краткая характеристика районов исследования

Для изучения закономерностей распределения РЗЭ в сихотэ-алинских туфогенных породах были выбраны три района активной геофагии (рис. 1, А).

Первый район находится в пределах Ванчинской вулканотектонической грабеноподобной впадины в южной части главного водораздела Сихотэ-Алиня на территории национального парка «Зов тигра» и охватывает верховья р. Милоградовка (район «Ванчин») (рис. 1, А, В). Второй район приурочен к Шандуйскому палеовулкану в центральной части Сихотэ-Алиня, большей частью на территории Сихотэ-Алинского биосферного заповедника (район «Шандуй») (рис. 1, А, Г). Третий район («Бикин») приурочен к Верхнебикинской палеовулканоструктуре в приводораздельной части рек Бикин и Максимовка. Со стороны Бикина данная территория входит в состав национального парка «Бикин».

По данным [5] чехол Ванчинской вулканотектонической впадины выполнен палеоцен-эоценовыми угленосными вулканогенно-осадочными отложениями мощностью в первые сотни метров. Они прорываются экструзиями и перекрываются небольшими покровами эоценовых риолитов, дацитов и трахиандезитов. Кайнозойские вулканогенно-осадочные отложения чехла Ванчинской впадины несогласно залегают на породах фундамента, представленных юрскими и нижнемеловыми терригенными толщами, а также позднемеловыми–раннепалеоценовыми эффузивами Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса среднего и кислого составов. В пределах Ванчинского грабена выявлена объемная цеолитизация туфогенных пород, а также многочисленные золото-серебряные, оловянные и полиметаллические рудопроявления и, кроме того, германиевая и редкоземельная минерализации в углях [6]. Здесь известны более 15 природных солонцов-кудуrow в вулканогенных породах



Рис. 1. Местоположение районов исследования и типичные природные солонцы-кудуры. А – районы исследования: 1 – «Ванчин»; 2 – «Шандуй»; 3 – «Бикин»; Б – лось и изюбры на кудуре в оглиненных туфах района «Бикин»; В – пятнистые олени на кудуре в туффитах района «Ванчин»; Г – Н.Ю. Попов на кудуре в витрокристаллических туфах района «Шандуй»

(преимущественно туффитах), регулярно посещаемых дикими копытными животными (изюбры, пятнистые олени, косули) (рис. 1, В).

Вторая исследованная область (район «Шандуй») охватывает верховья рек Заболоченная, Солонцовая и Тасжная, включая гору Солонцовая, в центральной части хребта Сихотэ-Алинь. Данная территория приурочена к руинам Солонцовского (Шандуйского) палеовулкана, слабо проявленного в современном рельефе [7]. Вулканическая постройка сложена палеоценовыми кислыми и средними эффузивами, с преобладанием их пирокластических разновидностей, вмещающих гидротермальную цеолитовую и серебряную минерализацию [8]. В районе «Шандуй» выявлено более 10 солонцов-кудуров, посещаемых изюбрами и косулями и приуроченных к обнажениям оглиненных вулканогенных пород (преобладают витрокристаллокластические туфы) (рис. 1, Г). Большинство выходов кудуритов образовалось в результате широко развитых в этом районе оползней.

Третий район исследования («Бикин») находится в северо-восточной части Приморского края, охватывая водораздельную часть главного хребта Сихотэ-Алинь в верховьях рек Бикин и Максимовка. Распространенные здесь кислые вулканы верхнемелового–раннекайнозойского возраста и, в меньшей степени, среднекайнозойские эффузивы контрастной серии, а также раннекайнозойские вулканогенно-осадочные слабоугленосные отложения формируют Верхнебикинскую палеовулканоструктуру. В пределах данного района установлены участки развития объемной цеолитизации в туфогенных породах, а также небольшие рудопроявления золота, олова и полиметаллов [9]. Здесь выявлено около 30 солонцов-кудуров (в интенсивно оглиненных обнажениях туфов и туффитов), регулярно посещаемых изюбрами, лосями и косулями (рис. 1, Б).

Практически все кудуриты в изученных районах представлены выходами цеолитизированных и оглиненных субгоризонтально слоистых вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород (витрокристаллокластические туфы, туффиты, туфоалевролиты и туфопесчаники). Витрокристаллокластические туфы риолитов состоят из уплощенных,

реже угловатых обломков разложенного вулканического стекла различной размерности. Цементирующая основная масса сложена частицами стекла псаммитовой размерности и обломками кристаллов кварца, серицитизированных зерен калиевого полевого шпата и опалитизированных чешуек биотита. Туффиты, туфопесчаники и туфоалевролиты состоят из угловатых обломков кварца, полевого шпата, вулканического стекла и редких обломков пород фундамента. Цементирующая масса сложена обломками пелитовой и алевритовой размерности. В минеральном составе туфогенных пород преобладают глинистые (преимущественно смектит) от 10 до 95% и цеолиты (преимущественно клиноптилолит и гейландит) от 10 до 60% объема. Примесь зерен кварца и полевых шпатов от 15 до 50% [2, 5, 8].

Материалы и методы

При изучении распределения редких элементов, в частности РЗЭ, в различных горных породах исследователи в большинстве случаев сталкиваются с трудностями поиска и анализа микро- и тонкодисперсных форм их выделений. В данной работе использовалась уже апробированная методика, заключающаяся в исследовании форм нахождения редких металлов в сколах и порошках пород с помощью сканирующей электронной микроскопии [10].

Материалы для лабораторных исследований были получены в ходе полевых работ в 2020–2021 гг. Всего на кудурах в трех исследованных районах было отобрано около 130 образцов вулканогенных пород.

Идентификация форм выделений РЗЭ была проведена в ЦКП ДВГИ ДВО РАН на сканирующих электронных микроскопах Tescan Lyra 3 XMN и JSM-6490LV, оснащенных аналитическими приставками (ЭДС) AZtec X-Max 80 и INCA Energy соответственно. Предварительная пробоподготовка включала в себя дробление и измельчение каменного материала, квартование и расситовку продуктов измельчения. Сканирование обособленных частиц туфогенных пород (в виде порошка разных фракций), закрепленных с помощью углеродистого скотча на алюминиевых цилиндрических столбиках, проводилось как в автоматическом, так и в ручном режимах. Для автоматического поиска и анализа РЗЭ-фаз использовался уникальный программный модуль AZtecFeature. Шаг сканирования электронного зонда в данном режиме составлял 200 нм, а минимальный размер анализируемых РЗЭ-фаз – 450 нм. В ручном режиме анализ осуществлялся по нескольким точкам, включающим как сами редкоземельные фазы, так и вмещающую их матрицу. Энергетические спектры в выбранных точках были получены при ускоряющем напряжении 20 кВ. Полуколичественные данные энергодисперсионного анализа интерпретировались с учетом влияния химического состава вмещающей матрицы (алюмосиликаты), напыления образцов углеродом (карбонаты) и структурно-морфологических особенностей выделений РЗЭ-фаз (водные и безводные фосфаты).

Результаты и обсуждение

В ходе съемки в режиме автоматического поиска 16 порошковых проб туфов из трех исследованных районов были обнаружены выделения (размером до 100 мкм) редкоземельных фаз в количестве от первых десятков до первых сотен в одной пробе.

Анализ их составов в ручном режиме показал присутствие РЗЭ (лантаноидов и Y), в собственных минеральных формах, соответствующих фосфатам, силикатам, карбонатам и фторкарбонатам.

Ванчинская вулканотектоническая впадина

Некоторые данные сканирующей электронной микроскопии образцов туфов Ванчинской вулканотектонической впадины приведены на рис. 2. Редкоземельные фазы представлены рабдофаном, бастнезитом и монацитом. Рабдофан и бастнезит слагают

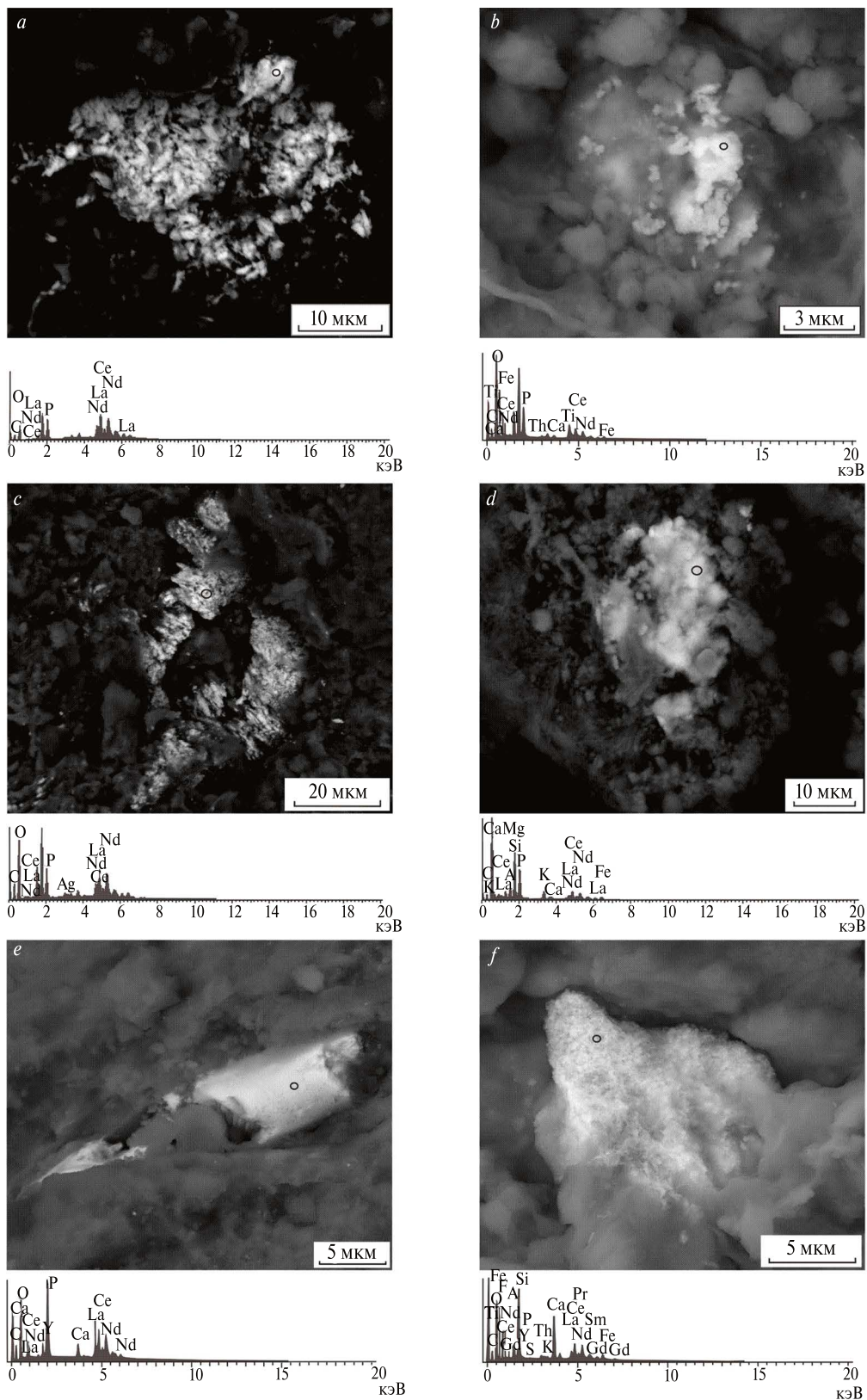


Рис. 2. Электронные фотографии и спектры некоторых редкоземельных минералов в туфогенных породах Ванчинской впадины: *a-d* – рабдофан, *e* – монацит, *f* – бастнезит

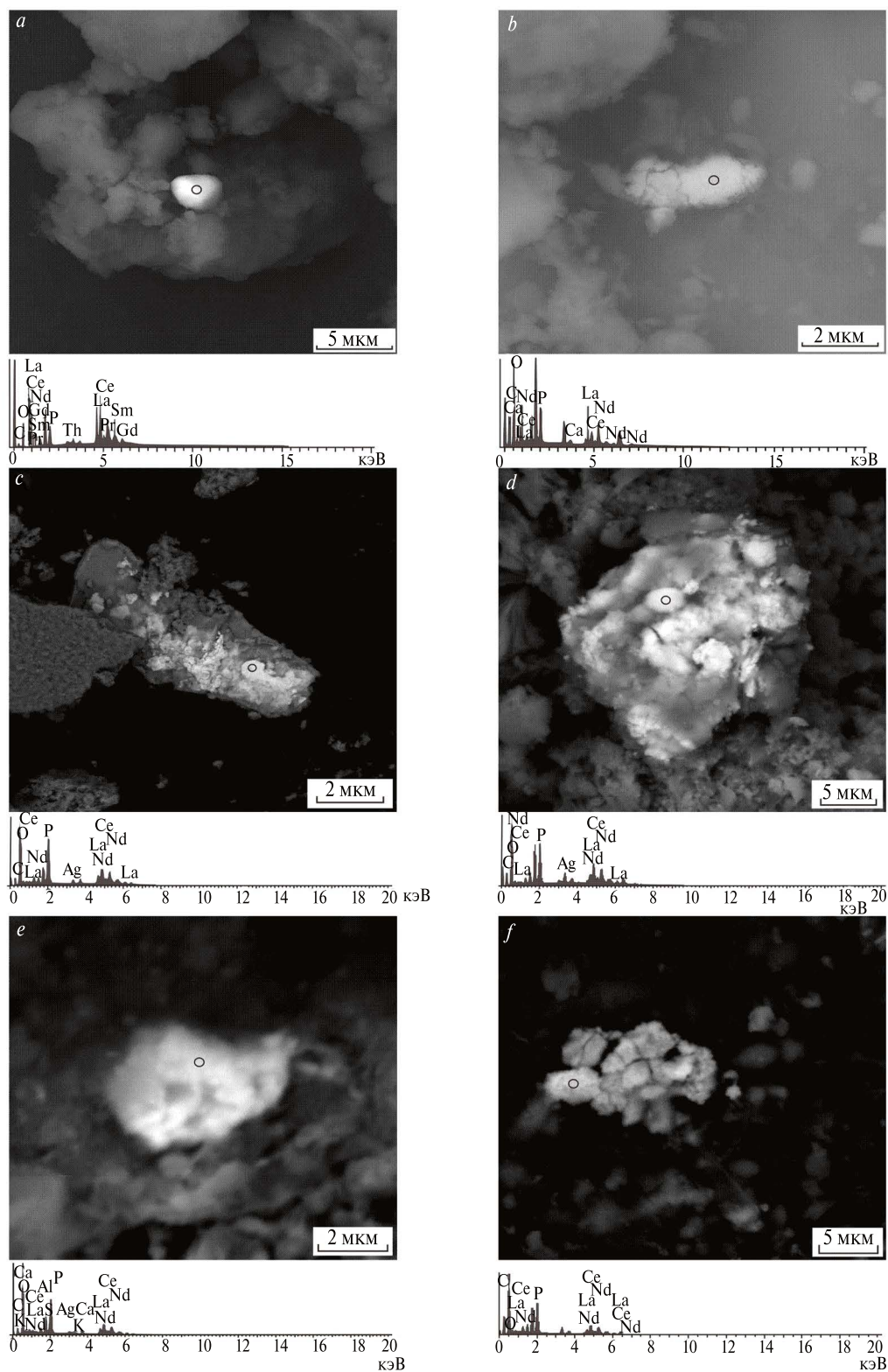


Рис. 3. Электронные фотографии и спектры некоторых редкоземельных минералов в туфогенных породах Шандуйского палеовулкана: *a* – монацит, *b–f* – рабдофан

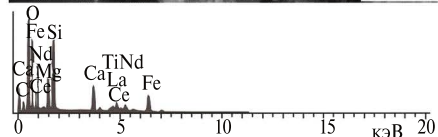
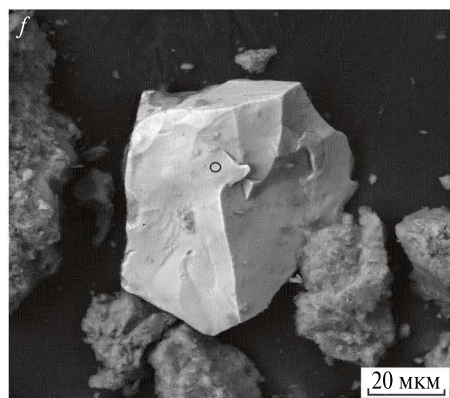
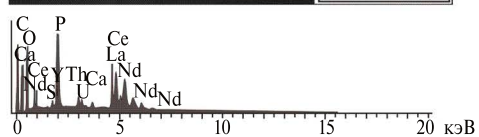
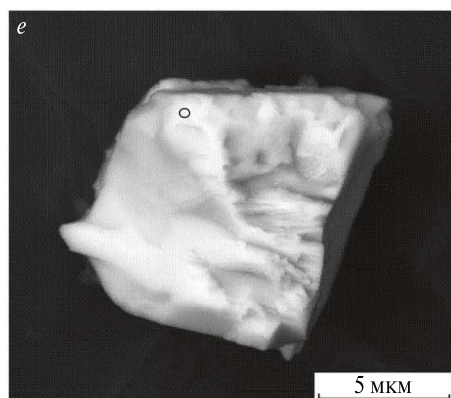
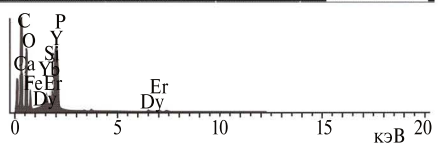
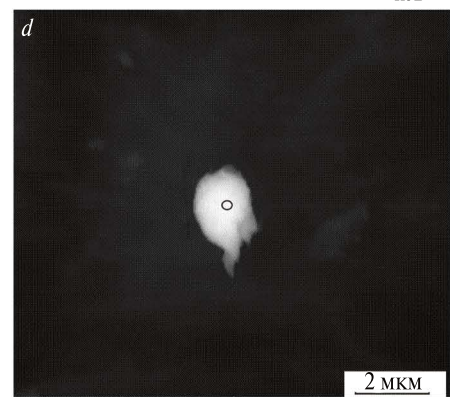
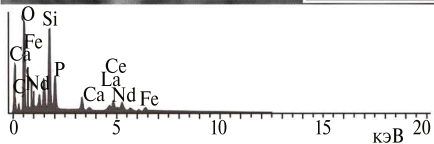
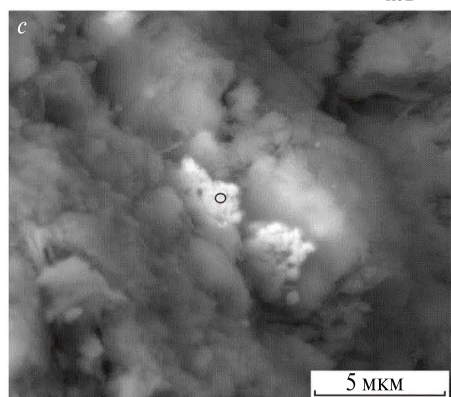
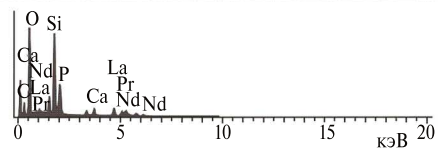
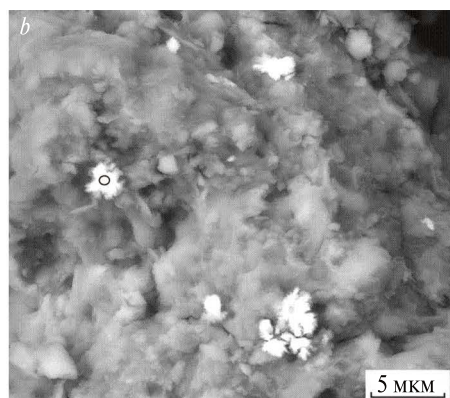
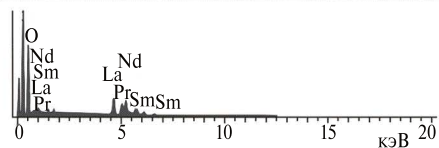
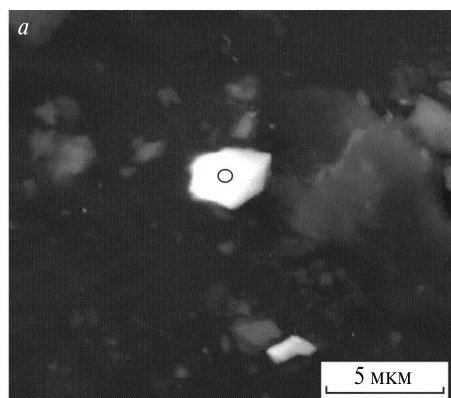


Рис. 4. Электронные фотографии и спектры некоторых редкоземельных минералов в туфогенных породах Бикинской палеовулканоструктуры: *a* – калксинит, *b–c* – рабдофан, *d* – ксенотим, *e* – монацит, *f* – алланит

тонкозернистые, пористые микроагрегаты неправильной формы, а монацит присутствует в виде кристаллических микрозерен. Размеры выделений минералов РЗЭ варьируют от сотен нанометров до десятков микрометров.

Шандуйский палеовулкан

Формы нахождения РЗЭ в образцах туфов, отобранных в районе Шандуйского палеовулкана, показаны на рис. 3. По данным рентгеноспектрального анализа, обнаруженные редкоземельные фазы соответствуют по составу рабдофану и монациту. Рабдофан состоит из тонкозернистых агрегатов, размер которых варьирует от единиц до нескольких десятков микрометров. Монацит образует единичные кристаллические микрозерна (до 10 мкм).

Бикинская палеовулканоструктура

Морфология выделений минералов РЗЭ в образцах туфов Бикинской палеовулканоструктуры приведена на рис. 4. Редкоземельные минералы представлены рабдофаном, состоящим из тонкозернистых, пористых микроагрегатов (единицы–десятки микрометров), калкинситом (?) в виде микрозерен (до 5 мкм), а также монацитом и алланитом в виде кристаллических микрозерен (до 50 мкм).

В изученных образцах, помимо типично магматических РЗЭ-минералов (монацит, ксенотим, алланит), обнаружено большое количество легкорастворимых гипергенных минеральных форм РЗЭ, таких как водные фосфаты (рабдофан) и карбонаты (бастнезит, калкинсит), являющихся гипергенными продуктами изменения магматических РЗЭ-минералов в туфогенных породах. Они, видимо, и определяют на изученных территориях повышенный фон концентрации РЗЭ в поверхностных и грунтовых водах, а также растительности, что установлено нашими предыдущими исследованиями [4, 11]. О высокой подвижности РЗЭ в породах Ванчинской вулканотектонической впадины также свидетельствуют аномальные содержания суммы РЗЭ в бурых углях (до 1000 г/т и более), маломощные пласты которых широко распространены здесь в вулканогенно-осадочных толщах. Накопление РЗЭ в углях происходило после захоронения в торфяниках щелочной вулканической тефры на этапе просачивания грунтовых или гидротермальных вод сквозь рыхлые вулканогенные породы с отложением РЗЭ в приграничных частях торфяных залежей, которые впоследствии были углефицированы [6].

Наблюдаемое относительное обогащение изученных образцов туфов преимущественно «легкими» редкоземельными элементами объясняется спецификой их поведения в процессах выветривания [12, 13]. В ходе данных процессов происходит вынос «тяжелых» лантаноидов, а в продуктах выветривания накапливаются элементы цериевой подгруппы в виде легкорастворимых фаз.

Выводы

Выявлено, что поедаемые дикими копытными животными туфогенные породы (кудуриты) на изученных участках активной геофагии в горах Сихотэ-Алиня представлены оглиненными в процессе аргиллизации и выветривания цеолитсодержащими туфами риолит-дацитового состава раннекайнозойского возраста. Обнаруженные как в собственно кудуритах, так и в окружающих солонцы-кудуры туфогенных породах в массовом количестве минералы РЗЭ соответствуют по составу фосфатам, силикатам и карбонатам. Установлены две генерации минералов РЗЭ: эндогенная (монацит, ксенотим и алланит) и гипергенная (рабдофан, бастнезит, и калкинсит).

Таким образом, изученные районы приурочены к ландшафтам с аномальным содержанием подвижных форм РЗЭ, источник которых – легкорастворимые гипергенные РЗЭ-минералы. Такие аномалии могут быть одной из причин активной геофагии среди животных. Основная причина геофагии, похоже, состоит в компенсации геохимически обусловленных микроэлементозов за счет регулярно-периодического потребления гли-

нистых и глинисто-цеолитовых сорбентов, способных выводить избыток и регулировать баланс как «легких» и «тяжелых» редких земель, так и других токсичных элементов в организме млекопитающих.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Panichev A.M., Golokhvast K.S., Gulkov A.N., Chekryzhov I.Yu. Geophagy in animals and geology of kudurs (mineral licks): a review of Russian publications // *Environmental Geochemistry and Health*. 2013. Vol. 35 (1). P. 133–152.
2. Паничев А.М. Зверовые солонцы Сихотэ-Алиня. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. 216 с.
3. Panichev A.M., Popov V.K., Chekryzhov I.Yu., Seryodkin I. V., Stolyarova T.A., Zakusin S.V., Sergievich A.A., Khoroshikh P.P. Rare earth elements upon assessment of reasons of the geophagy in Sikhote-Alin region (Russian Federation), Africa and other world regions // *Environmental Geochemistry and Health*. 2016. Vol. 38 (6). P. 1255–1270.
4. Panichev A.M., Baranovskaya N.V., Seryodkin I. V., Chekryzhov I.Yu., Vakh E.A., Soktoev B.R., Belyanovskaya A.I., Makarevich R.A., Lutsenko T.N., Popov N.Yu., Ruslan A. V., Ostapenko D.S., Vetoshkina A.V., Aramilev V.V., Kholodov A.S., Golokhvast K.S. Landscape REE anomalies and the cause of geophagy in wild animals at kudurs (mineral salt licks) in the Sikhote-Alin (Primorsky Krai, Russia) // *Environmental Geochemistry and Health*. 2022. Vol. 44, Iss. 3. P. 1137–1160.
<http://doi.org/10.1007/s10653-021-01014-w>
5. Чекрызов И.Ю., Попов В.К., Паничев А.М., Середин В.В., Смирнова Е.В. Новые данные по стратиграфии, вулканизму и цеолитовой минерализации Ванчинской впадины, Приморский край // *Тихоокеанская геология*. 2010. Т. 29, № 4. С. 45–63.
6. Середин В.В., Чекрызов И.Ю. Рудоносность Ванчинского грабена // *Геология рудных месторождений*. 2011. Т. 53, № 3. С. 230–249.
7. Ветренников В.В. Геологическое строение Сихотэ-Алинского заповедника и Центрального Сихотэ-Алиня // *Труды Сихотэ-Алинского заповедника*. 1976. Вып. 6. 167 с.
8. Паничев А.М., Попов В.К., Чекрызов И.Ю., Голохваст К.С., Серёдкин И.В. Кудуры Солонцовского палеовулкана в бассейне реки Таёжная, Восточный Сихотэ-Алинь // *Успехи наук о жизни*. 2012. № 5. С. 7–28.
9. Попов В.К. Петрология палеоген-неогеновых комплексов Восточного Сихотэ-Алиня. Владивосток: Издательство ДВНЦ АН СССР, 1986. 153 с.
10. Руслан А.В., Баринов Н.Н. Микро-наноминералогия золота и платины в графитоносных метаморфических комплексах Приморья // *Вестник ДВО РАН*. 2019. № 1. С. 114–119.
11. Ветошкина А.В., Чекрызов И.Ю., Паничев А.М., Вах Е.А., Барановская Н.В., Луценко Т.Н. Радиоактивные (Th, U) и редкоземельные элементы в природных водах центрального Сихотэ-Алиня (Приморский край) // *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333, № 1. С. 45–56.
12. Подпорина Е.К. Редкоземельные элементы в корях выветривания. М.: Наука, 1985. 126 с.
13. Гавриленко В.В., Сахоненко В.В. Основы геохимии редких литофильных металлов. Л.: Издательство ЛГУ, 1986. 172 с.

REFERENCES

1. Panichev A.M., Golokhvast K.S., Gulkov A.N., Chekryzhov I.Yu. Geophagy in animals and geology of kudurs (mineral licks): a review of Russian publications. *Environmental Geochemistry and Health*. 2013;35(1):133–152.
2. Panichev A.M. Zverovye solontsy Sikhote-Alinya. Vladivostok: DVNTs AN SSSR; 1987. 216 s. (In Russ.).
3. Panichev A.M., Popov V.K., Chekryzhov I.Yu., Seryodkin I. V., Stolyarova T.A., Zakusin S.V., Sergievich A.A., Khoroshikh P.P. Rare earth elements upon assessment of reasons of the geophagy in Sikhote-Alin region (Russian Federation), Africa and other world regions. *Environmental Geochemistry and Health*. 2016;38(6):1255–1270.
4. Panichev A.M., Baranovskaya N.V., Seryodkin I. V., Chekryzhov I.Yu., Vakh E.A., Soktoev B.R., Belyanovskaya A.I., Makarevich R.A., Lutsenko T.N., Popov N.Yu., Ruslan A. V., Ostapenko D.S., Ve-

- toshkina A. V., Aramilev V. V., Kholodov A. S., Golokhvast K. S. Landscape REE anomalies and the cause of geophagy in wild animals at kudurs (mineral salt licks) in the Sikhote-Alin (Primorsky Krai, Russia). *Environmental Geochemistry and Health*. 2022;44(3):1137–1160. <http://doi.org/10.1007/s10653-021-01014-w>
5. Chekryzhov I. Y., Popov V. K., Panichev A. M., Seredin V. V., Smirnova E. V. New data on the stratigraphy, volcanism, and zeolite mineralization of the Cenozoic Vanchinskaya depression, Primorye. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2010;29(4):45–63. (In Russ.).
 6. Seredin V. V., Chekryzhov I. Y. Ore potentiality of the Vanchin graben, Primorye, Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2011;53(3):230–249. (In Russ.).
 7. Vetretnikov V. V. Geologicheskoe stroenie Sikhote-Alinskogo zapovednika i Tsentral'nogo Sikhote-Alinya. In: *Trudy Sikhote-Alinskogo Zapovednika*. 1976. Vyp. 6. 167 s. (In Russ.).
 8. Panichev A. M., Popov V. K., Chekryzhov I. Yu., Golokhvast K. S., Seredkin I. V. Kudurs of paleovolcano Solontsoviy in the Tayojnaya river basin, East Sikhote-Alin. *Achievements in the Life Sciences*. 2012;(5):7–28. (In Russ.).
 9. Popov V. K. Petrologiya paleogen-neogenovykh kompleksov Vostochnogo Sikhote-Alinya. Vladivostok: DVNTs AN SSSR; 1986. 153 s. (In Russ.).
 10. Ruslan A. V., Barinov N. N. Micro-nanomineralogy of gold and platinum in the graphite-bearing metamorphic complexes of Primorye. *Vestnik of the FEB RAS*. 2019;(1):114–119. (In Russ.).
 11. Vetoshkina A. V., Chekryzhov I. Yu., Panichev A. M., Vakh E. A., Baranovskaya N. V., Lutsenko T. N. Radioactive (Th, U) and rare earth elements in natural waters of central Sikhote-Alin (Primorsky Krai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2022;333(1):45–56. (In Russ.).
 12. Podporina E. K. Redkozemel'nye elementy v korakh vyvetrivanija. M.: Nauka; 1985. 126 s. (In Russ.).
 13. Gavrilenko V. V., Sakhonenok V. V. Osnovy geokhimii redkikh litofil'nykh metallov. L.: Izdatel'stvo LGU; 1986. 172 s. (In Russ.).