

УДК 549:552.321.5(470.5)

ОКОЛУРУДНЫЕ ВЫСОКОБАРИЧЕСКИЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ В КУСИНСКОМ ГАББРОВОМ МАССИВЕ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2003 г. С. В. Прибавкин, Н. С. Бородин, Г. Б. Ферштатер, В. В. Холоднов, Т. Д. Бочарникова

Представлено академиком В.А. Коротеевым 21.02.2003 г.

Поступило 21.02.2003 г.

Кусинский габбровый массив, вмещающий одноименное титаномagnetит-ильменитовое месторождение, расположен в западной части Южного Урала. Он входит в кусинско-копанский комплекс, прорывающий базальты и риолиты машакской серии. Возраст габброидов комплекса 1300 ± 42 млн. лет, с первичным отношением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.7093 ± 0.0067 [2]. Массив слагают разные типы габброидов: габбро-нориты, амфиболовые габбро, габбро-диориты. Рудные тела представлены пластовыми залежами массивных сегрегационных титаномagnetит-ильменитовых руд, которые простираются на значительные расстояния (до 3 км) при мощности около 3 м, а также вкрапленными рудами.

Исследователи массива и месторождения в 1950–1990 гг. считали, что кусинские породы и руды подверглись процессам регионального метаморфизма, связанного с формированием Уфалейского гнейсового комплекса, что привело к превращению габброидов в амфиболиты и образованию сегрегационных ильменит-титаномagnetитовых руд из высокотитанистых титаномagnetитовых (для обзора см. [5]). Тем же объяснялись и отдельные случаи находок в породах ставролита и корунда [3, 6]. Наши исследования последних лет показали, что образование Кусинского массива, в отличие от других массивов, входящих в кусинско-копанский комплекс, происходило на глубине 20–25 км при высоком водном давлении и пониженной температуре ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 6\text{--}8$ кбар, $T = 600\text{--}900^\circ\text{C}$, $-\lg f_{\text{O}_2} = 18\text{--}11$), что привело к образованию амфиболовых габбро и определило раздельную кристаллизацию в породах и рудах ильменита и магнетита [5]. Оставалось неясным место

высокоглиноземистых минералов в разработанной модели петро- и рудогенеза. Детальные полевые наблюдения, изучение состава минералов с использованием опубликованных экспериментальных работ позволили решить эту задачу. Ниже представлены полученные данные.

Впервые обнаружено, что наряду со ставролитом и корундом в породах присутствует кианит. Эти высокоглиноземистые минералы образуют единую высокобарическую ассоциацию в околорудной зоне. В общем виде околорудная зональность выглядит следующим образом:

- 0) ильменитовые габбро-нориты (субстрат);
- 1) габбро-нориты, в различной степени амфиболитизированные (а – меланократовые, б – лейкократовые) с глиноземистыми минералами общей мощностью более 20 м;
- 2) гранат-амфиболовые породы и гранатиты (0.1–0.5 м);
- 3) биотитовый слой (до 1 см);
- 4) сплошные сегрегационные ильменит-титаномagnetитовые руды с хегбомитом и хлоритом (0.2–3.0 м).

Характерная особенность структуры неизменных габбро-норитов – наличие келифитовых кайм на границе фемических минералов с плагиоклазом. На контакте орто- и клинопироксена с плагиоклазом формируется кайма из зеленовато-бурой роговой обманки и хлорита, а на контакте рудных (ильменита, титаномagnetита) с плагиоклазом – из граната, роговой обманки, биотита и хлорита. Подобные каймы образуются в результате субсолидусного взаимодействия минералов с остаточным расплавом и флюидом. Составы роговой обманки, граната и биотита в таких келифитовых каймах аналогичны составам минералов из околорудных зон, что позволяет предполагать единый механизм и условия формирования [5].

Формирование внешней околорудной зоны связано с интенсивным развитием роговой обманки, которая замещает породообразующие мине-

Институт геологии и геохимии
им. акад. А.Н. Заварицкого
Уральского отделения
Российской Академии наук, Екатеринбург

Таблица 1. Средние составы минералов из различных околорудных зон, мас. %

Зона	Минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	f	Сумма
0	Hbl	41.89	0.32	15.74	15.98	0.08	9.39	11.06	1.99	0.62	0.63	97.07
0	Gt	38.10		21.06	28.04	1.49	5.78	3.91			0.83	98.38
1a	Hbl	43.73	0.41	14.54	17.06	0.18	9.01	10.26	2.54	0.20	0.65	97.93
1a	Gt	36.99		20.81	29.57	1.72	6.81	3.08			0.81	98.98
1a	Stv	27.34	0.58	52.96	13.10	0.30	2.46	0.05			0.84	96.76
1a	Hbl	42.31	0.73	13.75	16.30	0.24	9.99	10.20	3.17	0.12	0.62	96.82
1a	Gt	38.43		20.79	30.77	1.25	5.71	3.50			0.84	100.44
1б	Hbl	41.13	0.41	16.45	17.00	0.17	8.73	10.28	2.95	0.24	0.66	97.35
1б	Gt	38.79		20.50	30.12	1.33	5.26	4.06			0.85	100.05
1б	Stv	27.64	0.41	52.69	13.01	0.13	2.82	0.04			0.82	96.74
2	Hbl	40.05	0.56	17.61	18.03	0.15	7.66	10.67	2.35	0.33	0.70	97.40
2	Gt	35.27		21.70	30.86	1.95	4.81	4.68			0.87	99.26
4	Hog		7.30	57.58	20.10		11.10				0.64	99.39

Примечание. В таблицах и на рисунках сокращенные названия минералов даны по [14]. Содержание в хегбомите (Hog) Cr₂O₃ 2.33%, ZnO 0.98%.

ралы габбро-норитов вследствие их взаимодействия с остаточным расплавом и флюидом. В зависимости от исходного количества магния и железа в субстрате формируются либо практически мономинеральные амфиболовые породы, либо мезократовые до лейкократовых амфибол-плагиоклазовые породы. Здесь же появляются и высокоглиноземистые минералы: кианит, ставролит, корунд.

Гранат-амфиболовые породы обязаны своим происхождением близостью к рудному телу, служащему основным источником железа для формирования граната. В этой зоне процесс формирования граната и амфибола регулируется содержанием глинозема в исходной породе, а избыток железа реализуется в виде магнетита.

Кроме того, в околорудной зоне отмечены редкие гидротермальные кварц-турмалин-карбонатные прожилки с сульфидами, сопровождающиеся кианитовыми и мусковитовыми обособлениями. По аналогии со сходными образованиями

на кианитовом месторождении Хизовара (Балтийский щит), описанными в [1], эти прожилки можно трактовать как высокобарические метасоматиты фации кислотного выщелачивания, формирующиеся при высокой активности летучих компонентов, что приводит к устойчивости во внутренних зонах турмалина и пирита вместо ставролита и граната [1].

Ниже приведено описание высокоглиноземистых минералов, включая хегбомит.

Гранат – широко распространенный минерал. Его состав соответствует гроссуляр-альмандиновому типу (табл. 1). Количество и размер зерен граната возрастает от габбро-норитов к околорудным зонам, где его содержание может достигать >50%. Условия кристаллизации по данным амфибол-гранатовой термобарометрии составляют порядка 700–800°C, давление 6–8 кбар (табл. 2).

Кианит автотасоматически измененных пород 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.

Ставролит в шлифах наблюдается в виде мелких идиоморфных кристаллов, обычно включенных в таблицы плагиоклаза. В протолочках наблюдались хорошо оформленные короткопризматические кристаллы размером 0.05–0.2 мм. Часто можно наблюдать закономерные сращения ставролита с кианитом. Нами впервые изучен его химический состав, что позволило с помощью

Таблица 2. Оценки температур и давлений для минеральных парагенезисов из разных околорудных зон

Зона	Мин. парагенезис	T, °C	P, кбар
0	Hbl + Gt + Pl + Bt; Ilm + Mt	700–600 [5, 10, 12]	6–7.5 [4, 11]
1a, б	Hbl + Gt + Pl ± (Ky, St, Crn)	900–650 [7, 10, 12]	6–7 [4, 11]
2	Hbl + Gt + Pl	900–650 [10, 12]	6–8 [4, 11]
4	Ilm + Mt; Hog + Chl	900–600; 500–600 [5]	

литературных данных определить условия его формирования.

Долгое время считалось, что ставролит распространен только в метапелитовых ассоциациях. В последние десятилетия, начиная с 1970-х годов, появился целый ряд работ, описавших этот минерал в метабазах [13, 15 и др.]. Авторы этих исследований отмечают, что ставролит в этих породах образовался при более высоких давлениях, чем в обычных ассоциациях амфиболитовой ступени метаморфизма. Главное отличие ставролита из основных ассоциаций – более высокое содержание магния по сравнению со ставролитом из метапелитов [8]. В экспериментальной работе [9] в продуктах кристаллизации синтетических стекол базальтового состава, расплавленных в водных условиях при $P = 24\text{--}26$ кбар и $T = 740\text{--}760^\circ\text{C}$, 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 в глубинных метаморфических комплексах, в условиях кианит-кварцевой фации [1 и др.]. Эти ставролиты по составу сходны со ставролитами из метабазов (рис. 1).

Химический состав ставролита из кусинских габброидов, определенный на микроанализаторе, представлен в табл. 1 и на диаграмме $\text{Mg\#} - (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$, где для сравнения использованы литературные данные (рис. 1). На этой диаграмме поле ставролитов из базитовых ассоциаций, включая и кусинские ставролиты, практически не перекрывается с полем ставролитов из метапелитов, благодаря более высокому, по сравнению с последними, величинами магнезиальности.

Корунд в амфиболитованных габбро с кианитом и ставролитом представлен редкими зернами размером не более 0.25 мм. Его цвет варьирует от бесцветного, розового до малиново-красного с участками, окрашенными в фиолетовый и индигово-синий цвета. Для корунда весьма характерна замутненность газовой жидкостями включениями, вызывающая эффект опалесценции; прозрачные участки встречаются реже.

Хегбомит (сложный оксид Al, Fe, Mg, Ti) спорадически распространен в рудных телах Кусинского месторождения, где выполняет совместно с хлоритом интерстиции между рудными минералами, а также замещает герцинит. Изучение химического состава хегбомита показало, что он соответствует магнезиальной разновидности, с повышенным содержанием титана (до 10 мас. %, табл. 1). Формирование ассоциации хегбомита с Al-клинохлором происходило после кристаллизации главных рудных минералов, т.е. при температуре 600°C и ниже.

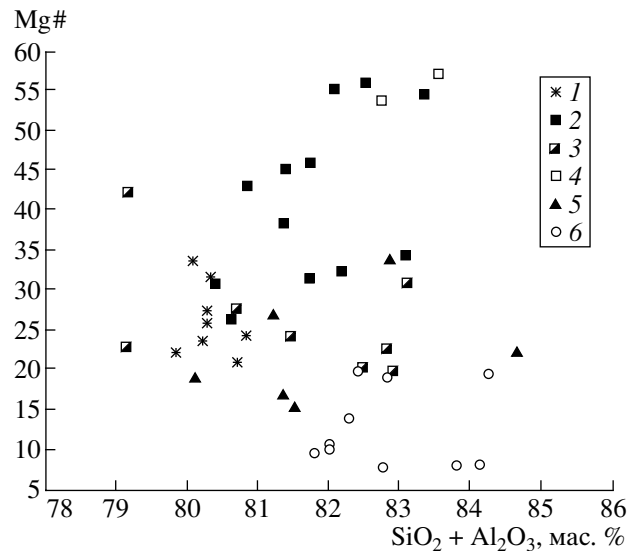


Рис. 1. Диаграмма $\text{Mg\#} - (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ для ставролита различных ассоциаций. 1 – ставролит из пород Кусинского массива, 2 – ставролит из метагабброидов [15], 3 – ставролит из основных метавулкаников [13], 4 – экспериментальные данные [9], 5 – метасоматитов высоких давлений [1], 6 – метапелитов [8].

Околорудная зональность выражена не только в развитии тех или иных минералов и парагенезисов, очень четко она проявлена в эволюции химического состава амфибола и граната по направлению от габбро-норитов к рудным телам. Габбро-нориты и мономинеральные амфиболовые породы характеризуются роговой обманкой с содержанием Al_2O_3 13.75%, MgO 10%. По мере приближения к рудному телу содержание глинозема в амфиболе возрастает до 17.6%, а содержание магния понижается до 7.7% (рис. 2). В этом ряду гранат также характеризуется уменьшением содержания магния и ростом содержания кальция (рис. 2), что, в свою очередь, свидетельствует о росте водного давления к рудным телам при общем изобарическом тренде кристаллизации. Оценки температур по субсолидусным минеральным парагенезисам габбро-норитов, руд и околорудных пород близки (табл. 2), что позволяет считать процесс формирования околорудной зональности не только изобарическим, но и изотермическим, происходившим на позднемагматическом этапе при просачивании водонасыщенного, остаточного, богатого рудным веществом расплава и флюида сквозь частично закристаллизованные породы. Состав флюида был существенно хлорный, что фиксируется в составе апатита (по мере приближения к рудному телу содержание хлора в апатите возрастает от 1 до 4%) и в локальной околорудной скаполитизации пород.

Изложенное позволяет заключить, что формирование высокоглиноземистых минералов, по-

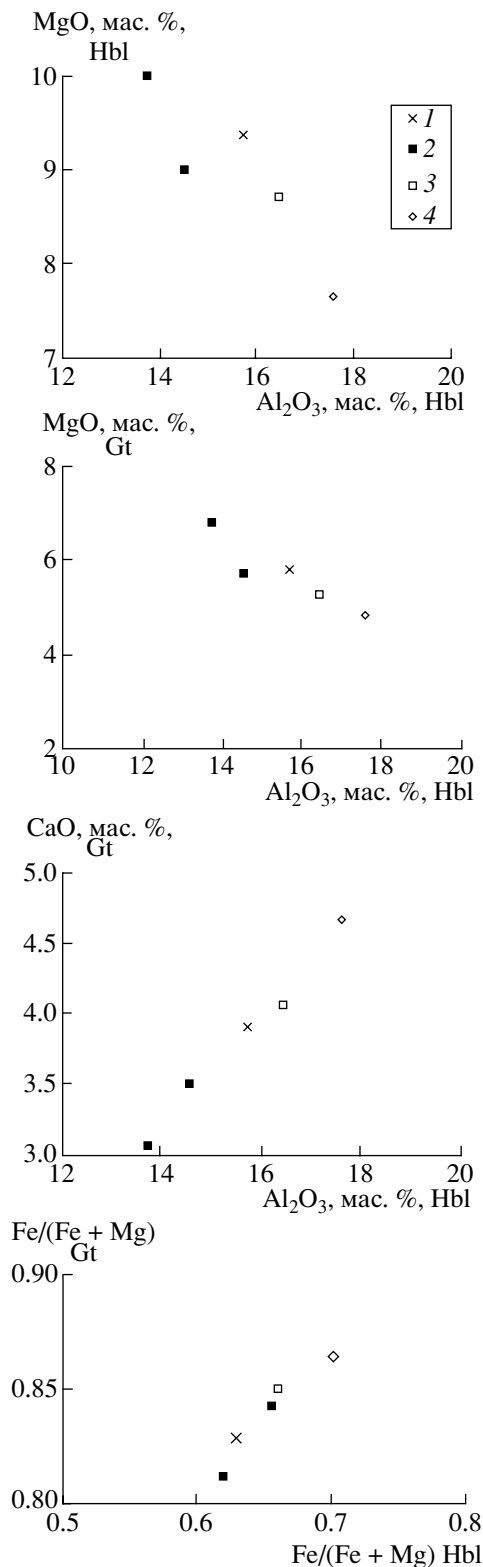


Рис. 2. Вариационные диаграммы для роговой обманки и граната из околорудной зональности Кусинского месторождения. 1 – габбро-нориты, 2 – мономинеральные амфиболовые породы (подзона 1а), 3 – амфиболовое габбро (1б), 4 – гранат-амфиболовые породы (зона 2).

видимому, вызвано процессами кислотного выщелачивания, которым способствовал хлорный состав поздне-постмагматического флюида. Приведенные данные свидетельствуют о формировании железооруденения и сопровождающих его силикатных минералов в Кусинском массиве в условиях абиссальной фации глубинности. Это один из немногих примеров рудообразования на глубинах более 25 км. В большинстве случаев процесс концентрации металлов в связи с разными типами магматизма осуществляется на меньших глубинах.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глебовицкий В.А., Бушмин С.А. Послемигматитовый метасоматоз. Л.: Наука, 1983. 216 с.
2. Горожанин В.М. В сб.: Магматизм и геодинамика. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. С. 98–108.
3. Мясников В.С., Николаева Е.Г., Карпова О.В. В сб.: Минералы базитов в связи с вопросами петрогенезиса. М.: Наука, 1970, С. 34–149.
4. Ферштатер Г.Б. // Геохимия. 1990. № 3. С. 328–335.
5. Ферштатер Г.Б., Холоднов В.В., Бородин Н.С. // Геология руд. месторождений. 2001. Т. 43. № 2. С. 112–128.
6. Фоминых В.Г., Андреев М.И. В: Ежегодник-1969. Свердловск: УФАН, 1970. С. 155–159.
7. Arnold J., Powell R., Sandiford M. // J. Metamorph. Geol. 2000. V. 18. P. 23–40.
8. Ballevre M., Pinardon J.-L., Kienast J.-R., Vuichard J.-P. // J. Petrol. 1989. V. 30. № 6. P. 1322–1349.
9. Hellman P.L., Green T.H. // Contribs. Mineral. and Petrol. 1979. V. 68. №4. P. 369–372.
10. Holland T., Blundy J. // Contribs. Mineral. and Petrol. 1994. V. 116. P. 433–447.
11. Kohn M.J., Spear F.S. // Amer. Miner. 1990. V. 75. P. 89–96.
12. Ravna E.K. // Lithos. 2000. V. 53. P. 265–277.
13. Spear F.S. // J. Petrol. 1982. V. 23. P. 383–426.
14. The Nomenclature of Minerals: a Compilation of IMA Reports / R.F.Martin. Ed. Ottawa, Ontario: Miner. Association of Canada. 1998. 149 p.
15. Ward C.M. // Amer. Miner. 1984. V. 69. № 5/6. P. 531–540.