

С.О.РЫЖКОВА, аспирант, ученый секретарь, ryzhkova2007@mail.ru
И.В.ТАЛОВИНА, канд. геол.-минерал. наук, ассистент, ital@mail.ru
В.Г.ЛАЗАРЕНКОВ, д-р геол.-минерал. наук, профессор, lazarenkov@mail.ru
Н.И.ВОРОНЦОВА, канд. геол.-минерал. наук, ассистент, natvoron@yandex.ru
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)
В.Л.УГОЛКОВ, канд. техн. наук, ugolkov@isc.nw.ru
Институт химии силикатов РАН

S.O.RYZKOVA, Post-graduate student, Scientific Secretary, ryzhkova2007@mail.ru
I.V.TALOVINA, PhDr. g.-m. Sci., Assistant, ital@mail.ru
N.I.VORONTSOVA, PhDr. g.-m. Sci., Assistant, natvoron@yandex.ru
V.G.LAZARENKOV, Dr. g.-m. Sci., Professor, lazarenkov@mail.ru
Saint-Petersburg State Mining Institute (Technical University)
V.L.UGOLKOV, PhDr. techn. Sci., ugolkov@isc.nw.ru
Institute of Silicate Chemistry of RAS

НИКЕЛЕНОСНЫЕ ОКСИДЫ ЖЕЛЕЗА БУРУКТАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ЮЖНЫЙ УРАЛ

В профиле Бурукталяского месторождения оксиды железа демонстрируют вертикальную минералогическую зональность (снизу вверх): магнетит – маггемит – гетит – гематит. Главным пороодо- и рудообразующим минералом оксидно-железной зоны месторождения является магнетит, представленный тремя генерациями: первичный реликтовый магнетит, сохранившийся от ультраосновных пород; вторичный, образовавшийся в процессе серпентинизации этих пород, и новообразованный гипергенный. Гипергенный магнетит, наряду с гетитом, является никеленосным рудным минералом, содержащим около 1 % NiO. По результатам комплексного термического анализа маггемита-магнетита и гетита Бурукталяского месторождения уточнено положение двух важных диагностических максимумов этих минералов: экзотермический эффект магнетита в интервале 317-340 °С, вызванный окислением магнетита до маггемита, имеет максимум при 327 °С («магнетитовая» точка), а эндотермический эффект гетита в интервале 269-296 °С, связанный с потерей конституционной воды минерала и его переходом в гематит, имеет максимум при 288 °С («гетитовая» точка).

Ключевые слова: кора выветривания, оксидно-железная зона, серпентиниты, магнетит.

NICKEL-CONTAINING IRON OXIDES IN THE BURUKTAL DEPOSIT, SOUTH URALS

In the Buruktal supergene nickel deposit, iron oxides possess vertical mineralogical zoning (bottom-up): magnetite-maghemite-goethite-hematite. The main rock- and ore-forming mineral in the iron-oxide zone of the deposit is magnetite, presented by three generations: primary relic magnetite, surviving from ultramafic rocks; secondary magnetite, forming at serpentinization process and neogenic supergene magnetite. Supergene magnetite, like a goethite, is nickel ore mineral, containing about 1 % NiO. Under the complex thermal analysis data, maghemite-magnetite and goethite have two main diagnostic maximums: exothermal effect of magnetite, caused by magnetite oxidation to maghemite in the interval 317-340 °C, displays maximum at 327 °C («magnetite» point), and endothermic effect of goethite, connected with loss of constitutional water of the mineral and its transition to hematite in the interval 269-296 °C, displays maximum at 288 °C («goethite» point).

Key words: weathering crust, iron-oxide zone, serpentinites, magnetite.

Буруктаьское кобальт-никелевое месторождение служит промышленной базой для металлургического комбината «Южуралникель» и Буруктаьского никелевого завода. Одними из главных минералов метасоматитов и руд Буруктаьского месторождения, содержащих никель, кобальт и платиновые металлы, являются оксиды железа. Они были изучены в работах И.И.Эдельштейна, Е.Н.Куземкиной, К.Г.Бородиной, И.В.Витовской, Г.Р.Капусткина, Б.М.Михайлова, И.В.Таловиной и других исследователей. Вместе с тем на сегодняшний день минералогия оксидов железа Буруктаьского месторождения требует дальнейшего изучения. Целью настоящей статьи является анализ химических, рентгеновских, термических и других свойств этой группы минералов в рудах Буруктаьского месторождения. К числу конкретных вопросов, заслуживающих внимания, относятся: распределение оксидов железа в различных зонах этого месторождения, особенно на участках развития карманообразных углублений линейно-трещинных метасоматитов; характеристика магнетита – важнейшего рудного минерала Буруктаьского месторождения, совершенно выпавшего из поля зрения предыдущих исследователей; изучение никеленосности оксидов железа и другие вопросы.

Буруктаьское месторождение находится на востоке Оренбургской области на границе с Казахстаном. Оно представляет собой никеленосную кору выветривания на Буруктаьском гарцбургитовом массиве. На месторождении широко развит горизонтально-зональный серпентинито-оксидно-железный (охристый) профиль, разбитый системой субвертикальных нарушений. Он состоит из развитой зоны оксидно-железных метасоматитов (охр) мощностью 3–40 м, под которой располагается зона выщелоченных серпентинитов мощностью до 40 м. Зона охр обычно представлена двумя подзонами: верхней – бесструктурных охр и нижней – структурных охр, сохранивших реликтовые структуры ультрамафитов. Местами под зоной охр наблюдается маломощная (до 6 м) прерывистая зона обохренных нонтронитизированных серпентинитов. Выщелоченные

серпентиниты на глубину сменяются дезинтегрированными серпентинитами мощностью 3–15 м, а затем неизменными серпентинитами.

Тектоническими нарушениями меридионального, северо-западного и северо-восточного направлений площадная кора выветривания Буруктаьского месторождения разбита на блоки. В результате дифференцированных тектонических перемещений отдельные блоки месторождения развивались индивидуально. Влияние блоковой тектоники можно наблюдать в карьерах месторождения, где вскрыта нижняя граница горизонта железных охр. Хорошо наблюдаемая зона контакта темных железных охр и светлых серпентинитов носит отчетливый ступенчатый характер. Здесь же фиксируются каньонообразные, клиновидные или карманообразные участки трещинной коры выветривания, выполненные бурами железными охрами с проникновением в серпентиниты на глубину до нескольких десятков метров. Эти карманообразные зоны маркируют сеть тектонических нарушений и узлы их пересечений, по которым оксидно-железные метасоматиты развиты наиболее глубоко.

Оксиды железа Буруктаьского месторождения были изучены нами методами рентгенофазового, термического и микрорентгеноспектрального анализов. Химические анализы выполнены в лаборатории СПГИ (ТУ) атомно-абсорбционным методом, аналитик О.Л.Галанкина; термические – на установках фирмы NETZSCH: STA 429C в термической лаборатории СПГИ (ТУ), STF 449C в ИП-МашРАН и STA 429CD + QMS в ИХ РАН, аналитик В.Л. Уголков; рентгенофазовые – на рентгеновском порошковом дифрактометре Geiderflex-D/max (Rigaku) в лаборатории АО «Механобр-Аналит», аналитик М.А.Яговкина, микрорентгеноспектральные – на растровом электронном микроскопе JEOL JSM 6400 в лаборатории прикладной физики Фрайбергской горной академии (Германия), аналитик д-р У.Кемпе (U.Kempe), в лаборатории СПГИ (ТУ), РЭМ JXA 8600S, аналитик И.М.Гайдамако и в лаборатории РИАН на сканирующем электронном микроскопе CAMSCAN-4DV с по-

лупроводниковым спектрометром AN-10000 (Великобритания), аналитик Ю.Л.Крецер. Расшифровка рентгеновских данных проводилась на основе классификации ICPDF (International Centre for Diffraction Data).

Оксиды и гидроксиды железа, обнаруженные нашими исследованиями в составе уральских гипергенных месторождений, представлены магнетитом, маггемитом, гетитом и гематитом. Часто упоминаемый в отечественной литературе термин гидрогетит, представляющий собой гетит, богатый молекулярной водой, из современной минералогической классификации исключен.

Магнетит FeFe_2O_4 повсеместно присутствует в метасоматитах и рудах Буруктальского месторождения. Рентгенофазовым анализом в большинстве проб он диагностирован в тонкодисперсных смесях магнетит-маггемитового состава. В профиле коры выветривания этот минерал накапливается как в окисдно-железной, так и в серпентинитовой зоне, но наиболее распространен в низах окисдно-железной зоны, где образует отдельные участки обогащения в виде линз и гнездовых скоплений, аналогичных известным в «черных» горизонтах Кемпирсайского и Сахаринского месторождений. Среднее содержание его в окисдно-железной зоне составляет 5-7 %, а на участках обогащения оно повышается до 50 % (иногда до 60 %). Максимальных же концентраций магнетит достигает в окисдно-железных метасоматитах линейно-трещинных зон коры выветривания, где его содержание колеблется от 35 до 75 %, в среднем составляя 50 %. В этих метасоматитах магнетит ассоциирует с минералами марганца, кварцем, гетитом, реже с сапонитом, галлуазитом и монтмориллонитом. В нижней серпентинитовой зоне Буруктальского месторождения наблюдается тонкая сыпь магнетита в количестве 1-3 %, иногда 5-10 %. В шлифах он образует идиоморфные зерна черного цвета размером от 0,2-0,15 до 0,7-0,5 мм.

В Буруктальском месторождении магнетит представлен двумя основными реликтовыми генерациями: а) первичной крупнозернистой (1-5 мм), обломочной, унаследованной от ультраосновных пород, и б) вто-

ричной тонкозернистой (доли миллиметра), образованной в ходе их серпентинизации. Первичный реликтовый магнетит представлен остроугольными обломками чернокоричневого цвета, приобретающими красновато-бурую окраску при переходе магнетита с поверхности в гематит. Как известно, первичный магнетит и его титанистая разновидность титаномagnetит являются постоянными акцессорными минералами ультрамафитов и мафитов, особенно рудных оливинитов, клинопироксенитов, габбро, а также сопутствующих им магнетитовых руд тагильского типа. Хотелось бы обратить внимание на то обстоятельство, что магнетитовая минерализация и магнетитовые месторождения довольно типичны для зональных, а также расслоенных массивов, но не характерны для ультрамафитов офиолитовой формации, к которой принадлежит Буруктальский массив. Серпентинизация (сначала хризотилизация, а потом лизардитизация) оливинов в гарцбургитах, дунитах и верлитах приводит к освобождению из их структуры изоморфного железа и элементов-примесей, которые фиксируются в тонкозернистом магнетите. В серпентинитах Буруктальского и других месторождений наблюдаются реликты оливина, окруженные агрегатами магнетита с прожилками серпентина, или тонкозернистые массы магнетита, погруженные в серпентин. Количество магнетита достигает 12 %. Под микроскопом можно проследить цепочку преобразований вторичного реликтового магнетита от субмикроскопических выделений по плоскостям спайности оливина и опацитовых кайм до рекристаллизованных зерен, скоплений и прожилков между силикатными минералами.

Следует отметить, что изучение И.И.Эдельштейном и нами гранулометрии буруктальского магнетита показало, что размер основной части его зерен в окисдно-железных метасоматитах соответствует тонкодисперсной фракции этого минерала в первичных серпентинитах. По мнению этого автора, а также по нашему мнению, это свидетельствует об унаследованности значи-

тельной доли магнетита оксидно-железных метасоматитов из серпентинитов, практически из коренных ультраосновных пород.

Помимо двух реликтовых генераций, в оксидно-железных метасоматитах Буруктальского месторождения наблюдается также новообразованный инфильтрационный магнетит третьей генерации, образующийся при дальнейшем разрушении железосодержащих минералов в коре выветривания. Как и при серпентинизации, это приводит к высвобождению свободного железа и переотложению его в виде отдельных магнетитовых зерен и натечных образований магнетита.

Представление о химическом составе магнетита из оксидно-железных метасоматитов можно составить из данных табл.1, из которой следует, что буруктальский магнетит обнаруживает постоянную примесь никеля (0,76-1,78 %, в среднем 1,18 %), иногда хрома и магния.

Таблица 1

Атомные доли оксидов в составе магнетита Буруктальского месторождения по данным микрорентгеноспектрального анализа, %				
Оксиды	Образец			
	1	2	3	4
SiO ₂	0,00	1,38	0,00	0,00
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr ₂ O ₃	0,00	0,45	1,21	0,00
FeO	96,32	92,98	93,47	98,82
Fe ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	1,68	0,00	0,00	0,00
MgO	0,00	4,14	4,52	0,00
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00
NiO	2,00	1,05	0,80	1,18
CoO	0,00	0,00	0,00	0,00
Сумма	100,0	100,00	100,00	100,00

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории РИАН на сканирующем электронном микроскопе CAMSCAN-4DV с полупроводниковым спектрометром AN-10000 (Великобритания), аналитик Ю.Л.Кредер.

На дифрактограммах кривых магнетита Буруктальского месторождения (рис.1) магнетит определялся по характерным рефлексам.

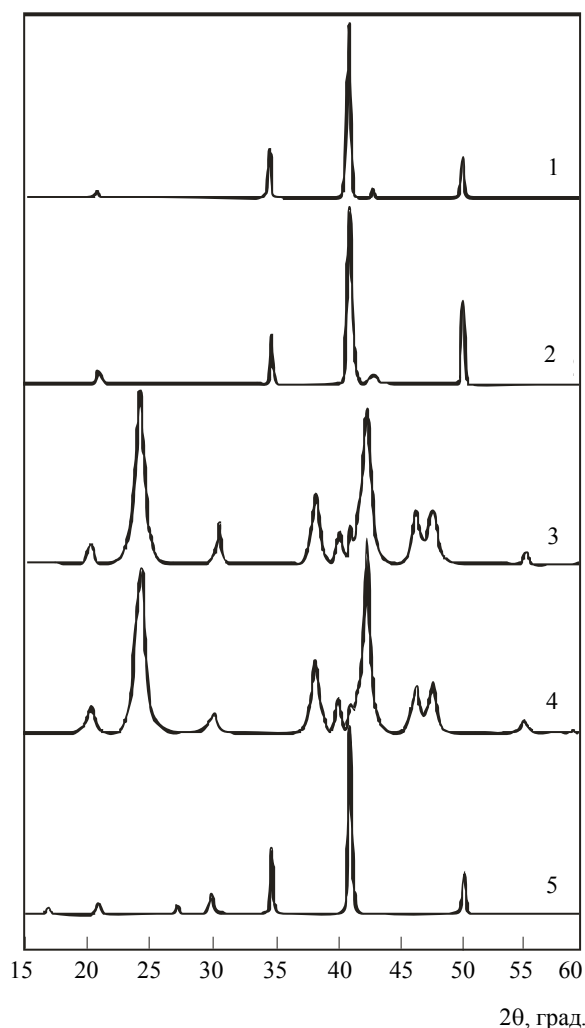


Рис.1. Дифрактограммы оксидов железа Буруктальского месторождения: 1, 2 – магнетит; 3, 4 – гетит; 5 – магнетит. Анализы выполнены рентгеноструктурным методом на рентгеновском дифрактометре Geiderflex-D/max (Rigaku) в лаборатории АО «Механобр-Аналит», порошковом аналитик М.А.Яговкина

Дифференциально-термические кривые (ДСК) магнетита (рис.2) характеризуются наличием систематического экзотермического эффекта в интервале температур 317-340 °С с точкой перегиба при 327 °С (среднее значение из 13 определений). Этот экзотермический максимум располагается на окончании температурного интервала перехода гетита в гематит, не сопровождается заметными изменениями массы на термогравиметрической кривой и является характерной диагностической – «магнетитовой» – точкой этого минерала. По мнению Х.А.Дира и др.

[2], данный экзотермический эффект обусловлен окислением магнетита до маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) и реакцией $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

Гетит $\alpha\text{-FeOOH}$, по данным И.И.Эдельштейна [6], является главным минералом класса оксидов и гидроксидов в окисдно-железных рудах Буруктаьского месторождения. Для него выделяются четыре морфологических типа образований: а) криптокристаллические, мелкочешуйчатые, порошковатые, землистые, мучнистые массы желтого или желто-бурого цвета; б) плотные округло-натечные массы; в) твердые угловатые зерна бурого, темно-бурого цвета; г) игольчатые зерна.

По данным Г.Р.Капусткина и др. [3], в коре выветривания Буруктаьского и Кемпирсайского месторождений наблюдается возрастание степени кристалличности гетита снизу вверх по разрезу. Вместе с тем гетит из кор выветривания этих месторождений имеет существенные различия: на Буруктаьском месторождении этот минерал обычно более мелкокристалличен.

Первые проявления гетита в коре выветривания Буруктаьского месторождения наблюдаются уже в зоне выщелоченных серпентинитов. Наиболее ранняя генерация гетита из этой зоны под электронным микроскопом представлена плохо образованными индивидами с нечеткими очертаниями и их агрегатами. Очень редко встречаются кристаллы с характерным игольчатым габитусом, но их длина обычно не превышает десятых и сотых долей микрона. Более поздние генерации гетита из подзоны структурных охр окисдно-железной зоны характеризуются тонкоигольчатым габитусом с довольно крупными кристаллами, длина которых может достигать более 1 мкм.

По нашим данным, в окисдно-железных метасоматитах Буруктаьского месторождения гетит содержится в количестве 40-80 % и встречается вместе с кварцем, минералами марганца, магнетит-маггемитом, иногда хлоритом и глинистыми минералами. В серпентинитах содержание его не превышает 5 %, а в обохренных разностях достигает 35 %. Размер зерен колеблется от 0,15 до 0,35 мм. В шлифах без анализатора гетит имеет бу-

рый цвет, а с анализатором – медово-бурый, оптический знак отрицательный, $N_g = 2,36$, $N_m = 2,35$, $N_p = 2,25$, слабо плеохроирует. При большом увеличении в гетите можно наблюдать коллоидное строение этого минерала, а также его структурные взаимоотношения с марганцевыми минералами и с минералами кремнезема.

Из данных табл.2 следует, что гетит обнаруживает постоянную примесь никеля (0,5-1,5 % NiO), марганца (до 2,97 % MnO), кремния (4,07-5,57 % SiO₂) и алюминия (0,00-3,31 % Al₂O₃). Дифрактограммы гетита Буруктаьского месторождения были приведены на рис.1.

В лаборатории СПбГУ (аналитик Э.А.Гойло) гетит Буруктаьского месторождения диагностирован по характерным для него рефлексам.

Дифференциально-термическая кривая эталонного образца гетита (рис.2) характеризуется наличием двух эндотермических эффектов: при 61 и 286 °С. Пологий максимум при 61°С связан с потерей адсорбированной воды, а четкий эндотермический эффект при 286 °С в интервале 189-323 °С отвечает потере конституционной воды в количестве 9,50 %. По данным 15 термограмм, положение максимума главного гетитового эндоэффекта в пределах от 269 до 296 °С может несколько смещаться при среднем положении 288 °С, и эта точка может быть названа «гетитовой» точкой. Потери конституционной воды в гетитах колеблются в среднем от 1,24 до 6,26 %. Содержание конституционной воды в гетите по данным химического анализа составляет около 10 % [2]. Необходимо отметить, что интервал температур главного гетитового эндоэффекта (189-323 °С), связанного с потерей конституционной воды, отвечает температуре перехода гетита в гематит, фиксируемой на термомагнитных кривых в интервале 150-400 °С. Очевидно, «гетитовая» точка соответствует не просто распаду структуры гетита, но и его переходу в безводную гематитовую фазу. Таким образом, наши данные существенно уточняют температуру перехода гетита в гематит.

Атомные доли оксидов в составе гетита Буруктальского месторождения по данным микрорентгеноспектрального анализа, %

Оксиды	Образец									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	7,37	7,09	6,99	6,47	8,67	7,65	6,69	7,68	8,93	8,49
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	5,93	4,21	5,20	3,54	3,47	0,00	2,93	2,54	3,57	0,00
Cr ₂ O ₃	0,00	0,36	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	84,25	87,04	86,50	89,34	85,71	90,11	88,83	88,78	81,50	89,11
Fe ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,54	0,00	4,04	0,54
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	0,47	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00	0,48	0,00
Na ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NiO	1,12	1,29	0,96	0,65	1,91	1,91	1,01	1,00	1,48	1,86
CoO	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории РИАН на сканирующем электронном микроскопе САМ-SCAN-4DV с полупроводниковым спектрометром AN-10000 (Великобритания), аналитик Ю.Л.Крецер.

Маггемит γ -Fe₂O₃ – малоустойчивая магнитная γ -фаза Fe₂O₃, обычно переходящая в гетит. Псевдокубический минерал обладает дефектной шпинелевой структурой типа магнетита. Маггемит и магнетит имеют одинаковую структуру, а переход от второго к первому сопровождается замещением в октаэдрических узлах 3Fe²⁺ на 2Fe³⁺. Маггемит – сильно магнитный минерал, по магнитным свойствам близок к магнетиту. Цвет его темно-бурый со стальным отливом. На поверхности зерен маггемита часто наблюдаются перистые или чешуйчатые агрегаты гематита, придающие ему темно-вишневый цвет. Содержание маггемита в метасоматитах Буруктальского месторождения колеблется от 1-3 до 20 % в сапонит-лизардитовых серпентинитах и от 1-3 до 40-60 % в оксидно-железных метасоматитах, в среднем составляя 20-30 %.

Дифрактограмма эталонного образца маггемита Буруктальского месторождения была приведена на рис.2. Диагностика его проводилась также в лаборатории СПбГУ (аналитик Э.А.Гойло), где маггемит определялся по характерным для него рефлексам. В подавляющем большинстве образцов Бу-

руктальского месторождения маггемит находится в тесном сростании с магнетитом и на дифрактограммах фиксируется как магнетит-маггемит или маггемит-магнетит (маггемомагнетит или магнетомаггемит [2]).

На термогравиметрических кривых маггемита (рис.2) отчетливо фиксируется эндотермический пик 87 °С, сопровождающийся большой потерей адсорбированной воды (7,18 %). Дифференциально-термическая кривая носит довольно пологий характер, усложненный слабыми эндотермическими (461, 547, 848 °С) и экзотермическими (179, 316, 652 °С) эффектами, среди которых экзотермический перегиб 316 °С обязан присутствию некоторого количества магнетита. При этой температуре происходит образование маггемита в процессе окисления магнетита, при этом маггемит наследует от магнетита не только структуру, но и высокие магнитные свойства.

Повышенные содержания маггемита ранее отмечались для Буруктальского массива Г.Р.Капусткиным и др. [3] в вишнево-красных оксидно-железных метасоматитах линейно-трещинных зон выветривания. По их данным на электронно-микроскопических

снимках маггемит представлен мелкими образованиями (до первых микрон) округлой и неправильной формы.

Гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ – в отличие от маггемита – устойчивая модификация Fe_2O_3 . В оксидно-железных метасоматитах Буруктальского месторождения гематит присутствует в небольшом количестве (1-3 %), но даже незначительное его содержание придает метасоматитам вишневый оттенок. Максимальные концентрации минерала наблюдаются в вишнево-красных железных охрах приразломных метасоматитов в зонах линейно-трещинной коры выветривания. В лаборатории СПбГУ (аналитик Э.А.Гойло) маггемит определялся по характерным для него рефлексам. Термограмма гематита была представлена на рис.2. Под электронным микроскопом перистые агрегаты буруктальского гематита имеют довольно произвольные очертания с неясно выраженными индивидуальными и располагаются по периферии зерен магнетита [3]. Подобные структурные взаимоотношения этих минералов указывают на образование гематита за счет маггемита.

О распределении оксидов железа в зональном профиле Буруктальского месторождения можно судить по данным табл.3.

Таблица 3

Относительная роль оксидов железа в разрезе Буруктальского месторождения, %

Зона	Гетит	Маггемит-магнетит
Оксидно-железная	43,1	56,9
Серпентинитовая	16,7	83,3
Участки линейно-трещинной коры выветривания	3,6	96,4

В нижней серпентинитовой зоне, развитой на гарцбургитах Буруктальского массива, доминирует маггемит-магнетит, гетит играет подчиненную роль, гематит вообще не зафиксирован. В верхней оксидно-железной зоне содержание гетита резко возрастает, поднимаясь до уровня маггемит-магнетита, а доля гематита составляет несколько процентов. В интересующих нас зонах линейно-трещинных метасоматитов, а также на отдельных участках нижних гори-

зонтов оксидно-железной зоны маггемит-магнетит снова преобладает, гетита мало, но спорадически гетит, как и гематит, образует скопления. Другими словами, в зонах линейно-трещинных приразломных метасоматитов, а также на границе серпентинитовой и оксидно-железной зон Буруктальского месторождения наблюдается концентрация магнетита, образованного, вероятно, при разрушении пород серпентинитовой зоны. Те участки обогащения магнетитом, которые имеют стратифицированное положение в профиле месторождения, являются полным аналогом «черных» горизонтов Кемпирсайского и Сахаринского месторождений Урала, но имеют прерывистое распространение. Магнетит в этих прерывистых горизонтах, как и во всей оксидно-железной зоне, является главным породообразующим минералом и явно образуется из разрушающихся серпентинитов. В целом, наблюдая за изменениями в фазовом составе оксидов и гидроксидов железа в зональном профиле Буруктальского месторождения, можно отметить, что здесь в направлении снизу вверх наблюдается отчетливая смена магнетита гетитом, а в верхних горизонтах оксидно-железной зоны еще и гематитом.

Первичный крупнозернистый магнетит (титаномагнетит) ультраосновных пород, возникший при высокой температуре, обладает большой изоморфной емкостью и содержит заметную примесь элементов группы железа, иногда элементов группы платины. Микронзондовое определение химического состава 35 образцов магнетита из магнетитовых клинопироксенитов Кондерского массива показало, что массовая доля элементов-примесей в нем следующая, %: MgO 2,76, Al_2O_3 1,60, TiO_2 6,03, Cr_2O_3 0,39, MnO 0,63, NiO 0,02. Исследование магнетита на лазерном микронзонде МИЧА обнаружило, что если Ti, Mn, Mg, Al, V, Ni, Co образуют примесь, постоянную по содержанию и частоте встречаемости, то Cu, Cr, Ca, Sr проявляют спорадическое распределение, связанное, скорее всего, с микровключениями. Электронно-микроскопическое изучение кондерского магнетита (увеличение 12000) показало, что микровключения в нем пред-

ставлены пластинчатыми пертитам ильменита трех генераций, а также ульвошпинелью, гематитом и шпинелью двух серий: $\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{Fe}_2\text{TiO}_4 - \text{Mn}_2\text{TiO}_4 - \text{FeFe}_2\text{TiO}_4$ и $\text{MgAlO}_4 - \text{FeAl}_2\text{O}_3$. Таким образом, даже те элементы-примеси (Ti, Mn, Mg, Al), для которых предполагалась изоморфная форма вхождения, при большом увеличении обнаруживают микрофазный характер включений. Содержание элементов платиновой группы, главным образом платины и палладия в россыпном магнетите кондерской россыпи, в сумме в среднем составляет 0,2 г/т.

Анализ обобщенных данных по вторичному магнетиту, образовавшемуся при серпентинизации ультраосновных пород, был выполнен А.С.Варлаковым [1]. По данным микрозондовых определений, новообразованный магнетит, в отличие от первичного, представлен тонкозернистой фазой с низкой массовой долей элементов-примесей: MgO 0,52, Al_2O_3 0,02, TiO_2 0,05, Cr_2O_3 0,09, NiO 0,12, т.е. он обнаруживает значительную «чистоту». При этом тонкозернистый магнетит лизардитовых серпентинитов Сарановского массива в заметном количестве содержит маггемитовый минал: 3-9 % по массе, иногда 18,7 % и даже 31,5 %. Определение содержания элементов платиновой группы в тонкозернистом магнетите не проводилось.

Изучение нами тонкозернистого магнетита из оксидно-железных метасоматитов (см. табл.1) показало, что если по размеру зерен он отвечает вторичному магнетиту из серпентинитов, то по химическому составу отличается от него, во-первых, присутствием заметного количества никеля ($\text{NiO} > 1\%$) и, во-вторых, полным отсутствием элементов группы железа (Ti, Cr, Co) и других элементов (Ba, Zn), т.е. еще большей «чистотой». Другими словами, в оксидно-железных рудах мы имеем дело уже с иным – никеленосным магнетитом, в котором содержание никеля на порядок выше, чем в тонкозернистом магнетите серпентинитов. Особенности его химического состава определяются экзогенным процессом миграции и накопления никеля и других элементов группы железа в коре выветривания. Впервые на

присутствие тонкодисперсного никеленосного магнетита ($< 0,05$ мм) указывала еще Е.Н.Куземкина [4] в охрах Серовского месторождения. В оксидно-железной зоне этого месторождения такой магнетит (30-50 % от массы породы) образует плотные скопления, прожилки и гнезда с содержанием NiO до 1,5 %. Иногда, по ее данным, он переходит в почти чистый маггемит.

Содержание никеля в гетите оксидно-железных метасоматитов Буруктальского месторождения колеблется от 0,5 до 1,5 % NiO, в среднем более 1 % NiO, при отсутствии других элементов-примесей, в первую очередь группы железа (Ti, Cr, Co), а также бария, кальция, цинка. Таким образом, гетит Буруктальского месторождения является никеленосным рудным минералом. По В.Шеллманну [8], маггемит характеризуется низкими концентрациями никеля, а большинство гематитов не содержат никеля. Факт низкой концентрации никеля в гематите вполне согласуется с данными разведочного опробования керна скважин охристых зон, в соответствии с которыми бронированная кираса этих зон, венчающая сверху разрез месторождений и в основном сложенная гематитом, практически лишена никеля, кобальта, а по нашим данным, и элементов платиновой группы.

Содержание никеля и кобальта в оксидно-железных метасоматитах и рудах гипергенных никелевых месторождений Южного Урала было изучено И.И.Эдельштейном [5]. Им было показано, что среднее содержание NiO в гетитах составляет 1,516 %, в преобладающем количестве проб – 1,2-1,6 % при общем пределе колебаний 0,14-3,96 % NiO. И.И.Эдельштейн полагал, что основной формой присутствия никеля в гетите является гидрат закиси никеля $\text{Ni}(\text{OH})_2$. Гетиты никелевых латеритов из различных никелевых месторождений мира были изучены В.Шеллманном [8]. Им было показано, что с гетитом ассоциировано 90 % никеля и 25-45 % хрома.

Формы вхождения никеля в структуру гетита были проанализированы в работах [7, 8] и др. В.Шеллманн определил три возможных способа ассоциации Ni с гетитом:

адсорбцию Ni на поверхности граней гетита, вхождение Ni в его кристаллическую решетку и включение никелевых фаз в структуру гетита, например $\text{Ni}(\text{OH})_2$, как это предполагал И.И.Эдельштейн [5], или ферригидрита, как предлагал Г.Кюнель. С помощью микрозондовых исследований и дифференцированного растворения гетита в растворе серной кислоты В.Шеллман доказал, что кристаллы гетита представляют собой гомогенные фазы, не содержащие никелевых микровключений и не концентрирующие никель на поверхности граней. Следовательно, никель входит в кристаллическую решетку гетита. Работами М.Л.Карвальо-е-Сильва с соавторами [6] методом рентгеновской спектроскопической абсорбции (XASI) были исследованы никеленосные гетиты (относительная молярная масса NiO равна 1,8-4,1 %) из месторождения Сьерра-де-Караджас, Бразилия. По их данным, никель замещает железо в решетке гематита, что сопровождается протонным захватом с образованием октаэдра $\text{NiO}_2(\text{OH})_4$ и искажением кристаллической структуры $\alpha\text{-FeOOH}$.

Выводы

1. В профиле Буруктальского месторождения оксиды железа демонстрируют вертикальную минералогическую зональность (снизу вверх): магнетит – маггемит – гетит – гематит. Зональность отражает тенденцию увеличения вверх по разрезу химических потенциалов кислорода и H_2O .

2. Магнетит является главным породо- и рудообразующим минералом окисно-железной зоны Буруктальского месторождения. Его высокие концентрации (50 % и выше) наблюдаются в «черном» горизонте в нижней части окисно-железной зоны, а также в узких линейных зонах трещинной коры выветривания.

3. В составе окисно-железных метасоматитов Буруктальского месторождения можно выделить магнетит трех генераций: первичный реликтовый, сохранившийся от ультраосновных пород; вторичный, образо-

вавшийся в процессе серпентинизации этих пород, и новообразованный гипергенный.

4. Гипергенный магнетит, наряду с гетитом, является никеленосным рудным минералом, содержащим около 1 % NiO.

5. По результатам комплексного термического анализа маггемита-магнетита и гетита Буруктальского месторождения уточнено положение двух важных диагностических максимумов этих минералов: кривая экзотермического эффекта магнетита, вызванного, по-видимому, окислением магнетита до маггемита в интервале 317-340 °C, имеет максимум при 327 °C («магнетитовая» точка), а кривая эндотермического эффекта гетита, связанного с потерей конституционной воды минерала и его переходом в гематит в интервале 269-296 °C, имеет максимум при 288 °C («гетитовая» точка).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Варлаков А.С. Петрология процессов серпентинизации гипербазитов складчатых областей. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1986. 224 с.
2. Дир У.А. Породообразующие минералы / У.А.Дир, Р.А.Хауи, Дж.Зусман. М.: Мир, 1966. Т.3. 316 с.
3. Капусткин Г.Р. Минералогические особенности в формировании оксидов – гидроксидов железа в процессе выветривания серпентинитов Южного Урала / Г.Р.Капусткин, И.Е.Горшкова, А.В.Савцов // Кора выветривания. Москва, 1986. Вып.19. С.66-77.
4. Кузнецкина Е.Н. Никельсодержащий магнетит // Никеленосные коры выветривания Урала. М.: Наука, 1970. С.193-202.
5. Эдельштейн И.И. Вещественный состав продуктов выветривания на ультраосновных породах Буруктальского массива // Материалы по геологии и полезным ископаемым Южного Урала. М.: Госгеолтехиздат, 1956. Вып.1, С.38-60.
6. Incorporation of Ni into natural goethite: An investigation by X-ray absorption spectroscopy / M.L.Carvalho-e-Silva, R. A.Y.amos, A.C.N.Tolentino, J.Enzweiler, S.M.Netto, M.C.M.Alves // Amer. Mineral. 2003. Vol.88, pp.876-882.
7. Manceau A. Heterogeneous distribution of nickel in hydrous silicates from New Caledonia ore deposits / A.Manceau, G.Calas // Amer. Mineral. 2000. Vol.0, pp.9-558.
8. Shellmann W. Behaviour of nickel, cobalt and chromium in ferruginous lateritic nickel ores // Bull. BRGM. 1978. Ser II. № 3. Sec.II, pp. 275-282.

REFERENCES

1. Varlakov A.S. Petrology of serpentinization process in hyperbasites of folded regions. Sverdlovsk: Publ. UNZ AS USSR, 1986. 224 p.

2. *Deer W.A.* Rock-forming minerals / W.A.Deer, R.A.Howie, J.Zussman. M.: Mir, 1966. Vol.3. 316 p.
3. *Kapustkin G.R.* Mineralogical features in iron oxide-hydroxide forming during weathering of serpentinites in South Urals / G.R.Kapustkin, I.E.Gorshkova, A.V.Savtsov // Weathering crust. M.: Nauka, 1986. Vol.19, pp. 66-77.
4. *Kuzemkina E.N.* Nickel containing magnetite. // In: «Nickel weathering crusts in Urals». M.: Nauka, 1970, pp.193-202.
5. *Edelshtein I.I.* Substantial content of weathering product on ultramafic rocks in Buruktal massif // Materials to geology and mineral resources in South Urals. M.: Gosgeoltechizdat, 1956. Vol.1, pp. 38-60.
6. Incorporation of Ni into natural goethite: An investigation by X-ray absorption spectroscopy / M.L.Carvalho-e-Silva, A.Y.Ramos, A.C.N.Tolentino, J.Enzweiler, S.M.Netto, M.C.M.Alves // Amer. Mineral., 2003. Vol.88, pp.876-882.
7. *Manceau A.* Heterogeneous distribution of nickel in hydrous silicates from New Caledonia ore deposits / A.Manceau, G.Calas // Amer. Mineral., 2000. Vol.0, pp.9-558.
8. *Shellmann W.* Behaviour of nickel, cobalt and chromium in ferruginous lateritic nickel ores // Bull. BRGM, 1978. Ser II. № 3ю Sec.II. pp.275-282.