

ВЫСОКОБАРИЧЕСКИЕ ОКОЛОРУДНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГАББРОИДОВ КУСИНСКОГО МАССИВА

С.В. Прибавкин, Н.С.Бородина, Г.Б. Ферштатер, В.В. Холоднов, Т.Д.Бочарникова

При изучении Кусинского габбрового массива, сопровождающегося ильменит-титаномагнетитовым оруденением, были обнаружены минералы и их парагенезисы, позволяющие по-новому оценить этапы преобразования пород, а также связанных с ними титаномагнетит-ильменитовых руд. Сюда относятся выявленные в габброидах вблизи рудных зон высокоглиноземистые минералы, а в самих рудах редкий рудный минерал – хегбомит, а также хлорит. Часть названных минералов упоминалась в литературе ранее (см. ниже), часть описывается впервые.

Преобразования габброидов можно разделить на два этапа. Первый этап непосредственно связан с рудным процессом в массиве на позднемагматическом этапе. Суть этого процесса заключается в автометасоматических изменениях габбро-норитов под воздействием

остаточных, насыщенных флюидом расплавов вблизи формирующихся пластов сегрегационных ильменит-титаномагнетитовых руд. Этот флюид характеризовался высокими концентрациями хлора [Ферштатер и др., 2001, Бочарникова и др., 2003]. Такие метасоматические преобразования являются неотъемлемой частью рудного процесса в Кусинском массиве. Они представлены последовательностью (от габбро-норитов к руде): слабоизмененными габбро-норитами, амфиболовыми габбро и горнблендитами, гранат-амфиболовыми породами, рудами. Общая мощность зоны изменений на Кусинском месторождении составляет первые десятки метров и сильно зависит от мощности рудных тел: чем крупнее рудный пласт, тем шире распространены изменения. Главными минералами, слагающими эти метасоматически преобразованные породы, являются гранат и роговая

обманка, причем глиноземистость роговой обманки возрастает к рудным телам, параллельно с глиноземистостью пород. Вблизи рудных тел появляются высокоглиноземистые минералы: ставролит, кианит, корунд. Формирование околорудных автометасоматитов первого этапа, по-видимому, связано с кислотным выщелачиванием под воздействием остаточных флюидов. С этим этапом связано формирование на щелочной стадии магнезиальных метасоматитов следующего состава: горнблендитов, гранат-жесдритовых пород, роговообманково-куммингтонитовых пород, которые образуют тела или участки в различных зонах кислотного выщелачивания и пока не рассматриваются в данной работе. Формирование пород происходило в условиях нарастания кислотности и падения температуры. Условия образования околорудных пород отвечали $T = 600-800^\circ$ и снижались до 300° в рудных телах при $P = 6-9$ кбар.

Второй этап преобразований габброидов связан с наложением на уже существующие околорудные метасоматиты гранат-амфиболового состава гидротермальных кварц-карбонатных прожилков с турмалином и сульфидной минерализацией. Ореол метасоматических изменений вокруг жилок составляет первые сантиметры и представлен хлоритовыми парагенезисами, сменяющимися мусковитовыми и кианитовыми в зальбандах жил. Формирование колонки происходило в средне-низкотемпературной области за пределами поля устойчивости St с Q , при высокой активности Fe , K и флюидов (CO_2 , Cl , B , S_2). Аналогичные образования турмалин-пирротин-кианит-кварцевой субфации были описаны для месторождения Хизовара Беломорско-Лапландского метаморфического пояса [Глебовицкий, Бушмин, 1983] и связаны с процессом кислотного выщелачивания в высокобарических условиях.

Ниже приводится описание минералов-индикаторов указанных процессов.

Гранат широко распространенный минерал, формирование которого связано с перераспределением компонентов титаномагнетита и плагиоклаза. Состав граната соответствует гроссуляр-альмандиновому типу (таблица). Количество и размер зерен граната возрастает от габбро-норитов к околорудным зонам, где его содержание может достигать 50%. Содержание кальция в гранате четко коррелирует с содержанием глинозема в парагенном амфиболе и содержанием его в породе. Температура кри-

сталлизации по данным амфибол-гранатовой термобарометрии составляет порядка $700-800^\circ$ [Лаврентьева, Перчук, 1989; Раупа, 2000], давление 6-9 кбар [Kohn, Spear, 1990; Ферштатер, 1990].

Кианит в Кусинском массиве найден впервые авторами [Прибавкин и др., 2001] и формируется на двух этапах высокобарических преобразований габброидов. В автометасоматически измененных породах он имеет вид вытянутых кристаллов с закругленными ребрами и вершинами, иногда с «заливами» и округлыми включениями плагиоклаза. Их размер составляет 0,05-0,3 мм. В протолочках кианит образует столбчатые или таблитчатые кристаллы бледно-голубой до синей окраски, неоднородно распределенной.

В гидротермальных кварц-карбонатных прожилках кианит образует пучки игольчатых кристаллов, радиально-лучистые агрегаты, имеющие бесцветную или бледно-голубую окраску. Размер кристаллов по удлинению достигает 5 мм.

Ставролит отмечался в габбро-амфиболитах рудной зоны и ранее [Мясников и др., 1970]. Нами впервые изучен его химический состав, что позволило, с помощью литературных данных, определить условия его формирования. Ставролит в шлифах наблюдается в виде мелких идиоморфных кристаллов, включенных в таблицы плагиоклаза. В протолочках наблюдались хорошо оформленные коротко-призматические кристаллы размером 0,05-0,2 мм. Часто можно наблюдать закономерные сростания ставролита с кианитом.

Несмотря на то, что ставролит в основном распространен в метапелитовых ассоциациях, в последние десятилетия, начиная с 70-х годов прошлого века, появился целый ряд работ, описавших этот минерал в метабазитах [Spear, 1982; Ward, 1984; Gibson, 1978, и др.]. Авторы этих исследований отмечают, что ставролит образовался при более высоких давлениях, чем в обычных ассоциациях амфиболитовой ступени метаморфизма. Главное отличие ставролита из основных ассоциаций – более высокое содержание Mg по сравнению со ставролитом из метапелитов [Balleve et al., 1989]. В экспериментальной работе [Hellman, Green, 1979] в продуктах кристаллизации синтетических стекол базальтового состава, расплавленных в водных условиях при $P=24-26$ кбар и $T=740-760^\circ$, был обнаружен ставролит, характерной

особенностью которого также является высокое содержание магния. Особый интерес для нашего исследования представляют данные по ставролитам, образовавшимся в процессе кислотного выщелачивания пород основного состава в глубинных метаморфических комплексах, в условиях кианит-кварцевой фации [Глебовицкий, Бушмин, 1983 и др.]. Эти ставролиты по составу сходны со ставролитами из метабазитов (рисунок).

Химический состав ставролита из кусинских габброидов, определенный на микроанализаторе, представлен в таблице и на рисунке. Для сравнения использованы данные о составе ставролитов из цитированных работ, а также из метапелитовых ассоциаций [Balleve et al., 1989]. На диаграмме $Mg\# - (SiO_2 + Al_2O_3)$ поле ставролитов из базитовых ассоциаций практически не перекрывается с полем ставролитов из метапелитов, при этом кусинские ставролиты характеризуются минимальными по сравнению с другими метабазитами значениями $(SiO_2 + Al_2O_3)$. Величины железистости ставролита и ассоциированного с ним граната близки, в отличие от метапелитов, где в случае метапелитов низкой и средней ступени метаморфизма ставролит характеризуется меньшей железистостью по сравнению с гранатом, в случае же метапелитов высокой ступени метаморфизма это соотношение обратное [Balleve et al., 1989].

Корунд в амфиболовых габбро с кианитом и ставролитом представлен редкими зернами размером не более 0,25 мм. Его цвет варьирует от бесцветного, розового до малиново-красного. Редко встречаются участки, окрашенные в фиолетовый и индигово-синий цвета. Для корунда весьма характерна замутненность газовой-жидкими включениями, вызывающая эффект опалесценции. Прозрачные участки встречаются реже. Описанный ранее корунд, найденный в заметных количествах на контакте амфиболовых габбро и рудного тела, отличался крупными размерами кристаллов и белой окраской [Фоминих, Андреев, 1969]. Формирование корунда в этой зоне прекрасно подтверждает процесс кислотного выщелачивания.

Охарактеризованные выше окологрудно-метасоматические преобразования габброидов на первом, высокотемпературном этапе синхронны по времени с процессами формирования самих руд Кусинского месторождения. Здесь на завершающей стадии происходила кристаллизация хегбомита и хлорита, цементирующих более ранние рудные минералы – титаномагнетит и ильменит.

Хегбомит встречается в центральных частях рудных тел. Ранее хегбомит Кусинско-Копанской группы титаномагнетитовых месторождений был описан В.А. Молевой, В.С. Мясниковым (1952), О.В. Карповой (1974). Новые данные по химическому составу и генезису этого минерала недавно были получены нами [Бочарникова и др., 2002].

В рудах Кусинского месторождения хегбомит встречается неравномерно, на одних участках его содержание может достигать 3–5%,

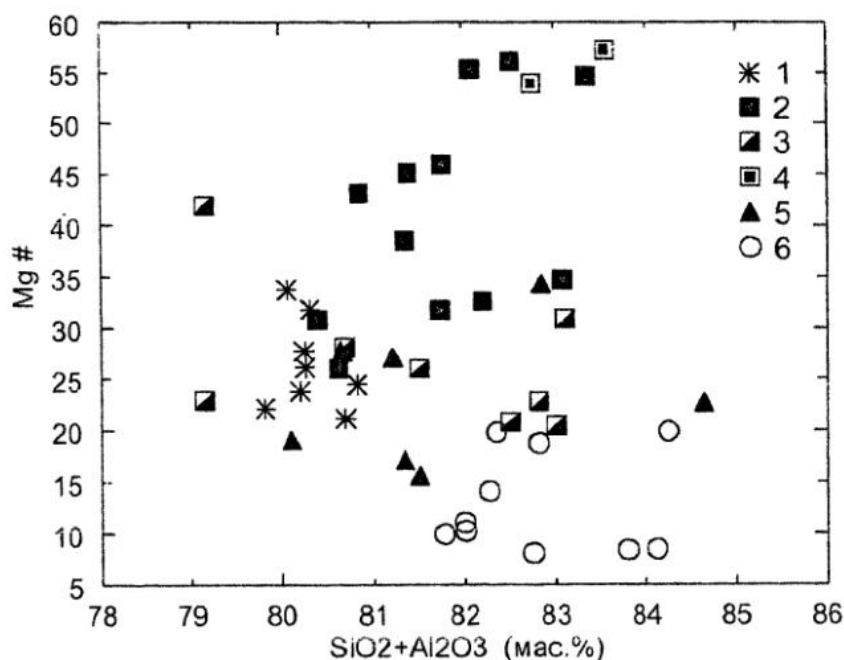


Диаграмма $Mg\# - (SiO_2 + Al_2O_3)$ для ставролита различных ассоциаций

1 – ставролит из преобразованных габброидов Кусинского массива, 2 – метабазитов [Ward, 1984; Gibson, 1978], 3 – основных метавулканитов [Spear, 1982], 4 – экспериментальные данные [Hellman, Green, 1989], 5 – метасоматитов высоких давлений [Глебовицкий, Вушмин, 1983], 6 – метапелитов [Balleve et al., 1989].

Средние составы минералов метасоматически преобразованных габброидов и руд

N	Мин.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	Сумма
Кс-100	Gt	35,71	0,00	22,02	31,05	1,92	4,85	4,44	-	-	-	99,99
Кс-100	Gt	34,83	0,09	21,38	30,66	1,97	4,77	4,92	-	-	-	98,62
Кс-101	Gt	36,99	0,00	20,81	29,57	1,72	6,81	3,08	-	-	-	98,98
Кс-102	Gt	38,94	0,00	20,43	29,76	1,25	5,24	4,62	-	-	-	100,24
Кс-102	Gt	38,63	0,00	20,56	30,48	1,40	5,28	3,50	-	-	-	99,85
Кс-100 (2)	Hbl	35,05	0,56	17,61	18,03	0,15	7,66	10,67	2,35	0,33	-	92,40
Кс-101 (5)	Hbl	42,48	0,70	13,51	16,23	0,24	10,28	10,00	3,10	0,12	-	96,66
Кс-102 (8)	Hbl	41,13	0,41	16,45	17,00	0,17	8,73	10,28	2,95	0,24	-	97,35
Кс-101 (4)	Stv	27,34	0,58	52,96	13,10	0,30	2,46	0,05	-	-	-	97,52
Кс-102 (4)	Stv	27,64	0,41	52,69	13,01	0,13	2,82	0,04	-	-	-	98,24
Кс-95 (7)	Hog	-	8,01	56,39	20,48	-	10,83	-	-	-	-	98,99
Кс-95 (8)	Hog	-	6,59	58,96	19,71	-	11,28	-	-	-	-	99,94
	Chl	26,39	0,59	23,13	14,77	0,09	22,63	0,30	0,18	0,07	11,63	99,78

Примечание. Цифры в скобках – количество анализов; Gt – гранат, Hbl – роговая обманка, Stv – ставролит, Chl – хлорит, Hog – хегбомит. Средний анализ хлорита приведены по данным В.Г.Фоминих. Содержание ZnO в пробе кс-101 и кс-102 – 0,75%; кс-95(7) – 0,96%, кс-95(8) – 1,06%.

на других – это единичные зерна, либо он отсутствует совсем. В пластинках хегбомита нередко обнаруживаются признаки спайности по базису, а также наблюдается полисинтетическое двойникование. В одних случаях хегбомит располагается между ильменитом и магнетитом, при этом зерна его имеют, как правило, неправильные очертания или образуют скелетные кристаллы; нередко зерна хегбомита содержат включения шпинели. В других случаях хегбомит ассоциирует с интерстиционными хлоритовыми скоплениями, где, как правило, имеет четкую кристаллографическую огранку (мелкие, сотые доли мм пластинки гексагонального, реже тригонального облика)

Что касается генезиса хегбомита, то его считают минералом ретроградного метаморфизма амфиболитовой и гранулитовой фации [Woodford and Wilson, 1976; Coolen, 1981 и др.], или образующимся при окислении первичной шпинели добавлением H₂O, Ti, Al [Leake, 1965; Appel, 1986 и др.]. Наши исследования условий формирования руд [Ферштатер и др., 2002] и состава хегбомита (см. таблицу) показывают, что этот минерал мог сформироваться на позднем магматической стадии при температуре ниже 600° и давлении 6-7 кбар, за счет окисления герцинита.

Хлорит на первом этапе преобразования габброидов выполняет интерстиции среди рудных минералов пластовых ильменит-титаномагнетитовых тел. Составы хлорита характеризуются повышенным содержанием глинозема и соответствуют Al- и Al-Fe-клинохлору [Минералы, 1992], что может свидетельствовать о повышенных давлениях и температурах кристаллизации этого минерала.

На втором этапе **хлорит и мусковит** в виде мелкочешуйчатых агрегатов совместно с карбонатом замещают основную ткань породы сложенную амфиболом, гранатом и плагиоклазом.

Турмалин тесно ассоциирует с сульфидами (пиритом, марказитом) и является наиболее поздним минералом прожилков. Форма выделения турмалина: идиоморфные призматические кристаллы до 4 мм по удлинению, зернистые агрегаты. Цвет черный, в шлифах просвечивает серо-синим в ядрах и буро-зеленым в краях. Надо отметить, что такой турмалин спорадически встречается совместно с кианитом в породах первого этапа преобразований.

Таким образом, впервые показано, что экзотические для габброидов минералы: кианит, ставролит, корунд – являются результатом окислорудного метасоматоза – реакции между твердыми фазами и остаточным расплавом или флю-

идом. Формирование околорудных метасоматитов, по-видимому, связано кислотному выщелачиванию под воздействием богатых хлором остаточных рудообразующих флюидов. Синхронно с этими преобразованиями в сегрегационных рудах кристаллизовались богатые глиноземом хебгомиты и хлориты.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 01-05-65184) и регионального гранта "Р2001 Ур.Чел.01-26".

Список литературы

Бочарникова Т.Д., Прибавкин С.В., Шагалов Е.С., Холоднов В.В. Новые данные о хебгомите Кусинского ильменит-титаномы негитового месторождения на Ю.Урале // Уральская минералогическая школа-01, Екатеринбург 2002, (в печати).

Бочарникова Т.Д., Холоднов В.В., Прибавкин С.В., Воронина Л.К. Распределение галогенов в тонкоплосчатых породах Кусинской габбровой интрузии // Ежегодник -2002 Ии ИГ. Екатеринбург: ИИ ИГ УрО РАН, 2003. С. ...

Глебовицкий В.А., Бумин С.А. Послемигматитовый метасоматоз. Л.: «Наука», 1983. 216 с.

Лаврентьева И.В., Перчук Л.Л. Экспериментальное изучение амфибол-гранатового равновесия (бескальциевая система) / Доклады АН СССР, 1989, 306, С.173-175.

Минералы / под ред. Ф.В.Чухрова / М.: «Наука», 1992. т.4. вып.2.

Мясников В.С., Николаева Е.Г., Карпова О.В. Минеральный состав орто-амфиболитов Кусинского массива (Южный Урал) // Минералы базитов в связи с вопросами петрогенезиса. М.: «Наука», 1970. С.134-149.

Прибавкин С.В., Ферштатер Г.Б., Бородин Н.С., Холоднов В.В. Глиноземистые минералы в габброидах кусинского массива // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып.2. Томск: ЦНТИ, 2001. С.79-80.

Ферштатер Г.Б. Эмпирический плагиоклазовообманковый барометр // Геохимия, 1990. N.3. С.328-335.

Ферштатер Г.Б., Холоднов В.В., Бородин Н.С. Условия формирования и генезис рифейских ильменит-титаномангнетитовых месторождений Урала // Геология рудных месторождений. 2001. Т.43. № 2. С.112-128

Ферштатер Г.Б., Холоднов В.В., Бородин Н.С., Прибавкин С.В. Рифтогенный габбро-гранитоидный

магматизм Южного Урала и сопровождающее его оруденение // Рифты литосферы: эволюция, тектоника, магматические, метаморфические и осадочные комплексы, полезные ископаемые. Тезисы докладов Международной научной конференции (VIII чтения А.Н.Заварицкого). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2002. С.226-227.

Фолминых В.Г., Андреев М.И. Корундовый амфиболит Кусинского месторождения // Ежегодник (основные результаты работ 1969 года). Свердловск: УФАИ СССР 1970. С.155-159.

12. Appel P.W.U. Garnite in an Archean iron-formation, West Greenland // Mineral Mag., 1986. 50 P.175-177.

Ballevre M., Pinardon J-L, Kienast J-R, Vuichard J-P. Reversal of Fe-Mg partition between garnet and staurolite in eclogite-facies matapelites from the Champtoceaux nappe (Brittany, France) // Journal of Petrology. 1989. V.30. N6. P.1322-1349.

Coolen J.M. Highbomite and aluminium spinel from some metamorphic rocks and Fe-Ti ores // Neues Jahrb Mineral Monatsh. 1981. V.8. P.374-384.

Gibson G.M. Staurolite in amphibolite and hornblendite sheet from the Upper Seaforth river, central Fiordland, New Zealand // Mineralogical Magazine. 1978. V.42. P.153-154.

Hellman P.L., Green T.H. The high pressure experimental crystallization of staurolite in hydrous mafic compositions // Contrib. Miner.Petrol. 1979. V.68. N4. P.369-372.

Kohn M.J., Spear F.S. Two new geobarometers for garnet amphibolites, the application to southeastern Vermont // American Mineralogist. 1990. V.75. P. 89-96.

Leake B.E. A cordierite-rich magnetite-highbomite-orthopyroxene hornfels from Currywongaun, Connemara, Ireland // Amer. Mineralogist. 1965. V.50 P.1092-1095.

Ravna E.K. Distribution of Fe²⁺ and Mg between coexisting garnet and hornblende in synthetic and natural systems: an empirical calibration of the garnet-hornblende Fe-Mg geothermometer // Lithos. 2000 V.53. P.265-277.

Spear F.S. Phase Equilibria of Amphibolites from the Post Pond Volcanics, Mt. Cube Quadrangle, Vermont // Journal of Petrology. 1982. V.23. P.383-426.

Ward C.M. Magnesiumstaurolite and green chromian staurolite from Fiordland, New Zealand // American Mineralogist. 1984. V.69. N.5-6. P.531-540.

Woodford P.J., Wilson A.F. Sapphirine, highbomite, kornerrupine and surinamite from aluminous granulite, north-eastern Strangways Range, Central Australia // Neues Jahrb Mineral Monatsh. 1976. V.1. P.15-35.