

В.К. ГАРАНИН, М.Д. ДОРФМАН, В.А. ЖИЛЯЕВА, Г.П. КУДРЯВЦЕВА
**СОСТАВ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТИТАНОМАГНЕТИТА
 ИЗ РАЙОНА МУШУГАЙ-ХУДУК (МНР)**

В пустынном районе Мушугай-Худук (МНР) среди карбонатитов, представленных различными по составу жилами с редкоземельным апатитом, магнетитом, целестином, флюоритом и др. [1], было обнаружено скопление (до 10 м в поперечнике) почти мономинерального магнетита с необычной формой кристаллов. Подобного рода карбонатиты, для которых характерна редкометалльная ассоциация минералов (минералы Sr, TR, Ba), относятся к позднему гипабиссальному типу карбонатитов [2].

Магнетит образует крупнокристаллический агрегат. Иногда на поверхности наблюдаются небольшие присыпки карбонатного вещества с включениями мелкозернистого апатита. В агрегатах кристаллов размером до 20 сантиметров в ребре, как

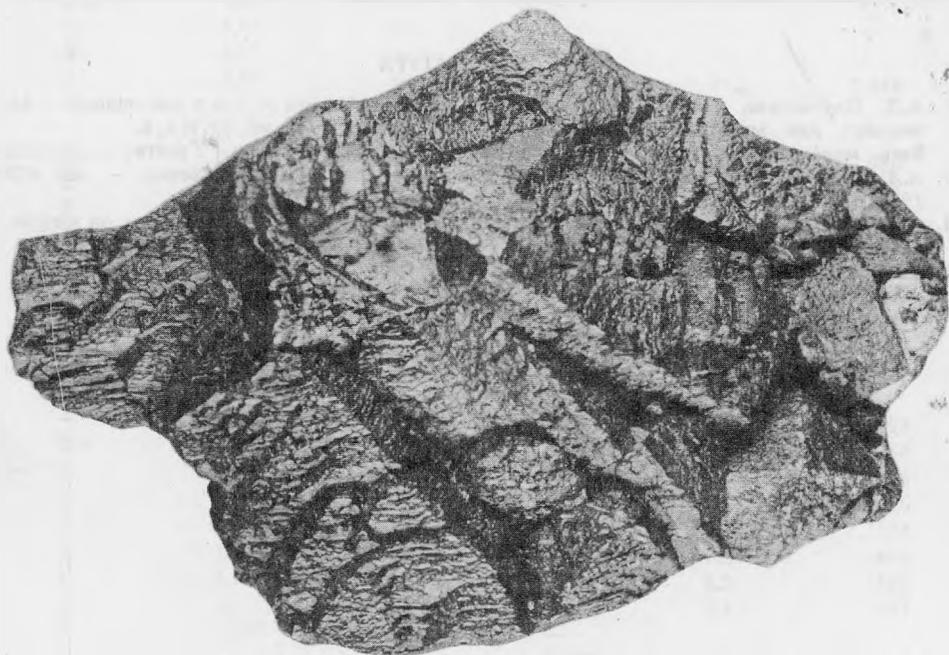


Рис. 1. Форма выделения кристаллов магнетита. Уменьш. 4/5

правило, видны лишь две неполные грани октаэдра, выветрелая поверхность которых имеет ельчатое или дендритное строение (рис. 1). Такое строение отражает не только полисинтетическое двойниковое срастание по шпинелевому закону, но и обусловлено внутренним строением "кристаллов". Оригинальные формы кристаллов явились причиной детального изучения состава и внутренней структуры магнетита.

Методика исследований

Для имеющихся 5 образцов магнетита были определены вторичные магнитные характеристики: H'_{cs} — разрушающее поле насыщения, H_{es} — магнитное поле насыщения, S_v — коэффициент магнитной вязкости — и построены коэрцитивные спектры. Аппаратура и методика измерения этих параметров описана ранее в работе В.К. Гаранина с соавторами [3]. По значениям H'_{cs} , H_{es} и S_v было установлено две группы образцов, причем в пределах каждой из групп не наблюдалось существенных

вариаций указанных характеристик. Поскольку величины вторичных магнитных параметров определяются составом и внутренней структурой ферромагнитных минералов [3, 4], то для детальных исследований были отобраны 2 образца (по одному из каждой группы), представляющие две сходные по внешней морфологии разности магнетита.

На следующей стадии образцы были подвергнуты термомагнитному анализу — изучению зависимостей относительной намагниченности J/J_{\max} от температуры в диапазоне от 20 до 600°С на установке, детально рассмотренной в работе [5]. Это позволило выявить количество ферромагнитных фаз, присутствующих в образце, и определить их точки Кюри.

Изучение внутренней морфологии образцов проводилось при наблюдении полированных шлифов под оптическим микроскопом, а также на электронно-зондовом приборе JXA-50A фирмы "Джеол" на основе изображений в обратно-рассеянных электронах весьма чувствительных к фазовой неоднородности минералов [6].

Количественный рентгеноспектральный анализ выявленных фаз осуществлялся на приборе JXA-50A по методике, описанной в работе [6]. Измерения выполнялись при ускоряющем напряжении 15 кв, диаметре зонда ~1 мкм, по линиям K_{α} -серии рентгеновского спектра. В качестве эталонов использовались чистые металлы: Mg, Al, Ti, Cr, Mn, Fe. Присутствие других элементов-примесей в образцах не установлено по программе качественного анализа в пределах ее чувствительности [6].

Результаты изучения

Состав и магнитные характеристики исследованных образцов приведены в табл. 1.

Образец 1М. Изучение его внутренней структуры под оптическим микроскопом показало, что образец представлен в основном магнетитом с закономерно ориентированными по октаэдру пластинчатыми выделениями сильно анизотропного минерала. Наблюдаются также мелкие зерна маггемита, приуроченного к границам фаз магнетита и пластинчатых выделений.

Поскольку данный образец характеризуется большой величиной магнитной восприимчивости¹ ($\chi = 796 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ), для него была получена термомагнитная кривая $J/J_{\max} = f(T^{\circ}\text{C})$ (рис. 2). На ней отмечаются два характеристических участка. Первый участок соответствует резкому падению намагниченности, связанному с превращением "ферримагнетик — парамагнетик" в точке Кюри $Q = 570^{\circ}\text{C}$. Высокое значение Q указывает на невысокое содержание изоморфных примесей в магнетите, что находится в согласии с данными микрорентгеноспектрального анализа (см. табл. 1). Необратимое падение намагниченности при 240°С, приводящее к магнитному гистерезису кривых нагрева и охлаждения, связано с переходом маггемита в гематит (" γ - α "-переход), относящимся к фазовому переходу 1-го рода.

Значения вторичных магнитных характеристик и наличие трех максимумов на коэрцитивном спектре (см. табл. 1) указывают на сложность фазового состава образца. Повышенные значения параметра S_v , по-видимому, могут быть обусловлены присутствием фазы маггемита [7]. Наличие трех максимумов на коэрцитивных спектрах может свидетельствовать о присутствии в образце различных по размеру пластинчатых включений, приводящих к дроблению ферримагнитной матрицы — магнетита [8].

Изучение полированных шлифов обр. 1М на приборе JXA-50A позволило установить присутствие в образце различных по размеру пластинчатых включений (рис. 3). По изображениям в обратно-рассеянных электронах определено, что крупные и тонкие микровключения имеют близкий средний атомный номер Z . Этот факт указывает на близость их состава [6]. Сходство состава включений и отсутствие мельчайших включений около грубопластинчатых, нередко нарушенная ориентировка крупных пластин, по-видимому, свидетельствуют об образовании последних в процессе перекристаллизации и сегрегации мелких включений. Количественный анализ, выполненный для различных по размеру пластинчатых включений, подтвердил сходство их состава. По этой причине в табл. 1 приведен их средний состав. Судя по результа-

¹ Измерения величины удельной магнитной восприимчивости χ проводились на приборе KLY = 1 (производство Института геофизики, г. Брно)

Таблица 1
Состав и магнитные характеристики титаномагнетита

Образец	Фаза	Содержания окислов в вес. %						Сумма
		MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	
1M	магнетит	0,24	0,50	0,81 (среднее из 4 опред.)	0,05	0,24	98,11	99,95
	"ильменит"	0,18	0,09	58,78 (среднее из 6 опред.)	0,03	0,57	38,62	98,27
2M	гематит	0,02	0,17	0,21	не обн.	не обн.	99,89	100,29
	рутил	0,06	0,02	97,26 (среднее из 4 опред.)	0,10	0,01	3,17	100,62

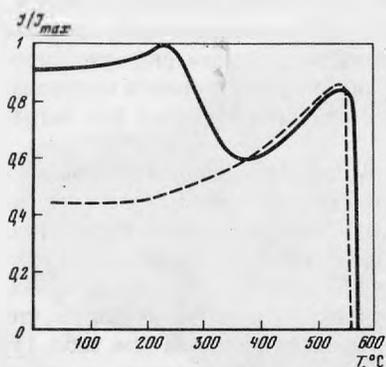
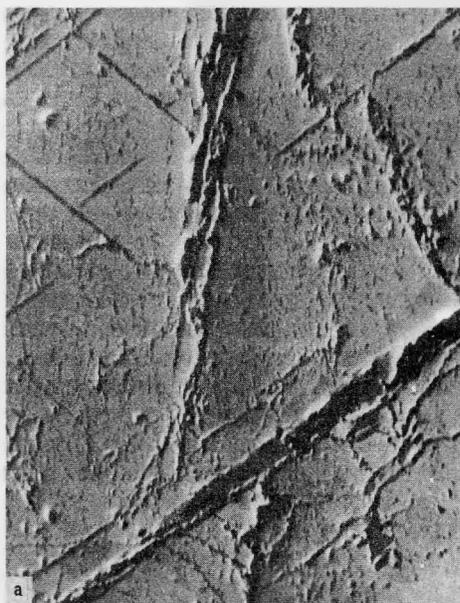


Рис. 2. Термомагнитная кривая магнетизированного титаномагнетита (сплошная линия — кривая нагрева, пунктирная — охлаждения), обр. 1 M

Рис. 3. Микровключения измененного ильменита в магнетите (обр. 1 M), увел. 300

a — изображение в обратнорассеянных электронах, характеризующее состав образца; *б* — в рентгеновских лучах Ti K_α [1]



Точки Кюри Q ($^{\circ}\text{C}$)		Температура " γ - α " перехода	S_V (э)	H'_{CS} (э)	H_{es} (кэ)	Коэрцитивный спектр		
нагрев	охлаждение					максимумы (э)		
						1	2	3
570	568							
Не обн.		240	25	337	7	290	375	540
675	675							
Не обн.		Не обн.	0	2500	> 9	290	—	> 800

Таблица 2
Валовый состав титаномагнетита (обр. 1М)

Окислы	Содержания, вес. %	Окислы	Содержания, вес. %
SiO_2	3,58	MgO	0,53
TiO_2	3,87	CaO	0,18
Al_2O_3	1,51	Na_2O	0,03
Fe_2O_3	72,73	K_2O	0,15
FeO	12,85	H_2O^-	Не обн.
MnO	0,57	H_2O^+	3,66
Сумма			99,66

Анализ выполнен в Центральной химической лаборатории ИГЕМ АН СССР. Аналитик Н.И. Степанова

там электронно-зондового анализа, пластинчатые включения по составу отвечают ильмениту с существенным избытком двуокиси титана.

Валовый состав образца по данным химического анализа приведен в табл. 2.

Образец 2М. В отличие от предыдущего в данном образце матрица представлена преимущественно гематитом, в котором сохраняются редкие реликты магнетита. Изучение полированной поверхности в отраженном свете и на приборе JXA-50А указывает на то, что в обр. 2М преобладают грубопластинчатые включения; ориентированных мельчайших включений не наблюдается. Количественный рентгено-спектральный анализ (табл. 1) показал, что пластинчатые выделения представлены в основном, зернистым агрегатом рутила.

Значение магнитной восприимчивости для образца невелико ($\chi = 30 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ), поэтому чувствительность установки для термомагнитного анализа [5] не позволила получить качественную кривую $\frac{J}{J_{\max}} = f(T^{\circ}\text{C})$. Высокие параметры коэрцитивности ($H'_{es} = 2500$ э, $H_{es} > 9$ кэ) и наличие интенсивного максимума на спектре в области $H \sim 800$ э подтверждают преобладание гематита в исследуемом образце. Максимум на спектре в области $H = 290$ э обусловлен присутствием грубых пластин "немагнитного" минерала.

Обсуждение результатов

Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что первоначальный состав изучаемых образцов отвечал титаномагнетиту (см. табл. 1, 2). По-видимому, первичный титаномагнетит, представляющий твердый раствор изоморфного ряда магнетит — ульвешпинель, при высоких значениях f_{O_2} был подвергнут окислению, что привело к преобразованию ульвешпинели в ильменит. На следующей стадии магнетит, содержащий тонкопластинчатые микровключения ильменита, подвергался изменениям, которые приводили к образованию в направлении "спайности" по октаэдру крупных пластин ильменита. Наблюдаемый распад твердого раствора является прямым указанием на магматическую природу магнетита [9]. В дальнейшем магнетит замещался маггемитом, образование которого происходило при температуре более 160°C, так как на термомагнитной кривой нагревания маггемитизированного магнетита (рис. 2) не отмечается дополнительного характеристического участка, свойственного упорядоченному (низкотемпературному) маггемиту [10].

В гипергенных условиях гематизация магнетита и маггемита получила настолько широкое развитие, что некоторые образцы с поверхности изменены более чем на 80%. Гематит, как правило, приурочен к трещинкам, секущим зерна маггемита.

Ильменит в гипергенных условиях также претерпевал изменения, подвергался лейкоксенизации вплоть до образования самостоятельных включений рутила. Таким образом, большая устойчивость ильменита в условиях пустынного выветривания по сравнению с магнетитом, по-видимому, могла являться важным фактором, приведшим к оригинальной морфологии обнаруженных в районе Мушугай-Худук агрегатов титаномагнетита.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Баскина, И.К. Волчанская. Новый тип редкометалльного оруднения в Южной Монголии, связанный с щелочными вулканами. — ДАН СССР, 1976, т. 228, № 3.
2. Ю.Л. Капустин. Минералогия карбонатов. М.: Наука, 1971.
3. В.К. Гаранин, В.А. Жилыева, Г.П. Кудрявцева. О возможности применения структурно-чувствительных магнитных характеристик для изучения ильменитов системы $MgTiO_3 - FeTiO_3 - Fe_2O_3$. Изв. АН СССР, Сер. Физика Земли, 1978, № 6.
4. В.А. Жилыева, Г.П. Кудрявцева, Н.Е. Сергеева, Г.П. Барсанов. Влияние микроструктурных особенностей и состава ферришпинелидов Ковдорского массива на их магнитные свойства — Изв. АН СССР, сер. геол., 1973, № 10.
5. В.К. Гаранин, Г.П. Кудрявцева, А.А. Хоболько. Об одном из методов измерения относительной намагниченности от температуры в широком диапазоне температур. — В кн.: Тр. IV научной конференции аспирантов и молодых ученых Геологического ф-та МГУ, 1977, Рукопись деп. в ВИНТИ 9 февраля 1978 г. № 482-78.
6. В.К. Гаранин, Г.П. Кудрявцева, Г.А. Крутов, Л.Т. Сошкина. Изучение фазовой неоднородности минералов на микроанализаторе ХА-50А. — Vorträge der III Arbeitstagung "Mikrosonde". Berlin, 1975.
7. Г.П. Кудрявцева. Фазовый состав и магнитные свойства ферришпинелидов Ковдорского массива (Кольский полуостров). Кандидатская диссертация. МГУ, М.: 1973.
8. В.А. Жилыева, Г.П. Кудрявцева, Н.Е. Сергеева. Зависимость коэрцитивных спектров от особенностей состава и структуры ферримагнетиков. — Геомагнетизм и аэрономия, 1974, № 5.
9. В.А. Вахрушев, Н.В. Владыкин. Апатит-титаномагнетитовые руды карбонатитового комплекса Южной Монголии. — Геол. рудн. месторожд., № 1, 1979, № 1, т. 21.
10. В.К. Гаранин, Г.П. Кудрявцева. К вопросу о диагностике маггемита. — В кн.: Сб. трудов III научной конференции аспирантов и молодых ученых Геологического ф-та МГУ, 1976. Рук. деп. в ВИНТИ, № 4078-77, 1977.