Оригинальная статья / Original article
УДК 552.331
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-145-159

Флюорит-бастнезитовые породы Улан-Удэнского редкоземельного проявления – новый тип карбонатитов (Россия, Западное Забайкалье)

© Г.С. Рипп[a], Е.И. Ласточкин[b], Л.Б. Дамдинова[c], И.А. Избродин[d], М.О. Рампилов[e], А.А. Савченко[f], В.Ф. Посохов[g]
[a–g]Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Резюме: Целью работы является подтверждение магматической природы бастнезит-флюоритовых пород Улан-Удэнского проявления, представляющих собой специфический тип карбонатитов. Минералы были изучены с помощью электронной микроскопии, термометрии и анализа стабильных изотопов. Содержание флюорита и бастнезита в них нередко достигает 50 % (каждого). По времени образования (134,2±2,6 млн лет) данные породы близки к карбонатитам Западно-Забайкальской провинции. Температуры образования бастнезита и флюорита в них превышают 500 °С. В породах присутствуют фенокристы флюорита, бастнезита, тетраферрифлогопита. Кристаллизация их начиналась в промежуточном очаге. Матрица, сложенная тонкозернистым флюоритом с мелкими табличками бастнезита, формировалась в близповерхностных условиях и фиксируется закаленностью пород. Особенностью карбонатитов является «сухость» их расплава. Это определило крайне низкое проявление гидротермальных процессов, изменения ксенолитов и ранее образованных минералов. Свидетельством пониженной флюидонасыщенности является отсутствие во флогопите воды в позиции А, заполненной только фтором. Карбонатиты характеризуются повышенным содержанием сульфатов, представленных тенардитом, глауберитом, плюмбоярозитом, коркитом, присутствующих в составе солевых расплавов, выделившихся на поздней стадии кристаллизации расплава.

Ключевые слова: флюорит, бастнезит, карбонатит, глауберит, плюмбоярозит

Благодарности: Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Геологического института СО РАН (базовый проект IX.129.1.2, № АААА-А16-116122110027-2) и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-1014.2019.5).

Информация о статье: Дата поступления 14 апреля 2020 г.; дата принятия к печати 25 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

Для цитирования: Рипп Г.С., Ласточкин Е.И., Дамдинова Л.Б., Избродин И.А., Рампилов М.О., Савченко А.А. [и др.]. Флюорит-бастнезитовые породы Улан-Удэнского редкоземельного проявления – новый тип карбонатитов (Россия, Западное Забайкалье). *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 2. С. 145–159. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-145-159

Fluorite-bastnaesite rocks of the Ulan-Ude rare earth occurrence as a new type of carbonatites: Western Transbaikalia, Russia

© German S. Ripp[a], Evgeny I. Lastochkin[b], Lyudmila B. Damdinova[c], Ivan A. Izbrodin[d], Mikhail O. Rampilov[e], Alena A. Savchenko[f], Viktor F. Posokhov[g]
[a–g]Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Abstract: The aim of the study is to show evidence confirm the magmatic nature of the bastnaesite-fluorite rocks of the Ulan-Ude occurrence that represent a specific type of carbonatites. The minerals have been studied using electron microscopy, thermometry, and analysis of stable isotopes. In many cases, the content of both fluorite and bastnaesite in the studied rocks reaches 50%. The rocks formation time (134.2 ± 2.6 Ma) is close to that of the carbonatites in the Western Transbaikalia province. The temperature of bastnaesite and fluorite formation in the rocks exceeds 500 C. The studied rocks contain phenocrysts of fluorite, bastnaesite, and tetraferriflogopite. Their crystallization began in the intermediate focus. The fine-grain fluorite matrix with small bastnaesite scales was formed in near-to-the-surface conditions and fixed by the hardening of the rocks. The carbonatites feature melt “dryness”, which determines an extremely low occurrence of the hydrothermal processes, changes in the xenoliths

and previously formed minerals. The low fluid saturation level is confirmed by the absence of phlogopite water in position A, filled with fluorine only. The carbonatites are characterized by a higher content of sulfates represented by tenardite, glauberite, plumbojarosite, and corkite that are present in the composition of the salt melts released at the later stage of the melt crystallization.

Keywords: fluorite, bastnaesite, carbonatite, glauberite, plumboyarozite

Acknowledgements: The study has been conducted within the framework of the Fundamental Research Program of the Geological Institute, SB RAS (base project IX.129.1.2, № АААА-А16-116122110027-2) and with a financial support of the Presidential grant of the Russian Federation (МК-1014.2019.5).

Information about the article: Received April 14, 2020; accepted for publication May 25, 2020; available online June 30, 2020.

For citation: Ripp GS, Lastochkin EI, Damdinova LB, Izbrodind IA, Rampilov MO, Savchenko AA., et al. Fluorite-bastnaesite rocks of the Ulan-Ude rare earth occurrence as a new type of carbonatites: Western Transbaikalia, Russia. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(2):145–159. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-145-159

Введение

Улан-Удэнское рудное проявление находится в пределах г. Улан-Удэ в бортовой части р. Селенги. Оно состоит из трех участков. Один из участков был обнаружен при проходке траншеи для коммунальных коммуникаций, два других – в котлованах строящихся домов и береговом обнажении. Изначально, подобно большинству описанных в литературе карбонатитов с флюоритом и редкоземельной минерализацией, проявление было отнесено к гидротермальному типу [1]. После получения первых результатов термобарогеохимического изучения [2] было высказано предположение о карбонатитовой природе изученных пород. Более детальное термобарогеохимическое изучение проявления привело к выводу о магматическом происхождении флюорит-бастнезитовых пород. В дополнение к приведенным материалам [2] в статью включена информация о специфике сульфатной минерализации и некоторым аспектам образования пород.

Проявление расположено в пределах эрозионного окна в позднемезозойских (юрских) терригенных отложениях. Фрагменты вскрытых коренных выходов ограничены, имеют площадь 300×200 м^2. Позднемезозойские отложения выполняют котловину рифтогенной впадины, обрамленную с севера ультраметаморфическим комплексом пород, сложенных гнейсами, кристаллическими сланцами. Возраст подобных биотит-амфиболовых гнейсов в северном борту впадины равен 282 млн лет [3]. По данным Rb-Sr геохронологического изучения в период 277–314 млн лет они были прорваны гранитами и гнейсо-гранитами[1]. Южный борт впадины обрамлен позднепалезойскими гранитами.

В пределах эрозионного окна распространено две группы пород. Западную часть его слагают биотитовые гнейсы, кристаллические сланцы, восточную – разнозернистые брекчии, образованные по метаморфическим породам. Гнейсы сложены плагиоклазом (олигоклаз № 18) и биотитом. В качестве редких и акцессорных минералов присутствуют магнетит, апатит, циркон, роговая обманка, титанит. Полоса брекчий вытянута вдоль восточного борта р. Селенги. Эти разнообломочные породы в смеси с гнейсами интенсивно альбитизированы, биотитизированы, калишпатизированы. Ширина зоны брекчий достигает 50 м. К восточной части тектонической зоны приурочены участки с флюорит-бастнезитовым оруденением. Эта ассоциация в основном слагает цемент брекчированных пород. Количество обломочного материала варьирует в широком диапазоне (рис. 1). Размер обломков колеблется

[1] Платов В.С., Савченко А.А., Игнатов А.М., Гороховский Д.В., Шор Г.М., Алексеенко В.Д. [и др.]. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000 000 (третье поколение). Алдано-Забайкальская серия. Лист М-48 – Улан-Удэ. Объяснительная записка. 2009. 271 с.

от долей миллиметра до десятков сантиметров. В пределах ассоциации встречаются маломощные (до нескольких десятков сантиметров) тела массивных карбонатитов. Матрица породы сложена тонкозернистым флюоритовым агрегатом, в котором неравномерно распределены фенокристы бастнезита, флюорита и флогопита. В матрице флюорита рассеяны мелкие таблитчатые кристаллы поздней генерации бастнезита. Образование карбонатитов (Ar/Ar, флогопит) произошло в период 134,2±2,6 млн лет.

Материалы и методы исследований

Изотопные составы кислорода и углерода в бастнезите определены в ЦКП «Аналитический центр минералого-геохимических и изотопных исследований» Геологического института СО РАН, г. Улан-Удэ (аналитик В.Ф. Посохов). Карбонаты были разложены ортофосфорной кислотой с использованием опции Gasbench при температуре 60–70 °С в течение 2–4 ч. Измерения проведены на масс-спектрометре Thermo Finnigan MAT 253 в режиме постоянного потока гелия. Калибровка для карбонатов проведена по стандартам NBS-18, NBS-19. Величины $\delta^{13}C$(PDB) и $\delta^{18}O$(SMOW) определены с погрешностью ±0,05 и ±0,1 ‰ (1σ) соответственно.

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

Флюидные включения в минералах исследовались методами термометрии. Для определения температур гомогенизации, температур эвтектики и плавления льда водных растворов, температур растворения дочерних фаз использовалась микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений от -196 до +650 °С. Стандартная аппаратурная ошибка измерений составляет ±0,1 в отрицательной и ±5 °С в положительной области температур.

Результаты исследований

Минеральный состав карбонатитов. В составе карбонатитов установлено около двух десятков минеральных видов. Главными из них являются бастнезит и флюорит. Количество бастнезита обычно составляет 20–40 %, иногда достигает 50 %. Установлено четыре временных стадии образования этого минерала. Наиболее ранняя из них представлена фенокристами размером до 0,5–1 см, содержащими большое количество включений образовавшихся минералов (рис. 2, 3). В их составе присутствуют флогопит, калиевый полевой шпат, альбит, циркон, ильменит, рутил. Матрица на этой стадии была обогащена силикатными минералами (флогопиом, калишпатом, альбитом). Второй тип бастнезита

Рис. 1. Типичное строение брекчиевых пород Улан-Удэнского редкоземельного проявления
(темное – тонкозернистая флюоритовая матрица)
Fig. 1. Typical structure of the breccia rocks, the Ulan-Ude rare earth occurrence
(dark is a fine-grain fluorite matrix)

образовался позднее и также представлен фенокристами. Зерна его обычно катаклазированы (см. рис. 2, 3). Третий тип фенокристов сопровождается сульфатными минералами (тенардит, коркит, плюмбоярозит, глауберит), присутствующими в составе солевых расплавных включений. В завершающую стадию в мелкозернистой флюоритовой матрице образовалось большое количество мелких таблитчатых кристаллов бастнезита (см. рис. 2, *e*), не содержащих включений других минералов. В фенокристах бастнезита, а также в монаците (см. рис. 3, *c*) участками присутствует до 3 % ThO_2, что привело к облучению флюорита и появлению фиолетовой окраски этого минерала. Ни в одном случае в наблюдавшихся зернах бастнезита не установлено замещения вторичными минералами. В них до десятых долей процента присутствует кальций. Автономно в виде одиночных таблитчатых кристаллов среди флюорита встречен паризит (см. рис. 2, *f*).

Флюорит представлен двумя морфологическими типами. Один из них слагает фенокристы размером до 0,5–1,5 см. Кроме флогопита он не содержит включений других минералов. Внешняя оболочка зерен его в результате радиоактивного облучения имеет темно-фиолетовую (до черной) окраску. Ширина зоны обычно менее 1 мм. Второй тип флюорита слагает матрицу карбонатита. Количество его достигает 40–50 %, а размер зерен варьирует от долей миллиметра до 1–1,5 мм. В нем рассеяны зерна бастнезита, флогопита, полевых шпатов. В результате радиоактивного облучения флюорит приобрел неравномерную темно-фиолетовую окраску.

Флогопит относится к числу типоморфных минералов карбонатитов. Он сопровождает ассоциации от начальных до завершающих стадий образования пород, распространен в околоконтактовых ореолах минерализованных брекчий, а вдоль контактов жил карбонатитов слагает зоны ослюденения (фенитизация) мощностью до 1–3 см. Флогопит сопровождает фенокристы флюорита, бастнезита, присутствует в составе флюоритовой матрицы, в том числе в виде достаточно крупных таблитчатых фенокристов. Кроме того, встречаются скопления мелкочешуйчатых агрегатов. Большая часть минерала относится к тетраферрифлогопиту, содержащему до 18 % MgO, пониженные количества FeO (6–10 %) и Al_2O_3 (7–10 %). Ранние генерации минерала характеризуются более высокими содержаниями MgO (до 20 %). Минерал не содержит в своем составе кристаллизованной воды, а позиция A полностью заполнена фтором (до 7–8 масс. %).

Среди сульфатов наиболее распространены плюмбоярозит и глауберит. Реже встречаются ярозит, тенардит, коркит. Все они выделились на поздней стадии кристаллизации расплава. Глауберит встречен в виде изометричных включений в бастнезите (см. рис. 3, *a*). Агрегаты его сложены таблитчатыми зернами. С ним ассоциирует тенардит. В составе глауберита постоянно отмечаются примеси стронция (0,35–2,6 %), калий (0,2–0,4 %), хлор (0,5–1,26 %), фтор (1,5–3,5 %).

Ярозиты являются наиболее распространенными сульфатами. Они представлены в основном плюмбоярозитом, собственно ярозит встречается редко. Состав плюмбоярозита неоднороден. Содержание свинца в нем колеблется от 5,5 до 21,3 %. В большинстве проб присутствует P_2O_5, количество которого в отдельных случаях достигает нескольких процентов. Включения плюмбоярозита в бастнезите имеют овальную, изометричную форму (см. рис. 3, *b–d*), сложены агрегатами таблитчатых кристаллов (см. рис. 3, *c*) иногда в ассоциации с коркитом. Во включениях с ним отмечается захваченный из матрицы мелкозернистый флюорит. Нередко во флюоритовой матрице плюмбоярозит слагает шлиры размером до 1–2 см (см. рис. 3, *d*). Он цементирует дробленные участки карбонатитов (см. рис. 3, *e–f*).

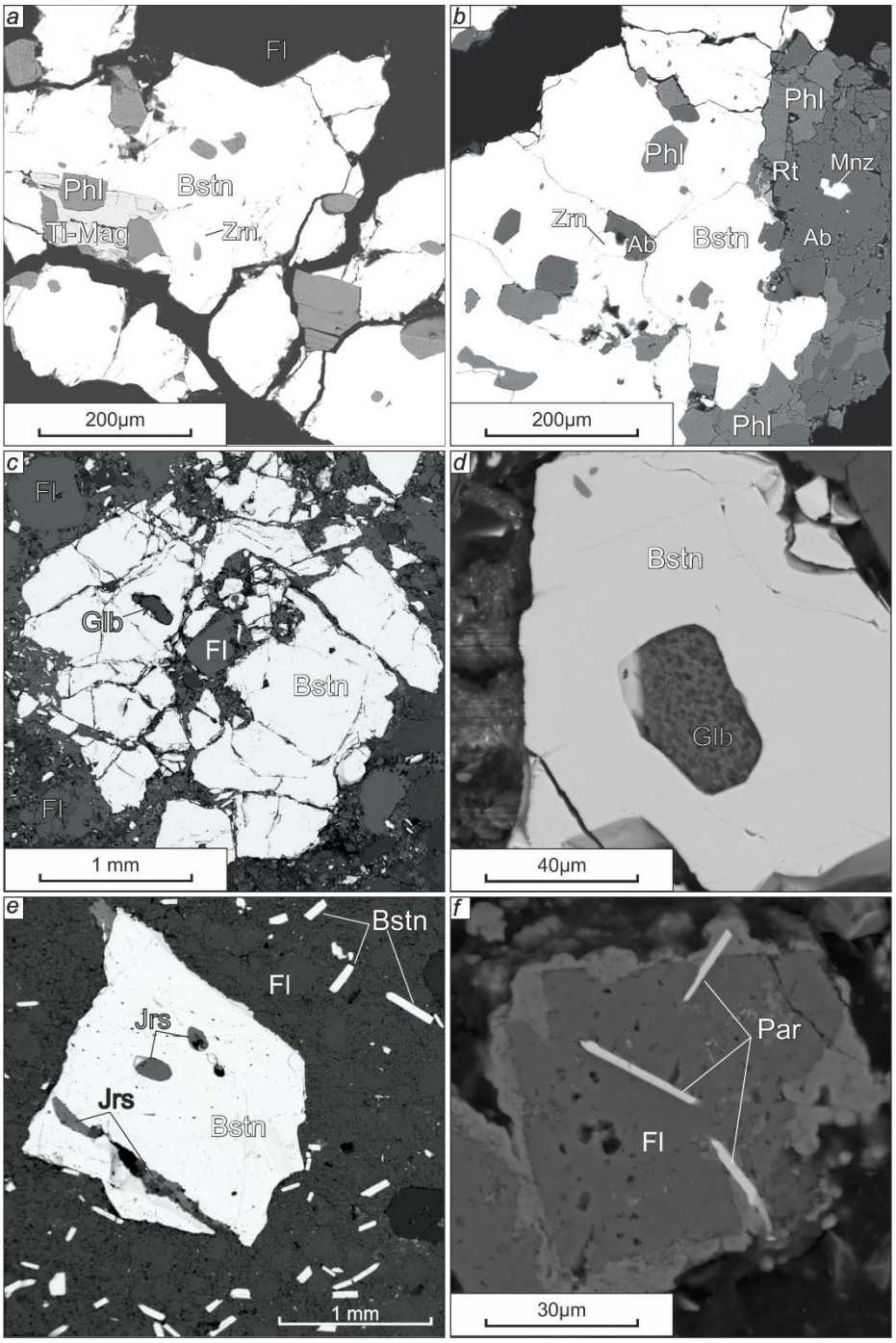


Рис. 2. Характер выделений редкоземельной минерализации Улан-Удэнского проявления:
a, b – фенокристы бастнезита ранней стадии формирования карбонатитов: c – дробленный фенокрист бастнезита, сцементированный тонкозернистой флюорит-бастнезитовой матрицей; d – фенокрист бастнезита промежуточной стадии кристаллизации с включением глауберита; e – фенокрист бастнезита в агрегате тонкозернистого флюорита и таблитчатых кристаллов бастнезита; f – таблитчатые кристаллы паризита в агрегате флюорита: Ti-Mag – титаномагнетит, Zrn – циркон, Ab – альбит, Mnz – монацит, Bstn – бастнезит, Phl – флогопит, Glb – глауберит, Jrs – ярозит, Rt – рутил, Fl – флюорит, Par – паризит

Fig. 2. The nature of the of rare-earth mineralization discharge, the Ulan-Ude occurrence:
a, b – bastnaesite phenocrysts, the early stage of carbonatite formation; c – crushed bastnaesite phenocryst cemented with a fine-grain fluorite-bastnaesite matrix; d – bastnaesite phenocryst, the intermediate crystallization stage with the inclusion of glauberite; e – bastnaesite phenocryst in the aggregate of the fine-grain fluorite and scaly bastnaesite; f – scaly crystals of parisite in the fluorite aggregate: Ti-Mag – titan-magnetite, Zrn – zircon, Ab – albite, Mnz – monazite, Bstn – bastnaesite, Phl – phlogopite, Glb – glauberite, Jrs – jarosite, Rt – rutile, Fl – fluorite, Par – parisite

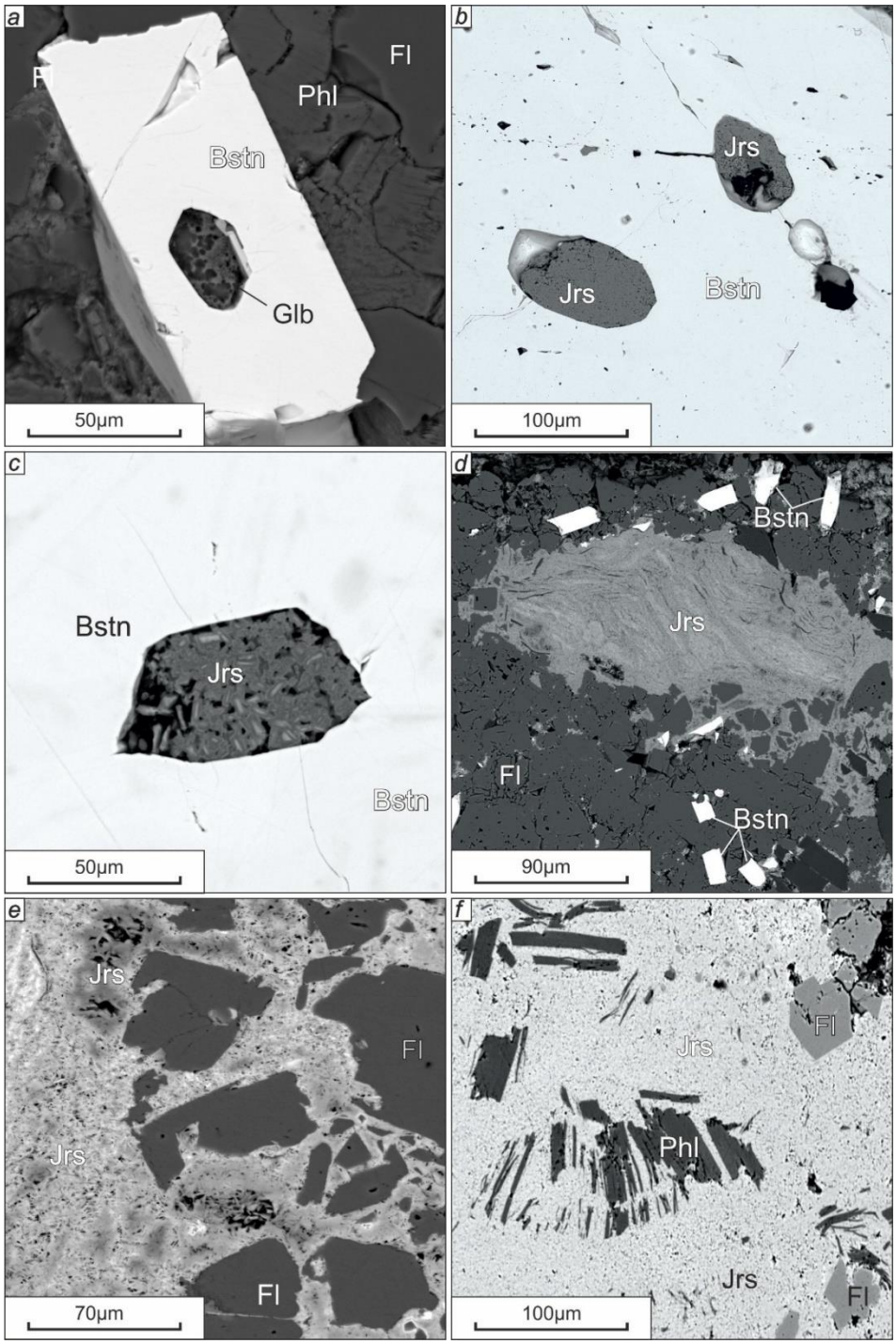


Рис. 3. Характер выделений сульфатных минералов в карбонатитах:
a – фенокрист бастнезита с включением глауберита (темное – мелкозернистая флюоритовая матрица); b – включения плюмбоярозита в фенокристе бастнезита; c – агрегат мелкотаблитчатых кристаллов плюмбоярозита в фенокристе бастнезита; d – шлировое скопление плюмбоярозита во флюоритовой матрице; e – дробленный мелкозернистый карбонатит, сцементированный плюмбоярозитом; f – дробленные участки флогопита и флюорита, сцементированные плюмбоярозитом: Fl – флюорит, Phl – флогопит, Bstn – бастнезит, Glb – глауберит, Jrs – ярозит

Fig. 3. The nature of the sulfate mineral precipitation in carbonatites:
a – bastnaesite phenocryst with the inclusion of glauberite (dark is a fine-grain fluorite matrix; b – inclusion of plumbojarosite in the bastnaesite phenocryst; c – aggregate of fine-scale crystals of plumbojarosite in the bastnaesite phenocryst; d – schlieren accumulation of plumbojarosite in the fluorite matrix; e – crushed fine-grain carbonatite cemented by plumbojarosite; f – crushed sections of phlogopite and fluorite cemented by plumbojarosite: Fl – fluorite, Phl – phlogopite, Bstn – bastnaesite, Glb – glauberite, Jrs – jarosite

Коркит встречается совместно с плюмбоярозитом в участках, обогащенных монацитом. Во включениях бастнезита он слагает агрегаты таблитчатых зерен вместе с плюмбоярозитом.

Последовательность минералообразования. Последовательность образования минералов показана на рис. 4. Начало кристаллизации карбонатита возникало в промежуточном очаге, фиксируется присутствием фенокристов бастнезита, флюорита и флогопита. В это время вместе с ними образовались циркон, флогопит, ильменит, рутил, альбит, калиевый полевой шпат (см. рис. 4). При перемещении расплава на верхний уровень часть фенокристов была дроблена и цементировалась тонкозернистой бастнезит-флюоритовой матрицей (см. рис. 2, *c*). Бастнезит, образовавшийся позднее, содержит только включения флогопита. В еще более поздних бастнезитах фиксируются включения сульфатных минералов. Образование карбонатитов завершилось мелкозернистым флюоритом с рассеянными таблитчатыми кристаллами поздней генерации бастнезита. (см. рис. 2, *e*). Образование флогопита происходило в течение всего периода кристаллизации расплава. Наиболее ранним являются околоконтактовые фенитоподобные образования. На поздней стадии произошло выделение сульфатных минералов.

Геохимические особенности пород. Изотопные составы кислорода и углерода бастнезита, ограниченные полем квадрата первичных магматических карбонатитов (PIC) (рис. 5), свидетельствуют об их глубинном происхождении.

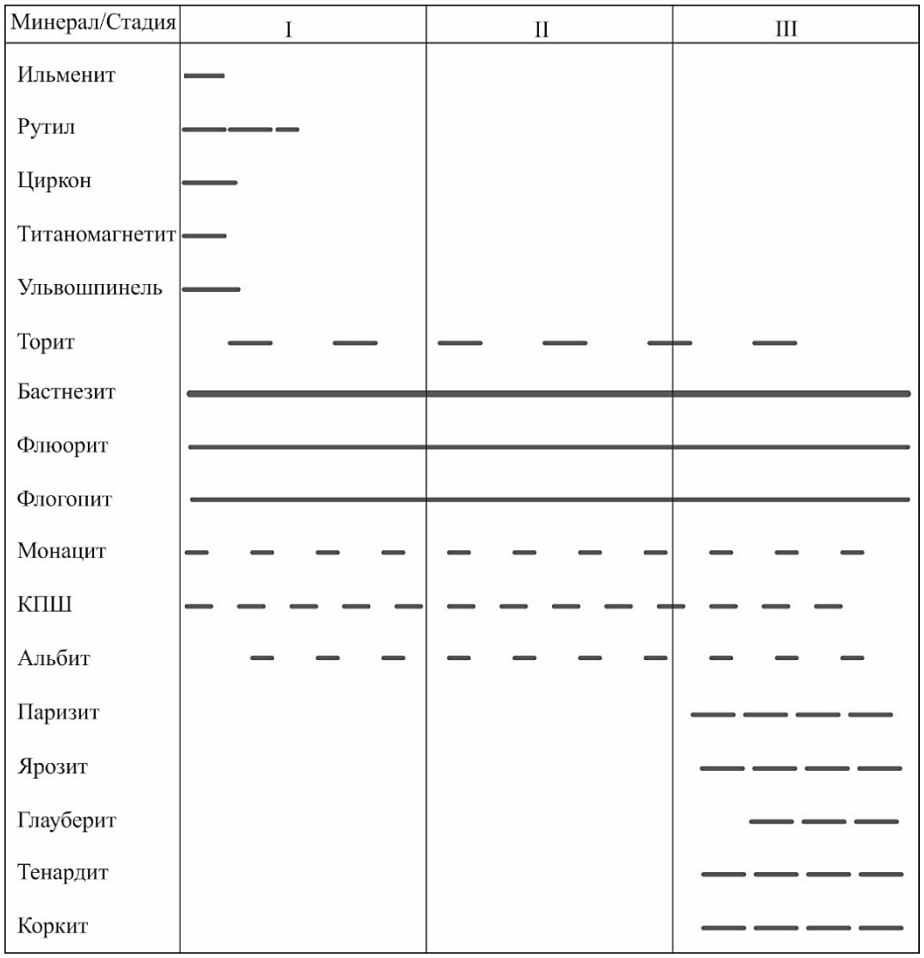


Рис. 4. Последовательность формирования минералов в карбонатитах Улан-Удэнского редкоземельного проявления
Fig. 4. Sequence of mineral formation in the carbonatites of the Ulan-Ude rare earth occurrence

В большинстве случаев их значения не выходят за пределы этого поля, отклонение может быть вызвано влиянием поздних постмагматических процессов. Составы редкоземельных элементов флюорит-бастнезитовых руд мало отличаются от составов в позднемезозойских карбонатитах Западно-Забайкальской провинции [2]. Особенностью пород является повышенная радиоактивность (20–50 мкР/ч), связанная с присутствием тория в бастнезите, монаците и вкрапленности торита.

Результаты термобарогеохимического изучения. На проявлении проведено термобарогеохимическое изучение минералов разновременных стадий кристаллизации. Были изучены первичные включения в фенокристах бастнезита и флюорита начальной стадии и флюорите из матрицы завершающего этапа. Установлены расплавные, кристаллофлюидные и газово-жидкие включения. В бастнезите изучены расплавные включения размером от 7 до 25 мк (рис. 6, *а–с*). Форма включений овальная, изометричная, иногда в виде неправильного многоугольника. Встречаются как одиночные включения, так и включения в виде групп. Включения содержат газовую (25–30 %) и твердую (70–75 %) фазы. Нередко газовый пузырь во включениях отсутствует. Минеральная фаза наблюдается в виде кристалликов неправильной формы, при прогреве включений часть из них растворяется при температуре 220–240 °С. При нагреве включений в фенокристах бастнезита минерал-хозяин начинал темнеть при температурах ≥450 °С, в связи с этим видимость становилась нулевой и эксперименты завершались. При этом объем нерастворившейся газовой фазы составлял 80–85 %.

Для установления температуры образования этого минерала нами использован титаномагнетит (около 15 % титана), присутствующий в бастнезите. Известные результаты изучения титаномагнетитов [5–7] из быстро остывавших пород показали корреляцию температур с содержанием титана в них. Расчет температуры образования такого магнетита в нашем случае показал 630 °С, что, вероятно, соответствует реальной температуре образования бастнезита.

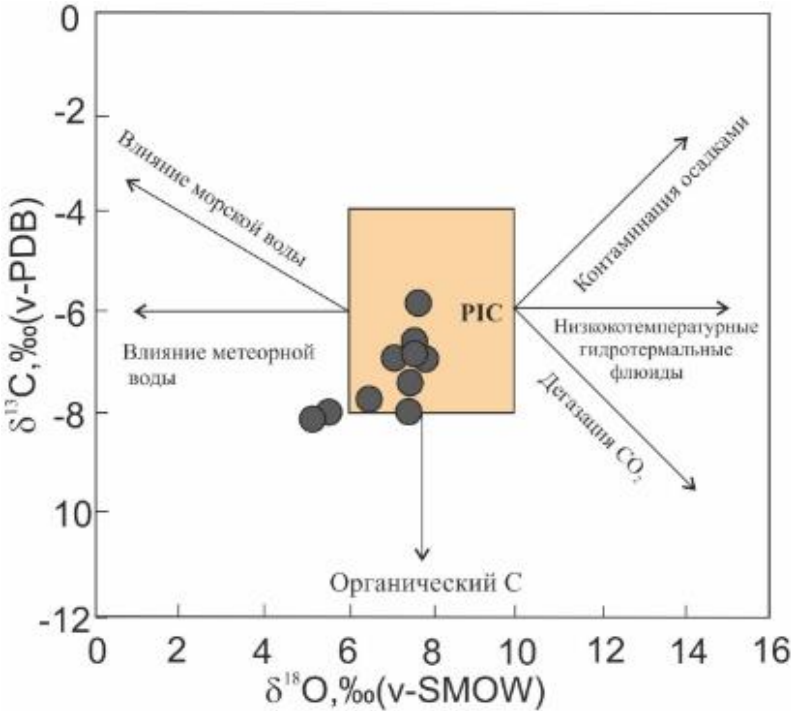


Рис. 5. Изотопные составы кислорода и углерода в бастнезитах Улан-Удэнского проявления
Поле PIC и тренды вовлечения вещества различных источников представлены по работе [4]
Fig. 5. Isotopic compositions of oxygen and carbon in the bastnaesites, the Ulan-Ude occurrence
PIC field and trends in substance involvement are represented according to [4]

Фенокристы флюорита, образованные на ранней стадии кристаллизации, имеют размер от 0,5 до 1,5 см. В них установлены первичные включения размером от 2–3 до 30 мк (рис. 6, *d–f*). Отмечаются как единичные включения, так и их группы. Количество газовой фазы в них составляет 15–25 %, количество минеральной фазы, представленной соприкасающимися зернами изометричной формы, достигает 55–65 %. При нагревании до 580 °С во включениях сохраняется нерастворенная газовая фаза (60–70 %). Гомогенизация некоторых включений происходит при ≥565–80 °С. Растворение твердых минеральных фаз отмечается при температурах ≥250–350 °С, в одном случае – при температуре 450 °С.

Флюорит, слагающий матрицу карбонатита, имеет темно-фиолетовую окраску, что затрудняет поиск пригодных включений, размер зерен флюорита обычно не более 1 мм. Включения в нем встречаются редко, имеют, как правило, изометричную или вытянутую форму (рис. 6, *g–i*). Их размер варьирует от 8 до 20 мк. В этих включениях присутствуют зерна твердой фазы. При термометрических экспериментах эти включения нагревались до 580 °С, при этом объем газового пузыря уменьшился всего на 10–20 %. Гомогенизация некоторых включений зафиксирована в диапазоне ≥450–550 °С. Растворение твердой фазы происходило при 300–350 °С.

Редко в некоторых зернах флюоритов встречаются газово-жидкие включения (рис. 6, *j–l*). Некоторые из них содержат твердые фазы, размер таких включений варьирует в основном в пределах 5–8 мк, редко достигает 15–17 мк. Форма их чаще изометричная, прямоугольная, реже вытянутая. При нагревании до ≥290–350 °С часть включений декрепитировала, в отдельных включениях при 345 °С зафиксирована гомогенизация.

Обсуждение результатов

Особенностью пород Улан-Удэнского проявления является высокая концентрация флюорита, достигающая 50 %, а в некоторых участках – более 50 %. Присутствие флюорита в карбонатитах – явление достаточно распространенное. Этот минерал нередко сопровождается редкоземельной минерализаций. Случаи экстремально высоких содержаний флюорита в карбонатитах достаточно редки. К ним относятся карбонатиты Большетагнинского месторождения [8–10], месторождений Мато Прето [11], Галлинас Маунтинс [12], Кызылджоарен [13], Амба Донгар [14], Спива [15]. Из всех вышеперечисленных месторождений по данным термометрического изучения магматические температуры установлены для месторождений Большетагнинское и Мато Прето [11]. Известные в природных объектах бастнезитсодержащие карбонатиты вместе с ассоциирующим флюоритом обычно идентифицируются как гидротермалиты [12, 16–18]. По составу, близкому к Улан-Удэнскому проявлению, в бастнезит-флюоритовых месторождениях Галлинас Маунтинс и Кызылджоарен отмечена высокая роль гидротермальных процессов.

Нужно полагать, высокие концентрации флюорита на Улан-Удэнском проявлении обусловлены специализацией региона. Здесь в позднем мезозое сформировался Центрально-Азиатский флюоритоносный пояс с сотнями эпитермальных кварц-флюоритовых проявлений и месторождений. В мезозое также образовались флюорит-фенакит-бертрандитовые месторождения (Ермаковское, Ауник, Амандак) с содержанием 20–70 % флюорита, молибден-вольфрамовые месторождения (Джидинское, Булуктаевское) с рудами и метасоматитами, содержащими до 10–15 % флюорита. В количестве до 5–10 % флюорит присутствует в некоторых позднемезозойских карбонатитах месторождений (Аршан, Южное, Жарчиха).

Магматическое происхождение, как и карбонатный состав, является главным признаком принадлежности пород к карбонатитам. Роль карбонатного компонента в нашем случае выполняет бастнезит.

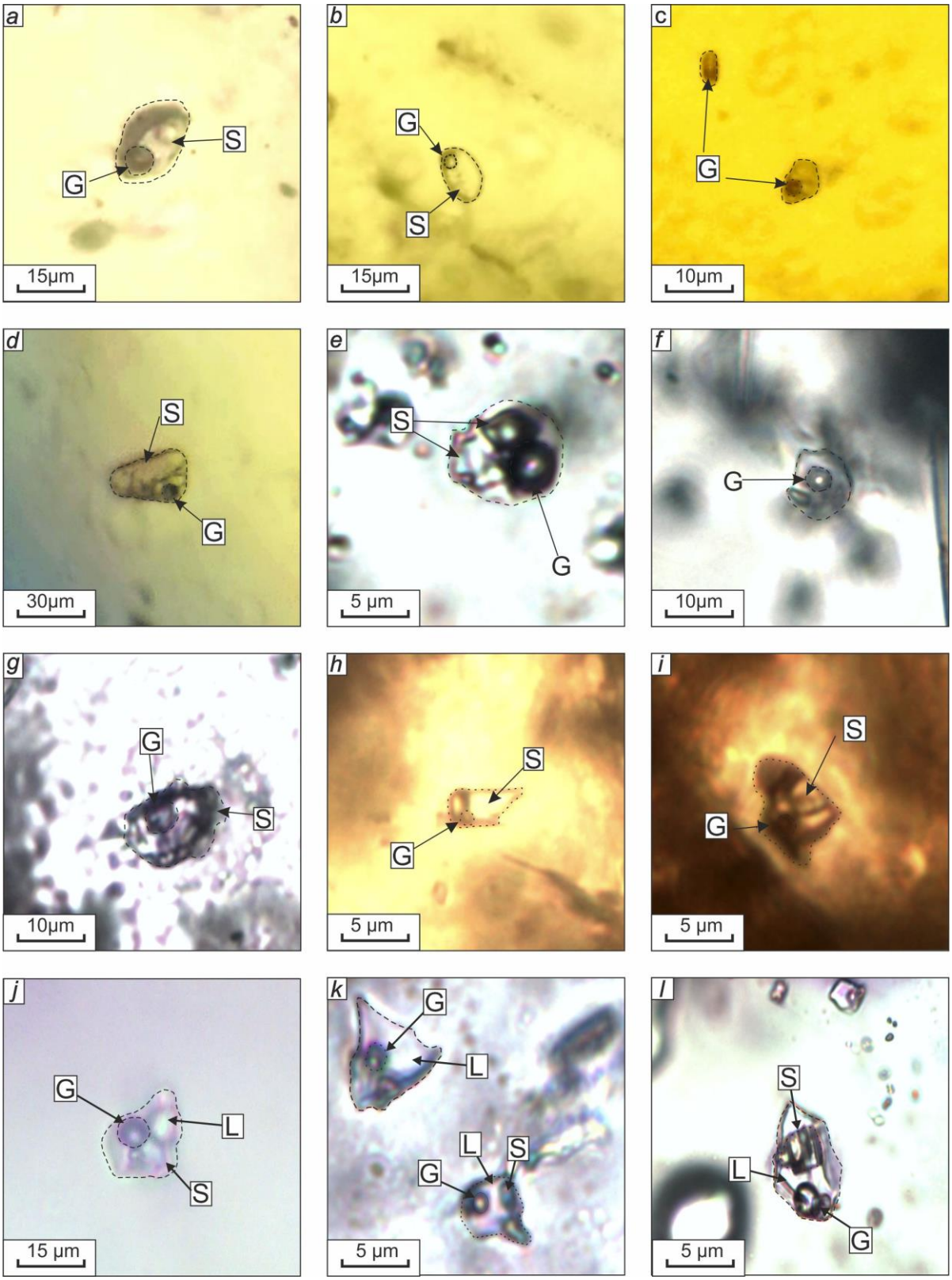


Рис. 6. Первичные включения бастнезита (a–c), флюорита (d–f) и флюоритов из тонкозернистой матрицы карбонатита (g–i) в фенокристах; газово-жидкие включения (j–l) во флюоритах:
G – газовая фаза; S – твердая фаза; L – жидкая фаза

Fig. 6. Primary inclusions in the phenocrysts: bastnaesite (a–c), fluorite (d–f), and fluorites from the fine-grain carbonatite matrix (g–i); gas-liquid inclusions (j–l) in fluorites:
G is a gas phase; S is a solid phase; L is a liquid phase

Температуры, полученные при термобарогеохимических исследованиях, соответствуют заключению о принадлежности изученных пород к карбонатитам. Геохимические особенности пород, изотопные составы кислорода и углерода в бастнезите, состав редкоземельных элементов [2] также соответствуют этому предположению. Тонкая зернистость минералов матрицы свидетельствует об их быстрой кристаллизации, связанной с близповерхностными условиями образования.

Текстурно-структурные особенности пород свидетельствуют о формировании их в двух очагах. На раннем более глубинном этапе формировались крупнозернистые минералы (фенокристы бастнезита, флюорита, флогопита). Образование флюоритовой тонкозернистой матрицы происходило в близповерхностных условиях.

Особенностью карбонатитов является «сухость» карбонатитового расплава. Ксенолиты и ранее образованные минералы в них не несут сколько-нибудь заметных гидротермальных изменений. О низкой концентрации флюида свидетельствует отсутствие его в позиции А флогопита, полностью заполненной фтором. Газово-жидкие включения не характерны как для флюорита, так и для бастнезита.

Уменьшение концентрации флюида на поздней стадии частично было связано с содержанием в расплаве лигандов плюмбоярозита. Это соединение при температурах выше 370–400 °С не содержит воду [19], а при понижении температуры поглощает ее из расплава. Значения изотопных составов кислорода и углерода бастнезита, не выходящие за пределы квадрата PIC, также свидетельствуют об отсутствии выделения флюидной фазы и вовлечения ее из других источников.

Как и в карбонатитах Западного Забайкалья [20], в породах Улан-Удэнского проявления повышены содержания сульфатной серы. Помимо сульфатных минералов (глауберит, ярозит, коркит) сера присутствует в апатите (4,2 %), монаците (3–4 %). Наличие сульфатной фазы предполагает повышенную фугитивность кислорода при образовании пород. Характер выделений сульфатов свидетельствует о присутствии их в виде солевых расплавов, включений в бастнезите и агрегатных скоплений во флюоритовой матрице. Сульфаты начинали появляться на более поздней стадии кристаллизации расплава, сегрегируясь в автономные скопления. На завершающей фазе они цементировали дробленные участки ранее образованных карбонатитов.

Заключение

Минеральный состав, геохимические особенности, высокие температуры позволили доказать принадлежность изученных пород к карбонатитам. Их структурно-текстурные особенности свидетельствуют о формировании в двух резервуарах. Начало кристаллизации протекало в промежуточном очаге, где произошел рост фенокристов флюорита, бастнезита, флогопита. Перемещение расплава к верхним горизонтам сопровождалось брекчированием, цементацией раскристаллизованных фрагментов расплава мелкозернистой матрицей. Особенностью карбонатитов является присутствие повышенных концентраций сульфатов. Последние образовались на поздней стадии кристаллизации. Особенностью карбонатитов является также «сухость» их расплава, определившая «ущербность» гидротермальных процессов, замещения вмещающих пород и ранее выделившихся минералов.

Библиографический список

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

2. Рипп Г.С., Прокопьев И.Р., Избродин И.А., Ласточкин Е.И., Рампилов М.О., Дорошкевич А.Г. [и др.]. Бастнезит-флюоритовые породы Улан-Удэнского проявления (минеральный состав, геохимические особенности, проблемы

генезиса) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 12. С. 1754–1774. https://doi.org/10.15372/GiG2019122

3. 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. 302–318. https://doi.org/10.7868/S0016752514020071

4. Demeny 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 / eds. F. Wall, A.N. Zaitsev. London: Mineralogical Society of Great Britain & Ireland, 2004. P. 407–431.

5. Рамдор П. Рудные минералы и их срастания / пер. с нем. М.: Издательство иностранной литературы, 1962. 1132 с.

6. Charilaou M., Löffler J.F., Gehring A.U. Fe-Ti-O exchange at high temperature and thermal hysteresis // Geophysical Journal International. 2011. Vol. 185. Iss. 2. P. 647–652. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04981.x

7. Jackson M., Bowles J.A. Curie temperatures of titanomagnetite in ignimbrites: effects of emplacement temperatures, cooling rates, exsolution, and cation ordering // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2014. Vol. 15. P. 4343–4368. https://doi.org/10.1002/2014GC005527

8. Андреева И.А., Коваленко В.И., Кононкова Н.Н. Натровые карбонатитовые расплавы Большетагнинского массива, Восточный Саян // Доклады Академии наук. 2006. Т. 408. № 1. С. 78–82.

9. Корытов Ф.Я., Фролов А.А., Багдасаров Ю.А. О температурах формирования флюоритсодержащих карбонатитов Большетагнинского массива // Геология месторождений редких элементов. Вып. 35. М.: Недра, 1972. С. 106–108.

10. Соколов С.В. Флюоритовые карбонатиты Большетагнинского массива (Восточный Саян, Россия) // Геохимия магматических пород: материалы XXV Всерос. семинара с уч. стран СНГ. СПб., 2008. С. 144–145.

11. Santos R.V., Dardenne M.A., Gouveia de Olivera C. Rare earth elements geochemistry of fluorite from the Mato Preto carbonatite complex, Southern Brasil // Revista Brasilera de Geociências. 1996. Vol. 26. No. 2. P. 81–86.

12. Williams-Jones A.E., Samson I.M., Olivo G.R. The genesis of hydrothermal fluorite-REE deposits in the Gallinas Mountains, New Mexico // Economic Geology. 2000. Vol. 95. Iss. 2. P. 327–342. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.2.327

13. Никифоров А.В., Öztürk H., Altuncu S., Лебедев В.А. Рудоносный карбонатит-содержащий комплекс Кызылджаорен: время формирования и минеральный состав пород (Северо-Западная Анатолия, Турция) // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56. № 1. С. 41–69. https://doi.org/10.7868/S0016777014010055

14. Viladkar S.G. Geology of the carbonatite-alkalic diatreme of Amba Dongar Gujarat: monograph. Ahmedabad: GMDC Science and Research Centre, 1996. 74 p.

15. Alvin M.P., Dunphy J.M., Groves D.I. Nature and genesis of a carbonatite-associated fluorite deposit at Speewah, East Kimberley region, Western Australia // Mineralogy and Petrology. 2004. Vol. 80. P. 127–153. https://doi.org/10.1007/s00710-003-0015-3

16. Liu S., Fan H-R., Yang K-F., Hu F-F., Wang K-Y., Chen F., et. al. Mezoproterozoic 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 Research. 2018. Vol. 311. P. 228–246. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.04.021

17. Fang T., Qiu Y., Qiu X. Carbon and oxygen isotopic characteristics of REE-fluorcarbonate minerals and their genetic implications, Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China // Chinese Journal of Geochemistry. 1996. Vol. 15. P. 82–86. https://doi.org/10.1007/BF03166799

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 World: 12th SGA Biennial Meeting Conference. 2013. Vol. 4. P. 1639–1642.

19. Frost R.L., Locke A.J., Martens W.N. Thermal analysis of beaverite in comparison with plumbojarosite // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2008. Vol. 92. P. 887–892. https://doi.org/10.1007/s10973-007-8702-7

20. Дорошкевич А.Г., Кобылкина О.В., Рипп Г.С. Роль сульфатов в образовании карбонатитов Западного Забайкалья // Доклады Академии наук. 2003. Т. 388. № 4. С. 535–538.

References

1. Ripp GS, Izbrodin IA, Lastochkin EI, Rampilov MO, Doroshkevich AG, Chromova EA. A new type of rare metal mineralization in the Western Transbaikalia. *Otechestvennaya geologiya*. 2018;3:9–21. (In Russ.)

2. Ripp GS, Prokopyev IR, Izbrodin IA, Lastochkin EI, Rampilov MO, Doroshkevich AG., et al. Bastnaesite and fluorite rocks of the Ulan-Ude occurrence (mineral composition, geochemical characteristics, and genesis issues). *Geologiya i geofizika*. 2019;60(12):1754–1774. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/GiG2019122

3. Ripp GS, Doroshkevich AG, Lastochkin EI, Izbrodin IA. Isotope-geochemical features of the rocks in the Oshurkovsky apatite-bearing massif, Western Transbaikalia.

Geokhimiya. 2014;4:302–318. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0016752514020071

4. Demeny A, Sitnikova MA, Karchevsky PI. Stable C and O isotope compositions of carbonatite complexes of the Kola Alkaline Province: phoscorite-carbonatite relationships and source compositions. In: Wall F, Zaitsev AN (eds.). *Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola Alkaline Province*. London: Mineralogical Society of Great Britain & Ireland; 2004. p.407–431.

5. Ramdohr P. *Ore minerals and their intergrowths*. Moscow: Foreign Languages Publishing House; 1962. 1132 p. (In Russ.)

6. Charilaou M, Löffler JF, Gehring AU. Fe-Ti-O exchange at high temperature and thermal hysteresis. *Geophysical Journal International*. 2011;185(2):647–652. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04981.x

7. Jackson M, Bowles JA. Curie temperatures of titanomagnetite in ignimbrites: effects of emplacement temperatures, cooling rates, exsolution, and cation ordering. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2014;15:4343–4368. https://doi.org/10.1002/2014GC005527

8. Andreeva IA, Kovalenko VI, Kononkova NN. Nanocarbonatite melts of the Bolshetagninsk massif, Eastern Sayan. *Doklady Akademii nauk*. 2006;408(1):78–82. (In Russ.)

9. Korytov FYa, Frolov AA., Bagdasarov YuA. On the temperatures of the formation of the fluorite-containing carbonatites in the Bolshetagninsky massif. In: *Geologiya mestorozhdenii redkikh elementov* = Geology of rare element deposits. Iss. 35. Moscow: Nedra; 1972. p.106–108. (In Russ.)

10. Sokolov SV. Fluorite carbonatites of the Bolshetagninsky massif (East Sayan, Russia). In: *Geokhimiya magmaticheskikh porod: materialy XXV Vserossiiskogo seminara s uchastiem stran SNG* = Geochemistry of Igneous Rocks: Proceedings of the 25th All-Russian Seminar with the CIS participation. Saint Petersburg; 2008. p.144–145. (In Russ.)

11. Santos RV, Dardenne MA, Gouveia de Oliveira C. Rare earth elements geochemistry of fluorite from the Mato Preto carbonatite complex, Southern Brasil. *Revista Brasilera de Geociências*. 1996;26(2):81–86.

12. Williams-Jones AE, Samson IM, Olivo GR. The genesis of hydrothermal fluorite-REE deposits in the Gallinas Mountains, New Mexico. *Economic Geology*. 2000;95(2):327–342. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.2.327

13. Nikiforov AV, Öztürk H, Altuncu S, Lebedev VA. Ore-bearing carbonatite-containing complex of Kyzyljaoren: rocks' formation time and mineral composition (North-West Anatolia, Turkey). *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2014;56(1):41–69. https://doi.org/10.7868/S0016777014010055

14. Viladkar SG. *Geology of the carbonatite-alkalic diatreme of Amba Dongar Gujarat*. Ahmedabad: GMDC Science and Research Centre; 1996. 74 p.

15. Alvin MP, Dunphy JM, Groves DI. Nature and genesis of a carbonatite-associated fluorite deposit at Speewah, East Kimberley region, Western Australia. *Mineralogy and Petrology*. 2004;80:127–153. https://doi.org/10.1007/s00710-003-0015-3

16. Liu S, Fan HR, Yang KF, Hu FF, Wang KY, Chen F, et. al. Mezoproterozoic 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 Research*. 2018;311:228–246. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.04.021

17. Fang T, Qiu Y, Qiu X. Carbon and oxygen isotopic characteristics of REE-fluorcarbonate minerals and their genetic implications, Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Geochemistry*. 1996;15:82–86. https://doi.org/10.1007/BF03166799

18. Andersson UB, Holtstam D, Broman C. Additional data on the age and origin of the Bastnäs-type REE deposits, Sweden. *Mineral Deposit Research for a High World: 12th SGA Biennial Meeting Conference*. 2013;4:1639–1642.

19. Frost RL, Locke AJ, Martens WN. Thermal analysis of beaverite in comparison with plumbojarosite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2008;92:887–892. https://doi.org/10.1007/s10973-007-8702-7

20. Doroshkevich AG, Kobylkina OV, Ripp GS. The role of sulfates in the formation of carbonatites in Western Transbaikalia. *Doklady Akademii nauk*. 2003;388(4):535–538. (In Russ)

Критерии авторства / Authorship criteria

Рипп Г.С., Ласточкин Е.И., Дамдинова Л.Б., Избродин И.А., Рампилов М.О., Савченко А.А., Посохов В.Ф. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

German S. Ripp, Evgeny I. Lastochkin, Lyudmila B. Damdinova, Ivan A. Izbrodin, Mikhail O. Rampilov, Alena A. Savchenko, Viktor F. Posokhov are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

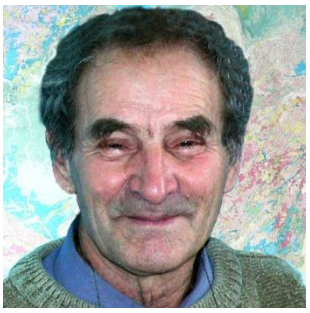
Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors

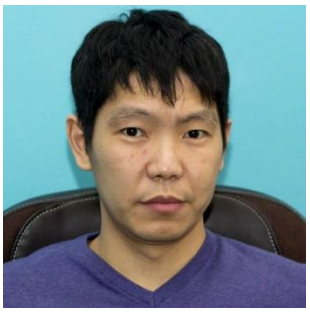


Рипп Герман Самуилович,
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: last@ginst.ru
German S. Ripp,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: last@ginst.ru

Ласточкин Евгений Иванович,
кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
✉ e-mail: gin-buryatia-07@yandex.ru
Evgeny I. Lastochkin
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
✉ e-mail: gin-buryatia-07@yandex.ru

Дамдинова Людмила Борисовна,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: ludamdinova@mail.ru
Lyudmila B. Damdinova,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: ludamdinova@mail.ru

Избродин Иван Александрович,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: izbrodin@ginst.ru
Ivan A. Izbrodin,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: izbrodin@ginst.ru



Рампилов Михаил Олегович,
кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: mrampilov@mail.ru
Mikhail O. Rampilov,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: mrampilov@mail.ru

Савченко Алена Алексеевна,
младший научный сотрудник лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: njandani@yandex.ru
Alena A. Savchenko,
Junior Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: njandani@yandex.ru

Посохов Виктор Федорович,
старший научный сотрудник лаборатории инструментальных методов анализа,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: vitaf1@yandex.ru
Viktor F. Posokhov,
Senior Researcher, Laboratory of Instrumental Analysis Methods,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: vitaf1@yandex.ru