

**ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ ПРИ МАГНЕЗИАЛЬНО-  
ЖЕЛЕЗИСТОМ МЕТАСОМАТОЗЕ НА СЕМИБРАТСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ  
КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАГНЕЗИТОВ**

**М.Т. Крупенин, В.А. Котляров, Т.Я. Гуляева**

Семибратское месторождение кристаллических магнезитов расположено в восточной части Башкирского мегантиклинория в структуре Верхнебельского синклинория (Уралтауская зона) и приурочено к метаморфизованным карбонатно-терригенным отложениям уреньгинской свиты, являющейся стратиграфическим аналогом авзянской свиты среднего рифея, представленной неметаморфизованными карбонатно-терригенными отложениями в разрезах западной части мегантиклинория. Месторождение расположено в 12 км к югу от с. Веселовка Златоустовского района Челябинской области. Семибратское месторождение с запасами около 200 млн т. – одно из крупнейших в Южно-Уральской провинции – приурочено к Златоустовской группе месторождений и проявлений кристаллического магнезита [Анфимов, Бусыгин, 1982]. По комплексу геолого-геохимических признаков магнезиты месторождения отно-

сятся к типичному для юрматиния второму типу [Крупенин, 2003] с линзовидной формой рудных тел, постепенными переходами вмещающих доломитов в магнезиты через зону вкрапленности, мелко-, среднезернистым сложением из округло-ромбовидных кристаллов магнезита, не превышающих 4 мм, повышенной примесью доломита и кварца в составе руд и наличием железистых разностей. В 1960-е годы на месторождении была проведена поисковая разведка с применением горных и буровых работ, выполнен подсчет запасов магнезитов и составлен сводный отчет [К.И.Стариков и др., 1970].

Геологические наблюдения позволили авторам отчета сделать заключение, что магнезиты имеют эпигенетическую метасоматическую природу. К такому же выводу пришли сотрудники Свердловского горного института, изучавшие метасоматически измененные породы в районе Семибратского месторождения [Ка-

## РУДООБРАЗОВАНИЕ, МЕТАЛЛОГЕНИЯ, МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

рагодин и др., 1989]. Наложенный характер оруденения подтверждается сложной формой рудных тел, развитием метасоматической зональности от вмещающих известняков через ряд промежуточных разновидностей пород (доломитизированный известняк-доломит-доломит с вкрапленностью магнезита-магнезит), формирующей концентрически зональное строение рудных тел. Метасоматический характер оруденения подтверждается также колонновидным (многоэтажным) расположением залежей в различных стратиграфических карбонатных горизонтах уреньгинской свиты, которых, как и в авзянской, насчитывается три. Наиболее крупная залежь с наилучшим качеством руды приурочена к нижнему карбонатному горизонту. Показан структурный контроль магнезитового оруденения: приуроченность залежей к зонам разломов северо-восточного простирания и экранирование тел дайками гранодиоритов и прослоями сланцев, в том числе поверхностью несогласия с зильмердакской свитой. Образование магнезитов моложе даек гранодиоритов, пересекающих отложения уреньгинской свиты и экранирующих магнезитовые тела, но не пересекающих аркозовые кварциты верхнерифейской зильмердакской свиты. В свою очередь, гранодиориты пересекаются жильными габброидами, которые не внедряются в отложения зильмердакской свиты. Установлено, что жилы габброидов ветвятся и выклиниваются в магнезитовых залежах. Проявления железистых карбонатов на месторождении, представленные прожилками и гнездами брейнерита, признаны вторичными относительно как магнезитов, так и вмещающих доломитов. Очень интересные выводы получены по геологической истории развития района месторождения в среднем и верхнем рифее: установлен перерыв отложений уреньгинской свиты с вышележащими отложениями зильмердакской свиты. Основанием к такому выводу послужило развитие карста в карбонатных породах и несогласное налегание на различные карбонатные и сланцевые горизонты уреньгинской свиты вышележащих серицит-кварцевых и хлорит-кварцевых сланцев, с прослоями аркозовых кварцитов и конгломератов «с невыдержанными по мощности залежами порфиритов диабазовых и их туфов в основании толщи» (Старков и др., с. 40). Основанием зильмердакской свиты признаны диабазовые порфириты и их туфы, сопровождающиеся локально развитыми пластообразными залежами

серного колчедана, в настоящее время частично превращенного процессами выветривания в бурый железняк и барит-лимонитовые руды (Семибратский, Кабановский, Хуторский участки). Порфириты и сланцы интенсивно выветрены с образованием глинистой коры выветривания преимущественно каолинового состава. Формирование рыхлой каолиновой коры выветривания не может быть связано с предзильмердакским выветриванием, поскольку породы и среднего и верхнего рифея из разреза месторождения подвержены региональному зеленосланцевому метаморфизму, однако наличие несогласия и резкая литологическая смена отложений указывают на перерыв в осадконакоплении между отложениями среднего и верхнего рифея.

Наши исследования проведены по керновому материалу, находящемуся на бывшем керноскладе, и образцам пород из обнажений в районе месторождения. Сравнение минералогического состава магнезитов и вмещающих доломитов по данным микроскопического и рентгенографического изучения показало, что магнезиты, по сравнению с доломитами, отличаются по составу минералов-примесей. Различия заключаются в отсутствии в магнезитах примеси кварца и плагиоклаза, характерной для доломитов, и присутствии небольшого количества талька и хлорита (табл. 1). Можно предположить, что в процессе магнезиального метасоматоза, проходящего в щелочных условиях, часть кварца была вынесена за пределы магнезитовой залежи, а часть была переработана в тальк и хлорит. Изучение литотипов магнезитов позволило выделить разновидности по кристаллическому размеру, а также по степени железистости. Первый признак не оказывает существенного влияния на свойства магнезитов, тем более, что преобладающий размер кристаллов не очень заметно варьирует: от 0,5-1 мм в мелкозернистых до 3-4 мм в среднезернистых. Крупно- и гигантокристаллические разновидности карбонатов на месторождении оказались не магнезитами, а перекристаллизованными доломитами. Таким образом, подтверждено, что степень перекристаллизации магнезитов второго типа в Южно-Уральской провинции зависит от генезиса руд, а не от степени метаморфизма. Железистость магнезитов проявляется в нескольких свойствах: повышении содержания железа в основной массе магне-

**Минералогический состав магнезитов и вмещающих доломитов Семибратского месторождения по данным дифрактометрии**

№	Литология	Mgz	Dol	Cc	Chl	Tc	Qu	Pl	Pу
Sem2	Доломит гз	-	+	-	-	-	-	о	-
Sem6	Магнезит сз	+	о	-	о	о	-	-	-
Sem12	Магнезит тз с Pу	+	-	-	-	-	-	-	сл
Sem17	Магнезит разнозерн.	+	о	-	-	о	-	-	-
Sem18	Брейнерит разнозерн.	+	о	-	сл	-	-	-	-
Sem20	Магнезит сз	+	о	-	-	о	-	-	-
Sem24	Магнезит кз Pу	+	-	-	-	сл	-	-	сл
Sem33	Магнезит мз	+	о	-	-	+	-	-	-
Sem15	Доломит	-	+	-	сл	-	о	сл	-
Sem34	Доломит	-	+	-	-	-	о	сл	-
Sem35	Доломит	-	+	-	-	-	сл	сл	-

Примечание. Mgz - магнезит; Dol – доломит; Cc – кальцит; Chl – хлорит; Tc – тальк; Qu – кварц; Pl – плагиоклаз, Pу – пирит; + много; о мало; сл – следы; - – отсутствует.

зита, что приводит к увеличению плотности и появлению бурого или желтоватого оттенка в светло-серой породе; развитию прожилков и отдельных мелких гнезд бурого брейнерита и появлении вкрапленности пирита, количество которого увеличивается вместе с увеличением железистости карбонатной части породы. Корреляции степени железистости с размером

кристаллов магнезита не наблюдается. Детальному изучению с применением рентгеноструктурного и химического методов анализа, а также количественного микроанализа в растровом электронном микроскопе (РЭМ-МА-202М) были подвергнуты 4 разновидности магнезита с различной степенью насыщения железом.

Таблица 2

**Химический состав магнезитов и вмещающих доломитов Семибратского месторождения**

Component	Sem-6 Брейнерит сз	Sem-12 Магнезит тз	Sem-17 Магнезит сз	Sem-18 Брейнерит нз	Sem-20 Магнезит сз	Sem-24 Магнезит кз Pу	Sem-33 Магнезит мз
SiO <sub>2</sub>	1,26	0,14	1,74	0,29	0,95	0,09	4,64
TiO <sub>2</sub>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,19	<0,01	<0,1	0,18	0,32	0,15	0,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	8,651	9,596	1,935	6,457	2,344	10,113	0,467
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,16	1,61	0,23	1,43	0,32	2,6	0,17
FeO	6,81	7,26	1,55	4,57	1,84	6,83	0,27
MnO	0,24	0,15	0,05	0,11	0,06	0,15	0,06
MgO	39,06	40,88	44,68	42,68	44,5	40,52	45,44
CaO	3,51	0,24	1,1	1,42	1,62	0,24	1,66
Na <sub>2</sub> O	0,12	0,12	0,13	0,12	0,11	0,13	0,12
K <sub>2</sub> O	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,02	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01
H <sub>2</sub> O-	0,03	не обн.	не обн.	<0,01	не обн.	не обн.	0,01
H <sub>2</sub> O+LOI	47,76	49,61	50,06	49,63	50,14	49,27	47,84
Сумма	100,17	100,03	99,55	100,47	99,88	99,99	100,37
S кач.	ооо	о	не обн.	не обн.	о	ооо	не обн.
Орг.в-во	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.

Примечание. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* – общее железо в пересчете на окись. S кач. – качественное определение серы. Сз – среднезернистый; тз – тонкозернистый; нз – неравномернозернистый; кз – крупнозернистый; Pу – пиритизация. Анализы выполнены в Институте земной коры СО РАН, Иркутск.

РУДООБРАЗОВАНИЕ, МЕТАЛЛОГЕНИЯ,  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

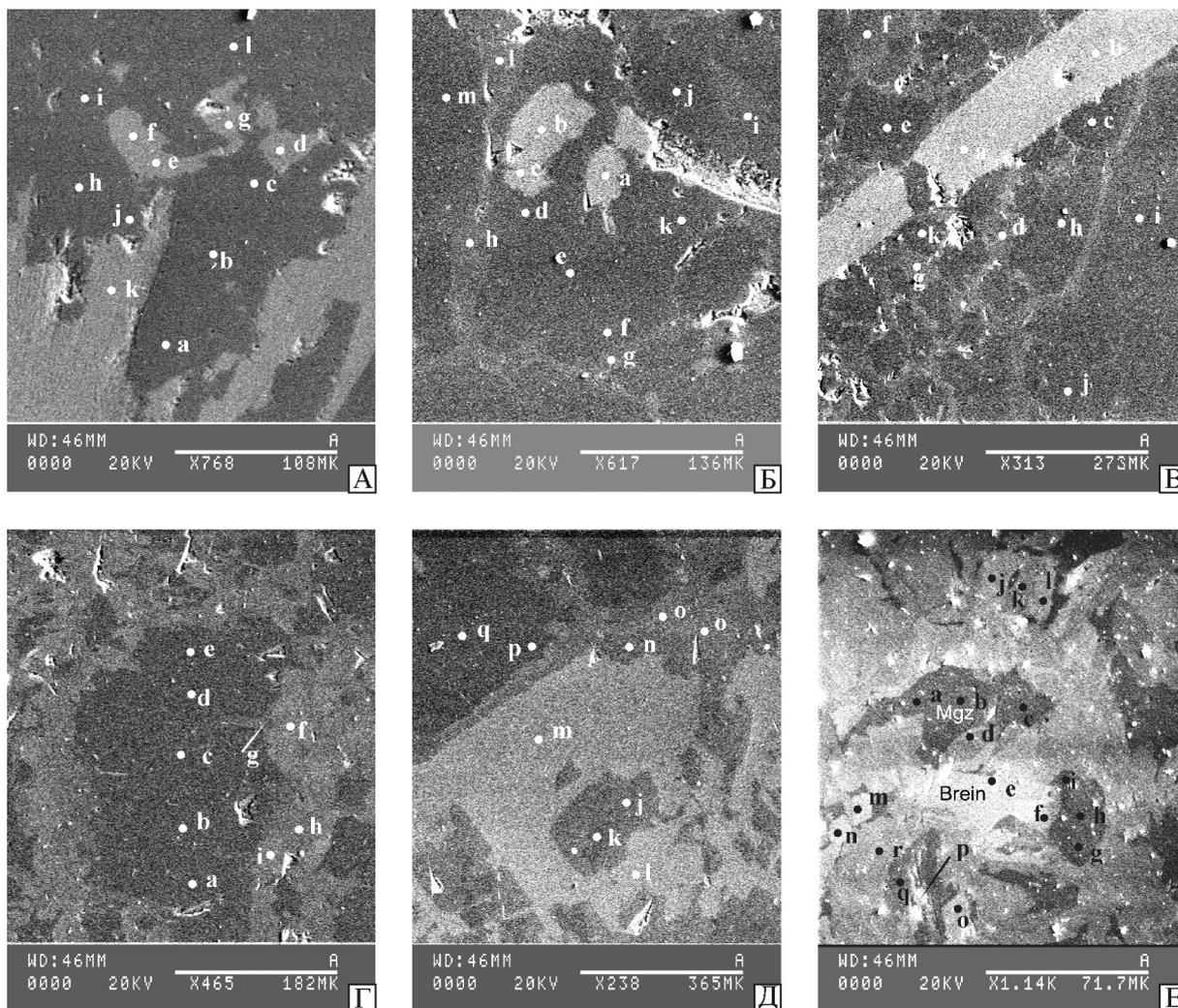


Рис. 1. Литотипы магнетита под электронным микроскопом: А) Sem-33 – магнетит мелкозернистый низкожелезистый; Б) Sem-17 – зерно магнетита разномзернистого маложелезистого (темно-серое) с каймой железистого магнетита (серое) и включениями доломита (светло-серое); В) Sem-17 – магнетит разномзернистый маложелезистый с каемками и прожилками железистого магнетита и крупными лейстами талька; Г) Sem-18 – магнетит разномзернистый ожелезненный, зерна низкожелезистого магнетита в окружении зон железистого магнетита; Д) переход от низкожелезистого магнетита к брейнериту через железистый доломит; Е) Sem-12 – реликты низкомагнетитовой матрицы в виде ромбических черных зерен в центре и справа, наличие четко выраженных зональных кристаллов брейнерита со ступенчатым нарастанием содержания железа.

Sem-33 – мелкозернистый массивный светло-серый магнетит. По данным рентгеновского анализа, содержит небольшую примесь доломита и талька. По данным химического анализа, является наименее железистой разновидностью из изученных (табл. 2). Под электронным микроскопом представляет собой темно-серый до черного однородный базис магнетитового состава, в котором распределены отдельные изометричные многоугольные зерна серого доломита и вытянутые зерна талька (рис. 1А). Данные микроанализа показывают, что все минералы в этой пробе наименее железистые из изученных проб; магнетит содержит FeO в интервале 0-0,1 %, в

доломите FeO составляет 0,1-0,2 %, тальк низкожелезистый имеет концентрации FeO в интервале 0,06-0,84 %, для него характерна примесь  $Al_2O_3$  до 1,5 % (табл. 3), вероятно, за счет взаимопрорастания с хлоритом.

Sem-17 – неравнозернистый магнетит темно-серый среднезернистый с прожилками и зонами тонкозернистого светло-бурого брейнерита в межзерновом пространстве. По данным химического анализа, магнетит относится к низкожелезистой разновидности с содержанием FeO 1,55 %. Под электронным микроскопом выделяется три элемента: 1) ядра зерен низкожелезистого, иногда вообще не содер-

Состав минералов магнезитовых руд по данным микроанализа

№ пробы	Имя образца	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	Сумма
Sem-33									
1	123a	47,5	0	0	0,41	0	0,15	0	48,06
2	123b	47,39	0	0	0,48	0,1	0,12	0	48,09
3	123c	47,5	0	0	0,36	0,19	0,02	0,03	48,1
4	123j	47,75	0	0	0,07	0	0,25	0	48,07
5	123l	47,52	0	0	0,33	0,18	0	0	48,03
6	123h	47,37	0	0	0,11	0	0,52	0	48
7	123i	47,14	0	0	0,15	0	0,8	0,04	48,13
8	123e	23,05	0	0	29,17	0,04	0,09	0,04	52,39
9	123f	22,86	0	0	29,34	0	0,1	0,09	52,39
10	123g	22,63	0	0	29,55	0	0,22	0,04	52,44
11	123d	30,12	1,55	63,03	0,02	0	0,31	0	95,03
12	123k	29,95	1,57	63,14	0	0,44	0,04	0	95,14
Sem-17									
1	124a	23,52	28,17	0	0,1	0,93	0	0	52,72
2	124b	22,29	28,78	0,02	0,05	1,37	0	0	52,51
3	124c	21,99	28,98	0,02	0,03	1,48	0	0	52,5
4	124d	47,61	0,18	0	0	0,21	0	0	48
5	124e	47,78	0,14	0	0,02	0,1	0	0	48,04
6	124f	47,84	0,1	0	0	0,11	0	0	48,05
7	124g	45,03	0,04	0,03	0,13	3,55	0	0	48,78
8	124h	43,83	0,05	0	0,08	5,04	0	0	49
9	124i	44,34	0,08	0	0,17	4,4	0	0	48,99
10	124j	47,45	0,35	0	0,06	0,15	0	0	48,01
11	124k	47,63	0,36	0,01	0	0	0	0	48
12	124l	44,73	0,12	0,05	0,06	3,85	0	0	48,81
13	124m	47,41	0,36	0,05	0,07	0,13	0	0	48,02
14	125c	47,4	0,46	0,04	0	0,18	0	0	48,08
15	125d	44,76	0,1	0,02	0,09	3,93	0	0	48,9
16	125e	47,68	0,15	0,07	0	0	0	0	47,9
17	125f	44,85	0,1	0,08	0,11	3,74	0	0	48,88
18	125g	44,75	0,15	0	0,05	3,58	0	0	48,53
19	125h	47,61	0,39	0	0,03	0,04	0	0	48,07
20	125i	47,89	0,13	0	0	0	0	0	48,02
21	125j	47,86	0,14	0	0	0,01	0	0	48,01
22	125k	47,4	0,33	0,12	0,05	0,15	0	0	48,05
23	125a	28,48	0,1	0,76	0,05	0,92	2,05	62,73	95,09
24	125b	28,24	0	0,61	0	1,13	1,7	63,28	94,96
Sem-18									
1	121a	47,34			0,25	0	0,42	0	48,01
2	121b	47,24			0,46	0,03	0,26	0,06	48,05
3	121c	47,35			0,33	0,04	0,3	0	48,02
4	121d	47,49			0,35	0,04	0,17	0	48,05
5	121e	47,34			0,32	0,1	0,27	0	48,03
6	121f	41,03			0	0	8,25	0,24	49,52
7	121g	43,73			0	0	5,57	0,02	49,32
8	121h	42,94			0,03	0	6,16	0,16	49,29
9	121i	39,48			0,1	0,01	9,97	0,06	49,62

РУДООБРАЗОВАНИЕ, МЕТАЛЛОГЕНИЯ,  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Таблица 3 (продолжение)

№ пробы	Имя образца	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	Сумма
10	121j	42,21			0,15	0	6,72	0,12	49,2
11	121k	47,24			0,35	0,09	0,29	0,04	48,01
12	121l	22,91			28	0,05	1,39	0,15	52,5
13	121m	21,52			28,55	0,14	1,9	0,22	52,33
14	121n	43,07			0,1	0,02	5,87	0,12	49,18
15	121o	39,59			0,4	0	9,43	0,14	49,56
16	121p	47,76			0,26	0	0,09	0	48,11
17	121q	47,6			0,15	0,06	0,17	0,03	48,01
Sem-12									
1	11169a,	47,08			0,34		0,61	0	48,03
2	11169b	47,16			0,41		0,46	0,01	48,04
3	11169c	47,08			0,16		0,55	0,03	47,82
4	11169d	41,37			0,08		7,79	0,06	49,3
5	11169e	35,92			0		13,09	0,21	49,22
6	11169f	40,58			0		8,54	0,16	49,28
7	11169g	46,88			0,4		0,61	0,05	47,94
8	11169h	46,88			0,6		0,53	0	48,01
9	11169i	47,2			0,23		0,4	0,07	47,9
10	11169j	35,7			0,1		13,22	0,18	49,2
11	11169k	39,17			0,04		9,77	0,02	49
12	11169l	37,35			0,06		11,82	0,08	49,31
13	11169m	35,41			0,08		13,74	0,11	49,34
14	11169n	35,97			0,1		13,06	0,12	49,25
15	11169o	36,23			0,08		12,72	0,18	49,21
16	11169q	46,84			0,48		0,48	0	47,8
17	11169r	41,05			0,05		8,05	0,11	49,26

жащего железа магнезита типа Sem-33 (черное); 2) изометричные и вытянутые зерна доломита (светло-серое, рис. 1Б); 3) каемки (серое), межзерновые прожилки и зоны железистого магнезита (рис. 1Б,В). Магнезит в низкожелезистых ядрах имеет низкую железистость на уровне 0-0,1 %, в то время как магнезит из межзерновых прожилков и каемок имеет повышенную железистость 3-5 % FeO (см. табл. 3).

Sem-18 – неравномернозернистый брейнерит светло-бурый с вкраплениями темно-серого магнезита. При выветривании порода превращается в бурую охру; по данным химического анализа, порода представляет собой железистый магнезит (FeO – 4,57%). Под электронным микроскопом выделяются следующие элементы: 1) ядра зерен низкожелезистого магнезита типа Sem-33 (черное); 2) межзерновые прожилки и зоны железистого магнезита (серое) (рис. 1Г); 3) зерна высокожелезистого магнезита или анкерита (рис. 1Д); 4) зерна магнезиального кальцита размером до 10 мкм (редко).

Sem-12 – неравномернозернистый (от тонко- до среднезернистого) серый магнезит.

По данным химического анализа, относится к брейнериту (FeO – 7,26 %). Учитывая низкое содержание серы в пробе, можно предполагать, что все железо связано с брейнеритом. Под электронным микроскопом наблюдаются как низкожелезистые зерна магнезита (реликты низкомагнезитовой матрицы в виде ромбических черных зерен в центре и справа на рис. 1Е), так и четко выраженные зональные кристаллы брейнерита с последовательным (ступенчатым?) нарастанием содержания железа.

Анализ распределения железа в магнезитовых рудах Семибратского месторождения позволяет предполагать двухстадийное минералообразование. На первом этапе произошло формирование низкожелезистого магнезита. На это указывает существование разновидностей с очень низким содержанием железа (Sem-33). Это подтверждается также статистическими данными по петрохимическому анализу руд Семибратского месторождения, выполненного Л.П.Урасиной [Главнейшие..., 1993], выделившей по данным химических анализов две круп-

ных совокупности магнезитов со средним содержанием FeO соответственно 1,8 % и 5,0 %. Размер зерен низкожелезистого магнезита составляет десятки до первых сотен микрон. Метасоматическое ожелезнение развивается сна-

чала по границам зерен в виде своеобразной сетки (см. рис. 1Б,В), затем выполняет все большее пространство с образованием зон сложной формы и гнезд (см. рис. 1В,Г). В процессе развития метасоматического ожелезнения нарастает

как площадь, так и степень насыщения железом первичной магнезитовой матрицы до почти полного замещения магнезита брейнеритом (образец Sem-12) с содержанием FeO в отдельных зернах до 13 % (см. рис. 1Д,Е; табл. 3). Наряду с ожелезнением основного минерала (магнезита) происходит последовательное насыщение железом и минералов-примесей – доломита и талька. На рис. 2 показано распределение железа во всех перечисленных минералах по изученным пробам. В пробе Sem-33 практически отсутствует брейнерит, железистость магнезита составляет около 0,1 %, в отдельных зернах поднимается до 0,8 %. Железистость доломита в этой пробе составляет не более 0,2 %, а талька 0,1-0,8 %. В пробе Sem-17 средняя железистость магнезита возрастает до примерно 0,2 %, и появляется брейнерит с содержанием FeO = 3-5 %, железистость доломита возрастает до 0,9-1,5 %, а талька – до 0,9-1,1 %. В пробе Sem-18 в магнезите нарастает содержание FeO до 0,1-0,6 %, брейнерит имеет содержание FeO от 5 до 11 %, тальк не обнаружен. В наиболее железистом магнезите пробы Sem-12 в реликтовых зернах магнезита содержание FeO составляет 0,4-0,6 %, брейнерит характеризуется максимальной железистостью с содержанием FeO в интервале 8-13,74 %, доломит и тальк не были обнаружены.

Синбатное нарастание содержания FeO в сосуществующих минералах позволяет предполагать прохождение железо-магнезительного метасоматического процесса в равновесных условиях, при которых происходило выравнивание химического потенциала в оп-

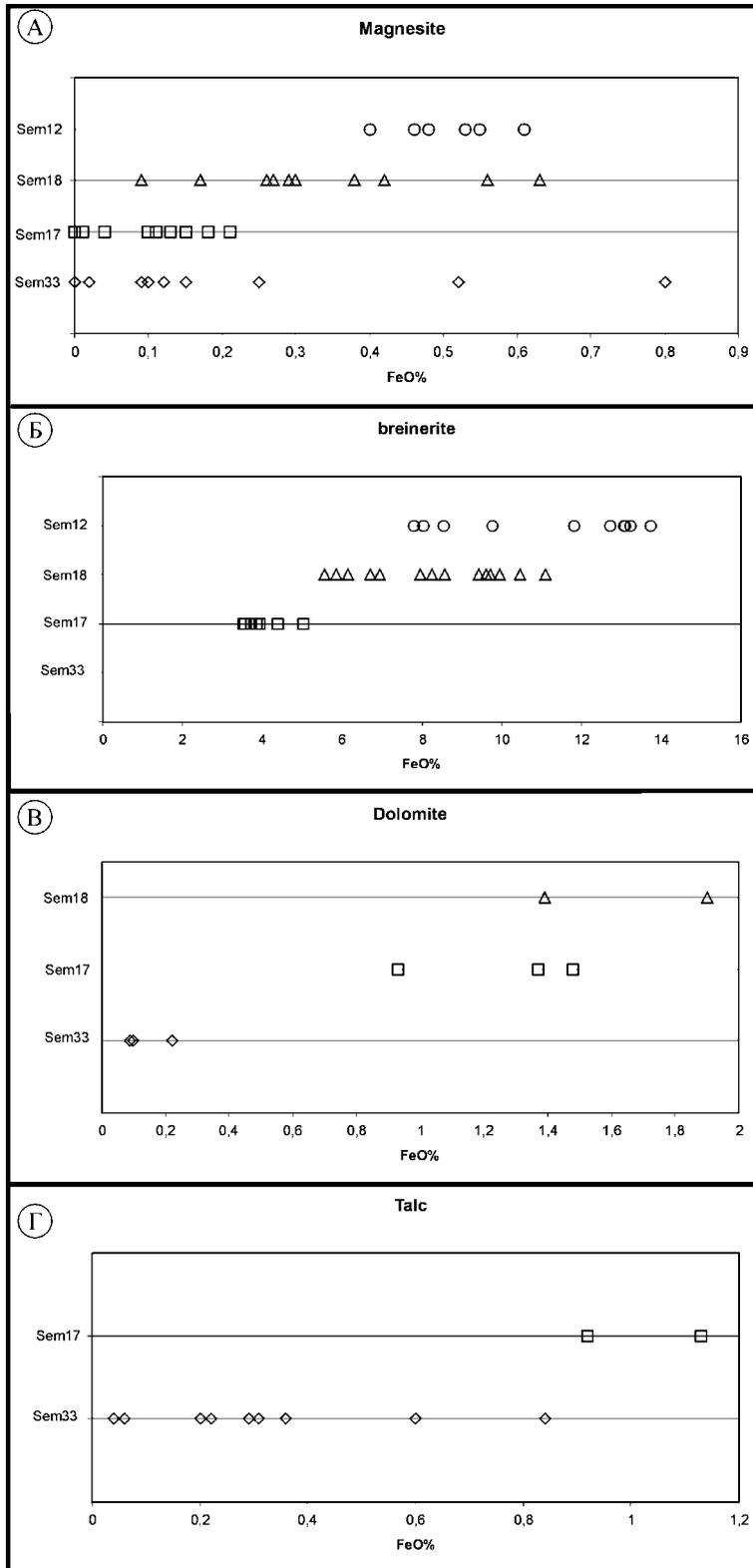


Рис. 2. Распределение FeO в магнезите (А), брейнерите (Б), доломите (В) и тальке (Г) из изученных проб по данным микронзондового анализа.

## РУДООБРАЗОВАНИЕ, МЕТАЛЛОГЕНИЯ, МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

ределенных зонах и формирование равновесных составов минеральных ассоциаций. Это напоминает метасоматическую зональность в колонке лиственитов при образовании тальк-карбонатных пород в серпентинитовых массивах. Сходство заключается в том, что во внешних частях колонки на серпентинитовых массивах наблюдается зона магнезит + доломит + тальк, во внутренних частях она сменяется зоной магнезит + брейнерит + Fe-доломит + тальк, самые внутренние части представлены уже зоной брейнерит + анкерит + сидерит + фуксит + кварц [Сазонов, 1984]. Таким образом, идет нарастание железистости в карбонатной фазе, при этом тальк заменяется зоной магнезит + кварц, кроме того, появляется фуксит. Для нашего случая важно, что по мере нарастания железистости в магнезите и доломите лиственитовой колонки происходит исчезновение талька. Это же мы наблюдаем и в Семибратском месторождении. Можно предполагать, что по составу растворов, их термодинамическая характеристика соответствовала условиям формирования лиственитов, характеризующих среднетемпературный гидротермально-метасоматический процесс. Известно, что этот процесс идет на фоне нарастания кислотности при повышении температуры. Как было отмечено И.М.Говоровым [1977], для  $Mg^{2+}$  и  $Fe^{2+}$  степень гидролиза возрастает при повышении температуры, так что, если при атмосферных условиях выпадение магнезита происходит при  $pH = 10,5$ , то при  $100^\circ C$  – при  $pH=10$ , при  $200^\circ C$  – при  $pH=9$ , при  $300^\circ C$  и давлении  $0,5$  кбар – при  $pH=6$ , то есть в общем случае, при повышении температуры  $pH$  магнезитообразующего раствора снижается. Таким образом, даже слабо кислые растворы при нейтрализации в карбонатных толщах могут образовать магнезит, если несут магний.

Формирование Семибратского магнезитового месторождения, по-видимому, происходило в две стадии. Предполагается, что источником магний-содержащих растворов являлись эвапоритовые рассолы [Крупенин, Прохаска, 2005], обогащенные магнием в гиперсоленых осадочных бассейнах авзянского времени. Возможность существования эвапоритовых условий для завершающей стадии осадконакопления в среднем рифее была показана ранее [Крупенин и др., 2002]. На первой стадии, вероятно в результате миграции высокомагниевого рассола при тектонической активизации в палеогидрогеологическом бассейне, были сформиро-

ваны низкожелезистые метасоматические магнезиты. Растворы на этой стадии были слабо насыщены железом из-за слабого взаимодействия флюид-порода. На втором этапе, при следующем импульсе тектоно-термальной и вулканической активизации в районе, произошло новое внедрение высокомагнезильных растворов. Эти растворы имели повышенную железистость в результате интенсивного взаимодействия с вмещающими глинистыми породами и, вероятно, из-за контаминации металлоносными гидротермами, сопровождавшими основные вулканы. Косвенным доказательством связи с последними является усиление пиритизации в железистых магнезитах и брейнеритах и формирование сульфидных и барит-сульфидных залежей совместно с диабазовыми порфиритами и их туфами в основании зильмердакской свиты. Вероятно, именно с этапом внедрения основных вулканических пород в районе следует связывать стадию магнезиально-железистого метасоматоза на Семибратском месторождении. Повышенная температура флюидов второй стадии способствовала образованию талька в магнезитах, но на фоне нарастающей кислотности и степени ожелезнения через метасоматическое замещение магнезит – брейнерит, происходило соответствующее замещение доломит – железистый доломит и тальк – железистый тальк. При дальнейшем нарастании железистости и кислотности происходило удаление из системы талька, кварца и железистого доломита, которые могли отлагаться в периферийных частях метасоматической колонки. На Семибратском месторождении отмечено статистическое снижение содержания  $SiO_2$  в железистых магнезитах (0,9 %) по сравнению с маложелезистыми (1,5 %) [Главнейшие..., 1993]. Минеральные равновесия между карбонатными минералами, установившиеся в результате магнезиально-железистого метасоматоза, могут быть использованы для определения температуры гидротермального процесса с помощью кальцит-доломитового или анкерит-сидеритового минералогических термометров.

В нашем случае возможно применение термометра анкерит-сидерит в интерпретации [Annovitz & Essene, 1987], которые использовали как природные образцы, так и экспериментальные данные составов и термобарических характеристик карбонатов тройной системы  $CaCO_3$ - $MgCO_3$ - $FeCO_3$ . Для расчета использованы сосуществующие железистый доломит и

Таблица 4

**Расчетные температуры магнезиально-железистого метасоматоза в магнезитах Семибратского месторождения по данным анкерит-сидеритового термометра**

Микроанализ	FeCO <sub>3</sub>	MnCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Сумма, %	T°С
Sem18j	10,83	0,19	85,39	0,27	96,68	<b>355,41</b>
Sem18l	2,24	0,24	46,35	50,00	98,83	
Sem18j	10,83	0,19	85,39	0,27	96,68	<b>465,19</b>
Sem18m	3,06	0,36	43,53	50,98	97,93	
Sem18n	9,31	0,19	87,13	0,18	96,82	<b>528,41</b>
Sem18m	3,06	0,36	43,53	50,98	97,93	
Sem17h	8,12	0,13	88,67	0,09	97,01	<b>453,62</b>
Sem17c	2,38	0,05	44,49	51,75	98,67	
Sem17h	8,12	0,13	88,67	0,09	97,01	<b>429,51</b>
Sem17b	2,21	0,08	45,09	51,39	98,77	
Sem17l	6,20	0,10	90,49	0,21	97,00	<b>565,96</b>
Sem17c	2,38	0,05	44,49	51,75	98,67	
Sem17l	6,20	0,10	90,49	0,21	97,00	<b>533,74</b>
Sem17b	2,21	0,08	45,09	51,39	98,77	

Примечание. Точки микроанализа в первом столбце соответствуют таковым на рис. 1б и 1д.

брейнерит, выбранные по минералогическим критериям как соответствующие наложенной стадии магнезиально-железистого метасоматоза по данным микроанализа. Доломит имеет содержание FeO в интервале от 0,93 % (Sem-17) до 1,92 % (Sem-18), брейнерит, который рассматривается в качестве структурного аналога сидерита, малонасыщенного железом, имеет концентрации FeO в интервале от 3,85 % (Sem-17) до 6,72 % (Sem-18). Результаты расчетов температуры приведены в табл. 4. В пробе Sem-17 анкерит-сидеритовый термометр дает температуры в интервале 429-566 °С, для пробы Sem-18 значения температуры кристаллизации пары анкерит-сидерит рассчитаны в интервале 359-536 °С. Наблюдается определенное сходство температур образования по двум парам карбонатных ассоциаций, различающихся уровнем насыщения железом. Уровень рассчитанных температур в интервале 350-550 °С соответствует среднетемпературным условиям формирования березит-лиственитовой гидротермально-метасоматической колонки и в целом отвечает уровню зеленосланцевого метаморфизма вмещающих пород Семибратского месторождения. Пока нерешенным является вопрос о том, совпадало ли время метаморфического преобразования рудовмещающей толщи с железисто-магнезиальным метасоматозом.

Таким образом, формирование магнезитов и брейнеритов Семибратского месторождения связывается с двухстадийным гидротермально-метасоматическим процессом, а именно – с участием как эвапоритовых высокомагневых рассолов, так и железистых гидротерм, внедрившихся в связи с импульсами тектоно-термальной и вулканической активности в середине и конце среднерифейского времени. Данный тектонический этап имеет важнейшее для региона Башкирского мегантиклинория минерогеническое значение, поскольку с ним связано формирование месторождений флюоритов, сидеритов в толщах бурзяния и барит-полиметаллических залежей в толщах юрматиния [Крупенин, 2004]. Установлено, что указанный этап, совпадающий по времени с гринвильской тектонофазой, содержал несколько стадий, начиная с 1230 млн лет до 1010 млн лет, связанных с тектоническим развитием региона. К первой стадии тектоно-термальной активизации было приурочено формирование жильной флюоритовой минерализации и седиментационно-эксгальационное барит-сульфидное оруденение в отложениях авзянской свиты. В течение последующего длительного перерыва в осадконакоплении в предзильмердакское время импульс тектоно-термальной активизации привел к формированию крупнейшей Бакальской группы сидеритовых месторождений. Рассмотренный по Семибратскому магнезитовому месторождению материал показывает, что этап тектонического развития региона на границе среднего и верхнего рифея имел важнейшее значение и для стадийного формирования магнезитовых рудных тел в толщах юрматиния.

*Работа выполняется при финансовой поддержке гранта РФФИ № 06-05-64592.*

## РУДООБРАЗОВАНИЕ, МЕТАЛЛОГЕНИЯ, МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

### Список литературы

- Афимов Л.В., Бусыгин Б.Д.* Южноуральская магнетитовая провинция. Свердловск: ИГГ УНЦ АН СССР, 1982. 70 с.
- Главнейшие магнетитовые месторождения / Л.П. Урасина, Т.А. Другалева, П.П. Смолин. М.: Наука, 1993. 157 с.
- Говоров И.М.* Термодинамика ионно-минеральных равновесий и минералогения гидротермальных месторождений. М.: Наука, 1977. 238 с.
- Карагодин С.С., Макаров А.Б., Малахов И.А., Рысин В.А.* Метасоматически измененные породы рифея в восточном крыле Башкирского мегантиклинория // Геология метаморфических комплексов. Межвузовский тематический сборник. Свердловск: СГИ, 1989. С. 92-101.
- Крупенин М.Т.* Геолого-геохимические и генетические различия месторождений Южно-Уральской магнетитовой провинции // Ежегодник-2002. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2003. С. 272-280
- Крупенин М.Т.* Минерогеническое и геодинамическое значение среднерифейского времени на западном склоне Южного Урала // Докл. АН. 2004. Т. 399. № 4. С. 503-505.
- Крупенин М.Т., Ларионов Н.Н., Гуляева Т.Я., Демчук И.Г.* Новые данные об особенностях седиментации в бассейнах авзянского времени среднего рифея // Ежегодник-2001. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2002. С. 43-49.
- Крупенин М.Т., Прохаска В.* Эвапоритовая природа флюидных включений в кристаллических магнетитах саткинского типа // Докл. АН. 2005. Т. 403. № 5. С. 661-663.
- Сазонов В.Н.* Березит-лиственитовая формация и сопутствующее ей оруденение (на примере Урала). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. 207 с.
- Стариков К.И., Костенко Л.Ф., Грознецкий Д.Л.* Отчет по теме 121/68: Обобщение материалов поисково-разведочных работ 1962-1969 гг. на магнетиты в Златоустовском районе с составлением сводного отчета и подсчетом запасов по Семибратскому месторождению. Миасс, 1970. (Фонды).
- Annovitz L.M. & Essene E.J.*, Phase equilibria in the system  $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3\text{-FeCO}_3$  // J. Petrol. V. 28. Part 2. 1987. P. 389-414.