

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ Mg-Fe МЕТАСОМАТОЗ В КАРБОНАТНЫХ ПОРОДАХ (НА ПРИМЕРЕ ПРОЯВЛЕНИЯ БОГРЯШКА, АВЗЯНСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН БАШКОРТОСТАНА)

© 2017 г. М. Т. Крупенин, С. В. Мичурин, А. А. Шарипова, А. А. Гараева,
Д. А. Замятин, Т. Я. Гуляева, В. Г. Петрищева

Mg-Fe метасоматиты широко развиты среди известняков рифейских отложений Южного Урала, приуроченных к Башкирскому мегантиклинорию. Выделяются две группы карбонатных метасоматитов: магнезиальные и магнезиально-железистые. К группе магнезиальных относятся доломиты и магнезиты. Mg-Fe метасоматические карбонаты образовались позже магнезитов. Они содержат несколько разновидностей: Fe-доломиты и анкериты в доломитовом ряду, Fe-магнезиты, брейнериты, мезититы, сидероплезиты в ряду непрерывного изоморфного замещения железом между магнезитом и сидеритом. В проявлении Богряшка северной части Авзянского рудного района магнезиально-железистые метасоматиты представлены доломитами, Fe-магнезитами и брейнеритами. Это проявление брейнеритовой минерализации пространственно близко к Fe-магнезитам Исмакаевского месторождения. В северной части Авзянского рудного района отсутствуют как масштабные залежи анкеритов, широко развитые в других частях мегантиклинория, так и сидероплезиты, крупнейшие месторождения которых (Бакальские) расположены в северных районах. В статье рассмотрены параметры метасоматического образования брейнеритовой минерализации.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Магнезиально-железистые метасоматиты Авзянского рудного района приурочены к первично известняковой миньякской подсвите суранской свиты нижнего рифея. Выходы этой свиты протягиваются в виде субмеридиональной полосы в западной части Ямантауского антиклинория и пространственно совпадают с долиной р. Б. Авзян (рис. 1). Известняки миньякской подсвиты местами интенсивно доломитизированы и вмещают несколько рудных объектов. В 10 км к северу от пос. Верх. Авзян, в месте впадения руч. Богряшка в р. Б. Авзян, бурением выявлена мощная зона брейнеритовых метасоматитов. В 10 км к северу, в районе д. Исмакаево, к миньякской подсвите приурочено крупное Исмакаевское месторождение кристаллических магнезитов. В 22 км к северу от д. Ис-

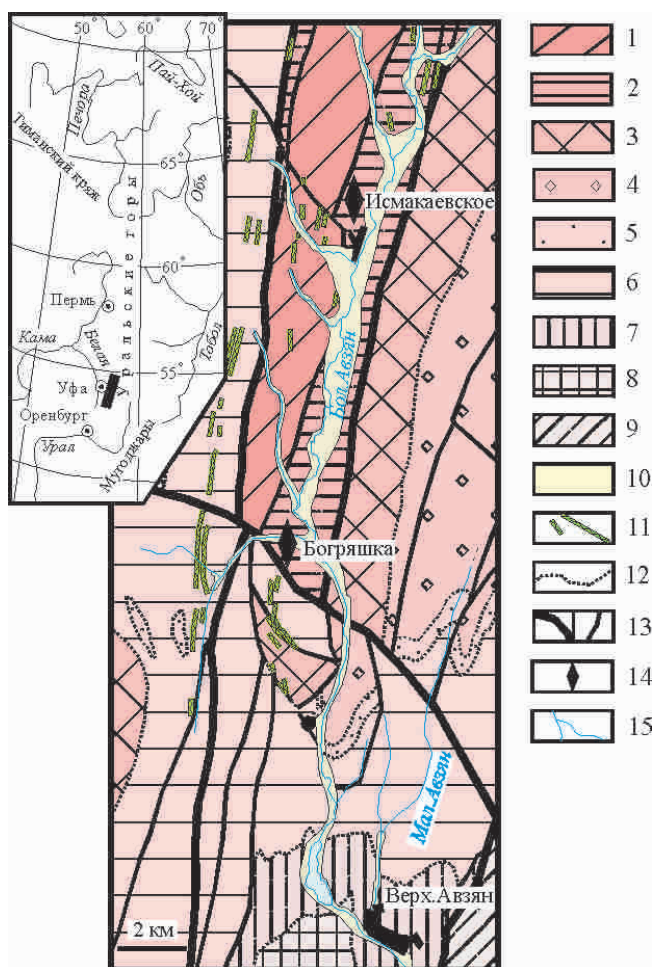


Рис. 1. Геологическая схема северной части Авзянского рудного района [Ларионов, 2003] и положение Исмакаевского месторождения магнезитов и рудопоявления Богряшка.

1–3 – отложения нижнего рифея, свиты: 1 – большеинзерская, 2 – суранская, 3 – юшинская; 4–7 – отложения среднего рифея, свиты: 4 – машакская, 5 – зигальгинская, 6 – зигазино-комаровская, 7 – авзянская; 8, 9 – отложения верхнего рифея, свиты: 8 – зильмердакская, 9 – миньярская; 10 – четвертичные отложения; 11 – дайки магматических пород; 12 – границы свит; 13 – тектонические нарушения разного порядка; 14 – Исмакаевское месторождение магнезитов и рудопоявление Богряшка; 15 – реки.

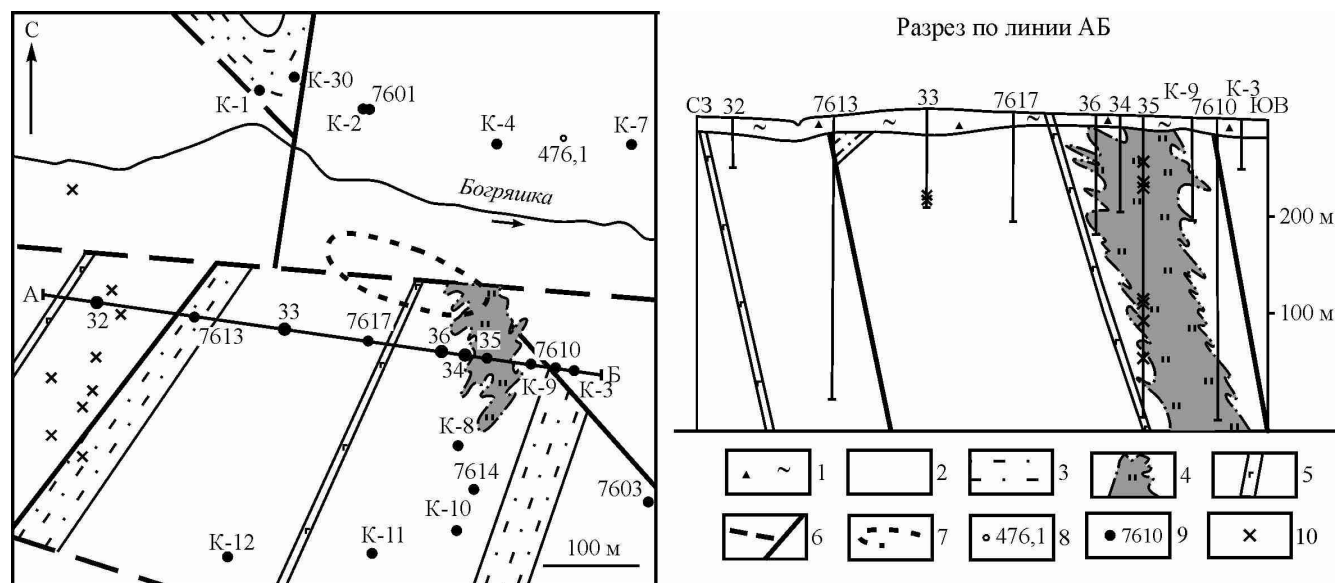


Рис. 2. Геологическая схема и разрез рудопоявления Богряшка (по материалам Абзелиловской ГПП).

1 – кора выветривания; 2, 3 – отложения миньякской подсвиты суранской свиты: 2 – доломиты, 3 – переслаивание песчаников, алевролитов и низкоуглеродистых глинистых сланцев; 4 – зона карбонатных метасоматитов; 5 – дайки долеритов; 6 – тектонические нарушения; 7 – карьер по отработке россыпного золота; 8 – топографические высоты; 9 – скважины и их номера; 10 – точки отбора проб.

макаево в этой же полосе развития доломитов миньякской подсвиты суранской свиты известны Суранское флюоритовое месторождение и несколько точек флюоритовой минерализации во вмещающих доломитах, образующих субмеридиональную зону в десятки километров.

Золоторудное проявление Богряшка приурочено к зоне карбонатных **Fe-Mg метасоматитов**, вскрытых скважинами в 1975–1978 гг. [Нечаев, 1982]. Метасоматиты образуют штокоподобную зону мощностью около 70 м, прослеженную до глубины 313,5 м и по простиранию на 400 м (рис. 2). Они представлены преимущественно железистыми магнезитами (брейнеритами), которые включают золотосодержащую гнездово-прожилковую сульфидную минерализацию, не представляющую промышленного интереса. Установлено, что брейнериты сформировались ранее золоторудных сульфидов [Мичурин, Шарипова, 2015; Крупенин и др., 2016a]. Брейнериты состоят из густой вкрапленности или сплошного агрегата зерен ромбоэдрического облика размером до 1,5 мм зеленовато-серого с бурым оттенком цвета и сильным стекляннным блеском на фоне тонко-мелкокристаллических серых вмещающих доломитов миньякской подсвиты суранской свиты и подобны гранобластовым среднезернистым Fe-магнезитам Исмакаевского месторождения.

В структурном отношении рудопоявление локализовано на участке максимального сближения двух региональных разломов субмеридионального простирания – Караташского и Большеавзянского. Оно располагается в ядре Большеавзянской ан-

тиклинали, осложненной многочисленными мелкими складками и разрывными нарушениями северо-западного и северо-восточного направлений. По долине р. Богряшка через центральную часть рудопоявления прослеживается разрывное нарушение субширотного направления. Штокообразные тела карбонатных метасоматитов встречаются на пересечении разрывных нарушений субширотного и северо-западного простирания. В целом зона карбонатных железомagneзиальных метасоматитов имеет простирание СЗ–ЮВ. Магматические образования в пределах площади рудопоявления представлены серией даек роговообманковых диабазов, габбро-диабазов среднерифейского лапштинского комплекса [Алексеев и др., 2003]. Дайки мощностью до 5 м развиты вдоль разрывных нарушений северо-восточного простирания, интенсивно метаморфизованы и иногда нацело превращены в карбонат-серицит-хлоритовые породы. С востока на отложения нижнего рифея надвинуты вулканогенно-терригенные образования машакского рифтогенного комплекса, сформированного в начале среднего рифея.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для уточнения состава метасоматитов выполнен комплекс исследований, включающих рентгенофазовый (дифрактометр XRD-7000 Shimadzu), термический (дериватограф Diamond TG/DTA, Perkin Elmer) (в ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург) и химический анализы. Химический состав проб определяли

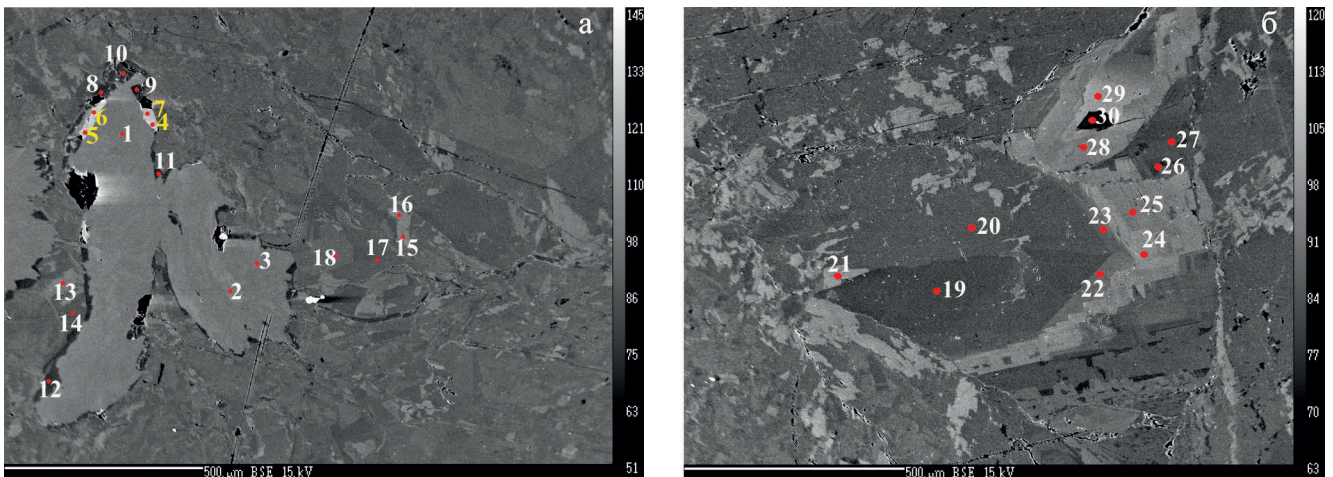


Рис. 3. Карбонатный Mg-Fe метасоматит (проба А-12346) рудопроявления Богряшка (изображение BSE, Самеса CX-100).

а – агрегат кристаллов брейнерита (серое разных оттенков, точки 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18), доломита (светло-серое, точки 1, 2, 3, 15) и анкерита (белое, точки 4, 5, 6, 7); б – зональные кристаллы брейнерита, изученные точки имеют содержание минала FeCO_3 от 22.48 мол. % (точка 30) до 40.23 (точка 29).

рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре VRA-30 (“Карл Цейсс”, Германия) в ИГ УНЦ РАН (г. Уфа). Определение состава карбонатных метасоматитов и регистрацию изображений в обратнорассеянных электронах (BSE-изображений) выполняли на электронно-зондовом микроанализаторе Самеса SX100, оснащённом пятью волновыми спектрометрами в ЦКП “Геоаналитик” (ИГГ УрО РАН). Флюидные включения (ФВ) в брейнеритах изучали на термокриостолке LinkamTHMSC-600, установленном на микроскопе ZeissAxioLab с дальнефокусными объективами OlympusLMPLFLN $\times 50$ и $\times 100$ (ИГГ УрО РАН) по стандартной методике.

Состав карбонатных метасоматитов соответствует брейнериту, члену изоморфного ряда магнетит–сидерит, в котором содержание FeCO_3 может достигать 30 мол. % и более. В брейнерите по сравнению с вмещающими доломитами резко увеличивается содержание FeO (6.91–12.24 мас. %) при высоком содержании MgO (33.45–37.1 мас. %) и незначительном CaO (0.28–2.00 мас. %), что типично для брейнерита [Крупенин и др., 2016а]. Часть проб метасоматитов по химическому составу близка к Fe-магнетитам Исмакаевского месторождения – обогащение кремнеземом при низком содержании глинозема и сравнительно высокое содержание железа (FeO – 3.93–6.91 мас. %). В отличие от исмакаевских магнетитов брейнериты проявления Богряшка содержат повышенные концентрации пирита нескольких генераций, что затрудняет определение количества изоморфного железа. Наиболее распространена изотопно-тяжелая генерация пирита, в которой среднее значение $\delta^{34}\text{S}$ составляет 16.1‰ ($n = 25$) [Мичурин, Шарипова, 2015], что соответствует изотопному составу серы пирита эвапорито-

вой природы в осадочных породах суранской свиты [Мичурин и др., 2009]. Расчет содержаний изоморфного железа в 12 изученных пробах брейнерита по значениям межплоскостного расстояния d_{104} для его третьего порядка $d_{3,0.12}$ [Rozenberg, 1963] показывает, что в интегральном составе брейнерита содержится от 8 до 30 мол. % FeCO_3 [Крупенин и др., 2016а].

По данным микроанализа в составе трех полированных образцов метасоматитов установлены Fe-доломит и брейнерит (рис. 3); в пробе А-12346 помимо названных присутствует анкерит. Доломит представлен агрегатами сложной формы размером до сотен микрометров, брейнерит образует ромбовидные кристаллы такого же размера, часто ему свойственно зональное строение со ступенчатым нарастанием содержания железа по зонам. Анкерит диагностирован только в одном случае на границе Fe-доломита и брейнерита (см. рис. 3а) и не является характерным минералом на контакте между ними. Составы минералов приведены в табл. 1. Вариации сидеритового минала в доломите составляют от 4.13 до 7.95 мол. %, в анкерите содержание FeCO_3 колеблется в интервале от 15.22 до 18.72 мол. %. В брейнерите по трем изученным пробам количество сидеритового минала изменяется в интервале от 10.13 (проба А-12346а) до 40.23 мол. % (проба А-12346) (см. рис. 3б). В то же время средние значения концентрации FeCO_3 в исследованных пробах составляют около 30 мол. %.

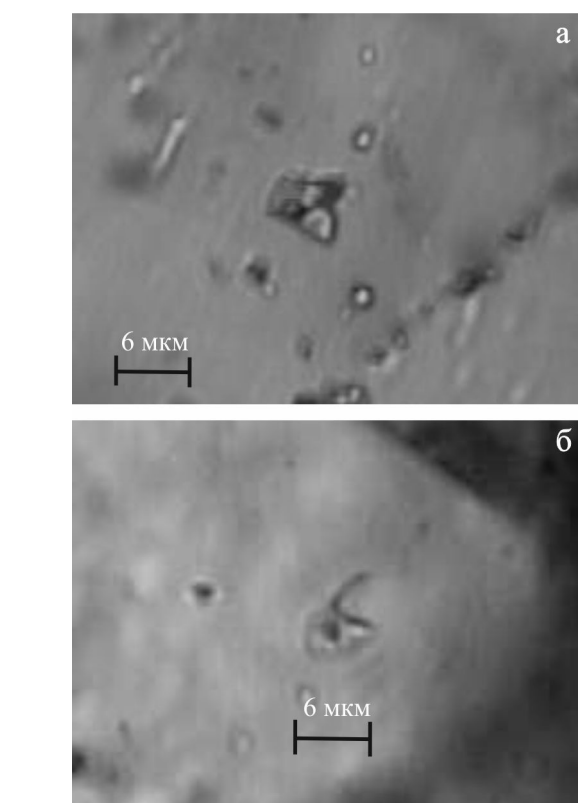
По данным термокриометрических исследований ФВ в 4 пробах брейнеритов получены сходные результаты, указывающие на минералообразование в условиях низкотемпературного (диапазон установленных температур 140–227°C) гидротермаль-

Таблица 1. Состав метасоматитов рудопроявления Богряшка по данным микронзондового анализа, мол. %

Минерал	CaCO ₃	FeCO ₃	MgCO ₃	MnCO ₃	SiO ₂	Сумма
A-12346						
Dol(9)	47.89	5.58	44.39	0.28	0.00	98.14
Dol _{min}	47.38	4.13	40.51	0.23	0.00	96.31
Dol _{max}	48.63	7.95	46.46	0.41	0.00	99.82
Br(30)	0.20	30.15	73.82	0.53	0.02	104.72
Br _{min}	0.00	20.62	64.88	0.10	0.00	102.01
Br _{max}	0.98	40.23	84.02	1.15	0.08	106.70
Ank(4)	50.18	16.79	29.97	0.71	0.02	97.66
Ank _{min}	48.46	15.22	26.78	0.26	0.00	95.18
Ank _{max}	51.12	18.72	31.53	1.20	0.03	99.13
A-12346a						
Dol(4)	48.77	6.40	43.73	0.28	0.02	99.20
Dol _{min}	48.35	5.80	43.33	0.23	0.00	98.58
Dol _{max}	49.13	7.12	44.02	0.40	0.06	99.53
Br(26)	0.12	33.20	70.03	0.61	0.03	104.00
Br _{min}	0.00	10.13	64.57	0.18	0.00	102.13
Br _{max}	0.71	37.97	92.17	0.97	0.10	105.59
A-12347						
Dol(7)	47.81	5.48	44.18	0.18	0.01	97.66
Dol _{min}	47.19	4.49	42.94	0.13	0.00	96.27
Dol _{max}	48.04	6.40	45.31	0.29	0.05	98.20
Br(10)	0.41	21.28	81.81	0.50	0.03	104.02
Br _{min}	0.14	13.16	71.36	0.24	0.00	102.79
Br _{max}	0.64	30.29	89.33	0.71	0.06	105.25

Примечание. Dol – доломит, Ank – анкерит, Br – брейнерит; жирным шрифтом выделено среднее содержание, в скобках указано количество проб; min, max – минимальное и максимальное содержание.

ного метасоматоза (табл. 2). Всего в брейнеритах удалось изучить 16 двухфазных включений, несмотря на их редкую встречаемость и преобладающий очень мелкий размер (от 3.7 до 8.2 мкм). Форма ФВ в основном ромбическая (отрицательный кристалл) или сложно-ромбическая (рис. 4). Большинство ФВ

**Рис. 4.** Двухфазные флюидные включения в брейнеритах рудопроявления Богряшка.

а – А-12342, включение усложнено-ромбической формы; б – А-12346, включения формы отрицательного кристалла и овальные.

приурочены к зонам роста и не связаны с трещинами, что позволяет рассматривать их как первично-вторичные, т. е. связанные с процессом образования брейнерита. ФВ преимущественно приурочены к наиболее прозрачным кристаллам, в то время как для серых зон, вероятно, обогащенных углеро-

Таблица 2. Результаты термодетерминации двухфазных флюидных включений в брейнеритах рудопроявления Богряшка

Обр.	$T_{\text{гом}}$	$T_{\text{эвт}}$	$T_{\text{пл}}$	Состав соли	С, % NaCl экв.	Газ	Наполн., %	Размер включений, мкм	Форма включений
	°С								
А-12342 – брейнерит (5)									
Средн.	157	-54.0	-7.0	Ca + (Na, Mg?)	10.0	H ₂ O	19.0	4.8	Отр.
Ст. откл.	12	2	1		1		4	2	
А-12345 – брейнерит (5)									
Средн.	181	-53.6	-11.0	–	14.5	–	18	6.3	Отр.
Ст. откл.	28	1	2	–	2	5	1		
А-12346 – брейнерит (3)									
Средн.	157	-54.6	-11.3	–	15.2	–	20	6.9	Отр. Отр.
Ст. откл.	17	1	1	–	1	6	1		
А-12348 – брейнерит (3)									
Средн.	187	-53.7	-11.2	–	15.2	–	20	7.8	Отр.
Ст. откл.	6	0	0	–	0	0	1		

Примечание. $T_{\text{гом}}$ – температура гомогенизации газовой-жидких включений; $T_{\text{эвт}}$ – температура эвтектики; $T_{\text{пл}}$ – температура таяния льда; С – солёность; наполн. – наполнение флюида газовой фазой; отр. – отрицательный кристалл.

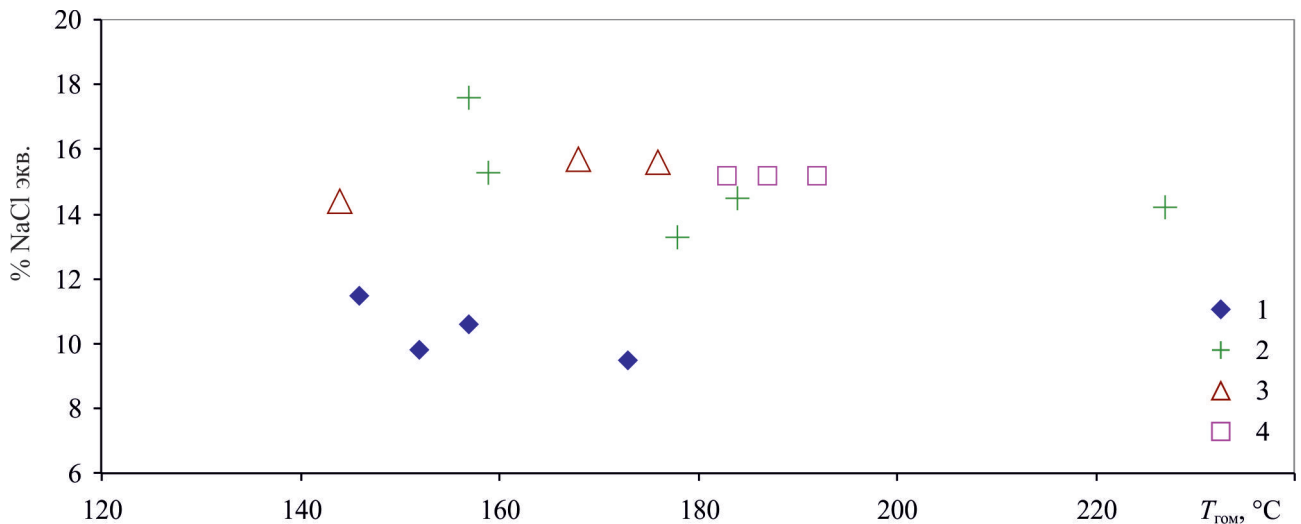


Рис. 5. Температуры гомогенизации ($T_{\text{гом}}$, °C) и соленость (% NaCl экв.) двухфазных ФВ в брейнерите рудопроявления Богряшка.

1 – А-12342, 2 – А-12345, 3 – А-12346, 4 – А-12348.

дистым дисперсным материалом, включения не характерны. Температуры начала плавления льда (эвтектики) находятся в узком интервале $-52...-55^{\circ}\text{C}$ для всех ФВ. Степень наполненности газом двухфазных ФВ колеблется от 10 до 30 об. %.

ОБСУЖДЕНИЕ

Присутствие брейнеритов в составе карбонатных метасоматитов рудопроявления Богряшка в миньякской подсвите суранской свиты нижнего рифея заставляет сравнить их с **Fe-магнезитами** Исмакаевского месторождения, расположенного в 10 км севернее в той же структурной зоне и в том же стратиграфическом горизонте для выявления их возможной генетической связи. Несмотря на более высокое содержание сидеритового минала (до 30 мол. %) в брейнеритах проявления по сравнению с Fe-магнезитами Исмакаевского месторождения, оба эти объекта обладают сходными особенностями распределения РЗЭ, показывающими увеличение роли средних и тяжелых лантаноидов в составе метасоматических продуктов [Крупенин и др., 2016a]. Такое распределение возникает в длительно функционирующих гидротермальных системах, испытавших интенсивное взаимодействие с вмещающими породами. В процессе ремобилизации возрастает основность флюидов, активная роль комплексообразователей приводит к увеличению доли средних и тяжелых лантаноидов в составе метасоматических продуктов [Вау, Moeller, 1992].

Сложное строение и непостоянный состав карбонатных метасоматитов проявления Богряшка, как Fe-доломитов, так и брейнеритов, установлены по данным микроанализа. Тем не менее в составе брейнеритов преобладает сидеритовый минал, составля-

ющий в среднем около 30 мол. %, что подтверждает интегральную насыщенность железом брейнерита, определенную расчетным методом по данным дифрактометрии. В то же время процесс магнезиально-железистого метасоматоза здесь имел неравновесный характер, что проявилось в широком диапазоне насыщения брейнеритов железом. По данным микрозондового анализа колебания FeCO_3 составляют от 10 до 40 мол. %. Обнаруженный в пробе А-12436 в небольшом объеме анкерит, несмотря на закономерное расположение между агрегатом доломита и кристаллами брейнерита разной железистости, вероятно, неогенетичен брейнериту. Расчет температуры образования в предположении, что анкерит и брейнерит в этом участке шлифа находятся в равновесии, не оправдался: полученная температура 940°C (метод анкерит-сидеритового термометра [Anovitz, Essene, 1987]) не является корректной для данной геологической ситуации. Следует отметить также то, что анкерит в этом метасоматическом процессе вообще не характерен, в основном брейнерит развивается непосредственно по доломиту.

При анализе ФВ отмечаются сходные температуры начала плавления льда в интервале $-52...-55^{\circ}\text{C}$ для всех включений, что, вслед за А.С. Борисенко [1977], позволяет интерпретировать их солевой состав как смесь хлоридов кальция, натрия и магния (для хлоридов Mg установлены температуры -52°C , для Ca + Na -55°C). Это позволяет заключить, что железо в составе гидротермальных растворов не было преобладающим элементом. ФВ из разных образцов имеют сходные параметры величины солености и температуры гомогенизации. В то же время анализ данных табл. 2 и распределение включений на общем графике в координатах “соленость–температура гомогенизации” (рис. 5)

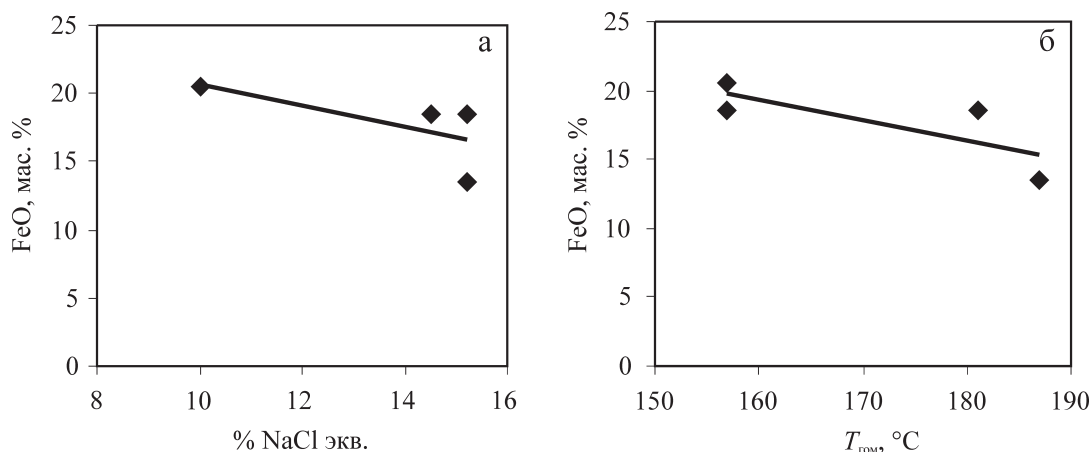


Рис. 6. Содержание FeO брейнеритов в зависимости от солёности флюидных включений (а) и температуры их гомогенизации (б).

показывают, что фигуративные точки каждого образца, несмотря на некоторое перекрытие, занимают свою локальную область. Это может указывать на определенную последовательность в минералообразовании и эволюцию состава флюида. Среди проб можно выделить относительно слабосоленые: А-12342 (среднее 10–11% NaCl экв., вариации 9–13% NaCl экв.) и относительно соленые: А-12345, А-12346, А-12348 (среднее 14.5–15.2% NaCl экв., вариации 13.3–17.6% NaCl экв.). Вместе с тем по температуре гомогенизации между пробами нет существенных различий, для всех включений характерен примерно один диапазон значений 144–192°C, кроме точки (227°C) в пробе А-12345. Данные по средним значениям солёности и температур гомогенизации изученных 4 проб позволяет сделать осторожное предположение, что эти параметры находятся в обратной зависимости от содержания FeO брейнеритов, т. е. брейнериты с максимальным содержанием железа имеют как пониженную солёность включений, как и пониженные температуры их формирования (рис. 6).

Изучение ФВ Mg-Fe карбонатных метасоматитов в суранской свите в Авзянском районе показало, что метасоматические флюиды были генетически связаны с захороненными эвапоритовыми рассолами [Крупенин, Гараева, 2015]. Вероятным источником таких рассолов могли быть перекрывающие миньякскую подсвиту мергельно-глинистые толщи бердагуловской подсвиты суранской свиты, для которых установлен ряд признаков эвапоритовой седиментации [Мичурин и др., 2009]. Метаморфизм этих погребенных рассолов за геологические промежутки времени привел к их обогащению железом в результате длительного взаимодействия со сланцевым резервуаром, что подтверждается высокой величиной $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в метасоматитах относительно вмещающих известняков и очень низкими значениями ϵNd , сопоставимыми с ана-

логичными показателями для вмещающих глинистых пород [Крупенин и др., 2016б]. Исследование распределения лантаноидов как в околорудных доломитах и магнезитах Исмакаево, так и брейнеритах Богряшки также позволило предположить длительную историю формирования в бассейне породообразования [Крупенин и др., 2016а]. Изотопно-геохронологические данные указывают на возникновение Fe-магнезитов Исмакаево в конце среднего рифея, на уровне 1250 млн лет [Крупенин и др., 2016б], вероятно, в процессе крупного этапа тектонотермальной активизации в регионе, с которым связывается и образование седиментационно-эксгальационных барит-полиметаллических проявлений и месторождений в отложениях авзянской свиты, а также Суранского селлаит-флюоритового месторождения.

Проявление Богряшка расположено в 10 км южнее Исмакаевского месторождения, в пределах той же миньякской карбонатной подсвиты. Образование брейнеритов с содержанием сидеритового минала до 30 мол. % и более согласно физико-химической модели формирования магнезитов может быть рассмотрено как результат поступления рассола в карбонатную толщу (тыловую зону метасоматоза, прилегающую к сланцевому резервуару) [Крупенин, Кольцов, 2017]. Таким образом, в результате метасоматической флюидной миграции в известняковой толще во фронтальной зоне возникают мощная зона доломитизации, затем железистый магнезит, который может появляться как при нагреве, так и в начале остывания флюида. Эта обстановка соответствует метасоматической последовательности, наблюдаемой на Исмакаевском месторождении Fe-магнезита. В тыловой зоне, примыкающей к сланцевому источнику рассола, которой, как мы предполагаем, отвечает район проявления Богряшка, образовались наиболее железистый магнезит и брейнерит.

Согласно результатам физико-химического численного моделирования установлено, что в режиме остывания флюида из сланцевого источника “в магнетитовой зоне железистость магнетита возрастает до нескольких мол. %, а в ее тыловой части, прилегающей к источнику, – до 50 мол. %” [Крупенин, Кольцов, 2017, с. 34]. Метасоматоз проходил в низкотемпературных гидротермальных условиях, соответствующих в среднем 220°C для Исмакаево и 140–190°C для проявления Богряшка. Таким образом, хорошо объясняется высокое содержание железа в брейнеритах этого проявления, что согласуется с модельными расчетами. Это подчеркивает жизнеспособность и прогностическое значение разрабатываемой модели образования магнетита исмакаевского подтипа.

Равновесие в системе $MgCO_3$ – $FeCO_3$ при низкотемпературном процессе ниже 250°C изучено очень слабо, поскольку при этих параметрах среды оно трудно достигается между образующимися минералами. Все имеющиеся экспериментальные и расчетные разработки в модельной системе CaO – MgO – FeO – H_2O – CO_2 находятся в интервале температур 250–700°C [Rosenberg, 1963; Powell et al., 1984; Anovitz, Essene, 1987; Мартынов, 1990]. Вероятно, поэтому сложно применить в таких условиях анкерит-сидеритовый термометр для оценки характеристик метасоматического процесса. Тем не менее полученные в настоящей работе параметры железистости брейнеритов, а также солевого состава и температур гомогенизации флюидов (образования минералов) представляют определенную ценность для понимания закономерностей низкотемпературного Mg-Fe метасоматоза в карбонатных породах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.А., Алексеева Г.В., Ковалев С.Г. Дифференцированные интрузии западного склона Урала. Уфа: Гилем, 2003. 171 с.
- Борисенко А.С. Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
- Крупенин М.Т., Гараева А.А. Источники флюидов для метасоматических магнетитов Исмакаевского месторождения Южно-Уральской провинции (термокриометрия флюидных включений) // Литосфера. 2015. № 2. С. 133–139.
- Крупенин М.Т., Кольцов А.Б. Геологическое строение, состав и физико-химическая модель формирования месторождений кристаллического магнетита Южно-Урала // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59, № 1. С. 17–40.
- Крупенин М.Т., Кузнецов А.Б., Константинова Г.В. Сравнительная Sr-Nd систематика и распределение РЗЭ в типовых магнетитовых месторождениях нижнего рифея Южно-Уральской провинции // Литосфера. 2016б. № 5. С. 58–80.
- Крупенин М.Т., Мичурин С.В., Шарипова А.А., Гуляева Т.Я., Петрищева В.Г. Минералогические и геохимические особенности магнезиально-железистых карбонатов Авзянского рудного района Южного Урала в связи с закономерностями метасоматоза // Вестн. Урал. отд. Минералогического о-ва. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2016а. С. 73–88.
- Ларионов Н.Н. Государственная геологическая карта РФ масштаба 1 : 200 000. Южно-Уральская серия. Л. N-40-XXII (Тукал). МПР РФ, 2003.
- Мартынов К.В. Экспериментальное изучение распределения Mg и Fe между твердыми растворами анкерита и брейнерита в системе $MgCO_3$ – $CaCO_3$ – $FeCO_3$ при 250–450°C и термодинамические свойства анкерита // Геохимия. 1990. № 12. С. 1688–1695.
- Мичурин С.В., Шарипова А.А. Изотопно-геохимические особенности рудопроявления золота Богряшка (Южный Урал) // Геол. сб. ИГ УНЦ РАН. 2015. № 12. С. 144–158.
- Мичурин С.В., Ковалев С.Г., Горожанин В.М. Генезис сульфатов и сульфидов в нижнерифейских отложениях Камско-Бельского авлакогена и Башкирского мегантиклинория. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2009. 192 с.
- Нечаев В.П. Особенности гидротермально-метасоматического процесса на некоторых золоторудных проявлениях западного склона Южного Урала // Вопросы минералогии, геохимии и генезиса полезных ископаемых Южного Урала. Уфа: БФАН СССР, 1982. С. 52–56.
- Anovitz L.M., Essene E.J. Phase equilibria in the system $CaCO_3$ – $MgCO_3$ – $FeCO_3$ // J. Petrol. 1987. V. 28, no. 2. P. 389–414.
- Bau M., Moeller P. Rare-earth element fractionation in metamorphogenic hydrothermal calcite, magnesite and siderite // Mineral. Petrol. 1992. V. 45. P. 231–246.
- Powell R., Condiliffe D.M., Condiliffe E. Calcite-dolomite geothermometry in the system $CaCO_3$ – $MgCO_3$ – $FeCO_3$: an experimental study // J. Metamorphic Geol. 1984. No. 2. P. 33–41.
- Rosenberg P.E. Synthetic solid solutions in the systems $MgCO_3$ – $FeCO_3$ and $MnCO_3$ – $FeCO_3$ // Amer. Mineral. 1963. V. 48, no. 11–12. P. 1396–1400.