

Новый тип редкоземельного оруденения в западном Забайкалье

Г.С.РИПП, И.А.ИЗБРОДИН, Е.И.ЛАСТОЧКИН, М.О.РАМПИЛОВ (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН); 670031, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а),
А.Г.ДОРОШКЕВИЧ (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН); 670031, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а), (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт геологии и минералогии СО РАН (ИГМ СО РАН); 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3),
Е.А.ХРОМОВА (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН); 670031, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а)

Редкоземельные проявления приурочены к выходам интенсивно дислоцированных кристаллических сланцев, гнейсов, кварцитов. Они представлены линзо- и жиллообразными телами, зонами брекчированных пород, сцементированных преимущественно бастнезит-флюорит-альбитовым агрегатом. Минеральный состав этих пород резко отличается от известных в регионе редкоземельных проявлений и месторождений. Кроме флюорита, альбита, бастнезита и калишпата в них присутствуют кварц, тетраферрифлогопит, манганильменит, а в качестве аксессуарных – монацит, циркон, рутил. Содержание флюорита в породах достигает нескольких десятков процентов, а бастнезита – до 15%. Минерализация сформировалась в три стадии: две бастнезитсодержащие с альбитом и флюоритом и завершающую, существенно флюоритовую. Редкоземельные элементы (РЗЭ) в них представлены в основном лёгкими лантаноидами. Термометрическое изучение минералов свидетельствует о гидротермальном образовании проявлений. Температура гомогенизации первичных флюидных включений в бастнезите – 345°C. Во флюорите часть включений гомогенизировала при температуре 233°–237°C, другая – при 160°–190°C. Изотопные составы углерода (-7‰ $\delta^{13}\text{C}$) и кислорода ($6,7\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$) в бастнезитах ложатся в контур квадрата P1C мантийных карбонатов. Первичные изотопные стронциевые отношения ($\text{Sr}_i - 0,7056$) также свидетельствуют о вероятном мантийном источнике их вещества. Низкие значения изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) в альбите ($4,3\text{‰}$) и биотите ($1,1\text{‰}$) свидетельствуют об участии в составе флюидов метеорного источника. Минералого-геохимические (в том числе изотопные) особенности проявлений, а также результаты определения Ar/Ar возраста указывают на их близость с позднемезозойскими карбонатитами Юго-Западного Забайкалья. Обнаружение этих проявлений свидетельствует о существовании новой площади с редкоземельным оруденением. Их связь с карбонатитами существенно расширяет ареал распространения таких пород и увеличивает перспективы территории Юго-Западного Забайкалья на этот вид полезных ископаемых.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, карбонатит, бастнезит.

Рипп Герман Самуилович
Избродин Иван Александрович
Ласточкин Евгений Иванович
Рампилов Михаил Олегович
Дорошкевич Анна Геннадьевна
Хромова Елена Александровна



ripp@gin.bscnet.ru
isbrodin@rambler.ru
gin-buryatia-07@yandex.ru
mrampilov@mail.ru
doroshkevich@igm.nsc.ru
lena.khromova.00@mail.ru

A new type of rare metal mineralization in the Western Transbaikalia

G.S.RIPP, I.A.IZBRODIN, E.I.LASTOCHKIN, M.O.RAMPILOV (Geological Institute SB RAS),
A.G.DOROSHKOVICH (Geological Institute SB RAS; V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS),
E.A.CHROMOVA (Geological Institute SB RAS)

REE ores are located in intensively dislocated crystalline schists, gneisses, quartzites. They represented by lens-and vein-like bodies, zones of brecciated rocks cemented by bastnasite-fluorite-albite aggregate. The mineral composition of these rocks differs sharply from other rare-earth deposits known in the region. Apart from fluorite, albite, bastnesite and K-feldspar there are quartz, tetraferriphlogopite; as accessory, there are monazite, zircon and rutile. Fluorite is contained in rocks

up to scores of percent, and bastnasite up to 15%. Ore mineralization formed during three stages two stages bastnasite, albite, fluorite, and primary fluorite. Rare earth elements are predominantly light. Thermometric study of minerals indicates hydrothermal formation. The homogenization temperature of primary fluid inclusions in bastnasite is 345°C. Some inclusions were homogenized at 233°–237°C, the other at 160°–190°C in fluorite. Isotopic composition of carbon (–7‰ $\delta^{13}\text{C}$) and oxygen (6,7‰ $\delta^{18}\text{O}$) in bastnasites lies within the PIC mantle carbonates. Initial ratio Sr_i (0,7056) also indicate a probable mantle source. Low values of $\delta^{18}\text{O}$ in albite (4,3‰) and biotite (1,1‰) indicate participation of water from a meteoric source. Mineralogical and geochemical (including isotopic) features, as well as Ar/Ar age indicate their similarity to Late Mesozoic carbonatites of the Southwestern Transbaikalia. Finding of these occurrences confirms a new area of REE mineralization. A relation with carbonatites can extend the range of distribution of such rocks and increases the prospects of the territory of the Southwestern Transbaikal for this type of minerals.

Key words: REE, carbonatite, bastnasite.

На территории Западного Забайкалья установлено более 10 генетических и минеральных типов редкоземельных проявлений, к числу которых относятся карбонатиты. Одна их часть (Аршанское, Южное) представлена бастнезитсодержащим типом (рис. 1), другая (Пограничное) – редкоземельными элементами (TR_2O_3 до 4–5 мас.%), сконцентрированными в апатите [14]. Повышенными концентрациями РЗЭ до 1,5 мас.% отличаются монацитсодержащие апатит-магнетитовые руды месторождения Северный Гурвунур в Озернинском рудном узле [12], апатиты (РЗЭ до 3–4 мас.%) из Сынырских ультракалийевых пород, магматиты и метасоматиты (брилолит, лопарит и др.) Бурпалинского щелочного массива в Северном Прибайкалье. В метаморфизованных высокоглинозёмистых породах [6], гранитных пегматитах установлено РЗЭ до нескольких мас.%. Во всех перечисленных случаях редкоземельные элементы представлены преимущественно лёгкими лантаноидами.

Тяжёлые лантаноиды присутствуют в гидротермалитах Кичерской зоны (Акит, Честен) в Северном Прибайкалье. Главный источник этих РЗЭ – ксенотим [1]. Обогащённость тяжёлыми РЗЭ отмечается также в альбититах бассейна р. Ирбо, содержащих фергусонит, ксенотим, иттриалит, таленит [13].

Резко отличаются от перечисленных проявлений бастнезитсодержащие породы, установленные в черте г. Улан-Удэ (см. рис. 1). Одно из них (Улан-Удэнское) вскрыто при прокладке подземных коммуникаций (пересечение улиц Смолина и Ербанова), другое (Портовое) расположено в береговом обнажении на правом берегу р. Селенга вблизи речного порта. Минералогическая и геохимическая изученность этих проявлений различна. Более детально изучено Портовое, обнаруженное в 2015 г. По Улан-Удэнскому участку кроме ранее проведённых визуальных наблюдений для аналитических исследований имелось ограниченное количество образцов.

Полученное значение возраста, минералогические и геохимические, в том числе изотопные особенности выявленных участков, позволяют предположить их генетическую связь с позднемезозойскими карбонатитовыми комплексами Западного Забайкалья, распространёнными в обрамлении внутриплитных рифтогенных структур [15].

Появление новых проявлений редкоземельной минерализации свидетельствует о ещё недостаточной изученности региона на этот вид полезных ископаемых.

Методы исследований. Ar/Ar возраст определён по флогопиту, являющемуся типоморфным минералом бастнезитсодержащих пород. Анализ выполнен в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) по методике [3]. При расчёте $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ возраста использовался метод возрастного плато [18]. По методу плато рассчитывался средний взвешенный возраст для нескольких последовательных (не менее трёх) температурных ступеней.

Изотопные составы кислорода и углерода в бастнезите и кислорода в силикатах определены в Геологическом институте СО РАН В.Ф.Посоховым. Карбонаты были разложены ортофосфорной кислотой с использованием опции «Газбенч» при температуре 60°–70°C в течение 2–4 часов. Измерения проведены на масс-спектрометре Finigan MAT 253 в режиме постоянного потока гелия. Калибровка для карбонатов проведена по стандартам NBS-18, NBS-19. Величины $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ и $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ определены с погрешностью $\pm 0,05$ и $\pm 0,1\%$ (1 σ) соответственно.

Кислород из альбита и флогопита был выделен методом лазерного фторирования. Калибровка анализов осуществлялась по международным стандартам NBS-28 (кварц), NBS-30 (биотит). Методика анализа силикатных минералов описана в работе [23]. Воспроизводимость анализов составляла $\pm 0,1$ – $0,3\%$ при 95% доверительном уровне.

Изотопный состав кислорода во флюидах произведён в соответствии с фракционированием минералов для альбита [27] и для флогопита [28]. Температуры, использованные при оценке изотопных составов, взяты из расчета 250°–300°C, полученных при термометрическом изучении флюидных включений в бастнезите и флюорите.

Состав минералов определён на модернизированном рентгеновском микроанализаторе MAP-3 С.В.Канакиным. Съёмки проводились при 15–20 kV, ускоряющем



Рис. 1. Участки расположения массивов карбонатов и изученных проявлений на схеме тектонического строения [10]:

1 – мезозойские впадины Иволгино-Удинской рифтогенной системы; 2 – ультраметаморфические породы; 3 – позднепалеозойские гранитоиды; 4 – структурные швы; 5 – точки нахождения участков: Портовое (1), Улан-Удэнское (2) и карбонатов Ошурковское (3), Халютинское (4), Аршанское (5), Южное (6)

напряжении тока зонда от 20 до 40 нА, времени измерения 20 сек и диаметре зонда 2–3 мкм. Микроструктурные особенности, взаимоотношения и однородность минералов изучались на электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy-300 Е.А.Хромовой.

Определение состава пород проведено методом классического силикатного анализа и РФА. Методом ICP-MS (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) в них установлено содержание примесных, в том числе редких и редкоземельных элементов.

Изучение включений проведено в бастнезите и флюорите оптическим и термометрическим методами. При проведении термометрических опытов с включениями использовался микроскоп Olympus BX51 с высокотемпературной термокриокамерой THMSG600 (г. Улан-Удэ). Скорость нагревания препаратов составляла в среднем 10°–15°С/мин.

Геологическое строение участков. Проявления расположены в северной части позднемезозойской Иволгино-Удинской впадины. По данным геологосъёмочных работ [4] здесь распространены поздне-меловые отложения (сотниковская свита), представленные песчаниками, алевролитами, сланцами, конгломератами, залегающими на размытой поверхности кристаллического фундамента. В составе последнего присутствуют гнейсы, мигматиты, гранито-гнейсы, 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, распространённых в 15 км к югу от г. Улан-Удэ, вблизи Ошурковского апатитового месторождения, составляет 282 млн. лет (циркон, SHRIMP II) [7, 11]. Метаморфические породы прорваны гранитами и гнейсо-гранитами, имеющими, по данным Rb-Sr геохронологического изучения [4], возраст от 277 до 314 млн. лет.

Проявления приурочены к кристаллическим породам и расположены в одном случае в береговом обнажении Портовое, в другом – в Улан-Удэнском (в 400 м по азимуту 150° от Портового). Аналогично породам, обрамляющим впадину, они метаморфизованы на уровне амфиболитовой фации, интенсивно тектонизированы, участками превращены в брекчии, пересекаются разрывными нарушениями.

В пределах проявлений распространены биотитовые кристаллические сланцы, кварциты, гнейсы и брекчии этих пород (рис. 2). Они состоят в основном из плагиоклаза, калиевого полевого шпата, биотита, кварца. В качестве аксессуарных в них присутствуют титанит, рутил и циркон. Биотит из этих пород характеризуется высокой железистостью ($f_m > 60\%$) и глинозёмистостью, не содержит фтора.

Брекчии состоят из остроугольных, частично сглаженных обломков гнейсов и кварцитов размером до 10–20 см, сцементированных мелкообломочной фракцией этих же пород. Обломки последних в виде ксенолитов часто присутствуют в бастнезитсодержащих рудах.

Бастнезитсодержащие породы представлены линзо- и жилообразными телами, гнездообразными выделениями, зонами дробления, сцементированными преимущественно флюорит-альбитовым агрегатом. Мощность тел в основном не превышает 1 м, протяжённость от первых метров до 10 метров. На участке Портовое установлено одно тело (см. рис. 2, Б). Аналогичные маломощные (до 4 см) бастнезитсодержащие прожилки и минерализованные брекчированные кварциты обнаружены также в 130 метрах к востоку, в выемке под фундаментом строящегося дома.

В результате катаклаза на обоих участках большая часть пород была измельчена до фракции размером 0,5–1,5 мм. В этом агрегате присутствуют более крупные зёрна альбита, калишпата и ксенолиты сланцев и кварцитов. На контактах тел с вмещающими породами имеются зоны, обогащённые флогопитом. Мощность их обычно не превышает 1 см.

Возраст плато, выделенного Ar³⁹ из флогопита проявления Портовое – 134,2±2,6 млн. лет.

Главные минералы бастнезитсодержащих пород – флюорит, альбит и бастнезит. Количество флюорита изменяется от единиц до 10–20 об.%, бастнезита от 1 до 15%. Существенно большей концентрацией флюорита (до 30%) и бастнезита (до 10–15%) характеризуются

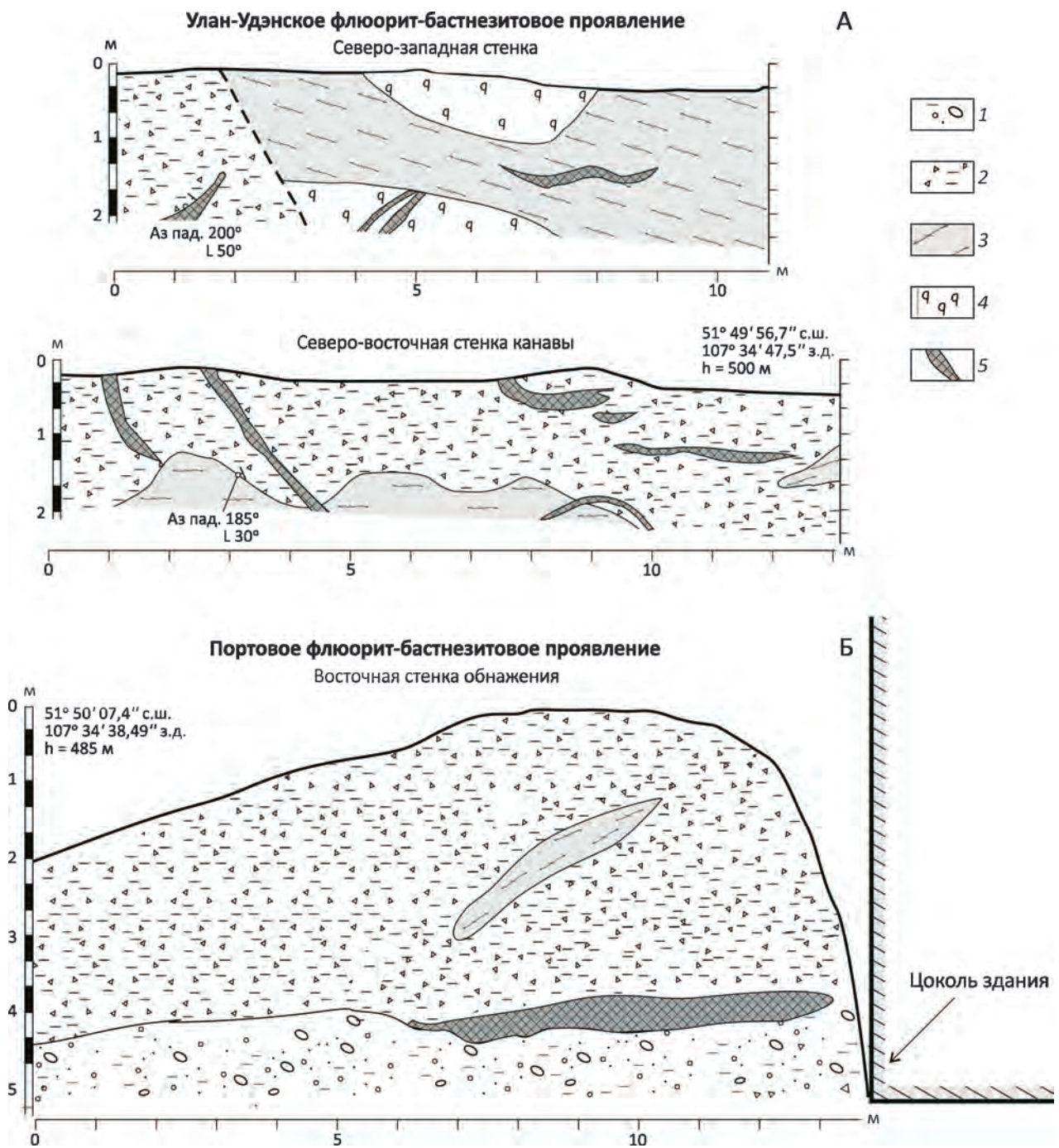


Рис. 2. Схемы зарисовок канав Улан-Удэнского (А) и обнажения Портовое (Б) флюорит-бастнезитовых проявлений. Зарисовка Улан-Удэнского участка по Б.Г.Базарову и др., 1966:

1 – делювиальные свалы; 2 – брекчи кристаллических сланцев и кварцитов; 3 – кристаллические сланцы; 4 – кварциты; 5 – тела бастнезит-флогопит-флюорит-альбитовых пород

руды Улан-Удэнского проявления. На участке Портовое отмечается до 20% калиевого полевого шпата, в меньшем количестве он присутствует на Улан-Удэнском

участке. В числе аксессуарных минералов на Портовом установлены монацит, ильменит, циркон, рутил, ферропсевдобрुकит.

1. Химический состав багнетитсодержащих пород проявления Портовое, в мас.%

№ проб	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	П.П.П.	F	SO ₃	Сумма
Б-1/15а	66,1	0,27	13,04	4,85	н/о	0,04	0,79	2,36	4,87	3,79	0,16	н/о	0,14	н/о	2,10	98,55
Б-1/15б	46,7	0,37	9,57	3,56	н/о	0,06	1,17	12,53	3,94	2,39	0,05	н/о	3,09	н/о	3,99	87,48
П-1	57,1	0,31	11,90	1,71	0,20	0,05	1,00	7,61	4,87	2,96	0,37	0,66	3,44	4,60	н/о	94,13
П-2	51,30	0,44	10,40	7,33	0,20	0,08	0,98	7,67	4,17	2,74	0,32	0,88	4,86	4,83	н/о	93,30

Примечание. н/о – элемент не определялся; пробы Б-1/15 выполнены в ИГМ СО РАН (РФА), П-1 и П-2 – в ГИН СО РАН (мокрая химия).

Геохимические особенности и минеральный состав багнетитсодержащих пород. Химический состав багнетитсодержащих пород проявления Портовое представлен в табл. 1. Для них характерна неоднородность состава, обусловленная фрагментарным распределением слагающих их минералов и количеством присутствующих ксенолитов вмещающих пород. Исходя из результатов петрографического изучения и расчётов нормативного состава, эти породы состоят в основном из альбита (30–40%), флюорита (10–15%) и калишпата (около 20%). Флогопит в них присутствует в количестве 1–3%, в составе аксессуарных – монацит, ильменит, циркон, рутил, ферропсевдобрукит. В породах отсутствует карбонатная фаза, за исключением багнетита. Высокая концентрация SiO₂, кроме собственно гидротермальной фазы, обусловлена большим количеством ксенолитов кремнистых пород.

Суммарное содержание редкоземельных элементов в рудах проявления Портовое изменяется от 1 до 6 мас.% (табл. 2). На Улан-Удэнском участке по результатам спектральных анализов, проведённых при оценочных работах (Б.Г. Базаров и др., 1966), концентрации La, Ce и Nd достигали 1% каждого из указанных элементов. Конфигурация графиков нормированных к хондриту содержаний РЗЭ и спайдердиаграмма (рис. 3) близки к графикам в карбонатитах и имеют отрицательный европиевый минимум (Eu/Eu* равно 0,51–0,58). Величина (La/Yb)_n в них свидетельствует о резком преобладании лёгких лантаноидов с вариацией от 1080 до 2670. В повышенных концентрациях в породах фиксируются торий, титан и марганец. Высокое содержание тория (239 ppm) установлено в пробе, обогащённой редкоземельными элементами. Его источником является монацит, а титана и марганца – манганийменит, рутил и флогопит. Содержание сульфатной серы в породах до 4 мас.%. Она установлена в водной вытяжке (102,8 мг/л) из багнетитсодержащей породы. О присутствии в породах растворимых форм серы свидетельствуют включения глауберита в багнетите.

Результаты изотопных исследований багнетитсодержащих пород обоих участков представлены в табл. 3. Изотопные составы кислорода и углерода в багнетитах этих участков аналогичны неизменённым

2. Составы примесных элементов в багнетитсодержащих породах проявления Портовое, в ppm

Компоненты	Б-1/15А	Б-1/15Б
Ti	1 366	1 941
V	58	33
Cr	8,1	6,2
Mn	248	436
Co	1,98	2,5
Ni	3,4	3,4
Cu	18,7	9,2
Zn	66	102
Rb	126	102
Sr	87	194
Y	22	113
Zr	203	132
Nb	33	19,5
Mo	3,5	3,2
Cs	1,08	1,04
Ba	156	185
La	3 182	23 216
Ce	4 268	29 649
Pr	369	2 484
Nd	945	6 261
Sm	56	327
Eu	9,3	48
Gd	37	232
Tb	2,2	11,3
Dy	5,6	23
Ho	0,84	3,3
Er	2,2	9,0
Tm	0,30	1,00
Yb	2,0	5,9
Lu	0,29	0,8
Hf	7,2	3,8
Ta	1,24	0,9
Pb	112	63
Th	47	239
U	15,9	9,8

Примечание. ICP-MS анализы выполнены в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

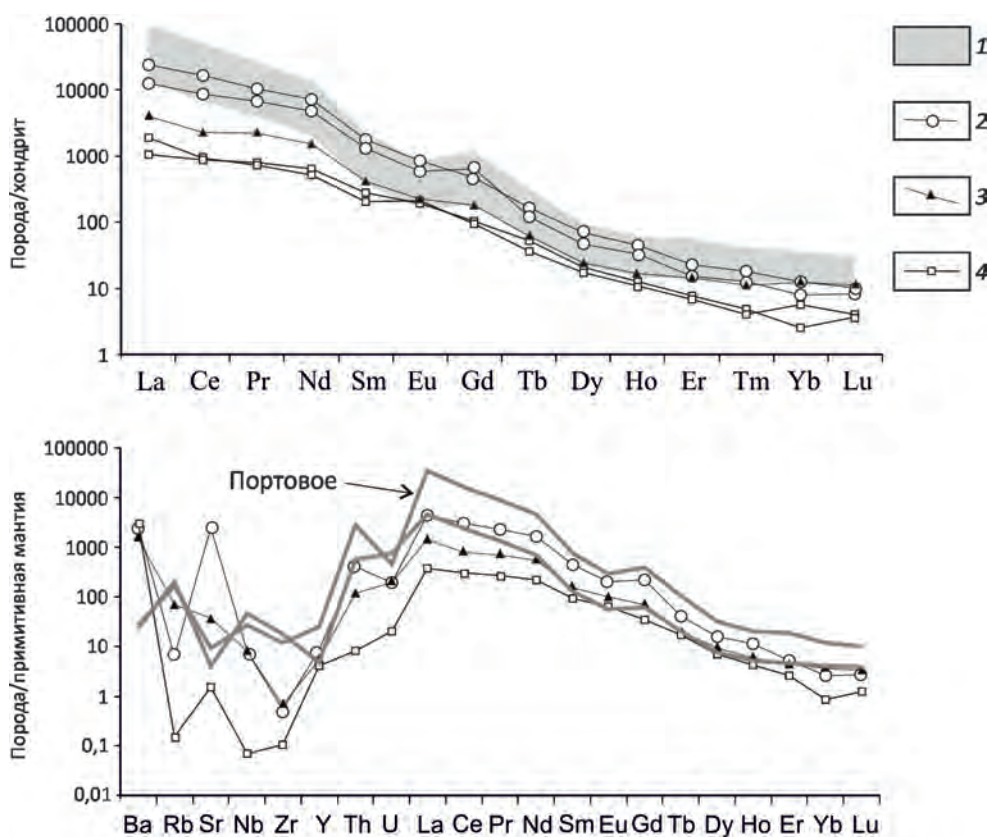


Рис. 3. Графики нормированных к хондриту содержаний редкоземельных элементов и спайдердиаграмма из бастнезитсодержащих пород участка Портовое [21]:

с ними совпадают кривые РЗЭ карбонатов Аршанского (2), Южного (3) и Халютинского (4) месторождений

карбонатитам. Близки к карбонатитам и первичные стронциевые отношения. Обогащены лёгким кислородом флогопит (1,1‰ $\delta^{18}\text{O}$) и альбит (4,3‰ $\delta^{18}\text{O}$).

Детальное минералогическое изучение в основном было проведено на участке Портовое, руды которого относительно руд участка Улан-Удэнский более интен-

сивно раздроблены и представляют собой слабосцементированный мелкозернистый агрегат. Его текстурные особенности показаны на рис. 3, из которого видно, что между крупными зёрнами минералов и ксенолитами вмещающих пород фиксируется идентичная по составу тонко- и мелкозернистая фракция. Флюорит наиболее

3. Изотопная характеристика минералов из бастнезитовых пород

Участок	Минерал	$\delta^{13}\text{C}\text{‰ PDB}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰ SMOW}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰ fluid}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$
Улан-Удэнский	Флюорит				0,70568±10
	Бастнезит	-8,1	+7,4		0,70559±9
Портовое	Бастнезит	-5,9	+4,8		
		-7,6	+7,4		
	Флогопит		+1,1	2	
	Альбит		-2,3	-1,4	
			+4,3	-0,1	

Примечание. Расчёт изотопного состава кислорода в воде равновесной с минералами проведён для температуры 300°C; вычисление состава кислорода во флюиде произведено в соответствии с фракционированием минерал–вода для альбита [26] и для флогопита [27].

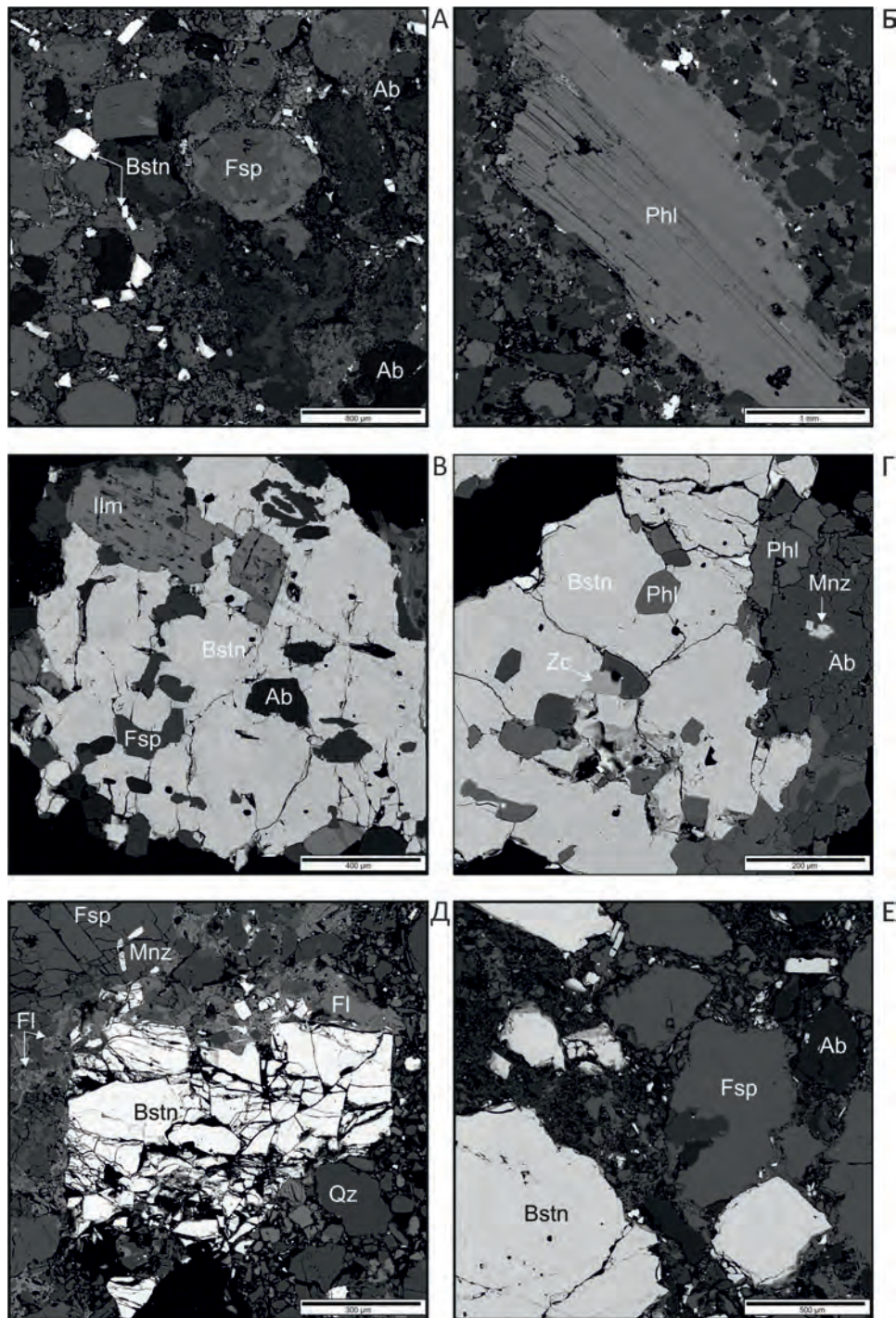


Рис. 4. Структурно-текстурные особенности и состав минеральных паргенезисов бастанезитсодержащих пород участка Портовое. Результаты съёмки на электронном микроскопе:

А – характерная брекчиевая структура руд, округлые зёрна калишпата и альбита сцементированы мелкозернистым полимиктовым агрегатом; Б – крупное зерно флогопита в мелкозернистом полимиктовом (флюорит, калишпат, альбит, флогопит) агрегате, мелкие белые зёрна – бастанезит; В–Г – минеральные паргенезисы ранней стадии образования пород, в бастанезите присутствуют включения альбита, калишпата, ильменита, циркона, флогопита; Д–Е – катакlastические структуры и минеральный паргенезис главной стадии формирования бастанезитсодержащих пород, дроблённые крупные зёрна бастанезита, альбита и калишпата «склеены» мелкозернистым полимиктовым агрегатом (Е – типичный облик дроблённых и дезинтегрированных крупных зёрен бастанезита); Bstn – бастанезит, Phl – флогопит, Ab – альбит, Qz – кварц, Zc – циркон, Fl – флюорит, Mnz – монацит Ilm – ильменит

подвержен дроблению, а альбит и калиевый полевой шпат устойчивее. Зёрна последних обычно имеют сглаженную поверхность и даже галькоподобную форму. Нередко такая же форма зёрен отмечается у бастнезита и флогопита.

Минеральные ассоциации сформировались в три стадии. Ранняя стадия во флюорит-альбитовой матрице слагает мелкие (до 1,5–3 см) шлиры, содержащие бастнезит, калиевый полевой шпат, флогопит, ильменит, циркон, монацит (рис. 4, В–Г). Минералы второй стадии, слагающей более 90%, представлены альбитом, калиевым полевым шпатом, флюоритом, кварцем, флогопитом и бастнезитом (см. рис. 4, Д–Е). В качестве аксессуарных отмечен монацит. Вкрапленники и скопления зёрен кварца, присутствующие в матрице бастнезитсодержащих пород, частично имеют ксеногенное происхождение. В завершающую стадию обо-

их проявлений образовались сегрегации и прожилковые выделения позднего флюорита. Последний более крупнозернистый, чем флюорит в матрице. Для этой стадии не характерны флогопит, бастнезит и альбит.

Альбит и калиевый полевой шпат в связи с устойчивостью к механическому воздействию имеют более крупные зёрна (2–5 мм), чем флюорит и бастнезит (см. рис. 4, Д–Е). В калиевом полевоом шпате присутствует решётчатая структура, иногда пертиты замещения альбитом. Примесные элементы (Sr и Ba) в минералах обеих стадий находятся за пределами обнаружения метода.

Флюорит – второй по распространённости минерал распределён неравномерно. Его количество изменяется от единиц до первых десятков процентов. Обычно это изометричные и неправильной формы зёрна размером до 3 мм. Минерал ассоциирует с бастнезитом,

4. Химический состав бастнезитов и монацита, в мас.%

№ п/п	№ пробы	Ce ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	ThO ₂	P ₂ O ₅	F	Сумма	Ce/La	Ce/Nd	La/Nd
1	1-1/6	34,87	33,53	2,08	4,4	–	–	6,71	81,59	1,04	7,93	7,62
2	1-1/7	36,87	30,96	–	4,88	–	–	6,64	79,35	1,19	7,56	6,34
3	1-1/8	34,35	31,51	–	5,75	–	–	7,34	78,96	1,09	5,97	5,48
4	1-1/9	35,44	33,54	–	4,12	–	–	7,26	80,36	1,06	8,60	8,14
5	1-2/1	37,83	31,27	1,79	5,79	–	–	6,7	83,37	1,21	6,53	5,40
6	1-2/2	34,25	31,98	2,18	6,22	–	–	6,01	80,63	1,07	5,51	5,14
7	1-2/3	35,35	29,47	–	5,89	–	–	6,59	77,3	1,20	6,00	5,00
8	1-2/4	37,84	27,82	1,88	6,63	–	–	7,29	81,46	1,36	5,71	4,20
	Среднее	35,85	31,26	1,98	5,48	–	–	6,82	80,38	1,15	6,72	5,91
9	3/1	37,48	26,13	–	6,68	–	–	6,75	77,04	1,43	5,61	3,91
10	3/2	37,52	25,81	2,47	7,44	–	–	6,39	79,63	1,45	5,04	3,47
11	3/3	37,19	29,85	2,32	5,73	–	–	6,71	81,79	1,25	6,49	5,21
12	3/4	37,33	25,59	1,88	8,01	–	–	6,23	79,05	1,46	4,66	3,19
13	3/5	35,96	27,98	2,19	5,83	–	–	6,83	78,79	1,29	6,17	4,80
14	5/1	37,67	27	1,7	7,12	–	–	7,04	80,52	1,40	5,29	3,79
15	1-1/4	37,07	27	1,62	6,86	–	–	5,4	77,94	1,37	5,40	3,94
16	1-2/5	36,87	24,55	2,7	8,63	–	–	6,45	79,2	1,50	4,27	2,84
17	1-3/1	38,28	27,83	2,74	6,99	–	–	6,74	82,57	1,38	5,48	3,98
18	1-4/1	37,49	28,57	2,08	6,73	–	–	5,98	80,86	1,31	5,57	4,25
19	1-5/1	36,53	27,68	1,85	6,28	–	–	6,11	78,44	1,32	5,82	4,41
	Среднее	37,21	27,09	1,95	6,94	–	–	6,42	79,94	1,37	5,44	3,98
20	У-У	38,3	30,47	2,49	6,90	–	–	6,07	84,23	1,26	5,55	4,41
21	У-У-2	37,32	22,51	2,26	8,7	1,09	–	5,99	77,87	1,65	4,28	2,59
22	У-У-3	34,88	22,04	1,92	9,84	–	–	6,16	74,84	1,58	3,54	2,24
23	У-У-4	34,55	22,38	1,76	8,76	–	–	6,55	74,0	1,54	3,94	2,55
	Среднее	36,56	24,35	1,98	8,55	1,09	–	6,19	77,74	1,5	4,33	2,94
24	1-1/4	35,62	20,75	2,64	9,48	1,55	28,99	–	100,09	1,72	3,76	2,19
25	1-5/7	36,18	19,66	1,95	7,72	2,96	27,13	–	97,04	1,84	4,69	2,55
26	3-4/3	36,36	22,85	1,91	6,82	–	28,05	–	96,41	1,59	5,33	3,35
27	4/6	36,7	24,16	2,22	6,88	–	29,58	–	99,54	1,52	5,33	3,51
28	1-1/5	35,62	20,75	2,64	9,48	1,55	28,99	–	100,09	1,72	3,76	2,19
	Среднее	36,09	21,63	2,27	8,07	2,02	28,54	–	98,63	1,67	4,57	2,75

Примечание. Бастнезит: 1–8 – ранней и 9–19 – главной стадий, 20–23 – Улан-Удэнского участка; 24–28 – монацит; прочерк – содержание элемента ниже порога чувствительности.

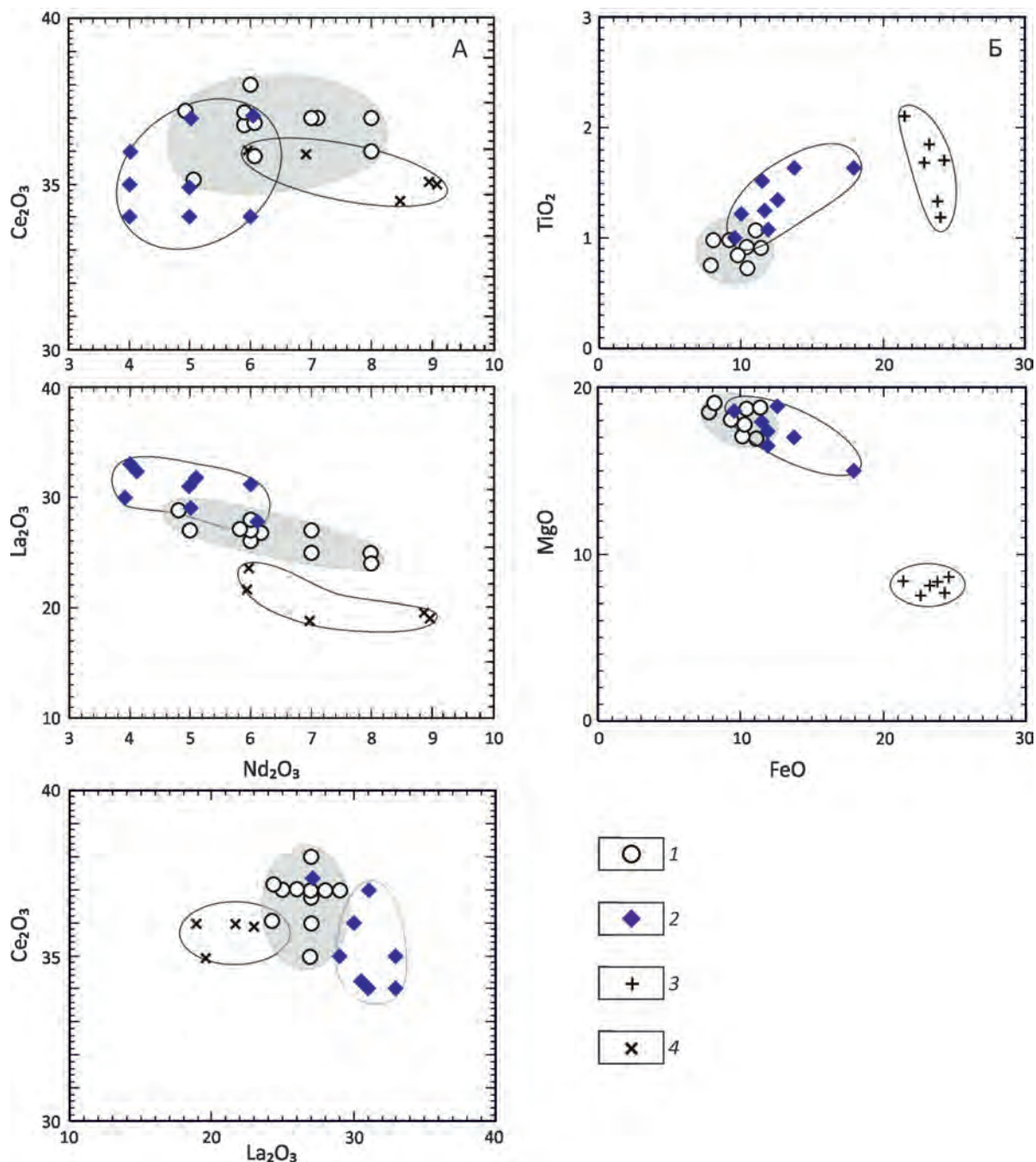


Рис. 5. Сравнительные составы (в мас.%) бастнезитов (А) и флогопитов (Б):

ассоциации стадий формирования руд (участок Портовое): 1 – главная, 2 – начальная; 3 – биотиты из кристаллических сланцев; 4 – монациты

флогопитом, кроме того, отмечаются образовавшиеся позднее более крупнозернистые анхимономинеральные сегрегации размером до 10 см. В отличие от парагенезиса главной стадии в них отсутствуют бастнезит, флогопит и альбит. Примесных элементов в минерале не зафиксировано.

Бастнезит представлен двумя генерациями. Зёрна его ранней генерации содержат включения флогопита, ильменита, циркона, альбита (см. рис. 4, В–Г). Поздняя генерация лишена включений перечисленных минералов, лишь иногда в них отмечаются мелкие выделения глауберита (Na₂O 20%, CaO 22%, SO₃ 54%). В обоих

случаях минерал ассоциирует с флогопитом. Большая часть зёрен бастнезита раздроблена и в разной степени дезинтегрирована (см. рис. 4, Д–Е). В бастнезите двух генераций содержатся в основном лёгкие лантаноиды (табл. 4). Составы выявленных генераций бастнезита заметно отличаются, что отчётливо фиксируется отношениями Ce/La , Ce/Nd и La/Nd . В минерале ранней генерации в целом заметно выше концентрация лантана и ниже – неодима (рис. 5, А).

Флогопит слагает рассеянную вкрапленность таблитчатых зёрен, которые часто деформированы, расщеплены и дезинтегрированы. Минерал характеризуется повышенной магниальностью и пониженной глинозёмистостью. Его состав ложится в поле тетраферрифлогопита (рис. 6), а величина железистости (fm) изменяется в пределах 17–31%. К числу особенностей флогопита относятся высокая концентрация фтора (табл. 5) и низкий (обычно не более 1,5%) уровень содержания титана. В большей части проб также обнаружен марганец (до десятых долей процента). Во флогопите, ассоциирующем с ранней генерацией бастнезита, выше титанистость, глинозёмистость и железистость, а поздняя генерация отличается большей магниальностью и содержанием фтора (см. рис. 5, Б).

Ильменит в виде таблитчатых зёрен встречен в бастнезите и альбите (см. рис. 4, В). Он отличается высокими концентрациями марганца (MnO_2 7–16%), позволяющими отнести его к манганиймениту (табл. 6). В минерале присутствуют включения ферропсевдобрюкита, ниобийсодержащего рутила и титансодержащего магнетита.

Монацит слагает таблитчатые зёрна, включённые в полевые шпаты и бастнезит. Минерал характеризуется присутствием тория (ThO_2 1,55–3,0 мас.%). Соотношения лёгких лантаноидов в монацитах заметно отличаются от соотношений в бастнезитах (см. рис. 5, А).

Циркон представлен мелкими неправильной формы зёрнами в бастнезите ранней генерации (см. рис. 4, Г). Примесных элементов в составе минерала не обнаружено.

Результаты изучения включений в минералах. В бастнезите Улан-Удэнского проявления выделено несколько типов включений. Один из типов представлен одиночными многофазными включениями, размер которых до 20 мкр. Форма включений изометричная. Они состоят из минеральной, жидкой и газовой фаз. Минеральная фаза представлена агрегатом тесно соприкасающихся зёрен неправильной формы, и её количество достигает 80–90 об.%. Газовый пузырь деформирован, а его форма определяется свободным пространством. Количество газовой фазы находится в пределах 5–10 об.%. Остальное пространство занято жидкостью.

Второй тип также представлен многофазными включениями, располагающимися по трещинам в виде шлейфов. Форма включений округлая, изометричная, реже удлинённая, размер – от первых микрон до 30 микрон. Во включениях присутствует твёрдая, жид-

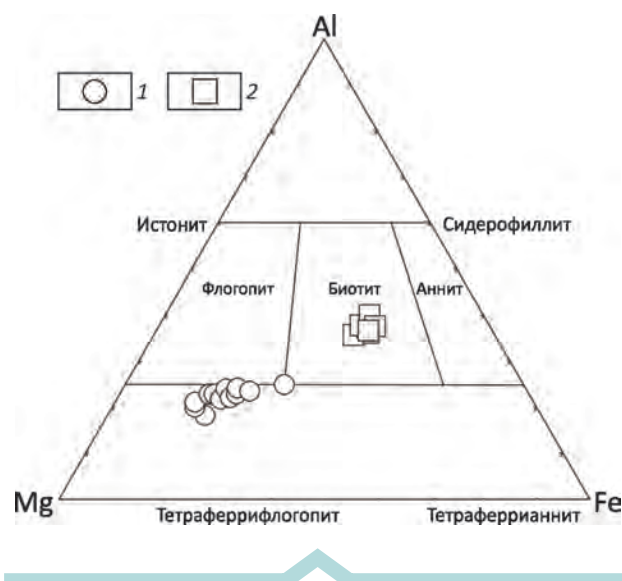


Рис. 6. Поля составов слюд. С использованием диаграммы из работы [22]:

1 – бастнезит-флюорит-альбитовые породы и 2 – вмещающие кристаллические сланцы участков Улан-Удэнский и Портовое

кая и газовая фазы. Количество минеральной фазы достигает 35–40 об.%, реже до 50–60 об.%. Твёрдая фаза образует кристаллики кубической, призматической и изометричной форм. Газовый пузырь занимает до 10–20 об.%, хотя встречаются включения, где содержание газовой фазы около 5 об.%. Количество жидкой фазы – от 20 до 40 об.%. Третий тип включений располагается по трещинкам, формируя шлейфы, часто со следами отшнуровки. Форма включений обычно удлинённая, а их размер не превышает 5 мкм. Это газожидкие включения, где газовый пузырь занимает до 10, реже 20 об.%, остальное пространство занято жидкостью. Иногда во включениях присутствуют одиночные кристаллики кубической формы. Их термометрическое изучение не проводилось.

Термометрическому исследованию подверглись бастнезит и флюорит проявления Портовое. В бастнезите присутствуют первичные и вторичные газожидкие включения. Нередко первичные включения содержат твёрдые фазы. Размер включений варьируется в основном в пределах 5–8 микрон, редко достигая 15–17 микрон. Их форма изометричная, прямоугольная, реже вытянутая. Количество газовой фазы в них составляет 15–25 об.%. При нагревании первичных включений с газовым пузырьком, занимающим 15 об.%, большая часть включений декрепитировала при T 290°–350°С. Включения с газовым пузырьком 20–25 об.%, гомогенизировались при 345°С в жидкость.

Во флюорите установлено несколько типов первичных включений. Часть из них существенно флюидная

5. Составы железомagneзиальных слюд из бастнезитсодержащих и вмещающих пород участков Портовое и Улан-Удэнский, в мас.%

№ п/п	Пробы	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	K ₂ O	F	Сумма	0=F ₂	Fm
Начальная стадия												
1	1-1/2	42,66	1,25	9,22	11,66	–	17,03	11,44	4,25	97,51	1,79	27,7
2	1-1/3	41,67	1,63	9,71	13,71	–	16,95	11,2	4,03	98,92	1,7	31,2
3	1-2/1	42,34	1,52	9,52	11,44	–	17,91	11,47	3,8	97,99	1,6	26,4
4	1-3/6	40,54	1,63	10,3	17,92	0,63	14,96	11,12	3,11	100,21	1,31	40,2
5	1-4/3	42,80	1,32	9,28	12,27	–	18,85	11,34	4,15	100,00	1,79	27,3
6	1-5/2	42,74	1,08	9,2	11,9	0,36	17,31	11,19	5	98,8	2,11	27,8
7	1-5/5	42,34	1	8,82	9,51	0,35	18,56	11,46	4,38	96,41	1,85	22,3
	Среднее	42,29	1,35	9,46	12,66	0,44	17,42	11,35	4,11	98,55	1,74	28,98
Главная стадия												
8	3-2/2	42,47	1,2	8,69	9,94	0,48	17,96	11,37	4,77	97,34	2,01	23,7
9	3-2/3	43,92	0,97	7,97	8,14	0,34	19,49	11,53	5,12	97,47	2,16	19
10	3-3/1	43	0,73	8,16	10,38	0,71	17,43	11,19	5,93	97,54	2,5	25,1
11	3-3/2	45,4	0,98	6,63	9,31	–	18,09	11,18	6	97,6	2,53	22,4
12	3-5/1	41,4	1,08	8,54	11	0,59	16,93	11,12	4,95	95,61	2,09	26,7
13	3-5/2	44,91	0,75	7,61	7,77	–	18,51	11,35	5,5	96,39	2,32	19,1
14	1/2	42,96	0,9	8,50	10,1	0,56	18,29	11,49	5,86	98,42	2,47	19,2
15	3/6	42,64	0,88	8,98	9,93	0,58	10,93	10,08	5,57	95,59	2,37	11,93
	Среднее	43,33	0,93	8,13	9,57	0,54	17,20	11,16	5,46	96,99	2,31	18,57
16	УУ-1	44,0	0,89	5,60	10,7	0,3	18,16	10,35	5,30	98,90	2,24	28,1
Вмещающие кристаллические сланцы												
17	2-3/3	34,91	1,22	16,14	24,3	–	8,24	9,94	–	94,75		62,3
18	2-3/4	35,32	1,37	16,17	24,21	–	8,27	10,6	–	95,95		62,1
19	2-3/5	35,51	1,73	16,12	24,55	–	7,98	10,56	–	96,45		63,3
20	2-3/6	35,09	1,88	15,95	23,45	–	8,39	10,22	–	94,98		61,1
21	2-3/7	35,32	1,73	16,14	23,2	–	7,76	10,55	–	94,7		62,7
22	2-3-1/4	38,89	2,15	16	21,61	–	8,51	10,12	–	97,98		58,8
	Среднее	35,84	1,68	16,08	23,55	–	8,19	10,33	–	95,8		61,71

Примечание. Портовое: 1–7 – из ассоциации ранней и 8–15 главной стадий, 17–22 – из вмещающих кристаллических сланцев; 16 – из участка Улан-Удэнский; прочерк – содержание элемента ниже порога чувствительности.

6. Составы титансодержащих минералов из бастнезитсодержащих пород участка Портовое

№ пробы	Минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	Сумма
1-1/6	Ильменит	–	50,74	–	42,27	6,98	99,99
1-2/2		–	51,22	–	40,74	8,03	99,99
1-3/3		–	51,18	–	37,66	11,13	99,97
1-4/2		–	51,81	–	41,29	6,89	99,98
4/4		–	50,84	–	33,36	15,79	99,97
1-2/3		–	51,22	–	40,74	8,03	99,99
4/5	Ферропсевдобрुकит	2,93	74,78	2,00	19,01	–	98,73
4/8		4,77	76,10	3,25	15,46	–	99,58
1-2/1		3,32	64,77	3,10	22,57	–	93,75

Примечание. Прочерк – содержание элемента ниже порога чувствительности.

газово-жидкая, в других присутствует также твёрдая фаза. Форма включений изометричная, размер от 8 до 29 микрон. Твёрдая фаза (от 15 до 30%) представлена зёрнами изометричной и кубической форм. По температурам гомогенизации выделилось две группы. В

одной группе температура частичной гомогенизации без растворения минеральной фазы – 233°–237°С. Во второй группе включения имеют также изометричную форму, размер до 10 микрон, объём газовой фазы 12–15 и минеральной 20–30%. Температура их частичной

7. Сравнительная изотопно-геохимическая характеристика флюорит-бастнезит-альбитовых проявлений и карбонатитов Юго-Западного Забайкалья. С использованием данных [2, 5, 7, 15–17]

Компоненты сравнения	Улан-Удэнский Портовое	Халюта	Аршан	Южное	Ошурково	Торей
Изотопные характеристики						
Безрубидиевые минералы (флюорит, апатит, карбонаты, барит)						
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$	0,70564	0,70561	0,70585	0,70591	0,70546	0,70508
Карбонаты (бастнезит, кальцит)						
$\delta^{13}\text{C}\text{‰ PDB}$	-5,9...-8,1	-5,5...-9,8	-5,2...-6,2	-3,7...-4,9	-5,0...-7,4	-4,14
$\delta^{18}\text{O}\text{‰ SMOW}$	4,8-7,4	5,4-10,8	5,9-6,0	5,9-10,5	3,6-13,5	7,5
Слюды						
$\delta^{18}\text{O}\text{‰ SMOW}$	1,1	5,1-7,8	4,4	5,7-7,0	4,9-5,7	
fm	19-31	16-31	21-46	25-36	24-37	31-34
TiO ₂ (мас.%)	0,7-1,6	0,1-0,5	0,7-2,3	1,0-2,1	1,8-2,9	3,7
F (мас.%)	3,1-5,5	3,2-5,6	1,2-3,2	2,8-3,4	0,9-1,6	1,6-1,8
Геохимические характеристики						
Eu*	0,55	0,84	0,40	0,45	0,63-0,76	
(La/Yb) _n	1800	340	1750	320	144	237
Th/U	3-2,4	2-4	0,8-2,0	1,5-5,4	2-2,5	3,5

Примечание. fm – коэффициент фракционирования $(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)\times 100\%/(\text{MgO}+\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$.

гомогенизации – 160°–190°С, при дальнейшем прогреве происходила декрепитация. Многочисленные двухфазные газово-жидкие включения являются вторичными. Они расположены чаще всего по трещинкам, образуют вытянутые шлейфы. Их гомогенизация происходила при 120–140°С.

Обсуждение. Бастнезитовые месторождения относятся к числу наиболее технологичных и перспективных объектов для добычи редкоземельных элементов. Они связываются в основном с карбонатитами и ассоциирующими с ними щелочными породами (например, месторождение Каронге) [25]. Гомогенизация газово-жидких включений в бастнезите и флюорите в интервале 160°–350°С указывает на гидротермальное происхождение пород изученных участков. Зафиксированные два температурных интервала гомогенизации включений во флюоритах свидетельствуют о стадийности формирования минеральных ассоциаций.

Основанием для предположения о связи выявленных проявлений со щелочным магматизмом может служить их существенно фельдшпатоидный состав. В 30–40 километрах к югу от обнаруженных проявлений известны карбонатиты (см. рис. 1), в том числе бастнезитсодержащие (Аршанское, Южное, Халюта). Близость возрастов (120–130 млн. лет) и минералого-геохимических особенностей с изученными проявлениями (табл. 7) с большой долей уверенности позволяют предположить генетическую связь между ними. Об этом также свидетельствуют первичные изотопные стронциевые отношения, изотопные составы углерода и кислорода в карбонатах, подобие кривых нормированных содержаний РЗЭ. Значения Sr_0 в бастнезите (0,70559) и флюорите (0,70568) существенно более

низкие, чем в коровых породах, и изотопные составы кислорода и углерода в бастнезите, лежащие, как и в случае с карбонатитами, в границы бокса РИС, позволяют предположить поступление вещества из мантийного источника.

Подобно карбонатитам характерными особенностями слюд изученных проявлений являются повышенные магнезиальность, содержание фтора, принадлежность к тетраферрифлогопиту. Аналогично карбонатитам, в рассматриваемых проявлениях повышена марганцевосность, присутствуют сульфатные минералы, а содержание MnO составляет до 13–20 мас.%. Главные отличия выявленных проявлений от карбонатитов, распространенных в регионе, – отсутствие в них кальцита и доломита, повышенное содержание кварца, низкие концентрации бария и стронция. Минеральные парагенезисы с кварцем, флюоритом, редкоземельными минералами достаточно часто фиксируются на посткарбонатитовом этапе многих проявлений.

Такие гидротермальные образования описаны на месторождениях Канганкунде [26], Карасуг [9], Амба-Донгар [20], Барра де Итапирапуа [19] и других [8]. На бастнезитсодержащих породах участка Весёлый, находящегося в 40 км от описываемых проявлений, в посткарбонатитовую стадию также проявилось окварцевание, сопровождавшееся флюоритом, бастнезитом. Перечисленные аргументы позволяют с достаточной большой уверенностью относить описанные проявления к гидротермальным продуктам, связанным с поздне-мезозойским карбонатитовым магматизмом Западного Забайкалья.

По представленным материалам можно сделать следующие выводы. В Западном Забайкалье установлены

проявления нового типа редкоземельного оруденения. Их возможная генетическая связь с карбонатитами расширяет ареал распространения таких пород, имеет важное значение для анализа геологических процессов региона и существенно увеличивает перспективы редкоземельного оруденения изученной территории.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов 15-45-04089 Р-СИБИРЬ-А, 17-05-00129 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акитский* массив щелочных пород и ассоциирующее с ним оруденение (Северное Прибайкалье) / Г.С.Рипп, Н.В.Владыкин, А.Г.Дорошкевич и др. // Глубинный магматизм его источники и плюмы. – Иркутск–Мирный, 2006. С. 285–304.
2. *Бурцева М.В., Дорошкевич А.Г.* Минералого-геохимические особенности Торейской карбонатной жилы (Западное Забайкалье) // Труды X Международного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А.Усова: – Томск, 2006. С. 75–77.
3. *Геохронология* Чернорудной гранулитовой зоны (Ольхонский район, Западное Прибайкалье) / А.В.Травин, Д.С.Юдин, А.Г.Владимиров и др. // Геохимия. 2009. Т. 11. С. 1181–1199.
4. *Государственная* геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000 000 (третье поколение) Алдано-Забайкальская серия. Лист М-48. Объяснительная записка // В.С.Платов, А.А.Савченко, А.М.Игнатов и др. – Улан-Удэ, 2009.
5. *Дорошкевич А.Г., Рипп Г.С.* Изотопная характеристика пород Халютинского карбонатитового комплекса (Западное Забайкалье) // Геохимия. 2009. Т. 47. № 12. С. 1279–1293.
6. *Избродин И.А., Рипп Г.С., Ходырева Е.В.* Редкометалльная минерализация кварц-кианитовых сланцев Ичетуйского и Лево-Чемургаевского проявлений (Западное Забайкалье) // ЗРМО. 2011. № 6. С. 87–98.
7. *Изотопно-геохимические* особенности пород Ошурковского апатитоносного массива (Западное Забайкалье) / Г.С.Рипп, А.Г.Дорошкевич, И.А.Избродин и др. // Геохимия. № 4. 2014. С. 302–310.
8. *Карбонатиты.* – М.: Изд-во «Мир», 1969.
9. *Карбонатиты* Центральной Тувы: геологическое строение, минеральный и химический состав / А.В.Никифоров, А.В.Болонин, А.М.Сугоракова и др. // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47. № 4. С. 360–382.
10. *Объяснительная* записка к Государственной геологической карте Российской Федерации масштаба 1:200 000 по листу М-48-VI Селенгинской серии / В.С.Платов, В.Г.Терещенков, А.А.Савченко и др. – М.–СПб., 2000.
11. *Ошурковский* базитовый плутон: хронология, изотопно-геохимические и минералогические особенности, условия образования // Г.С.Рипп, И.А.Избродин, А.Г.Дорошкевич и др. – Новосибирск.: ГЕО СО РАН, 2013.
12. *Патрахина А.В., Ходырева Е.В.* Геохимические особенности руд апатит-магнетитового месторождения Северный Гурвунур (Западное Забайкалье) // Мат-лы III Всероссийской Байкальской молодежной научной конференции по геологии и геофизике. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2015. С. 238–240.
13. *Рампилов М.О., Рипп Г.С., Дорошкевич А.Г.* Особенности редкометалльной минерализации в альбититах и альбитизированных гранитах на площади Ангаро-Витимского батолита // Руды и металлы. 2009. № 6. С. 29–36.
14. *Рипп Г.С., Бадмацзыренов М.В., Дорошкевич А.Г.* Минеральный состав и геохимические особенности карбонатитов проявления Пограничное (Северное Прибайкалье) // Труды третьего международного семинара: «Плюмы и проблема глубинных источников щелочного магматизма». – Иркутск–Хабаровск, 2003. С. 88–108.
15. *Позднемезозойские* карбонатиты Западного Забайкалья / Г.С.Рипп, О.В.Кобылкина, А.Г.Дорошкевич и др. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2000.
16. *Doroshkevich A.G.* The Arshan REE carbonatites, Southwestern Transbaikalia, Russia: mineralogy, paragenesis and evolution // Canad. Mineral. 2008. Vol. 46. P. 1223–1239.
17. *Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Moore K.R.* Genesis of the Khaluta alkaline-basic Ba-Sr carbonatite complex (West Transbaikalia, Russia) // Miner. Petrol. 2010. Vol. 98. P. 245–268.
18. *Fleck R.J., Sutter J.E., Elliot D.H.* Interpretation at discordant ³⁹Ar/⁴⁰Ar age-spectra at Mesozoic tholeiites from Antarctica // Geochim. Cosmochim. Acta. 1977. Vol. 41. P. 15–32.
19. *Hydrothermal* REE fluorocarbonate mineralization at Barra do Itapirapua, a multiple stockwork carbonatite, Southern Brazil / R.Excelso, E.R.Gaston, B.G.Enrich and Celso // Canad. Mineral. 2008. Vol. 46. P. 901–914.
20. *Hydrothermal* REE mineralisation in the Amba Dongar carbonatite complex, Gujarat, India / A.G.Doroshkevich, S.G.Viladkar, G.S.Ripp, M.V.Burtseva // Can. Min. 2009. Vol. 47. P. 957–968.
21. *Mc Donough W. F., Sun S.-s.* The composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. Vol. 120. P. 223–253.
22. *Phlogopite* and tetra-ferriphlogopite from Brazilian carbonatite complexes: petrogenetic constrains and implication for mineral-chemistry Systematics / J.A.Brod, I.C.Gaspar, de D.P.Araigo et. al. // J. Asian Earth Sci. 2001. Vol. 19. P. 265–296.
23. *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. Vol. 54. P. 1353–1357.
24. *Sun S.-S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in Ocean Basins. Geol. Soc. Spec. Publ. – London, 1989. P. 313–345.
25. *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 // Mineral. Mag. 1994. Vol. 58A. P. 951–952.
26. *Wambeke L.V.* The Karonge Rare Earth Deposits, Republic of Burundi: New Mineralogical – Geochemical data and Origin of the mineralization // Mineral. Dep. 1977. Vol. 12. P. 373–380.
27. *Zheng Y.-F.* Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals // Geochim. Cosmochim. Acta. 1993a. Vol. 57. P. 1079–1091.
28. *Zheng Y.-F.* Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates // Earth Planet. Sci. Lett. 1993b. Vol. 120. P. 247–263.