## БАСТНЕЗИТ-ФЛЮОРИТОВЫЕ ПОРОДЫ УЛАН-УДЭНСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ (минеральный состав, геохимические особенности, проблемы генезиса) Г.С. Рипп<sup>1</sup>, И.Р. Прокопьев<sup>2,3</sup>, И.А. Избродин<sup>1</sup>, Е.И. Ласточкин<sup>1</sup>, М.О. Рампилов<sup>1</sup>, А.Г. Дорошкевич<sup>1,2</sup>, А.А. Редина<sup>2</sup>, В.Ф. Посохов<sup>1</sup>, А.А. Савченко<sup>1</sup>, Е.А.Хромова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт СО РАН, 670031, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Россия

<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия <sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

В пределах г. Улан-Удэ обнаружено несколько участков существенно бастнезит-флюоритовых и кальцитсодержащих пород. Они приурочены к выходам палеозойских кристаллических сланцев, кварцитов, имеют возраст 134.2 ± 2.6 млн лет. Породы представлены брекчированными линзо- и жилообразными телами, сцементированными преимущественно бастнезит-флюоритовым агрегатом. Содержание флюорита в породах составляет несколько десятков процентов, бастнезита-(Се) — 20—30 %, нередко достигая 50 %. В числе второстепенных присутствуют монацит-(Се), альбит, калиевый полевой шпат, в качестве акцессорных — циркон, ниобийсодержащий рутил, манганильменит. Редкоземельные элементы в породах специализированы на легкие лантаноиды. В бастнезите и флюорите установлены флюидные рассолрасплавные включения с температурами гомогенизациии 490—520 °С. Солевой состав таких включений представлен преимущественно сульфатами Na и Ca, в подчиненном количестве присутствуют карбонаты Са и REE, газовая фаза включений содержит углекислоту. Газовые и часть водно-солевых включений гомогенизировались при температурах 150-200, 290-350 и 430-450 °С. Солевой состав поздних флюидов отвечает карбонатам Ca, REE, хлоридам К и/или Na, гидросульфатам Ca, Mg и Fe и гидрокарбонатам Са и Na, а газовая фаза включений содержит CO<sub>2</sub> ± H<sub>2</sub>. Изотопные составы углерода (-5.9 ....-8.3 ‰  $\delta^{13}C_{V-PDB}$ ) и кислорода (4.3...8.3 ‰  $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ ) в бастнезитах и кальцитах ложатся в контур квадрата PIC, характерный для неизмененных интрузивных карбонатитов. Первичные изотопные стронциевые отношения во флюорите и бастнезите равны 0.70559-0.70568. Пространственная сопряженность, близкий возраст и минералого-геохимические особенности указывают на их генетическую связь с позднемезозойскими карбонатитами Юго-Западного Забайкалья. Обнаружение этого проявления свидетельствует о существовании еще одной карбонатитоносной площади и расширяет ареал распространения таких пород, увеличивая перспективы территории Юго-Западного Забайкалья на редкоземельное оруденение.

Редкоземельные элементы, бастнезит, флюорит, флюидные включения.

#### BASTNAESITE AND FLUORITE ROCKS OF THE ULAN-UDE OCCURRENCE (mineral composition, geochemical characteristics, and genesis issues)

#### G.S. Ripp, I.R. Prokopyev, I.A. Izbrodin, E.I. Lastochkin, M.O. Rampilov, A.G. Doroshkevich, A.A. Redina, V.F. Posokhov, A.A. Savchenko, and E.A. Khromova

Within the city of Ulan-Ude, several sites of bastnaesite-fluorite rocks and calcite-containing rocks were found. They are confined to the exposures of Paleozoic schists and quartzites. The rocks have an age of  $134.2 \pm 2.6$  Ma. They are brecciated lenticular and vein-like bodies cemented mainly with bastnaesite-fluorite aggregate. The content of fluorite in the rocks is several tens of percent, and the content of bastnaesite-(Ce) is 20–30%, often reaching 50%. Among the secondary minerals, there are monazite-(Ce), albite, and K-feldspar, and the accessory minerals are zircon, Nb-containing rutile, and manganilmenite. Light lanthanides are predominant among REE in the rocks. Bastnaesite and fluorite contain brine-melt fluid inclusions with homogenization temperatures of 490-520 °C. The salts of these inclusions are composed of predominant Na and Ca sulphates and subordinate Ca and REE carbonates, and the gas phase contains CO<sub>2</sub>. Gas inclusions and part of water-salt inclusions homogenized at 150-200, 290-350, and 430-450 °C. The salts of late fluids are composed of Ca and REE carbonates, K and/or Na chlorides, Ca, Mg, and Fe hydrosulphates, and Ca and Na hydrocarbonates, and the gas phase contains  $CO_2 \pm H_2$ . The isotopic compositions of carbon (-5.9 to -8.3%  $\delta^{13}C_{V-PDB}$ ) and oxygen (4.3 to  $8.3\% \delta^{18}O_{V-SMOW}$ ) in bastnaesite and calcite fall in the PIC square specific to unaltered intrusive carbonatites. The primary strontium isotope ratios in fluorite and bastnaesite are equal to 0.70559-0.70568. The proximal location, close ages, and mineral and geochemical features indicate a genetic relationship of the studied rocks with the late Mesozoic carbonatites of southwestern Transbaikalia. The finding of this rock occurrence indicates the existence of one more carbonatite-bearing area and expands the distribution area of such rocks, which makes southwestern Transbaikalia promising for REE mineralization.

Rare-earth elements, bastnaesite, fluorite, fluid inclusions

© Г.С. Рипп, И.Р. Прокопьев, И.А. Избродин, Е.И. Ласточкин, М.О. Рампилов<sup>⊠</sup>, А.Г. Дорошкевич, А.А. Редина, В.Ф. Посохов, А.А. Савченко, Е.А.Хромова, 2019 e-mail: mrampilov@mail.ru

#### введение

Обнаруженные в пределах г. Улан-Удэ бастнезит-флюоритовые и существенно кальцитовые породы несут высокие концентрации редкоземельных элементов. Они представлены жильными телами и минерализованными брекчиями с широкими вариациями ксенолитов различного состава. Изначально выявленное проявление было отнесено к гидротермальному образованию [Рипп и др., 2018]. После обнаружения пород с содержаниями бастнезита, достигающими 50 % (участок Смолина), и более детального, в том числе термобарогеохимического, изучения установлена их высокотемпературная природа. Близость возраста, минералогических и геохимических, в том числе изотопных, особенностей выявленного проявления с позднемезозойскими карбонатитоносными комплексами Западного Забайкалья дают основание для вывода об их генетической связи.

Необходимость публикации предлагаемого сообщения обусловлена несколькими причинами. Одна из них связана с появлением еще одного участка не столь распространенных специфических пород, представляющих интерес для широкого круга специалистов. Вторая причина связана с неординарностью их минерального и химического состава. И, в-третьих, выявленное проявление с весьма высокими концентрациями редкоземельных элементов должно вызвать интерес как перспективная площадь на промышленное редкоземельное оруденение.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аг/Аг возраст определен по флогопиту, являющемуся типоморфным минералом бастнезитсодержащих пород. Анализ выполнен в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) по методике [Травин и др., 2009]. При расчете <sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar возраста использовался метод возрастного плато [Fleck et al., 1977]. По методу плато рассчитывается средний взвешенный возраст для нескольких последовательных (не менее трех) температурных ступеней.

Изотопные составы кислорода и углерода в бастнезите и кальците, кислорода в силикатах определены в ЦКП «Аналитический центр минералого-геохимических и изотопных исследований» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ). Карбонаты были разложены ортофосфорной кислотой с использованием опции «Газбенч» при температуре 60—70 °C в течение 2—4 часов. Измерения проведены на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 в режиме постоянного потока гелия. Калибровка для карбонатов проведена по стандартам NBS-18, NBS-19 [Friedman, 1982]. Величины  $\delta^{13}C_{V-PDB}$  и  $\delta^{18}O_{V-SMOW}$  определены с погрешностью  $\pm 0.05$  и  $\pm 0.1\%$  (1 $\sigma$ ) соответственно.

Кислород из альбита и флогопита был выделен методом лазерного фторирования. Калибровка анализов осуществлялась по международным стандартам NBS-28 (кварц), NBS-30 (биотит) [Coplen, 1988]. Методика анализа силикатных минералов описана в работе [Sharp, 1990]. Погрешность анализов составляла ± 0.1—0.3 ‰ при 95 %-ом доверительном уровне.

Изотопные стронциевые отношения определены в таких «безрубидиевых» минералах как флюорит и бастнезит в Аналитическом центре минералого-геохимических и изотопных исследований ГИН СО РАН (В.Ф. Посохов) и Центре коллективного пользования ИЗК СО РАН «Геодинамика и геохронология». Rb и Sr выделены по стандартной методике с использованием ионно-обменных смол. Изотопные составы Rb и Sr измерены на многоколлекторных масс-спектрометрах Finnigan MAT 261 и TRITON в статическом режиме. Точность определения концентраций Rb и Sr составляет ± 0.5 %, изотопных отношений <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr ± 0.5 %, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ± 0.05 % (2 $\sigma$ ).

Микроструктурные особенности, взаимоотношения и однородность минералов изучались на электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy-300 Е.А. Хро-мовой.

Состав пород определен методом классического силикатного анализа, РФА (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ). Для определения редких элементов использовался масс-спектрометр высокого разрешения с магнитным сектором ELEMENT (Finnigan MAT). Для разложения образцов и переведения их в раствор в качестве основы была использована методика сплавления с метаборатом лития, разработанная в Аналитическом центре ИГМ СО РАН. Пределы обнаружения высокозарядных и редкоземельных элементов составляют от 0.01 до 0.06 г/т, для Eu, Ho, Lu — 0.003 г/т, для высокозарядных элементов — 0.09—0.22 г/т.

Флюидные включения были изучены методами оптической микроскопии (микроскоп Olympus BX51), криотермометрии и рамановской спектроскопии. Криотермометрические исследования выполнялись в микротермокамере THMSG-600 фирмы Linkam. Состав газовой и солевых фаз флюидных включений изучался методом рамановской спектроскопии: спектрометр Ramanor U-1000 и детектор Horiba DU420E-OE-323 фирмы Jobin Yvon, лазер Millennia Pro фирмы Spectra-Physics. Диагностика кристаллических фаз во включениях, по данным КР-спектроскопии, проводилась согласно базе данных http://rruff.info/. Химический состав солевых фаз, вскрытых в сухой системе флюидных включений,

определен с помощью метода сканирующей электронной микроскопии (SEM) на приборе JSM-6510, снабженном энергодисперсионным спектрометром (EDS) фирмы OXFORD. Количество термометрических экспериментов составляет порядка 60 анализов флюидных включений во флюорите и бастнезите разных генераций. Исследования выполнены на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием многоэлементных и изотопных исследований в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ПЛОЩАДИ УЛАН-УДЭНСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ

Проявление расположено в северной части мезозойской рифтогенной Иволгино-Удинской впадины (рис. 1). По данным геолого-съемочных работ [Платов и др., 2000] здесь распространены позднемеловые отложения (сотниковская свита), представленные песчаниками, алевролитами, сланцами, конгломератами, залегающими на размытой поверхности кристаллического фундамента. В составе последнего присутствуют гнейсы, мигматиты, гранитогнейсы, кристаллические сланцы и известняки. Коренные выходы этих пород закартированы вдоль северной границы впадины и в обнажениях по правому борту р. Селенга. Возраст биотит-амфиболовых гнейсов, распространенных в 15 км к югу от г. Улан-Удэ, вблизи Ошурковского апатитового месторождения составляет 282.8±2.9 млн лет (циркон, SHRIMP-II) [Рипп и др., 2013, 2014]. Метаморфические породы прорваны гранитами и гнейсогранитами, имеющими, по данным Rb-Sr геохронологического изучения [Платов и др., 2000], возраст от 277 до 314 млн лет. Породы, обрамляющие впадину, метаморфизованы на уровне амфиболитовой фации, интенсивно тектонизированы, участками превращены в брекчии, пересекаются разрывными нарушениями.

На площади проявления распространены биотитовые кристаллические сланцы, кварциты, гнейсы и брекчии этих пород. Сланцы и гнейсы состоят в основном из плагиоклаза, калиевого полевого шпата, биотита, кварца. В качестве акцессорных в них присутствуют титанит, рутил, циркон, апатит. Биотит из этих пород характеризуется высокой железистостью ( $f_m > 60$ %) и глиноземистостью, не содержит фтора.

Бастнезит-флюоритовые и кальцитсодержащие породы установлены вдоль береговой линии Селенги, в обнажениях коренных пород, канаве, пройденной для прокладки подземных коммуникаций, и в котлованах под строительство домов в пределах эрозионного окна в полосе шириной 40—50 м на рас-



## Рис. 1. Расположение Улан-Удэнского проявления и карбонатитов Юго-Западного Забайкалья. Схема тектонического строения, по [Платов и др., 2000].

1 — мезозойская впадина Иволгино-Удинской рифтогенной системы; 2 — метаморфические породы палеозойского возраста; 3 — позднепалеозойские гранитоиды; 4 — структурные швы; 5 — границы Западно-Забайкальской карбонатитовой провинции;

6 — карбонатиты: Ошурковское (2), Халютинское (3), Аршанское (4), Южное (5), Жарчиха (6); 7 — участки: Улан-Удэнский, Портовый, Смолина.

стоянии около 400 м. К настоящему времени установлены три участка (Улан-Удэнский, Портовый и Смолина). Все они приурочены к выходу палеозойских метаморфических пород, перекрытых отложениями позднего мела. Эти породы входят в состав разнообломочной брекчии, которая в результате неоднократного дробления, частично была измельчена до 1—2 мм. При более поздней тектонизации, минерализованные участки также были дроблены и разубожены материалом вмещающих пород. Проявление находится в пределах Западно-Забайкаль-



ской карбонатитовой провинции (см. рис. 1) [Рипп и др., 2000]. В 26—40 км западнее, юго-западнее от него расположены существенно кальцитовые карбонатиты, несущие стронциевую (Халютинское) и редкоземельную (Аршанское, Южное) минерализацию. Карбонатиты сформировались в интервале 135— 122 млн лет [Рипп и др., 2000, 2009] и контролируются позднемезозойской рифтогенной структурой.

Для определения возраста были проведены Ar-Ar изотопные исследования флогопита, отобранного из бастнезит-флюоритовой породы (обр. П-1) участка Портовый. По своему химическому составу минерал относится к тетраферрифлогопиту. Результаты <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar датирования представлены на рис. 2. График ступенчатого нагрева флогопита показывает плато с возрастом 134.2 ± 2.6 млн лет и максимальной долей кумулятивного <sup>39</sup>Ar. Это значение принимается нами в качестве возраста формирования флогопита и, соответственно, бастнезит-флюоритовых пород.

В пределах изученной площади распространены три структурно-вещественных эпигенетических типа пород: 1) линзо- и жилообразные существенно бастнезит-флюоритовые тела, 2) брекчии, сцементированные этим же минеральным парагенезисом (рис. 3, 4) и 3) участки с кальцитовыми и альбит-кальцитовыми ассоциациями, содержащими бастнезит и монацит (рис. 5).

Участки минерализованных брекчий занимают площадь до нескольких квадратных метров, окружены ореолом флогопитизации и маломощными бастнезит-флюоритовыми прожилками. Они содержат многочисленные ксенолиты вмещающих пород, размеры которых варьируют от 1-2 мм до 10-15 см. В брекчиях видна полосчатость, обтекающая ксенолиты, подчеркнутая ориентировкой чешуек флогопита и таблитчатых зерен бастнезита. Участками отмечены также шлейфы мелких обломков дезинтегрированных ксенолитов. Новообразованные минералы бастнезит-флюоритовой ассоциации обычно содержат большое количество ксеногенных минералов (см. рис. 4, *a*). Ксенолиты имеют резкие границы и даже их мелкие обломки не несут заметных гидротермальных изменений. Химический состав приведен в табл. 1 (ан. 1, 2).

Мощность жилообразных тел обычно не превышает 0.5 м, протяженность 10 м. Химический состав их представлен в табл. 1 (ан. 3—6). На контактах они оторочены зонами анхимономинерального мелкочешуйчатого флогопита мощностью до 1—2 см. Зона флогопитизации прослеживается на расстоянии до нескольких метров от рудных тел, в виде тонких (до нитевидных) прожилков и мономинеральных гнезд.

В пределах площади бастнезит-флюоритовых пород установлены кальцитовые и альбит-кальцитовые ассоциации пород. Непосредственных взаимоотношений с вмещающими породами не наблюдалось из-за плохой обнаженности. Масштабы проявления этих мелкозернистых пород, содержащих рассеянную вкрапленность бастнезита, флогопита и монацита, не определены. Визуально каждый из таких участков занимает площадь не более первых квадратных метров. Кальцит вместе с бастнезитом и монацитом выполняет пространство между зернами альбита (см. рис. 5), в качестве второстепенных присутствует апатит, рутил, мусковит, флюорит. Кальциты постоянно содержат в пределах первых процентов (до 1.5 мас. %) FeO и до 3.6 % MnO. Редко в них отмечается магний (менее 1 % MgO). В более поздних кальцитовых прожилках примесные элементы не установлены.

## ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ПОРОД

Бастнезит-флюоритовые породы сложены в основном бастнезитом-(Се) и флюоритом (до 30— 55 % каждый). В числе типоморфного минерала (до 5—10 %) присутствует тетраферрифлогопит, а среди второстепенных и акцессорных установлены калиевый полевой шпат, альбит, циркон, манганильменит, ниобийсодержащий рутил. Характерными являются также сульфатные (3—4 мас. % SO<sub>3</sub>) и фос-

Таблица 1.	Хим	ический состав	в бастнезит-фли	ооритовых пор	од	
1/	Б-1/15а	Б-1/15б	Б-15-1	CM-1/18a	CM-2a/18	CM-3/18
Компонент	1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	66.10	46.70	н.о.	6.00	7.70	н.о.
TiO <sub>2</sub>	0.27	0.37	»	0.12	0.15	»
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.04	9.57	»	1.20	1.70	»
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.85	3.56	»	1.49	0.82	»
MnO	0.04	0.06	»	0.01	0.01	»
MgO	0.90	1.17	»	1.01	0.89	»
CaO	2.36	12.53	»	48.30	51.80	»
Na <sub>2</sub> O	4.87	3.94	»	0.35	0.52	»
K <sub>2</sub> O	3.79	2.39	»	0.95	1.02	»
P <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.16	0.05	»»	0.14	0.17	»
П.п.п.	0.14	3.09	»»	7.20	5.52	»
Сумма	96.52	83.48	»»	66.70	70.30	»
<u> </u>	HO	но	»»	0.44	0.22	»
S		»	,, ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	0.13	0.10	»»
F	»»	»	»»	23.80	25 30	»»
Ti	1366	1941	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	н.о	H 0	
V	58	33	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,			~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
Cr	81	62	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	»	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
Mn	248	436				
Co	1.98	2.5	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	»»	»	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
Ni	3.4	3.4		~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	»	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
Cu	19	9.2	,, ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	» »	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
Zn	66	102	»»	»»	»	»»
Rb	126	102	»»	»	»	»
Sr	87	194	,, ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	» »	»»
Y	22	113	98	101	90	117
Zr	203	132	но	но	но	но
Nh	33	20	»»	»»	»	»»
Mo	3.5	3.2	»»	»	»	»
Cs	1.08	1.04	»»	»	»	»
Ba	156	185	»»	»	»	»
La	3182	23216	4110	79375	49581	74118
Ce	4268	29649	5752	92161	55749	68830
Pr	369	2484	473	6474	3958	5240
Nd	945	6261	1225	15000	9380	12740
Sm	56	327	77	1434	963	1288
Eu	9	48	12	164	114	146
Gd	37	232	23	282	203	252
Tb	2.2	11.3	2.04	21.7	19.6	20.5
Dy	5.6	23	6.42	67.8	65	66
Но	0.84	3.3	0.94	8.7	7.12	7.65
Er	2.2	9	2.38	15.2	14.1	14.5
Tm	0.3	1	0.3	1.31	1.2	1.29
Yb	2	5.9	1.25	5.5	6	6.87
Lu	0.29	0.8	0.14	0.43	0.61	0.64
Hf	7.2	3.8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Та	1.24	0.9	»	»	»	»
Pb	112	63	»	»	»	»
Th	47	239	»	»	»	»
U	15.9	9.8	»	»	»	»

Примечание. Содержание оксидов приведено в мас. %, элементов — г/т. Анализы 1, 2 — минерализованные брекчии, 3—6 — жилообразные тела. н.о. — элемент не определялся.





Обломочный материал представлен ксенолитами вмещающих сланцев и сцементирован мелкозернистым бастнезит-флюоритовым агрегатом. Фотографии полированных образцов (*a*—*г*).

фатные (до 1.0—1.5 мас. % Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub>) минералы — глауберит, плюмбоярозит, монацит-(Се), коркит. Дезинтегрированные вмещающие породы определили присутствие ксеногенных кварца, альбита, калиевого шпата, биотита.

Бастнезит-(Се) в породах представлен двумя генерациями (табл. 2). Ранняя — слагает фенокристы размером до 1.0—1.5 см. Зерна этой генерации секутся прожилками мелкозернистого флюорита и поздней генерацией плюмбоярозита. В бастнезите-(Се) в составе включений установлены тетраферрифлогопит, плюмбоярозит и глауберит. В брекчиевых породах бастнезит-(Се) часто содержит многочисленные включения захваченных минералов (см. рис. 4, *a*). Среди последних, чаще всего, фиксируются калиевый полевой шпат, альбит, титановые минералы, циркон. В минерале ранней генерации в целом заметно выше концентрация лантана и ниже — неодима (см. табл. 2, ан. 1—4).

Вторая генерация представлена мелкими (2—4 мм) таблитчатыми зернами, рассеянными в мелкозернистой матрице флюорита (см. рис. 3, *в*, *г*). Относительно раннего бастнезита в позднем — ниже концентрации церия и выше лантана (см. табл. 2, ан. 5—12).

Бастнезит-(Ce) из кальцитовой и альбит-кальцитовой ассоциации по своим морфологическим и химическим свойствам близок к минералу из бастнезит-флюоритовых пород. В первом фиксируется лишь несколько большая концентрация неодима.

**Флюорит** представлен двумя генерациями. Первая из них слагает фенокристы размером до 0.5— 1.5 см среди мелкозернистого агрегата основной массы флюорита. Он не содержит включений других минералов, лишь изредка встречаются единичные зерна флогопита. Внешняя кромка зерен шириной 1—2 мм имеет темно-фиолетовую (до черной) окраску, наиболее вероятно обусловленную радиоактивным облучением торийсодержащего монацита.

Основная масса флюорита (вторая генерация) представлена изометричными и неправильной формы зернами размером до 2—3 мм. С минералом ассоциируют бастнезит-(Се), монацит-(Се), флогопит.



Минерал, как и ранняя генерация, имеет темно-фиолетовую окраску. Дробленые участки флюорита цементируются агрегатами плюмбоярозита.

Во вмещающих породах иногда встречаются разнозернистые неправильной формы, ветвящиеся гидротермальные прожилки флюорита.

**Фторфлогопит** в бастнезит-флюоритовых породах слагает относительно равномерную вкрапленность, а на контактах тел — чешуйчатые агрегаты. Зерна его часто деформированы, расщеплены и дезинтегрированы. Нередко минерал представлен крупными (более 1 см) кристаллами, шлироподобными скоплениями в бастнезите-(Се). На контактах бастнезит-флюоритовых тел он слагает существенно мономинеральные зоны. Состав его ложится в поле тетраферрифлогопита (рис. 6, табл. 3). Величина железистости ( $F_m$ ) изменяется в пределах 17—31 %. В большей части проб до десятых долей процента обнаружен марганец. Минерал не содержит воду, а позиция ОН-F полностью заполнена фтором (до 8 мас. %). Во фторфлогопите, присутствующем в виде включений в фенокристах бастнезита-(Се), наиболее высокие концентрации магния (22—23 мас. % MgO), в поздних генерациях этого минерала содержание MgO варьирует в пределах 17—19 мас. %.

Флогопит кальцитовых ассоциаций, в отличие от минерала флюорит-бастнезитового парагенезиса, характеризуется более низкими содержаниями магния, фтора и высокими — алюминия, железа и титана (см. табл. 3, ан. 7—12). По своему составу мусковит из кальцитовых ассоциаций относится к



#### Рис. 5. Состав и структурные особенности альбит-кальцитовых пород.

В породе содержится бастнезит (Bstn) (редкие зерна) и монацит (Mnz). Кальцит (Cal) и ассоциирующие с ним редкоземельные минералы выполняют интерстиции среди альбита (Ab).

промежуточному члену ряда мусковит—алюмоселадонит, в нем присутствует железо (до 5.8 мас. % FeO) и магний (до 1.7 мас. % MgO) (см. табл. 3, ан. 13—15).

**Монацит-(Се)** в небольших количествах отмечен во флюорит-бастнезитовых, кальцитовых и альбит-кальцитовых ассоциациях. Во всех случаях он представлен рассеянной вкрапленностью таблитчатых и неправильной формы зерен, дистанцированных от бастнезита-(Се). В больших количествах он присутствует в кальцитовых породах (см. рис. 5). Минерал из флюорит-бастнезитового парагенезиса содержит до 4 мас. % тория (см. табл. 2), обусловившего повышенную радиоактивность пород (25— 50 мкР/ч) и темно-фиолетовую (до черной) окраску флюорита.

В монаците-(Ce) из кальцитовой ассоциации торий отсутствует, но в нем установлена до нескольких процентов сера (см. табл. 2). Соотношения легких лантаноидов в монацитах заметно отличаются от соотношений в бастнезитах за счет более высокого содержания неодима (см. табл. 2, ан. 20—25).

Сульфаты относятся к числу характерных минералов флюорит-бастнезитовых пород. В породах установлены глауберит, ярозит, плюмбоярозит, барит, коркит. В фенокристах бастнезита-(Се) глауберит и плюмбоярозит встречены в виде каплевидных выделений и включений хорошо образованных кристаллов и микрозернистых агрегатов (рис. 7, *а*—*в*). Поздняя генерация плюмбоярозита представлена мелкозернистыми агрегатами во флюоритбастнезитовой матрице, цементирует участки

Рис. 6. Диаграмма составов железомагнезиальных слюд из флюорит-бастнезитовых (1), альбит-кальцитовых (2) и вмещающих кристаллических сланцев (3).

Серое поле (4) — слюды из карбонатитов Юго-Западного Забайкалья [Рипп и др., 2000]. Использована диаграмма из [Brod et al., 2001].



Т	a6	бл	И	Ш	а	2.

Составы бастнезита-(Се) и монацита-(Се) из бастнезит-флюоритовых и кальцитсодержащих ассоциаций, мас.%

№ п/п	№ пробы	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	$P_2O_5$	$SO_3$	F	Сумма	Ce/La	Ce/Nd	La/Nd
					Бастнез	ит- флю	оритовы	е поролы					
Бастнезит-(Се) ранней генерации													
1	1-1/6	34.87	33.53	2.08	4.40				6.71	81.59	1.04	7.93	7.62
2	1-2/1	37.83	31.27	1.79	5.79	_			6.7	83.37	1.21	6.53	5.40
3	1-2/2	34.25	31.98	2.18	6.22	_		_	6.01	80.63	1.07	5.51	5.14
4	1-2/4	37.84	27.82	1.88	6.63	_	_	_	7.29	81.46	1.36	5.71	4.20
Сре	днее (8)	35.85	31.26	1.98	5.48	_			6.82				_
	Бастнезит-(Се) поздней генерации												
5	3/2	37.52	25.81	2.47	7.44	_			6.39	79.63	1.45	5.04	3.47
6	3/3	37.19	29.85	2.32	5.73	_	_	_	6.71	81.79	1.25	6.49	5.21
7	3/4	37.33	25.59	1.88	8.01	_	_	_	6.23	79.05	1.46	4.66	3.19
8	3/5	35.96	27.98	2.19	5.83	_	—	—	6.83	78.79	1.29	6.17	4.80
9	1-2/5	36.87	24.55	2.7	8.63	_	_	_	6.45	79.20	1.50	4.27	2.84
10	1-3/1	38.28	27.83	2.74	6.99	_	—	—	6.74	82.57	1.38	5.48	3.98
11	1-4/1	37.49	28.57	2.08	6.73	_	—	—	5.98	80.86	1.31	5.57	4.25
12	1-5/1	36.53	27.68	1.85	6.28	_	_	_	6.11	78.44	1.32	5.82	4.41
Сред	цнее (11)	37.21	27.09	1.95	6.94	—		_	6.42	_		_	_
Монацит-(Се)													
13	1-1/4	35.62	20.75	2.64	9.48	1.55	28.99			100.09	1.72	3.76	2.19
14	1-5/7	36.18	19.66	1.95	7.72	2.96	27.13	—		97.04	1.84	4.69	2.55
15	1-1/5	35.62	20.75	2.64	9.48	1.55	28.99	_	—	100.09	1.72	3.76	2.19
Сре	днее (5)	36.09	21.63	2.27	8.07	2.02	28.54	_	—	_		_	_
Альбит-кальцитовые породы													
						Бастне	езит-(Ce)						
16	3/5	35.4	26.9	1.97	6.75	_	_	_	8.3	79.33	1.31	5.24	3.98
17	4/5	37.93	25.57	2.26	7.23	_	—	—	7.69	80.67	1.48	5.24	3.53
18	6/5	35.95	26.19	1.57	6.82	_	—	—	8.15	79.17	1.37	5.27	3.84
19	7/5	35.57	28.45	1.40	5.61	_	—	—	8.05	75.09	1.25	6.34	5.07
Сре	днее (4)	36.21	26.77	1.80	6.61	_		_	8.04	_			_
Монацит-(Се)													
20	5/1	35.22	22.06	2.16	8.17	_	30.22	_		96.48	1.59	4.31	2.7
21	5/2	32.47	22.86	2.57	7.45	_	29.35	1.07	_	96.48	1.55	4.76	3.06
22	5/2-3	34.12	24.23	1.78	6.49	_	29.54	—		98.03	1.41	5.25	3.73
23	6/1	34.44	23.22	1.92	6.95	_	28.04	0.95	_	96.17	1.48	4.95	3.34
24	6/1-2	33.04	26.29	1.40	6.46	—	29.42			97.09	1.25	5.11	4.06
25	7/3	30.96	20.29	1.31	5.77	_	28.89	2.12		91.96	1.52	5.36	3.51
Cpe	днее (6)	33.87	23.15	1.85	6.88	_	29.24		_	_		_	_

дробленых зерен флогопита, бастнезита-(Се), флюорита (см. рис. 7, *г—е*), слагает оторочки вокруг зерен бастнезита-(Се). В ассоциации с плюмбоярозитом встречены неправильной формы зерна коркита. Составы минералов представлены в табл. 4.

Особенностью глауберита является присутствие калия, хлора, повышенных количеств фтора и стронция. Плюмбоярозиты характеризуются высокой неоднородностью составов. В нем варьируют содержания железа (от 18 до 43 мас. % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и свинца (от 5.5 до 21 мас. % PbO). Для ранней генерации характерно более высокое содержание калия. В ярозитах фиксируются калий, фосфор.

**Циркон** представлен мелкими неправильной формы зернами в бастнезите ранней генерации (см. рис. 4, *a*). Одиночные зерна циркона отмечены в слюдистых агрегатах контактовых зон флюорит-бастнезитовых пород. Примесных элементов в составе минерала не обнаружено.



## Рис. 7. Характер выделений сульфатных минералов в флюорит-бастнезитовых породах.

*а*, б, *в* — включения ранних глауберита (Glb) и плюмбоярозита (Jrs) в ассоциации с монацитом (Mnz); *г*, *д*, *е* — поздняя генерация плюмбоярозита, цементирующая дробленые участки флюорита (*д*) и бастнезита, флогопита (*в*).

Таблица 3.

# Составы железомагнезиальных слюд из вмещающих, бастнезит- и кальцитсодержащих пород, мас.%

№ п/п	№ пробы	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	K <sub>2</sub> O	F	Сумма	$0 = F_2$	$F_m$
Бастнезит-флюоритовые породы												
Начальная стадия												
1	1-3/6	40.54	1.63	10.30	17.92	0.63	14.96	11.12	3.11	100.21	1.31	40.20
2	1-5/2	42.74	1.08	9.20	11.90	0.36	17.31	11.19	5.00	98.80	2.11	27.80
3	1-5/5	42.34	1.00	8.82	9.51	0.35	18.56	11.46	4.38	96.41	1.85	22.30
Среднее (	7)	42.29	1.35	9.46	12.66	0.44	17.42	11.35	4.11			—
Главная стадия												
4	3-2/2	42.47	1.2	8.69	9.94	0.48	17.96	11.37	4.77	97.34	2.01	23.70
5	3-2/3	43.92	0.97	7.97	8.14	0.34	19.49	11.53	5.12	97.47	2.16	19.00
6	3-3/1	43	0.73	8.16	10.38	0.71	17.43	11.19	5.93	97.54	2.50	25.10
Среднее (	8)	43.33	0.93	8.13	9.57	0.54	17.20	11.16	5.46			—
Альбит-кальцитовые породы												
7	4/2	36.67	1.70	13.98	13.86	1.27	14.64	10.64	3.41	96.16	1.44	2.4
8	4/3	35.41	1.55	15.32	15.34	0.98	13.66	10.73	3.23	96.23	1.36	2.88
9	5/3-2	37.01	1.37	13.98	10.92	1.30	15.77	11.06	4.4	95.83	1.86	4.08
10	6/1	41.42	1.78	11.70	11.19	0.32	15.34	11.12	5.38	101.75	2.27	3.57
11	6/2	35.43	1.88	15.63	16.13	0.74	13.07	10.54	2.61	96.53	1.11	2.59
12	7/2-1	39.77	0.88	13.42	10.07	1.02	17.64	11.26	5.65	99.72	2.39	4.99
13	7/3	44.16	0.72	27.93	5.80		1.71	11.99	1.07	93.37	0.45	1.52
14	7/4	44.36	1.83	29.36	5.00		1.07	11.78	_	93.32	_	1.38
15	7/5	43.84	1.05	28.29	5.11		1.49	11.7	1.39	92.76	0.58	1.52
Кристаллические сланцы												
16	2-3/6	35.09	1.88	15.95	23.45		8.39	10.22		94.98	_	61.10
17	2-3/7	35.32	1.73	16.14	23.20		7.76	10.55	_	94.70	_	62.70
18	2-3-1/4	38.89	2.15	16.00	21.61		8.51	10.12	_	97.98		58.80
Среднее (	5)	35.84	1.68	16.08	23.55	—	8.19	10.33		_		—

Примечание. В начальную стадию включены фенокристы и включения в бастнезитах, в главную — минерал, рассеянный во флюоритовой матрице. Пробы 13—15 — мусковит.

**Ильменит** в виде таблитчатых зерен встречен в бастнезите-(Се) и альбите (см. рис. 4, *a*). Он характеризуется высокими концентрациями марганца, варьирующими от 7 до 16 мас. % MnO, позволяющими отнести его к манганильмениту. В минерале присутствуют включения ферропсевдобрукита, ниобийсодержащего рутила и титансодержащего магнетита.

Апатит относится к акцессорным минералам. Он установлен в виде включений в монаците-(Се), отмечается в кальцитовых породах. Минерал относится к фторапатиту (4—5 мас. % F). Содержания примесных компонентов находятся за пределами чувствительности метода анализа.

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАСТНЕЗИТ-ФЛЮОРИТОВЫХ ПОРОД

Неоднородность распределения слагающих минералов и присутствующие ксенолиты вмещающих пород определили неоднородность состава пород. В оруденелых брекчиях содержания REE колеблются в диапазоне от 1—2 до 5—6 мас. % оксидов, в массивных флюорит-бастнезитовых телах суммарные содержания REE варьируют от 15—20 до 31 мас. % оксидов (см. табл. 1). В составе редкоземельных элементов в бастнезит-флюоритовых породах, основная часть которых сконцентрирована в бастнезите, преобладают легкие лантаноиды, со средним La/Yb отношением, равным 7000. На графике нормированных к хондриту содержаний REE (см. рис. 8) породы образуют наклонную кривую с отсутствием европиевой аномалии. Наиболее высокие концентрации REE характерны для брекчированных бастнезитфлюоритовых пород участка Смолина. Породы Улан-Удэнского и Портового проявлений на рассматриваемых графиках имеют схожую кривую, но характеризуются более низкими содержаниями

таблица ч. Анмические составы сульфатных минералов из бастисянт-флюбритовых пород, мас. 70											
№ п/п	FeO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SrO	PbO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	$SO_3$	Cl	F	Сумма
Глауберит											
1		20.90	17.07		2.39	_	_	51.14	1.07	3.25	95.82
2	_	21.44	17.73	0.29	1.81		_	57.55	1.00	2.00	94.81
3	_	22.81	14.80	0.25	1.96		_	51.69	1.22	3.00	95.74
4	_	21.39	16.01	0.28	1.18			50.55	0.81	1.61	91.83
5		19.88	19.88	0.20	1.97		—	47.01	0.55	3.57	93.06
6	_	21.23	17.84	0.22	0.55		_	50.27	1.26	3.47	94.84
7	_	22.00	19.85	0.45	1.71		_	54.21	н/о	н/о	98.32
					я	озит					
8	40.64	_	_	7.67	_	_	_	30.52	_	_	83.59
9	36.25		_	6.49			_	27.22			77.18
					Плюмб	оярозит-І					
10	38.90	_		6.40	_	11.04		28.24	_		84.58
11	40.19		—	7.28		7.82	—	29.84	_	—	85.13
12	36.54		—	5.61		14.76	—	26.67	_	—	85.58
13	37.62		—	5.95		14.62	1.54	25.32		—	85.04
14	35.20		—	4.95		16.60	1.54	27.67		—	82.56
15	38.10		_	6.00		11.48	0.73	26.92		—	83.13
16	35.66	_	_	6.08		10.97	1.21	24.40	_	—	78.32
					Плюмб	оярозит-II					
17	36.24		_	4.18		19.19	2.52	22.27		—	84.40
18	35.56		_	3.40		21.30	3.96	18.83		—	82.76
19	42.75		_	4.88		10.85		21.58	_	—	80.05
20	39.75		—	7.52		5.53	—	28.99	_	—	81.86
21	37.33		—	4.94		15.80	0.92	24.92	_		84.11
22	38.59		—	5.83		12.15	0.69	27.34	_		84.61
23	39.80		—	2.29		21.32	3.09	17.85	_	—	84.35
24	38.02		—	4.95		16.04	0.66	25.90		—	85.57
25	42.47		—	8.41		6.20		31.31		—	88.39
26	39.70	_	_	3.70	_	14.42	1.17	20.68	_	—	79.67
					Ко	ркит					
27	_	_	—	0.55	_	28.24	7.33	13.09	_	—	77.81
28	—		_	1.73		26.89	6.12	16.81	_	—	81.75

Таблица 4. Химические составы сульфатных минералов из бастнезит-флюоритовых пород, мас.%

легких лантаноидов. Конфигурация графиков REE аналогична таковой для позднемезозойских карбонатитов Западного Забайкалья (рис. 8).

На диаграмме нормированных к примитивной мантии содержаний редких элементов бастнезитфлюоритовые породы характеризуются отрицательными аномалиями по Nb, Ta, Pb, Zr, Hf и Ti относительно соседних элементов (см. рис. 8). Породы имеют схожие спектры распределения редких элементов с таковыми для позднемезозойских карбонатитов Западного Забайкалья (см. рис. 8). Относительно карбонатитов наблюдаются четко выраженные минимумы по Ba и Sr, что связано с отсутствием сульфатов бария и стронция (барита и баритоцелестина) на изученных проявлениях и их распространенностью в карбонатитах Западного Забайкалья.

Изотопное значение  $\delta^{13}C_{V-PDB}$  в бастнезите-(Ce) из бастнезит-флюоритовых пород и кальците варьируют от -5.9 до -8.3 ‰ и от -3.6 до -6.6 ‰ соответственно (рис. 9. табл. 5). Полученные данные ложатся в поле мантийных карбонатов (PIC) и аналогичны неизмененным карбонатам из карбонатитов Аршанского и Южного проявлений [Рипп и др., 2000]. Значение  $\delta^{18}O_{V-SMOW}$  для флогопита составило +1.1 ‰.

···········	- <b>F</b>	T T	The second secon						
Минерал	$\delta^{13}C_{V-PDB}$ , ‰	$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ , ‰	( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>0</sub>						
Флюорит-бастнезитовые породы									
Флюорит			$0.70568 \pm 10$						
Бастнезит-(Се)	-8.1	+7.4	$0.70559\pm9$						
То же	-5.9	+4.8	_						
»	-8.3	+5.5	_						
»	-7.8	+4.3	_						
»	-8.3	+5.4	_						
Флогопит	_	+1.1	_						
То же	_	+1.1	_						
»	_	+2.3	_						
»	_	+1.2	_						
»	_	+0.3	_						
Альбит-кальцитовые породы									
Кальцит	-6.5	+8.3	_						
То же	-6.1	+4.6	_						
»	-3.6	+5.4	_						
»	-6.6	+7.9							
	Минерал   Флюорит   Бастнезит-(Се)   То же   »   Флогопит   То же   »   Флогопит   То же   »   Флогопит   То же   »   А   Кальцит   То же   »	Минерал δ <sup>13</sup> C <sub>V-PDB</sub> , ‰   Флюорит-бастнезитовые   Флюорит   Бастнезит-(Се)   То же   -5.9   »   -8.3   »   -7.8   »   Флогопит   По же   »   -7.8   »   -7.8   »   -7.8   »   -7.8   -8.3   Флогопит   -   N   -   N   -   N   -   N   -   N   -   N   -   N   -   N   -   N   -   N   -   N   -   N   -   N   -	Минерал δ <sup>13</sup> C <sub>V-PDB</sub> , ‰ δ <sup>18</sup> O <sub>V-SMOW</sub> , ‰   Флюорит-бастнезитовые породы Флюорит   Флюорит -8.1 +7.4   Бастнезит-(Се) -8.1 +7.4   То же -5.9 +4.8   » -8.3 +5.5   » -7.8 +4.3   » -8.3 +5.4   Флогопит - +1.1   То же - +1.1   » -8.3 +5.4   Флогопит - +1.1   » - +1.1   » - +1.2   » - +0.3   Альбит-кальцитовые породы Кальцит -6.5   Кальцит -6.5 +8.3   то же -3.6 +5.4   » -3.6 +5.4   » -6.6 +7.9						

Таблица 5. Изотопная характеристика минералов из бастнезит-флюоритовых и кальцитсодержащих пород

Первичные изотопные стронциевые отношения в бастнезите (0.70559) и флюорите (0.70568) из флюорит-бастнезитовых пород идентичны отношениям в карбонатитах Юго-Западного Забайкалья [Рипп и др., 2000].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

Во флюорите и бастнезите Улан-Удэнского проявления при комнатной температуре установлены три типа флюидных включений (рис. 10). Первая группа представлена высококонцентрированными рас-



сол-расплавными включениями (см. рис. 10, a,  $\delta$ ), которые располагаются одиночно либо группами по 2-3 включения в центральных областях кристаллов раннего бастнезита и флюорита. Форма вакуоли рассол-расплавных включений округлая, изометричная, нередко представлена в виде отрицательных форм кристалла. Иногда группы рассол-расплавных включений расположены по зонам роста кристаллов флюорита, что подтверждает первичность захвата включений. Высококонцентрированные рассол-расплавные включения состоят из минеральной, жидкой и газовой фаз. Минеральная фаза, количество которой достигает 80-90 об. %, представлена

Рис. 8. Распределение редкоземельных элементов, нормированных к хондриту [McDonough, Sun, 1995], и редких элементов, нормированных к примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989], в флюорит-бастнезитовых породах Улан-Удэнского проявления.

Серое — позднемезозойские карбонатиты Западного Забайкалья (Аршанское, Южное, Халютинское), по [Рипп и др., 2000; Дорошкевич, 2013].

Тип ФВ	Матрица	<i>Т</i> <sub>гом</sub> , °С	Состав/концентрация, мас.%	Состав кристаллических фаз (КР, Raman)
Рассол-расплавные, первичные	Бастнезит, флюорит	490—520	Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup> , REE, CO <sub>2</sub> (ж) — H <sub>2</sub> O / > 80	Глауберит, тенардит, флогопит (?), кальцит, паризит (?)
Кристаллофлюидные, псевдовторичные	»	430—450	Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup> , REE, CO <sub>2</sub> — H <sub>2</sub> O / 40—60	Тенардит, глауберит, паризит (?)
Водно-солевые, первично-вторичные	Флюорит	290—350	NaCl/KCl — H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> (г) / 30—15 NaCl-экв.	Галит/сильвин
Газово-жидкие, вторичные	Бастнезит, флюорит	150—200	Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , HSO <sub>4</sub> <sup>+</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , CO <sub>2</sub> $\pm$ H <sub>2</sub> $$ H <sub>2</sub> O / 1 $$ 10	Гидросульфаты Ca, Mg и Fe, гидрокарбонаты Ca и Na

Таблица 6. Результаты термобарогеохимических исследований включений в минералах Улан-Удэнского проявления

агрегатом тесно соприкасающихся зерен неправильной, прямоугольной, удлиненной, изометричной формы. Газовый пузырек нередко деформирован, а его форма определяется свободным пространством. Количество газовой фазы находится в пределах 5—10 об. %. Остальное пространство занято жидкостью. Размеры рассол-расплавных включений могут достигать 50 мкм, а в среднем — 15—20 мкм.

Второй тип включений представлен многофазными кристаллофлюидными включениями (см. рис. 10, *в*, *г*). Флюидные включения являются псевдовторичными, поскольку располагаются группами вдоль залеченных трещин в кристаллах бастнезита и флюорита первой генерации. Кроме того, включения являются первичными по отношению к поздним генерациям минералов матрицы. Форма вакуоли включений округлая, изометричная, реже удлиненная и имеет вид отрицательных кристаллов, размер включений составляет в среднем 10—15 мкм. Во включениях присутствует твердая, жидкая и газовая фазы. Количество минеральной фазы составляет 30—50 об. %. Твердая фаза образует кристаллики кубической, прямоугольной и изометричной форм. Газовый пузырек занимает до 10—20 об. %.

Третий тип включений — это вторичные и псевдовторичные газово-жидкие водно-солевые включения (рис. 10,  $\partial$ , e), которые могут также содержать одну—две кристаллические фазы (до 5—10 об. %). Включения располагаются по трещинам и плоскостям, формируют шлейфы, иногда со следами шнурования. Форма вакуоли включений обычно удлиненная, реже изометричная, неправильная, а их размер не превышает 15 мкм. Это газово-жидкие включения различных генераций, где газовый пузырек занимает от 10 до 90 об. %, а остальное пространство занято жидкостью.

Результаты диагностики дочерних кристаллических фаз рассол-расплавных включений установили преобладание сульфатов Na и Ca — глауберита и тенардита — в составе включений (рис. 11, *a*). Кроме сульфатов, в рассол-расплавных включениях присутствуют фазы алюмосиликатных минералов — флогопита (?), карбонатов и редкозе-

лов — флогопита (?), кароонатов и редкоземельных фаз — кальцита, паризита (?), последний также отмечается в составе кристаллофлюидных включений (см. рис. 11, б, в). По данным КР-спектроскопии, газовая фаза рассол-расплавных включений содержит жидкую углекислоту. Содержание солевых компонентов рассол-расплавных включений оценено в 80—90 об. %, при этом сульфаты по объему практически вдвое преобладают над карбонатами и силикатными фазами. Общая концентрация солей во включениях превышает 80 мас. % (табл. 6). Температуры гомогенизации рас-

Рис. 9. Диаграмма изотопных составов кислорода и углерода в бастнезитах (1) и кальцитах (2) Улан-Удэнского проявления.

Область PIC и тренды изменения изотопных составов О и С, по [Demény et al., 2004].





Рис. 10. Включения в минералах из пород Улан-Удэнского проявления.

Солевые рассол-расплавные включения в бастнезите (*a*) и флюорите (*б*); кристаллофлюидные включения в бастнезите (*в*, *г*); газово-жидкие включения в бастнезите (*d*) и флюорите (*e*).



## Рис. 11. Результаты исследования состава включений в минералах из пород Улан-Удэнского проявления:

а — КР-спектры дочерних кристаллических фаз глауберита и тенардита рассол-расплавного включения в бастнезите (фото); б, в — результаты диагностики кристаллических фаз во вскрытых включениях на сканирующем электронном микроскопе (фото и спектр исследуемых фаз): алюмосиликатная фаза — флогопит (?) в рассол-расплавном включении во флюорите (б) и карбонат-REE — паризит (?) в кристаллофлюидном включении в бастнезите (спектры фаз содержат элементы матрицы включений). сол-расплавных включений небольших размеров находятся в диапазоне 490—520 °C. Процесс нагрева наиболее мелких рассол-расплавных включений происходил с постепенным растворением дочерних кристаллических фаз, образующих жидкую фазу, с последующим исчезновением газовой фазы и образованием гомогенного расплава во включении. При остывании включения возвращались к первоначальному фазовому состоянию.

Диагностика состава кристаллофлюидных включений, содержащих до 30—50 об. % солевых фаз, показала наличие карбонатов и сульфатов Са и Na и карбонатов REE. Интервал температур гомогенизации солевых флюидных растворов составляет 430—450 °C (см. табл. 6). Суммарная концентрация солей во включениях по объемным соотношениям может быть оценена в 40—60 мас.%. Во флюорите поздних генераций установлены первично-вторичные флюиды, содержащие одиночные изотропные кристаллики кубической формы — хлориды Na и/или K, отвечающие за вторичные процессы минералообразования. Температуры гомогенизации хлоридных флюидных включений соответствуют диапазону 290—350 °C, газовая фаза кристаллофлюидных включений содержит CO<sub>2</sub>. Температуры плавления дочерних фаз при термометрии дают оценки концентрации флюидных растворов в 30—15 мас.% NaCl-экв. (см. табл. 6).

Газово-жидкие вторичные флюидные растворы в бастнезите и флюорите гомогенизируются при температурах 150—200 °С. Включения содержат кристаллики гидросульфатов Са, Мg и Fe, гидрокарбонатов Са и Na, а газовая фаза состоит из  $CO_2 \pm H_2$  (см. табл. 6). Поздние существенно газовые флюидные включения (см. рис. 10, *e*) во флюорите могут свидетельствовать также о вскипании флюидов в процессе поздних преобразований гидротермальной системы.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известные в природе бастнезитсодержащие месторождения связываются в основном с карбонатитами и ассоциирующими с ними щелочными породами. Для обсуждаемого в статье случая важным является то, что в 26—40 км к югу от описываемого проявления находится несколько, в том числе бастнезитсодержащих (Аршанское, Южное) проявлений карбонатитов. Близость возрастов (135—122 млн лет [Рипп и др., 2000]), минералогических и геохимических особенностей с изученным проявлением с большой долей уверенности позволяют предполагать генетическую связь с позднемезозойскими карбонатитами Юго-Западного Забайкалья. Об этом свидетельствуют также значения Sr<sub>0</sub> в бастнезите и флюорите, кривых нормированных содержаний REE, составы углерода и кислорода в карбонатах. Последние ложатся, как и в случае с карбонатитами, в границы поля PIC [Рипп и др., 2000; Дорошкевич, 2013]. Подобно карбонатитам, в слюдах изученных проявлений повышены магнезиальность, содержание фтора, а состав их соответствуют тетраферрифлогопиту (см. рис. 5).

Парагенезисы с флюоритом и редкоземельной минерализацией часто фиксируются на многих проявлениях карбонатитов мира. Они описаны на месторождениях Канганкунде [Wall et al., 1994], Баян Обо [Tao, 1996], Карасуг [Никифоров и др., 2005], Барра до Итапирапуа [Ruberti et al., 2008], Амба-Донгар [Doroshkevich et al., 2009] и часто идентифицируются как гидротермалиты [Williams-Jones et al., 2000; Anderson et al., 2013; Liu et al., 2018] или карботермальные образования [Mitchel, 2005]. В бастнезит- и флюоритсодержащих карбонатитах участков Южный и Аршан, находящихся в 26—40 км от описываемых проявлений, на посткарбонатитовой стадии фиксируются окварцевание, замещение бастнезита паризитом, синхизитом, алланитом [Рипп и др., 2000; Doroshkevich et al., 2008]. Поэтому к аргументам высокотемпературного образования исследуемых пород относятся: структурно-текстурные особенности пород (равномернозернистость, наличие фенокристов, следы течения, наличие газовых пустот), более всего совпадающие с магматическим способом их образования; границы ксенолитов (несмотря на пестрый состав) с флюорит-бастнезитовыми агрегатами резкие, без реакционных кайм; высокие температуры гомогенизации первичных включений в бастнезите (490—520 °C).

Флюидный режим формирования карбонатитов Западного Забайкалья изучен относительно слабо. До настоящего времени приводились оценки только гидротермальной (330—210 °C) минерализации карбонатитов [Булнаев, 1985, 2000]. Первые кристаллофлюидные включения были установлены и изучены на Южном и Аршанском REE-карбонатитах [Дорошкевич, Рипп, 2004]. Установлено, что бастнезит карбонатитов образовался при температурах выше 520 °C. Получить истинные температуры гомогенизации рассол-расплавных включений тогда не удалось вследствие разложения минерала-хозяина (бастнезита) при высоких температурах от 480 до 520 °C. Однако удалось установить наличие солевых дочерних фаз сульфатов Na, K и Ca и фторсодержащих минералов во включениях [Дорошкевич, Рипп, 2004]. Температура образования флюорита на месторождениях Аршан и Южное находится в интервале 370—400 °C, а первые оценки температур формирования минерала на Улан-Удэнском проявлении — 233—237 °C [Рипп и др., 2018].

Полученные новые данные исследований включений в бастнезите и флюорите Улан-Удэнского проявления показали, что породы образовались из ортомагматического солевого рассола карбонатно(Са, REE)-сульфатного (Са, Na) состава при температурах выше 490—520 °C. Дальнейшая эволюция орто-

карбонатитового флюида на гидротермальном этапе проходила по следующей схеме изменения *TX*условий процессов минералообразования: при 450—430 °C карбонатно-сульфатный (30—40 мас. %) раствор (Ca, Na, REE)-CO<sub>2</sub>  $\rightarrow$  при 350—290 °C в хлоридный (K, Na)-CO<sub>2</sub> (30—10 мас. %) раствор  $\rightarrow$ 350—290 $\rightarrow$ 200—150 °C гидрокарбонатно-сульфатный—гидрокарбонатно-хлоридный (Ca, Mg, Fe<sup>3+</sup>, Na, K)—CO<sub>2</sub>±H<sub>2</sub> низкоконцентрированный (10—1 мас.%) раствор. В первую ортомагматическую стадию кристаллизуется основной парагенезис пород — бастнезит, флюорит, флогопит, циркон, ильменит. При этом сульфаты также последовательно меняют свой состав от ранней ортомагматической стадии (глауберит) к гидротермальным стадиям (барит, крокит, ярозит) при изменении состава флюида на низкоконцентрированный гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридный.

Все перечисленное позволяет относить изученные флюорит-бастнезитовые породы к производным региональной карбонатитовой рудно-магматической системы, широко проявленной в виде карбонатитовых F-Ba-Sr- и REE комплексов в Западном Забайкалье: Халюта, Южное, Аршан, Торей, Ошурково. К особенностям пород относится присутствие в них сульфатных минералов. Они выделялись с начальных стадий (в виде включений в фенокристах) до завершающих, цементируя дробленые участки ранее образованных флюорита, бастнезита, флогопита. Следует отметить, что сульфаты относятся к числу типоморфных минералов в карбонатитах Западного Забайкалья [Дорошкевич и др., 2003]. Сульфатная фаза, согласно [Migdisov, Williams-Jones, 2014], могла быть одним из важных лигандов переноса (и, соответственно, концентрирования) редкоземельных элементов. Это расширяет ареал распространения таких пород, имеет важное значение для расшифровки геологических процессов региона и существенно увеличивает перспективы редкоземельного оруденения изученной территории.

Экспериментальные исследования карбонатитовых систем показывают, что гидротермальные редкоземельные минералы, как правило, накапливаются в растворе и кристаллизуются в виде собственных минеральных фаз в результате перераспределения флюидами редкоземельных элементов в REEсодержащих магматических минеральных фазах [Harlov et al., 2002, 2005; Harlov, Förster, 2003; Широносова, Прокопьев, 2017, 2018]. Флюиды, участвующие в переносе и кристаллизации REE-минералов имеют высокую активность анионных лигандов (F, Cl,  $CO_2$  (ж),  $SO_4^{2-}$ ), а также являются по составу рассолами [Tropper et al., 2011, 2013; Williams-Jones et al., 2012]. Согласно [Li, Zhou, 2015], гидротермальное REE-перераспределение также сильно зависит от катионных лигандов Са и Na. Данные наблюдения подтверждены результатами исследования флюидных и расплавных включений в минералах [Samson et al., 1995; Buhn, Rankin, 1999, 2002; Smith et al., 2000, 2018; Xie et al., 2009; Prokopyev et al., 2016, 2017, 2018] и, несомненно, требуют пристального внимания при изучении карбонатитовых комплексов Западного Забайкалья.

Определенную интригу для изученного проявления вносят кальцитсодержащие породы. Такие породы отнесены [Лапин и др., 2011] к одной из высокотемпературных фаций (420—530 °C) карбонатитов. Минералогические особенности этих пород позволяют говорить в настоящее время пока о вероятной связи с изученным нами проявлением. Кальцитовая порода совместно с альбитом описана на месторождении карбонатитов Кызылджоарен (Турция) [Никифоров и др., 2014]. Это месторождение известно как крупный флюорит-барит-редкоземельный объект. Для нашего случая природа кальцитсодержащих пород и характер связи их с флюорит-бастнезитовыми требует дополнительных исследований.

#### выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. Обоснована генетическая связь Улан-Удэнского проявления с позднемезозойскими карбонатитами Западно-Забайкальской провинции. Установлены специфичность его состава, высокие концентрации редкоземельных элементов. Подобно карбонатитам Западно-Забайкальской провинции в его формировании участвовали сульфаты. Обнаружение этого проявления свидетельствует о еще недостаточной геологической изученности площади и высоких перспективах ее на промышленное редкоземельное оруденение.

Геохимические исследования выполнены в рамках темы НИР ПФНИ ГАН IX.129.1.2 (№ гос. рег. АААА-А16-116122110027-2). Изучение изотопного состава в минералах при финансовой поддержке проекта РФФИ 17-05-00129а. Изучение минералогии карбонатитов выполнено за счет средств гранта Президента РФ МК-1113.2019. Термометрические эксперименты финансированы за счет гранта РНФ 19-17-00013.

### ЛИТЕРАТУРА

Булнаев К.Б. Условия образования и локализации фтор-редкоземельного оруденения // Геология рудных месторождений, 1985, т. XXVII, № 2, с. 28—38.

Булнаев К.Б. Редкоземельное оруденение линейных карбонатитов Аршанского месторождения // Геология рудных месторождений, 2000, № 36, с. 275—280.

Дорошкевич А.Г. Петрология карбонатитовых и карбонатсодержащих щелочных комплексов Западного Забайкалья: Автореф. дис.... д.г.-м.н. Улан-Удэ, ГИН СО РАН, 2013, 40 с.

Дорошкевич А.Г., Кобылкина О.В., Рипп Г.С. Роль сульфатов в образовании карбонатитов Западного Забайкалья // ДАН, 2003, т. 388, № 4, с. 535—538.

Дорошкевич А.Г., Рипп Г.С. К оценке условий образования редкоземельных карбонатитов Западного Забайкалья // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (4), с. 495—500.

Лапин А.В., Толстов А.В., Плошко В.В., Чемизова Л.Н., Сорокина Т.И. Минерагения кор выветривания карбонатитов. Метод. руководство. М., ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2011, 308 с.

Никифоров А.А., Ozturk H., Altuncu S., Лебедев В.А. Рудоносный карбонатитсодержащий комплекс Кызылджаорен: время формирования и минеральный состав пород (Северо-Западная Анатолия, Турция) // Геология рудных месторождений, 2014, т. 56, № 1, с. 41—69.

Никифоров А.В., Болонин А.В., Сугоракова А.М., Попов В.А., Лыхин Д.А. Карбонатиты Центральной Тувы: геологическое строение, минеральный и химический состав // Геология рудных месторождений, 2005, т. 47, № 4, с. 360—382.

Платов В.С., Терещенков В.Г., Савченко А.А., Бусуек С.М., Аносова Г.Б., Полянский С.А. Объяснительная записка к Государственной геологической карте Российской Федерации масштаба 1:200 000 по листу М-48-VI Селенгинской серии. М., СПб., 2000.

Рипп Г.С., Кобылкина О.В., Дорошкевич А.Г., Шаракшинов А.О. Позднемезозойские карбонатиты Западного Забайкалья. Улан-Удэ, Изд-во БНЦ СО РАН, 2000, 224 с.

Рипп Г.С., Избродин И.А., Дорошкевич А.Г., Ласточкин Е.И., Рампилов М.О., Сергеев С.А., Травин А.В., Посохов В.Ф. Хронология формирования пород габбро-сиенит-гранитной серии Ошур-ковского плутона, Западное Забайкалье // Петрология, 2013, т. 21, № 4, с. 414—432.

Рипп Г.С., Дорошкевич А.Г., Ласточкин Е.И., Избродин И.А. Изотопно-геохимические особенности пород Ошурковского апатитоносного массива (Западное Забайкалье) // Геохимия, 2014, № 4, с. 302—310.

Рипп Г.С., Избродин И.А., Рампилов М.О., Ласточкин Е.И., Дорошкевич А.Г., Хромова Е.А. Новый тип редкоземельного оруденения в Западном Забайкалье // Отечественная геология, 2018, № 3, с. 9—21.

**Травин А.В., Юдин Д.С., Владимиров А.Г., Хромых С.В., Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Колотилина Т.Б.** Геохронология Чернорудной гранулитовой зоны (Ольхонский район, Западное Прибайкалье) // Геохимия, 2009, т. 11, с. 1181—1199.

Широносова Г.П., Прокопьев И.Р. Поведение РЗЭ+У во фторидно-хлоридно-сульфатно-карбонатных средах на гидротермальных стадиях щелочных магматических комплексов по данным термодинамического моделирования // Изв. Томск. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов, 2017, т. 328, № 12, с. 75—83.

Широносова Г.П., Прокопьев И.Р. Коэффициенты распределения РЗЭ-Ү между минералами и охлаждающимся богатым сульфатной серой флюидом (термодинамическое моделирование) // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов, 2018, т. 329, № 10, с. 6—18.

Andersson U.B., Holtstam D., Broman C. Additional data on the age and origin of the Bastnäs-type REE deposits, Sweden // Mineral deposit research for a high-tech world. Proc. 12th Biennial SGA Meeting, Uppsala, Sweden, 2013, p. 1639—1642.

**Brod J.A., Gaspar I.C., de Araigo D.P., Gibson S.A., Thompson R.N., Junqueira-Brod T.C.** Phlogopite and tetra-ferriphlogopite from Brazilian carbonatite complexes: petrogenetic constrains and implication for mineral-chemistry systematics // J. Asian Earth Sci., 2001, v. 19, p. 265–296.

**Buhn B., Rankin A.H.** Composition of natural, volatile-rich Na-Ca-REE-Sr carbonatitic fluids trapped in fluid inclusions // Geochim. Cosmochim. Acta, 1999, v. 63, p. 3781—3797.

**Buhn B., Rankin A.H., Schneider J., Dulski P.** The nature of orthomagmatic, carbonatitic fluids precipitating REE,Sr-rich fluorite: fluid-inclusion evidence from the Okorusu fluorite deposit, Namibia // Chem. Geol., 2002, v. 186, p. 75–98.

Coplen T.B. Normalization of oxygen and hydrogen data // Chem. Geol., 1988, v. 72, 293-297.

**Demény A., Sitnikova M.A., Karchevsky P.I.** Stable C and O isotope compositions of carbonatite complexes of the Kola Alkaline Province: phoscorite–carbonatite relationships and source compositions // Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola Alkaline Province. Miner. Soc. Ser., 2004, v. 10, p. 407–431.

**Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Viladkar S.G., Vladykin N.V.** The Arshan REE carbonatites, South-western Transbaikalia, Russia: minerology, paragenesis and evolution // Can. Miner., 2008, v. 46, p. 807—823.

**Doroshkevich A.G., Viladkar S.G., Ripp G.S., Burtseva M.V.** Hydrotermal REE mineralization in the Amba Dongar carbonatite complex, Gujarat, India // Can. Miner., 2009, v. 47, p. 1105–1116.

**Fleck R.J., Sutter J.F., Elliot D.H.** Interpretation of discordant <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age-spectra of Mesosoic tholeiites from Antarctica // Geochim. Cosmochim. Acta, 1977, v. 41, p. 15–32.

Friedman I., O'Neil J., Cebula G. Two new carbonate stable-isotope standards // Geostand. Newslett., 1982, v. 6 (1), p. 11—12.

**Harlov D.E., Förster H.J.** Fluid-induced nucleation of (Y + REE)-phosphate minerals in apatite: nature and experiment. Part II. Fluorapatite // Am. Miner., 2003, v. 88, p. 1209—1229.

**Harlov D.E., Förster H.J., Nijland T.G.** Fluid induced nucleation of (Y + REE)-phosphate minerals in apatite: nature and experiment. Part I. Chlorapatite // Am. Miner., 2002, v. 87, p. 245—261.

**Harlov D.E., Wirth R., Förster H.J.** An experimental study of dissolution–reprecipitation in fluorapatite: fluid infiltration and the formation of monazite // Contr. Miner. Petrol., 2005, v. 150, p. 268–286.

Li X., Zhou M.F. Multiple stages of hydrothermal REE remobilization recorded in fluorapatite in the Paleoproterozoic Yinachang Fe–Cu–(REE) deposit, Southwest China // Geochim. Cosmochim. Acta, 2015, v. 166, p. 53–73.

Liu S., Fan H., Yang K.-F., Hu F.-F., Wang K.-Y., Chen F.-K., Yang Y., Yang Z.-F., Wang Q.-W. Mesoproterozoic and Paleozoic hydrothermal metasomatism in the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit: Constrains from trace elements and Sr-Nd isotope of fluorite and preliminary thermodynamic calculation // Precambrian Res., 2018, v. 311, p. 228—246.

McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth // Chem. Geol., 1995, v. 120, p. 223–253.

**Migdisov A., Williams-Jones A.E.** Hydrothermal transport and deposition of the rare earth elements by fluorine-bearing aqueous liquids // Miner. Deposita, 2014, v. 49, p. 987—997.

Mitchell R.H. Carbonatites and carbonatites and carbonatites // Can. Miner., 2005, v. 43, p. 2049—2068. Prokopyev I.R., Borisenko A.S., Borovikov A.A., Pavlova G.G. Origin of REE-rich ferrocarbonatites in southern Siberia (Russia): implications based on melt and fluid inclusions // Miner. Petrol., 2016, v. 110 (6), p. 845—859.

**Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Sergeev S.A.** Mineralogy, age and genesis of apatite-dolomite ores at the Seligdar apatite deposit (Central Aldan, Russia) // Ore Geol. Rev., 2017, v. 81, p. 296—308.

**Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Redina A.A., Obukhov A.V.** Magnetite-apatite-dolomitic rocks of Ust-Chulman (Aldan shield, Russia): Seligdar-type carbonatites? // Miner. Petrol., 2018, v. 112 (2), p. 257—266.

**Ruberti E., Enrich G.E, Gomes C.B., Comin-Chiaramonti P.** Hydrothermal REE fluorocarbonate mineralization at Barra do Itapirapua, a multiple stockwork carbonatite, Southern Brazil // Can. Miner., 2008, v. 46, p. 901—914.

Samson I.M., Liu W.N., Williams-Jones A.E. The nature of orthomagmatic hydrothermal fluids in the Oka carbonatite, Quebec, Canada: evidence from fluid inclusions // Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, v. 59, p. 1963—1977.

Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // Geochim. Cosmochim. Acta, 1990, v. 54, p. 1353—1357.

Smith M.P., Henderson P., Campbell L.S. Fractionation of the REE during hydrothermal processes: constraints from the Bayan Obo Fe–REE–Nb deposit, Inner Mongolia, China // Geochim. Cosmochim. Acta, 2000, v. 64, p. 3141–3160.

Smith M., Kynicky J., Xu C., Song W., Spratt J., Jeffries T., Brtnicky M., Kopriva A., Cangelosi D. The origin of secondary heavy rare earth element enrichment in carbonatites: Constraints from the evolution of the Huanglongpu district, China // Lithos, 2018, v. 308—309, p. 65—82.

Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the ocean basins / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. Geol. Soc. London Spec. Publ., 1989, v. 42, p. 313—345.

**Tao F., Yuzhuo Q., Xiuhua Q.** Carbon and oxygen isotopic characteristics of REE-fluorcarbonate minerals and their genetic implications, Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China // Chinese J. Geochem., 1996, v. 15, N 1, p. 82—86.

**Taylor H.P., Frechen J., Degens E.T.** Oxygen and carbon isotope studies of carbonatites from the Laacher See district, West Germany and the Alnö district, Sweden // Geochim. Cosmochim. Acta, 1967, v. 31, p. 407—430.

**Tropper P., Manning C.E., Harlov D.E.** Solubility of  $CePO_4$  monazite and  $YPO_4$  xenotime in  $H_2O$  and  $H_2O$ -NaCl at 800 °C and 1 GPa: implications for REE and Y transport during high-grade metamorphism // Chem. Geol., 2011, v. 282, p. 58—66.

**Tropper P., Manning C.E., Harlov D.E.** Experimental determination of CePO<sub>4</sub> and YPO<sub>4</sub> solubilities in  $H_2O$ -NaF at 800 °C and 1 GPa: implications for rare earth element transport in high-grade metamorphic fluids // Geofluids, 2013, v. 13, p. 372—380.

**Wall F., Barreiro B.A., Spiro B.** Isotopic evidence for late-stage processes in carbonatites: rare earth mineralization in carbonatites and quartz rocks at Kangankunde, Malawi // Miner. Mag., 1994, v. 58A, p. 951—952.

Williams-Jones A.E., Samson I.M., Olivo G. The genesis of hydrothermal fluorite-REE deposits in the Gallinas Mountains, New Mexico // Econ. Geol., 2000, v. 95, p. 327—341.

Williams-Jones A.E., Migdisov A.A., Samson I.M. Hydrothermal mobilisation of the rare earth elements — a tale of «Ceria» and «Yttria» // Elements, 2012, v. 8, p. 355—360.

Xie Y., Hou Z., Yin S., Dominy S., Xu J., Tian S., Xu W. Continuous carbonatitic melt–fluid evolution of a REE mineralization system: Evidence from inclusions in the Maoniuping REE Deposit, Western Sichuan, China // Ore Geol. Rev., 2009, v. 36 (1), p. 90–105.

Рекомендована к печати 22 мая 2019 г. Е.В. Скляровым Поступила в редакцию 6 марта 2019 г., после доработки — 21 мая 2019 г.