

УДК 553.08.086:550.4.551.2

Л. Ф. БОРИСЕНКО, Н. М. КУРИЛЕНКО

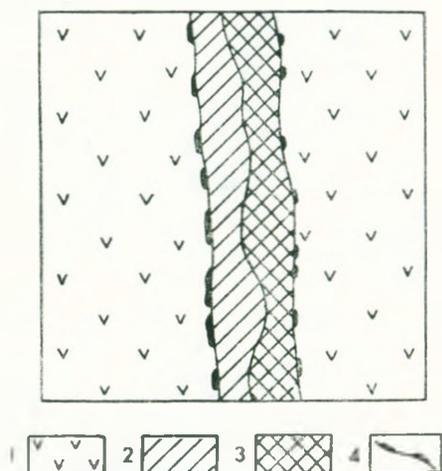
ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И ГЕНЕЗИС БРУСИТ-АнтиГОРИТОВЫХ ПРОЖИЛКОВ С МАГНЕТИТОМ НА ДЖИЛ-САТАНАХАЧСКОМ МАССИВЕ

Обособления антигорита и брусита в ассоциации с магнетитом встречаются среди ультраосновных пород Джил-Сатанахачского габбро-перидотитового массива в Армении. Этот массив является самым крупным в Севанском гипербазитовом поясе. Северная и центральная части массива сложены породами основного состава, а южная — гипербазитами, преимущественно гардбургитами и лерцолитами, которые занимают около 90% всей площади ультраосновных пород; остальное приходится на дуниты и пироксениты. Как правило, перидотиты и дуниты сильно, иногда нацело, серпентинизированы. Среди серпентинитов выделяются следующие разновидности: хризотилловые, хризотил-лизартитовые, антигоритовые и брусит-антигоритовые.

Среди анодунитовых серпентинитов брусит-антигоритового состава в непосредственной близости от Нижне-Даринского месторождения хрома находятся брусит-антигоритовые жилки с магнетитом и более мелкие брусит-магнетитовые линзочки и прожилки. Если вторичный магнетит в виде пылевидных скоплений обычен в серпентинизированных гипербазитах, то крупные зерна магнетита, которые мы наблюдали в брусит-антигоритовых обособлениях, достаточно редки. Такой магнетит встречается в жилках, имеющих мощность 0,5—1,2 см. Жилки имеют поперечношестоватое строение, светло-зеленую окраску и четкие контакты с вмещающими серпентинитами. Окраска наиболее мощной жилки неравномерная: более светлая близ одного контакта и более темная у другого. Граница между разноокрашенными участками извилистая, но довольно резкая. К контакту осветленного участка жилки с вмещающей породой и приурочены скопления крупных зерен магнетита (фиг. 1). На противоположном контакте наблюдаются лишь единичные мелкие (до 0,5 см) зернышки магнетита. В средней части жилки этот рудный минерал отсутствует.

Минеральный состав жилки: антигорит 74,1; брусит 15,2; девейлант 10,7% (объемн.). Антигорит представлен кристаллами игольчатой формы длиной до 2 мм, реже мелкими пластинками. В центральной части жилки игольчатые антигориты расположены субпараллельно и ориентированы перпендикулярно контактам, а в приконтактных участках они изгибаются и перекрещиваются. Пластинки брусита размером 0,1—1,0 мм заполняют интерстиции между игольчатками антигорита.

В осветленной части жилки брусит избирательно замещается мелко-чешуйчатым агрегатом серпентиноподобного минерала—девейлита. В отдельных участках этот минерал обнаруживает криптоволокнустое



Фиг. 1. Брусит-антигоритовая жилка в серпентините: 1—серпентинит; 2—осветленная часть жилки; 3—более темная часть жилки; 4—магнетит. М. 1:1.

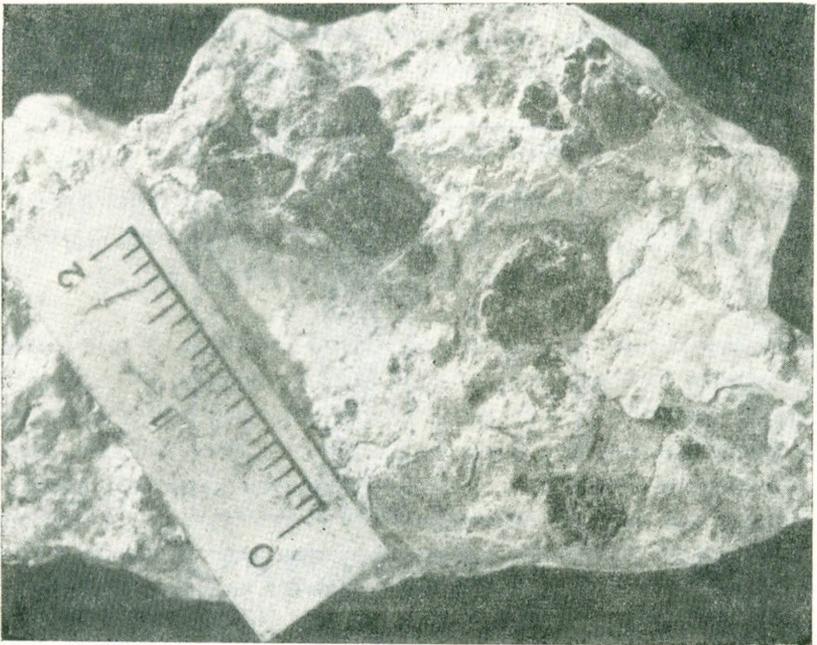
строение. При одном николе девейлит бесцветен или слабо желтоват. Агрегативно поляризует, особенно интенсивно на границе с бруситом. $N_g - N_p = 0,009$.

Структура породы, слагающей брусит-антигоритовую жилку, параллельно-лучистая.

На самом контакте брусит-антигоритовой жилки с вмещающей породой наблюдаются довольно многочисленные кристаллы магнетита и их скопления (фиг. 2). В ассоциации с магнетитом, а часто в непосредственном срастании с ним, встречаются кристаллы ярко-зеленого хромового граната (0,1—2 мм). Его химический состав (вес. %): 33,80 SiO_2 ; 28,50 Fe_2O_3 ; 3,95 Cr_2O_3 ; 34,00 CaO ; $\Sigma = 100,25$ (аналитик М. Е. Казакова). Плотность граната 3,88. Ребро элементарной ячейки $a_0 = 12,0 \pm 0,02 \text{ \AA}$ (определено Р. Н. Александровой). Выделения магнетита и граната заключены в мелкочешуйчатой массе антигорита и девейлита.

Крупные зерна магнетита (до 7 мм) имеют округлую форму, тогда как более мелкие его зерна (0,1—0,2 мм)—октаэдрическую. Под микроскопом хорошо видно, что крупные выделения магнетита состоят из отдельных зерен, разделенных тончайшими нитевидными прожилками серпентина. На отдельных зернах наблюдаются фигуры роста кристаллов магнетита. Плотность магнетита 4,92 (определено В. Ф. Педобой). Микротвердость 494—614 кг/мм^2 , в среднем 550 кг/мм^2 (определено на ПМТ-3 С. И. Лебедевой по 14 замерам).

В полированных шлифах исследованный магнетит выглядит однородным. При увеличении в 600 раз с иммерсионным маслом в нем наблюдаются мельчайшие пластинчатые включения. По своему расположению



Фиг. 2. Зерна магнетита на контакте брусит-антигоритовой жилки с серпентинитом.

они отвечают структуре распада твердых растворов. Однако, в отличие от титаномагнетита магматических месторождений, размер этих включений чрезвычайно мал и расположены они очень неравномерно. Ввиду небольших размеров включений диагностировать их не удалось. Можно лишь предположить, что ими могут быть хромшпинелиды. На это косвенным образом указывает повышенная хромистость (0,76% Cr_2O_3) магнетита. Согласно расчету результатов химического анализа магнетита (табл. 1) в нем содержится: 88,6% $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ и 11,4% $\text{MgO}(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$.

Таблица 1
Результаты химического анализа магнетита из
брусит-антигоритовой жилки (вес. %)

Компоненты	Вес, %	Молекулярные количества
SiO_2	не обн.	—
TiO_2	не обн.	—
Fe_2O_3	69,13	4328
Cr_2O_3	0,76	50
FeO	28,45	3850
MnO	0,06	8
MgO	2,01	498
CaO	не обн.	—
Сумма	100,41	8742
Аналитик	М. Е. Казакова	—

Данные химического и спектрального анализов показывают, что для исследованного магнетита совершенно не характерны главные элемен-

ты-примеси (титан и ванадий), обычно содержащиеся в повышенном количестве в титаномагнетите магматических образований [3]. С другой стороны, магнетит брусит-антигоритовых прожилков содержит повышенное количество магния, хрома, никеля и кобальта (табл. 2), которые являются наиболее характерными элементами ультраосновных пород гипербазитовой формации. Результаты количественного спектрального анализа (аналитик Е. Гущина) магнетита из брусит-антигоритовой жилки близки к данным для вторичного пылевидного магнетита, выделенного из серпентинизированных дунитов и аподунитовых серпентинитов Армении (табл. 2). Таким образом, для вторичного магнетита из основной массы ультраосновных пород и из более поздних жильных образований типичны одни и те же элементы-примеси.

Таблица 2

Содержание элементов-примесей в магнетите из гипербазитов Армении

Порода, содержащая магнетит	Содержание в магнетите (вес. %)						Исследователи
	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	
Брусит-антигоритовая жилка	не обн.	0,01	0,52	0,07	0,026	0,30	Настоящая работа
Серпентинизированный дунит и аподунитовый серпентинит	0,019	0,008	0,85	0,08	0,048	0,19	С. Б. Абоян, Л. Ф. Борисенко [1]

Кроме скоплений крупных зерен магнетита в брусит-антигоритовых жилках, этот минерал наблюдается в тонких прожилках того же состава, а также в мелких линзочках и проводничках, сложенных в основном бруситом. Тонкие антигорит-бруситовые прожилки с магнетитом, толщина которых составляет 0,1—1,5 мм, наблюдаются в серпентинизированных дунитах Джил-Сатанахачского массива. Сетка этих прожилков явно наложена на более раннюю петельчатую структуру, образованную хризотилом. Они состоят из удлиненных пластинок брусита, ориентированных поперек простирания прожилка, между которыми находятся зерна магнетита изометричной или вытянутой формы с неровными краями. Пластины и иголки антигорита часто слагают внешнюю оторочку таких прожилков.

Линзочки и проводнички, образованные бруситом и магнетитом, встречаются в антигоритовых серпентинитах в 50—100 м от Нижне-Даринского месторождения хромита. Мелкие, до 2 мм по длине, магнетит-бруситовые обособления хорошо фиксируются только под микроскопом. Они сложены листочками брусита, между которыми распределены мельчайшие (0,01 мм) зернышки магнетита. Для обособлений такого рода характерна паркетная внутренняя структура и извилистые границы.

Если сравнить минеральный состав вмещающей серпентинизированной породы и брусит-антигоритовых жилок, то оказывается, что они довольно близки. Эта порода состоит из (объем. %): антигорита 75,2;

брусита 22,1; хромшпиннелида 0,5; граната 0,7 и вторичного магнетита 1,5. Структура породы листоватая, местами решетчатая. Однако, результаты химического анализа (аналитик Юрченкова Л. П.) вмещающей породы и брусит-антigorитовой жилки (основная масса жилки без выделений крупных зерен магнетита в ее зальбандах) позволяют обнаружить некоторое их отличие друг от друга: концентрации железа и алюминия выше во вмещающей породе, а содержание углекислоты значительно больше в жилке (табл. 3).

Таблица 3

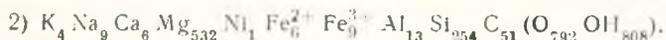
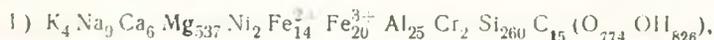
Пересчет химических анализов вмещающей породы (1) и брусит-антigorитовой жилки (2) по кислородному методу Барта

Компонент	Весовые %		Весовые %, приведенные к 100%		Атомные количества катионов		Атомные количества кислорода		Количество электроположительных ионов в стандартной ячейке	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
SiO ₂	31,30	31,05	31,02	31,18	516	519	1032	1038	260	254
Cr ₂ O ₃	0,37	0,05	0,37	0,05	5	1	8	1	2	—
Al ₂ O ₃	2,56	1,35	2,54	1,36	50	27	75	40	25	13
Fe ₂ O ₃	3,25	1,40	3,22	1,41	40	18	60	27	20	9
FeO	2,02	0,86	2,00	0,87	28	12	28	12	14	6
NiO	0,23	0,15	0,23	0,15	3	2	3	2	2	1
MnO	0,08	0,05	0,08	0,05	1	0	1	0	—	—
MgO	43,31	43,64	42,93	43,83	1065	1087	1065	1087	537	532
CaO	0,64	0,68	0,63	0,68	12	13	12	13	6	6
Na ₂ O	0,56	0,55	0,56	0,55	18	18	9	9	9	9
K ₂ O	0,40	0,42	0,40	0,42	8	8	4	4	4	4
H ₂ O	14,89	14,80	14,76	14,86	1638	1650	819	825	826	808
CO ₂	1,27	4,57	1,26	4,59	29	104	58	208	15	51
Сумма	100,98	99,57	100,00	100,00	3413	3459	3174	3266	1720	1693

Переводные множители: 1) 1600 : 3174 = 0,5041,

2) 1600 : 3266 = 0,4899.

Формула породы (1) и жилки (2):



В жилке привнос: 36 ионов С и вынос: 5 ионов Mg, 1 иона Ni, 8 ионов Fe²⁺ и 1 ионов Fe³⁺, 12 ионов Al, 6 ионов Si, 18 ионов OH.

Для сравнения результатов химического анализа, помещенных в табл. 3, были использованы два метода пересчета: 1) кислородный метод Т. Барта; 2) пересчет на нормативный состав [11]. Применение метода Т. Барта целесообразно при сравнении близких по составу пород [7]. Этот метод дает возможность количественного учета перемещения вещества при метасоматозе. Второй метод наглядно показывает разницу в минеральном составе сравниваемых пород. В результате пересчета по методу Барта обнаружено, что в каждой стандартной ячейке брусит-ан-

тигоритовой жилки по сравнению с вмещающей породой не достает: 5 ионов Mg, 19 ионов Fe, 2 ионов Cr, 12 ионов Al, 6 ионов Si и 18 ионов OH, в избытке же остается только 36 ионов С.

Пересчет на нормативный минеральный состав дал следующие результаты: в жилке по сравнению с вмещающей породой увеличилось содержание карбоната (магнезита) на 5,81% и появился новый минерал девейлит в количестве 10,11%. Все остальные минералы содержатся в жилке в меньших количествах, чем во вмещающей породе, причем содержание магнетита в жилке сократилось на 0,88%, хромита на 0,16%, антигорита на 9,67%, брусита на 5,21% (табл. 4).

Таблица 4

Пересчет результатов химического анализа вмещающей породы и брусит-антигоритовой жилки на приближенный минеральный состав

Минерал	Количество минералов (% от 100)		Изменение содержания минералов в жилке
	порода	жилка	
Антигорит	71,87	62,20	-9,67
Брусит	24,11	18,90	-5,21
Девейлит	—	10,11	+10,11
Карбонаты	2,28	8,09	+5,81
Хромшпинелиды	0,16	—	-0,16
Магнетит	1,58	0,7	-0,88

При сопоставлении данных двух пересчетов выявляются следующие закономерности: магний при образовании жилки выносился в незначительном количестве. Часть магния, входящего во вмещающей породе в состав антигорита и брусита, в жилке идет на образование девейлита и карбоната. Уменьшение содержания брусита в жилке связано с вхождением некоторого количества магния в серпентин вместо выделившегося из него железа. Это же явление отмечалось для серпентинитов Урала И. А. Малаховым [9]. Выносится небольшая часть кремния, алюминия и гидроксил-анионов. Железо и хром в значительной степени мигрируют из внутренних частей жилки к ее контактам с вмещающим серпентинитом, где образуются магнетит и хромовый гранат.

Помимо указанных элементов при образовании брусит-антигоритовых жилок выносились никель, кобальт, марганец (табл. 5). Количество хрома в жилке примерно в 8 раз, а кобальта и никеля в 2 раза меньше, чем во вмещающем серпентините. Присутствие ванадия и титана не установлено (табл. 5). Характерно, что существенной разницы в содержаниях элементов семейства железа в более темной и осветленной части прожилка не наблюдается.

Обращаясь к генезису брусит-антигоритовых жилок с магнетитом, следует отметить сложный характер серпентинизации гипербазитов, которая интенсивно проявлена в районе Нижне-Даринского месторождения хромита.

Таблица 5

Содержание элементов семейства железа в брусит-антигоритовых прожилках и вмещающей породе

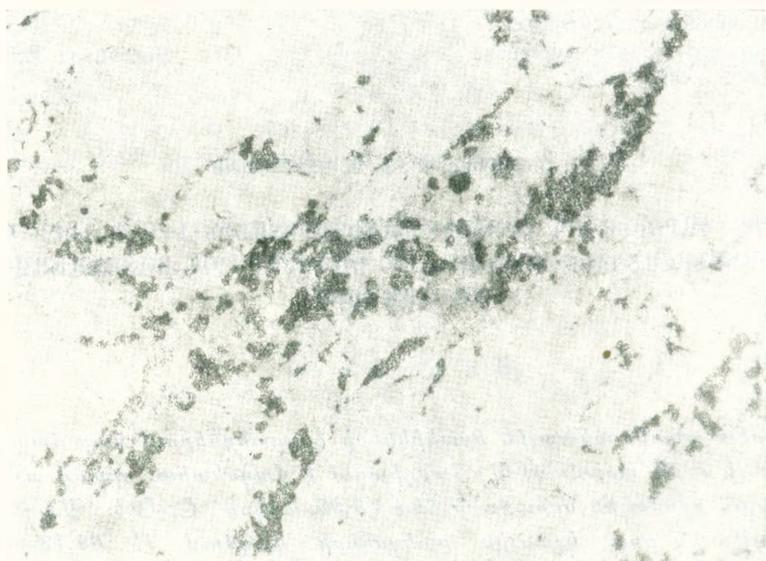
Порода	Cr	Co	Ni	Mn	V	Ti
Вмещающий серпентинит	0,250	0,020	0,18	0,075	не обн.	не обн.
Брусит-антигоритовый прожилок (темная часть)	0,030	0,011	0,11	0,054	не обн.	не обн.
Брусит-антигоритовый прожилок (осветленная часть)	0,035	0,012	0,12	0,056	не обн.	не обн.

По всей вероятности, во время начального этапа серпентинизации образовались существенно хризотилловые серпентиниты. Затем на эти серпентиниты была наложена антигоритовая и бруситовая минерализация. Используя показатели преломления брусита $N_g = 1,595$ и $N_p = 1,574$, полученные нами иммерсионным методом, и диаграмму зависимости светопреломления брусита (N_p) от железистости (F), построенную Д. С. Штейнбергом и И. С. Чащухиным [12], находим, что его железистость равна 6%. Небольшое значение железистости изученного брусита свидетельствует об относительно невысоких давлениях, при которых формировались брусит-антигоритовые разности пород, что отмечалось И. А. Малаховым [10] для ультрабазитов Урала. По всей вероятности, образование этих пород тесно связано с зонами тектонических нарушений, в которых существенно снижалось давление флюидной фазы. Таким образом, антигорит, существенно магnezиальный брусит и вторичный магнетит образовались на поздних этапах серпентинизации ультраосновных пород Джил-Сатанакского массива в условиях $P_{H_2O} < P_s$. Однако антигоритовые и особенно брусит-антигоритовые разности серпентинитов имеют ограниченное распространение в исследованном районе. Вероятнее всего они сформировались в результате воздействия на хризотилловые серпентиниты растворов, характеризующихся повышенной щелочностью при относительно невысоком содержании CO_2 . Как известно, при изменении pH в сторону увеличения кислотности при концентрации CO_2 в растворах около 2%, температуре 450° и давлении 1000 бар, брусит становится неустойчивым, а при понижении температуры замещается при еще меньших содержаниях CO_2 [13]. На образование брусита в ультраосновных породах при повышении щелочности растворов указывали также А. С. Варлаков и С. И. Матвеев [5].

Как было показано Р. Гаррелсом [6], в водных растворах могут существовать следующие химические формы железа: Fe^{3+} ; $Fe(OH)^{2+}$; $Fe(OH)_2^+$; FeO_2^- ; Fe^{2+} ; $Fe(OH)^+$, $HFeO_2^-$, из которых первые четыре содержат ионы трехвалентного железа, а остальные—двухвалентного. В щелочных водных растворах возможен перенос железа, главным образом, в виде $Fe(OH)_4^-$, устойчивого в довольно широком интервале температур [8]. Образуется $Fe(OH)_4^-$ таким образом: $FeO_2^- + 2H_2O = Fe(OH)_4^-$. При изменении pH и окислительно-восстановительного потен-

цнала растворов, снижении температуры, может образоваться магнетит. Согласно диаграмме полей устойчивости Р. Гаррелса [6], этот минерал будет находиться в равновесном состоянии с водными низкотемпературными растворами при pH 8—12 и Eh—0,2 до 0,7 в.

Изученные брусит-антигоритовые жилки с магнетитом и брусит-магнетитовые линзочки и проводнички являются наиболее поздними гидротермальными образованиями. По всей вероятности, они развились вдоль трещин путем метасоматической перекристаллизации брусит-антигоритовых серпентинитов. При этом существенно менялась структура: порода в жилке стала отчетливо параллельно-лучистой. Железо и хром в процессе образования брусит-антигоритовых жилок мигрировали к контактам, где шло выделение относительно крупных зерен магнетита (фиг. 1, 2) и хромового граната. Образование магнетита за счет перерас-



Фиг. 3. Магнетит-бруситовые обособления в серпентините. Прозр. шлиф
Увел. 50.

пределения вещества подвергшихся метасоматическому изменению гипербазитов привело к тому, что этот минерал, кроме Cr, Ni, Co и Mg, почти не содержит других примесей. Характерно, что хром, никель, кобальт и магний так же, как железо, могут переноситься в виде растворенных соединений в щелочных растворах.

Железо и указанные элементы-примеси вошли в состав вновь образованного магнетита, главным образом, за счет некоторого перераспределения вещества в процессе серпентинизации. Примесь хрома в магнетите в значительной степени, по-видимому, связана с растворением аксессуарных хромшпинелидов. Возможность накопления хрома во вторичном магнетите за счет хромшпинелидов отмечалась Л. Д. Булыкиным [4] на примере гипербазитов Урала.

Избирательное замещение брусита девейлитом в осветленной зоне жилки может быть связано с циркуляцией самых поздних порций растворов, содержащих повышенное количество CO_2 . В этих условиях брусит становится неустойчивым и замещается девейлитом. Новообразованный девейлит находится в тесной ассоциации с магнезитом. При пересчете результатов химического анализа брусит-антигоритовой породы из жилки на вероятный минеральный состав определено 8,09% нормативного карбоната.

Таким образом, изученный нами магнетит, отличающийся по составу и внутреннему строению от титаномагнетита магматических пород и руд, является типичным представителем низкотемпературных постмагматических образований в гипербазитах.

В заключение авторы выражают свою признательность за советы С. Б. Абовяну, М. С. Бессмертной и Г. А. Голевой.

Институт минералогии, геохимии
и кристаллохимии редких элементов
АН и МГ СССР

Поступила 30.IX.1974 .

Լ. Ֆ. ԲՈՐԻՍԵՆԿՈ, Ն. Մ. ԿՈՐԻԼԵՆԿՈ

ՄԱԳՆԵՏԻՏԻ ՊԱՐՈՒՆԱԿՈՂ ԲՐՈՒՍԻՏ-ԱՆՏԻԳՈՐԻՏԱՅԻՆ ԵՐԱԿԻԿՆԵՐԻ ԿԱԶՄԻ ԱՌԱՆՋՆԱՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՆ ՈՒ ԾԱԳՈՒՄԸ ԶԻ-ՍԱՏԱՆԱԽԱԶԻ ԶԱՆԳՎԱԾՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Բրուսիտ-անտիգորիտային երակիկների զալբանդներում կլոր հատիկների ձևով (մինչև 7 մմ տրամագծով) հանդիպում է մագնետիտ, որտեղ այն հանդես է գալիս բրոմային նոնաքարի հետ (3,95 տոկոս Cr_2O_3): Մագնետիտի բաղադրությունն ըստ կշռային տոկոսների կազմում է՝ 69,13 Fe_2O_3 , 0,76 Cr_2O_3 , 28,45 FeO , 0,06 MnO , 2,01 MgO , գումարը՝ 100,41: Խառնուրդների ձևով պարունակվում են կորալտ և նիկել:

Մագնետիտ պարունակող բրուսիտ-անտիգորիտային երակիկները հիդրոթերմալ անմենաուշ առաջացումներն են: Հավանաբար, նրանք զարգացել են ձեղքերի երկայնքով: Երկաթն ու քրոմը երակիկների առաջացման ժամանակ տեղաշարժվել են ղեպի կոնտակտները, որտեղ և անջատվել են մագնետիտի և բրոմային նոնաքարի հատիկների ձևով:

Ենթադրվում է, որ մագնետիտն առաջացել է սերպենտինիտների վրա բարձր արկալայնության և ածխաթթու զաղի համեմատաբար փոքր պարունակություն ունեցող լուծույթների ազդեցության շնորհիվ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Абовян С. Б., Борисенко Л. Ф. Новые данные о вторичном магнетите из ультрабазитов Армянской ССР. Докл. АН Арм. ССР, т. 52, № 4, 1971.
2. Барт Т. Теоретическая петрология. Изд-во ИЛ, М., 1956.

3. *Борисенко Л. Ф., Лалин А. В.* О концентрации элементов-примесей в титаномагнетите и магнетите эндогенных месторождений различных типов. Докл. АН СССР, т. 196, № 6, 1971.
4. *Булыкин Л. Д.* Некоторые новые данные о поведении окислов железа при серпентинизации. Тр. II Уральск. петрограф. совещ., т. 2, 1969.
5. *Варлаков А. С., Матвеев С. И.* Поведение брусита при серпентинизации ультраосновных пород Урала. Сб. «Геология и полезные ископаемые Урала», ч. 1, Свердловск, 1969.
6. *Гаррелс Р.* Минеральные равновесия. Изд-во ИЛ, М., 1962.
7. *Казыцын Ю. В., Рудник В. А.* Руководство к расчету баланса вещества и внутренней энергии при формировании метасоматических пород. «Недра», М., 1968.
8. *Калинин А. С., Кашик С. А.* К вопросам о формах растворенного железа в гидротермальных растворах. Докл. АН СССР, т. 182, № 1, 1968.
9. *Малахов К. А.* Петрохимия ультрабазитов Урала. Тр. Ин-та геологии, вып. 79, Изд-во АН СССР, Уральский филиал, Свердловск, 1966.
10. *Малахов Н. А.* О термодинамических условиях серпентинизации. Тр. Ин-та геологии и геохимии, вып. 100, 1973.
11. *Четвериков С. Д.* Руководство к петрохимическим пересчетам. Госгеолтехиздат, М., 1958.
12. *Штейнберг Д. С., Чащухин И. С.* О составе брусита в серпентинитах и методах его определения. Докл. АН СССР, т. 186, № 2, 1969.
13. *Walter L. S., Wyllie P. J., Tulle O. F.* The System $MgO-CO_2-H_2O$ of High Pressure and Temperatures, Journal of petrology - V. 3, № 1, London, 1962.