

К ВОПРОСУ О МАГНЕТИЗМЕ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД ГУСЕВОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ИЗМЕРЕНИЯ НА ОБРАЗЦАХ)

© 2016 г. В. С. Иванченко*, Н. А. Белоглазова*, И. И. Глухих*, О. А. Кусонский*
В. П. Молошаг**, С. В. Калугина***

*Институт геофизики УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100
E-mail: Ivanchenko_05@mail.ru

**Институт геологии и геохимии УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15

***“ЕВРАЗ КГОК”
624351, Свердловская область, г. Качканар, ул. Свердлова, 2

Поступила в редакцию 18.12.2015 г.

Принята к печати 21.06.2016 г.

В работе приведены результаты измерений по стандартной методике магнитоакустической эмиссии, температур Кюри, остаточной и индуцированной намагниченностей на образцах титаномagnetитовых руд Гусевгорского месторождения. Показано, что магнетизм руд обусловлен практически одной, но с меняющимся содержанием элементов-примесей, магнитной фазой. Присутствие второй магнитной фазы – маггемита встречается только на участках с развитыми процессами окисления. Отмечается широкий диапазон изменения индуцированной (0.37–321.8 А/м) и остаточной (0.19–7685 А/м) намагниченностей, что обусловлено как изменением количества рудной минерализации, так и текстурно-структурными особенностями ее выделения, обусловившими образование разных доменных структур, предопределяющих образование остаточной намагниченности. Остаточная намагниченность образцов, являющаяся суммой термоостаточной, химической, кристаллизационной, вязкой и динамической, вследствие возможного преобладания динамической намагниченности, не всегда адекватно отражает природную остаточную намагниченность титаномagnetитовых руд в естественном залегании.

Ключевые слова: *титаномagnetит, магнитоакустическая эмиссия, точка Кюри, естественная остаточная намагниченность, коэффициент Кенигсбергера, доменная структура, магнитная восприимчивость.*

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно только на одном Качканарском ГОКе “Ванадий” добывается около 50 млн т железной руды со средним содержанием железа в руде порядка 15%. Определение его содержания в карьере осуществляется с помощью магнитных методов, а на обогатительной фабрике – с помощью химического анализа. Из-за различия в магнитных свойствах добываемых magnetитовых руд содержание железа, определяемое в карьере по значению магнитной восприимчивости, зачастую не совпадает с содержанием железа, определяемого с помощью химического анализа (как правило, оно выше). Таким образом, часть работы карьера и фабрики осуществляется впустую. Знание магнитных свойств титаномagnetитовых руд позволит более точно строить корреляционные зависимости между содержанием железа в руде и его магнитными свойствами и тем самым повысить точность определения

содержания железа в карьере и в итоге эффективность его извлечения. Повышение эффективности извлечения железа на 1% только на одном Качканарском ГОКе даст ежегодный прирост в размере 0.5–1.0 млн т руды.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Месторождение приурочено к Гусевгорскому пироксенитовому массиву, составляющему северо-восточную и восточную части Качканарского интрузивного комплекса [5]. Среди пироксенитов Гусевгорского массива преобладают диаллаговые и оливинсодержащие диаллаговые рудоносные разновидности. Оливиновые пироксениты преимущественно безрудны. Жильный комплекс представлен в основном плагиоклазитами. Титаномagnetитовое оруденение в плагиоклазитах отсутствует.

Руды Гусевгорского массива, являющиеся объектом добычи и переработки на Качканарском

ГОКе, представлены неравномерной вкрапленностью титаномagnetита при содержании железа общего более 15.5%. По технологическим свойствам руды подразделяются на нормально обогащаемые, обеспечивающие получение концентрата с заданным содержанием железа, труднообогащаемые и сложные труднообогащаемые.

Нормально обогащаемые руды обеспечивают получение концентрата с содержанием железа 63.8%, труднообогащаемые – при нормальной производительности – менее 60%, сложные труднообогащаемые – 55–58% при снижении производительности в 1.5 раза и увеличении потерь железа в хвостах на 2.0–2.5%.

Для технологической оценки руд большое значение имеет содержание железа и ванадия в магнитной и немагнитной фракциях, зависящее от петрографического состава, текстурно-структурных особенностей руд и степени серпентинизации. В качестве изоморфной примеси в магнетите (титаномagnetите) содержится от 45 до 75% ванадия относительно валового его содержания в руде. На магнетит приходится и значимое содержание титана от 35 до 40% по отношению к валовой его концентрации в добываемой руде [3]. До сих пор извлечение титана и ванадия в добываемых рудах Качканарского ГОКа было не актуально. В настоящее время потребность в титане и ванадии как стратегическом сырье для металлургических предприятий России резко возросла [7].

Основным методом опробования и, соответственно, картирования титаномagnetитовых руд является магнитный экспресс-метод (каротаж магнитной восприимчивости) буровзрывных скважин, который основан на использовании статистической зависимости величины магнитной восприимчивости горных пород и руд от количества в них магнитных минералов. Исследования 1960–1970-х гг. показали, что ведущим магнитным минералом руд является магнетит (титаномagnetит)¹.

Количество магнетита с учетом размеров его зерен и содержания в них примесей титана и ванадия определяется на основе корреляционной зависимости с измеряемой в скважинах магнитной восприимчивостью. В последующем по значению данного параметра и 3-мерным координатам проб с помощью информационной системы Suprac отстраиваются 2- и 3-мерные карты распределения магнетита с допустимым диапазоном ошибок $\pm 1\%$.

Многолетняя практика работ указывает на необходимость уточнения существующих методов определения данного минерала, поскольку погрешности его определения на отдельных “проблемных”

участках в ряде случаев выходит за допустимые пределы. Из сказанного очевидно, что требуются углубленные исследования магнитных свойств магнетита и других железосодержащих минералов руд. На разрабатываемом Качканарским ГОКом Гусевгорском месторождении качество получаемого при магнитном обогащении концентрата определяется содержанием в нем магнетита.

Учитывая, что эксплуатационная добыча ведется с четырех залежей (Главной, Северной, Западной и Южной), такие корреляционные зависимости между содержанием магнетита и измеряемой в скважине магнитной восприимчивостью должны быть определены для каждой из залежей, а для исключения систематической погрешности необходима постоянная проверка этих зависимостей. Одним из методов снижения систематической погрешности магнитного экспресс-метода может служить регулярный контроль за изменением магнитных свойств добываемых руд по образцам и непосредственно в массиве. В связи с этим изучение магнетизма титаномagnetитовых руд месторождения необходимо как для решения геолого-геофизических проблем при исследовании месторождения, так и при оценке технологических характеристик руд.

В данной работе приведены результаты изучения магнетизма титаномagnetитовых руд Гусевгорского месторождения по измерениям на образцах (в основном по Главной и Северной залежам и в меньшей степени по Западной).

Главная залежь расположена в центральной части Гусевгорского массива и сложена преимущественно диаллагитами неравномерно-зернистого строения [5]. В геологическом строении Главной залежи установлено преобладание северо-западного простирания основных структурных элементов, фиксирующихся положением контактов разных пород, ориентировкой полосчатости в них, направлением наиболее крупных тектонических зон. Аналогичная закономерность наблюдается в залегании разных текстурных типов руд и распределении железа, титана и ванадия.

Северная залежь занимает северо-западную часть Гусевгорского массива и сложена неравномерно-зернистыми диаллаговыми пироксенитами. Для нее характерны северо-западное простирание и крутое падение главных структурных элементов: контактов между петрографическими разностями пород, полосчатости и крупных жил плагиоклазитов. По характеру оруденения Северная залежь отличается от Главной преимущественным развитием мелковкрапленного оруденения с пониженным содержанием железа и ванадия.

Западная залежь приурочена к крупному блоку пироксенитов в западной части Гусевгорского массива. В зоне контакта отмечается перемежаемость габбро и пироксенитов. Характерные для Западной залежи плагиоклазовые пироксениты – это

¹ Считаем нужным отметить, что в обширной литературе по титаномagnetитовым месторождениям, приводимой в сборнике [5], термины “магнетит” и “титаномagnetит” часто упоминаются как идентичные, хотя в минералогическом отношении титаномagnetит следует считать разновидностью магнетита [2].

массивные породы неравномерно-зернистой структуры, в разной степени амфиболитизированные. Жильные породы представлены редкими мономинеральными плагиоклазами. По характеру оруденения этой залежи свойственно резкое преобладание мелковкрапленной руды в западной и северо-западной частях и средневкрапленной – в юго-восточной части.

Целью предлагаемой работы является совершенствование существующих методов контроля качества руд на основе привлечения новых методов исследования физических свойств, а также вещественного состава руд и собственно магнетита в условиях действующей технологии добычи руд с учетом особенностей геологического строения разрабатываемых карьерами участков Гусевгорского месторождения.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Комплекс измерений на образцах включает в себя изучение магнитоакустической эмиссии, термомагнитные исследования и измерения магнитных характеристик. Для исследований было отобрано 36 штучков (19 – в Главном, 14 – в Северном и 3 – в Западном карьере), из которых были приготовлены по 2–3 образца в форме кубиков со стороной 2.4 см.

Для термомагнитных исследований проба дробилась до стадии –1.0 мм и перемешивалась.

Проведено петрографическое и минералогическое описание образцов и изучение вещественного состава (спектральный анализ и рентгеноспектральный флуоресцентный метод).

МАГНИТОАКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ОБРАЗЦОВ

Учитывая, что основной процесс, который обуславливает изменение намагниченного состояния горных пород при значениях первичного поля, создаваемого приборами, измеряющими магнитную восприимчивость, связан со смещением границ доменов, возникающих в титаномагнетитовых зернах. Одним из эффективных методов исследования может быть измерение магнитоакустической эмиссии, возникающей при перемагничивании образца одновременно со скачками Баркгаузена [1].

В качестве параметров магнитоакустической эмиссии использованы: величина магнитного поля, при которой наблюдается максимальное значение; медианное значение диапазона магнитных полей, в которых проявляется магнитоакустическая эмиссия, и ее амплитуда. Типичные кривые магнитоакустической эмиссии (МАЭ) представлены на рис. 1.

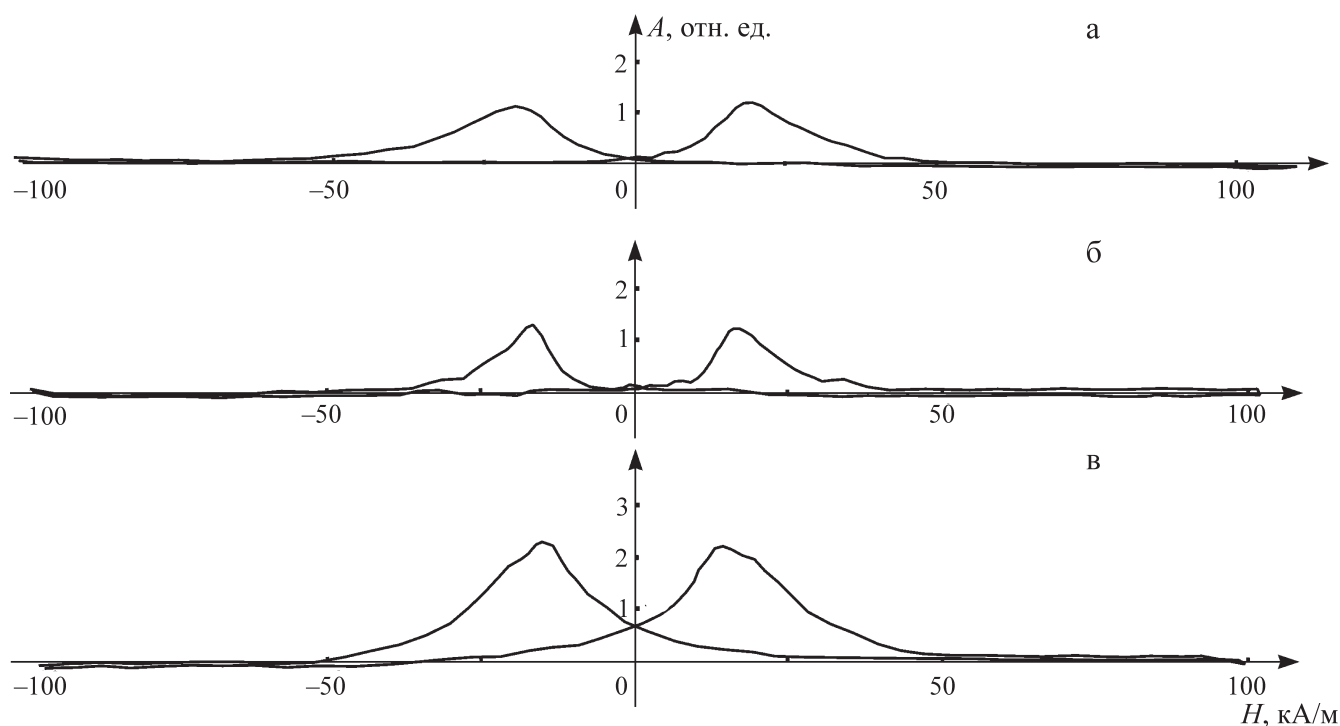


Рис. 1. Типичные кривые магнитоакустической эмиссии.

а – первый тип (I – обр. 4844); б – второй тип (II – обр. 4833); в – третий тип (III – обр. 4824).

Fig. 1. Typical curves magnetoacoustic emission.

а – the first type (sample 4844); б – the second type (sample 4833); в – the third type (sample 4824).

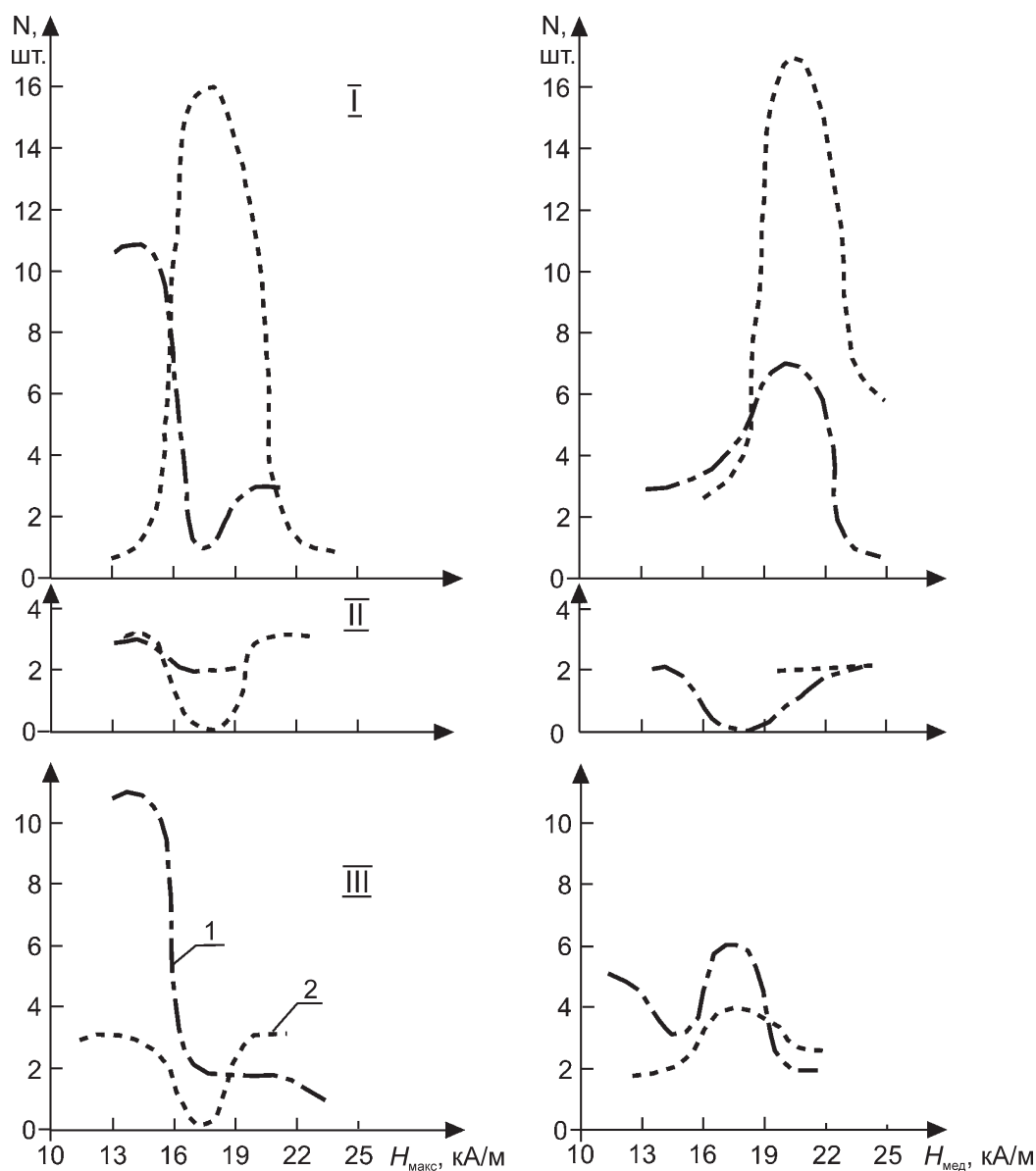


Рис. 2. Вариационные кривые распределения значений $H_{\max}$ и $H_{\text{мед}}$ по выделенным типам кривых (I–III).

1 – Главная залежь, 2 – Северная залежь.

Fig. 2. The variation curve of distribution of values for $H_{\max}$ and $H_{\text{мед}}$ to selected types of curves (I–III).

1 – Main deposit, 2 – North deposit.

Анализ формы кривых МАЭ измеренных образцов позволяет предполагать один источник генерации магнитоакустической эмиссии. Наблюдаемые изменения параметров свидетельствуют об отличиях в структуре этого источника, связанных как с внутренними факторами, так и возможным влиянием последующих внешних воздействий (наведенной анизотропией). Результаты измерений по трем ортогональным осям показывают практическое отсутствие анизотропии МАЭ. По диапазону полей проявления МАЭ измеренные образцы подразделяются на три группы (см. рис. 1) с соответствующи-

ми значениями медиан ($H_{\text{мед}}$): 22.7, 18.8 и 12.2 кА/м. Средние значения полей максимумов МАЭ ($H_{\max}$) для этих групп различаются незначительно: 17.2, 14.6 и 16.7 кА/м соответственно.

На рис. 2 представлены вариационные кривые распределения значений $H_{\max}$ и $H_{\text{мед}}$ для каждого типа кривых по Главной и Северной залежам. Значимое различие преобладающих значений $H_{\max}$ наблюдается только для кривых первого типа МАЭ: Главная залежь – 13–16 кА/м, Северная залежь – 16–19 кА/м.

Анализ табл. 1 показывает, что жесткость закрепления доменных границ зависит от количества

Таблица 1. Среднее содержание элементов-примесей (данные спектрального анализа) для типов образцов, выделяемых по МАЭ

Table 1. The average content of trace elements (spectral data) for the types of samples allocated to the MAE

Тип по МАЭ	Средний параметр		Содержание элементов-примесей, отн. ед.					Средняя температура Кюри, °С
	$H_{\text{мед}}$, кА/м	$H_{\text{макс}}$, кА/м	Ti	V	Cr	Mn	Co	
I	22.7	17.2	5247	501	104	684	86.1	544.6
II	18.8	14.8	4757	504	161	729	78.1	558.3
III	12.2	16.7	4551	382	165	660	76.7	552.0

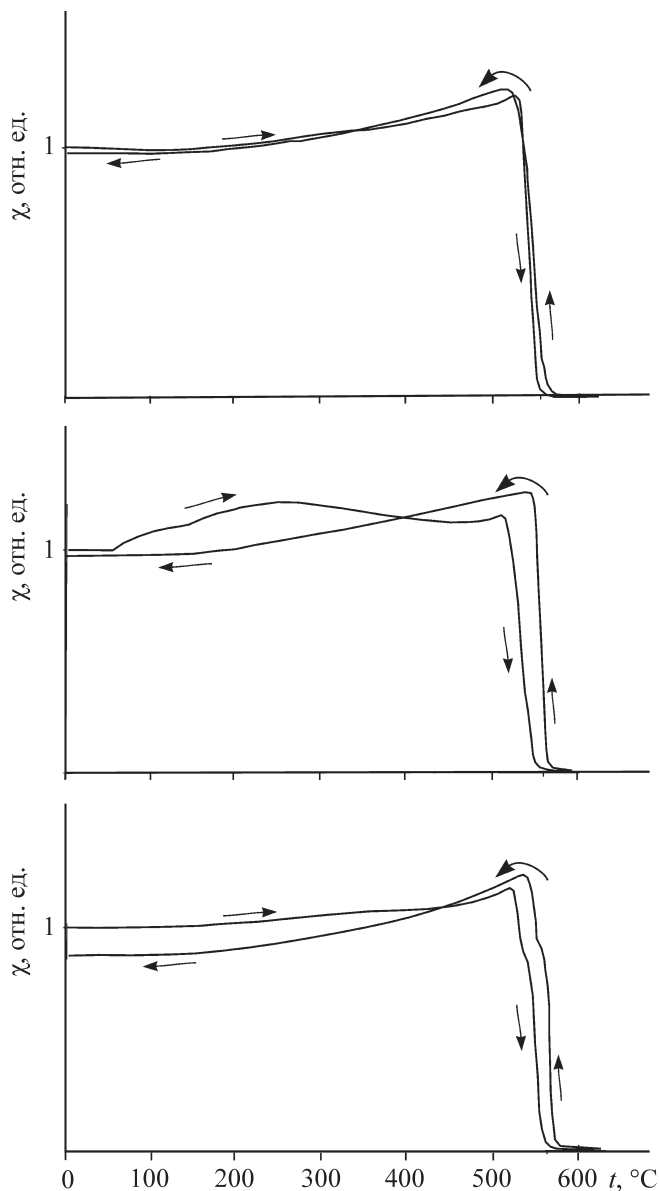


Рис. 3. Типичные термомангнитные кривые.

а – обратимые (обр. 4832), б – необратимые (обр. 4821), в – необратимые, двухфазные (обр. 4831).

Fig. 3. Typical thermomagnetic curves.

а – reversible (sample 4832), б – irreversible (sample 4821), в – irreversible, two-phase (sample 4831).

элементов-примесей (в основном это титан и ванадий) непосредственно в решетке основной магнитной фазы, о чем свидетельствует понижение температуры Кюри. Эффектом закрепления доменных границ на немагнитных включениях можно объяснить повышение медианного значения диапазона МАЭ второго типа, поскольку более низкая величина поля максимального значения МАЭ и температура Кюри, близкая к температуре Кюри магнетита стехиометрического состава, характеризуют основную магнитную фазу как однородную.

Помимо отмеченных типов на месторождении встречены образцы, на которых магнитоакустическая эмиссия не наблюдается, что свидетельствует о жестком закреплении доменных границ. Намагничивание образца при изменении внешнего магнитного поля в этом случае обусловлено процессом вращения вектора намагниченности домена. Эти образцы не выделяются ни по магнитным характеристикам, ни по содержанию элементов-примесей, но в них отмечается присутствие маггемита.

ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Зависимость магнитной восприимчивости от температуры позволяет получить информацию о точках Кюри магнитных фаз и их количественном соотношении [3]. Типичные термомангнитные кривые представлены на рис. 3. В основном магнитные свойства обусловлены одной магнитной фазой с точками Кюри от 540 до 570°С (обратимые кривые, рис. 3а). Необратимый тип кривых обусловлен присутствием нестабильной фазы – маггемита (рис. 3б). Магнитные фазы с точками Кюри 560 и 550°С (в двух случаях) наиболее вероятно обусловлены присутствием двух стабильных фаз: магнетита и хроммагнетита (рис. 3в).

Вариационные кривые температур Кюри основной магнитной фазы образцов по залежам представлены на рис. 4. Для Главной залежи отмечается преобладание двух магнитных фаз (точки Кюри 545 и 565°С), а на Северной залежи – одной магнитной фазы с точкой Кюри 555°С.

Наблюдаемые обратимые кривые (одна магнитная фаза, температуры Кюри меняются в пределах 540–570°С, что обусловлено разным содержа-

нием примесей в решетке магнетита) отмечаются у образцов с колебаниями содержания элементов-примесей в диапазонах (отн. ед.): Ti – 4027–8536, V – 198–1015, Cr – 31.4–392, Mn – 524–949, Co – 65.2–125.2.

Форма необратимых термомагнитных кривых типична для магнетит-маггемитового сочетания. Точка Кюри основной магнитной фазы меняется в пределах 535–550°C. Температура перехода маггемитовой фазы в немагнитное состояние меняется в достаточно широких пределах (375–530°C), и связано это, вероятно, с различной степенью окисления. Содержание элементов-примесей меняется также в больших пределах (отн. ед.): Ti – 169.8–5068, V – 6.7–686, Cr – 2.5–169.4, Mn – 44.4–722, Co – 38.8–98.8.

Третья форма термомагнитных кривых отмечена только у двух образцов. В образце 4828 (Главная залежь, гор. 160) повышено содержание хрома (512 отн. ед.) и понижено содержание титана (3230 отн. ед.). Точки Кюри магнитных фаз 560 и 570°C. В образце 4831 (Главная залежь, гор. 100) с пониженным содержанием хрома (9.08 отн. ед.) и при средних концентрациях остальных компонентов отмечаются три магнитные фазы: магнетитовая (точка Кюри 560°C), маггемитовая (точка Кюри 440°C) и хроммагнетитовая, или хромтитанмагнетитовая, с точкой Кюри 550°C.

Различие содержания элементов-примесей в первую очередь титана позволяет считать, что насыщенность рудных растворов, сформировавших Главную и Северную залежи, была различной, а в результате последующих геологических процессов, которые привели к распаду твердых растворов, основные магнитные фазы этих залежей оказались достаточно близкими по составу и магнитной структуре.

СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ

Измерения структурно-чувствительных магнитных характеристик образцов выполнены в лаборатории “Арти” на аstaticком магнитометре МА-21 по стандартной методике. По результатам измерений вычислены: величина магнитной восприимчивости, индуцированная и остаточная намагниченности, направление остаточной намагни-

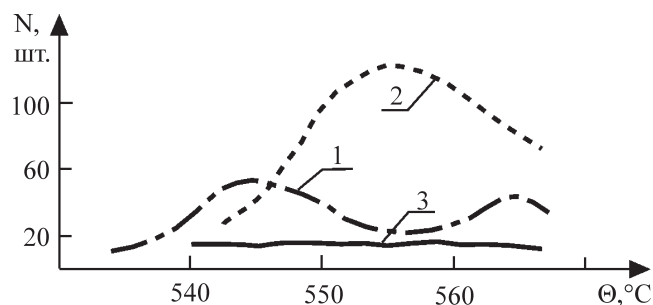


Рис. 4. Вариационные кривые распределения температур Кюри.

1 – Главная залежь, 2 – Северная залежь, 3 – Западная залежь.

Fig. 4. Variation distribution curves of the Curie temperature.

1 – Main deposit, 2 – North deposit, 3 – West deposit.

ченности, коэффициент Кенигсбергера. Размагничивающий фактор при этом не учитывался. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

По отношению намагниченностей остаточной (J_r) к индуцированной (J_i) (коэффициент Кенигсбергера, или фактор Q) все образцы подразделяются на две группы: коэффициент Кенигсбергера больше 1 и меньше 1. Для первой группы образцов среднее содержание элементов примесей (отн. ед.): Ti – 4712, V – 436, Cr – 116, Mn – 657 и Co – 69.6. Средняя температура основной магнитной фазы Кюри 549°C. Для второй группы средние содержания элементов-примесей (отн. ед.): Ti – 2818, V – 297, Cr – 108, Mn – 475, Co – 77.5. Средняя температура Кюри основной магнитной фазы 556°C. Таким образом, можно считать, что повышение количества элементов-примесей в основной гомогенной магнитной фазе приводит к увеличению остаточной намагниченности. В то же время более низкое среднее значение поля максимальной амплитуды МАЭ для первой группы образцов ($H_{\max} = 17.3$ кА/м) по сравнению с таковым второй группы ($H_{\max} = 20.4$ кА/м) предполагает меньшую энергетическую закрепленность доменных границ в образцах первой группы (при превышении остаточной намагниченности над индуцированной).

На рис. 5 и 6 представлены вариационные кривые распределения значений индуцированной и остаточ-

Таблица 2. Диапазон изменения физических свойств образцов

Table 2. The range of changes in the physical properties of the samples

Залежь	Остаточная намагниченность (модуль), А/м		Магнитная восприимчивость, ед. СИ		Плотность, г/см ³		Коэффициент Кенигсбергера	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Главная	1.09	1377	0.29	7.63	3.01	3.90	0.28	34
Северная	6.50	6385	0.29	1.50	3.08	4.28	0.40	271
Западная	3.90	33.4	0.23	0.32	3.49	3.57	0.40	2.3

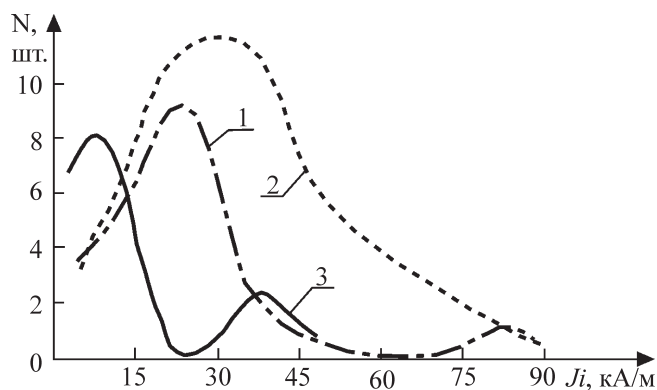


Рис. 5. Вариационные кривые распределения величины индуцированной намагниченности.

1 – Главная залежь, 2 – Северная залежь, 3 – Западная залежь.

Fig. 5. The variation curve of the distribution of the induced magnetization.

1 – Main deposit, 2 – North deposit, 3 – West deposit.

ной намагниченностей по залежам. В общем случае отмечается сдвиг значений остаточной (более существенный) и индуцированной (менее значимый) намагниченностей руд Северной залежи по сравнению с рудами Главной.

АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ОБРАЗЦОВ

В практике эксплуатации Гусевогорского месторождения и обогащения руд используется технологическая классификация, основанная на текстурно-структурных особенностях руд, их вещественном составе и физических свойствах, позволяя плани-

ровать глубину обогащения и качественный показатель концентрата. Рудные пироксениты месторождения имеют поликристаллическое строение от тонко- до гигантозернистых. Размеры рудных обособлений хорошо согласуются с размерами зерен силикатов.

В табл. 3 приведены данные об изменении измеренных свойств по типам руд. Анализ результатов измерений позволяет сделать следующие выводы.

1. Оливинсодержащий пироксенит с акцессорной рудной минерализацией (плотность 3.01 г/см^3), представленной ильменитом, магнетитом и хроммагнетитом (повышенное содержание титана, наличие двух магнитных фаз с точками Кюри 570 и 560°C), характеризуется низкими значениями остаточной намагниченности (3.82 А/м) и коэффициента Кенигсбергера (0.28). Достаточно широкий диапазон проявления эффекта МАЭ ($47\text{--}54 \text{ кА/м}$) и повышенные значения $H_{\text{макс}}$ и $H_{\text{мед}}$ (соответственно $16.9\text{--}17.3$ и $20.4\text{--}23.5 \text{ кА/м}$) могут быть связаны с наличием межфазных границ и размагничивающими полями в небольших по размеру рудных вкраплениях.

2. В образце, где присутствует гигантозернистый магнетит, отмечается, по данным анализов, наличие минералов ильменитовой группы. Возможно, разделение этих фаз происходило при медленном остывании рудного раствора в центральной части залежи или при перекристаллизации титаномagnetита под воздействием последующих наложенных процессов, поскольку для магнетита этого образца характерны небольшой диапазон проявления МАЭ ($31\text{--}37 \text{ кА/м}$), невысокие значения параметров МАЭ ($H_{\text{макс}} = 14.2\text{--}15.6 \text{ кА/м}$ и $H_{\text{мед}} = 15.5\text{--}16.3 \text{ кА/м}$), остаточной намагниченности (1.09 А/м), коэффициента Кенигсбергера (0.11) и повышенное значение точки Кюри (570°C).

3. Для крупнозернистых руд отмечается повышение значений остаточной намагниченности

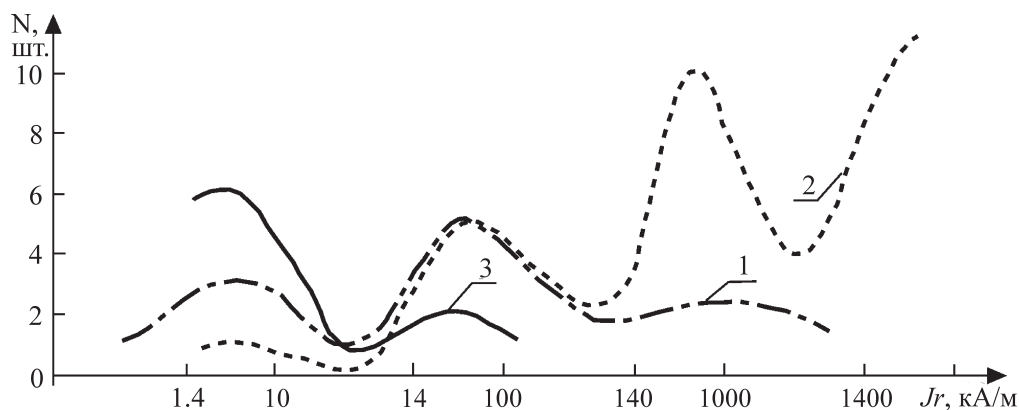


Рис. 6. Вариационные кривые распределения величины остаточной намагниченности.

1 – Главная залежь, 2 – Северная залежь, 3 – Западная залежь.

Fig. 6. The variation curve of the distribution of the residual magnetization.

1 – Main deposit, 2 – North deposit, 3 – West deposit.

(305 А/м), коэффициента Кенигсбергера (4.05) и понижение точки Кюри (545°C), что свидетельствует о наличии элементов-примесей в основной магнитной фазе, которая сравнительно изотропна (невысокие значения параметров магнитоакустической эмиссии).

4. С уменьшением размера вкрапленников наблюдается резкое увеличение остаточной намагниченности (мелковкрапленная руда 328–1102 А/м; руда мелковкрапленная до дисперсной – 4803–7870 А/м) и коэффициента Кенигсбергера (соответственно 16.2–28.4 и 9.0–28.2). Точки Кюри основных магнитных фаз 560 и 555°C соответственно, что объясняется понижением элементов-примесей в основной магнитной фазе. С уменьшением размера рудных зерен отмечается также значимое увеличение поля, в котором наблюдается максимальное значение амплитуды МАЭ: $H_{\text{макс}}$ для мелковкрапленных руд 16.7–17.1 кА/м; $H_{\text{макс}}$ для руд мелковкрапленных до дисперсных – 20.6–20.7 кА/м. Возрастание значений параметров МАЭ, вероятно, связано с увеличением объема межзеренных границ и внутренними размагничивающими полями.

Естественно, что на формирование доменной структуры руд, а следовательно, и на параметры МАЭ и образование остаточной намагниченности, окажут влияние структуры распада твердого раствора (тонких включений в основной магнитной фазе ильменита или шпинели), но их наличие наблюдается практически во всех типах руд.

На Гусевогорском месторождении широко развит комплекс жильных пород, наиболее часто представленных жилами плагиоклазитов, приуроченных к тектоническим нарушениям, зонам дробления и контактам разных пород [5]. Контакты с вмещающими породами резкие. Возможно ожидать термальное воздействие на окружающую рудную массу при внедрении этих жил, поэтому были отобраны образцы руд на разных расстояниях от контакта. Результаты измерений приведены в табл. 4.

Плагиоклазиты как в Северной, так и в Главной залежах содержат очень незначительное количество магнитной фракции: их плотность меняется в пределах 2.62–2.77 г/см³; магнитная восприимчивость 0.009–0.015 ед. СИ; остаточная намагниченность 0.20–0.28 А/м. Точки Кюри магнитных фаз (магнетита) 550–570°C. Отмечается присутствие маггемита. Суммарное количество элементов-примесей от 267 до 1624 отн. ед. Магнитоакустическая эмиссия отсутствует.

Для титаномagnetитовых руд Северной залежи, образцы которых взяты на расстоянии 2 и 3 м к западу от жилы и 3, 4 и 5 м к востоку (см. табл. 4), отмечается общая закономерность: увеличение остаточной намагниченности до 141.5 и 135.8 А/м соответственно, увеличение коэффициента Кенигсбергера (7.8 и 5.7) и снижение температуры Кюри до 543 и 553°C. Суммарное количество элементов-примесей

Таблица 3. Изменение физических свойств и вещественного состава по типам руд
Table 3. Changes in the physical properties and composition of ore types

№ образца, залежь	Описание образца	Плотность, г/см ³	J_r , А/м	J_i , А/м	$Q = J_r/J_i$	Θ , °C	$\chi_{\text{проб}}^{\text{э}}$, ед. СИ	$H_{\text{макс}}$, кА/м	$H_{\text{мед}}$, кА/м	Тип МАЭ	Диапазон, кА/м	Данные спектрального анализа, отн. ед.	
												Ti	Cr
4827 Главная	Гигантозернистый магнетит	3.38	1.09	10.4	0.11	570	0.57	14.2 15.6 15.0	15.5 15.5 16.3	2, 3	31.0 31.0 37.4	8536	74.1
4826 Главная	Крупнозернистая руда	3.44	305	75.5	4.05	545	0.33	13.8 14.2 14.0	13.5 14.8 13.5	1	35.0 40.5 35.0	5406	34.6
4828 Главная	Оливинсодержащий пироксенит	3.01	3.82	12.9	0.28	570/560	0.23	16.9 17.3 17.3	23.5 20.0 23.5	2, 3	47.0 54.0 47.0	3230	513
4846-1, 2, 3 Северная	Мелковкрапленная руда с оливином	3.72 3.65 3.64	1102 328 1057	46.3 20.1 37.2	23.8 16.2 28.4	560/472	0.27	16.7 17.0 17.1	22.0 20.0 22.0	1	40.0 44.0 44.0	1031 $\text{TiO}_2 = 0.6$	16.7 0.01 25.9
4847-1, 2, 3 Северная	Мелковкрапленная до дисперсной руда	3.49 3.75 3.81	4803 5378 7870	19.9 19.0 87.1	24.4 28.2 9.0	555	0.22	20.6 20.7 20.6	19.5 21.5 20.0	1	39.0 40.0 42.0	2318 $\text{TiO}_2 = 1.3$	0.01

Примечание. Для образцов 4846 и 4847 содержание маггемита (Fe_2O_3) 23.1 и 23.9 соответственно, мас. %.
Note. For samples 4846 and 4847 maghemite (Fe_2O_3) contents respectively 23.1 and 23.9, wt %.

Таблица 4. Изменение петрофизических характеристик образцов, отобранных на разном расстоянии от плагиоклазовой жилы
Table 4. Changing the petrophysical characteristics of the samples, choosed at different distances from plagioclase veins

№ образца	Место отбора	Плотность, г/см ³	Магнитная восприимчивость, ед. СИ	Намагниченность		Коэффициент Кенигсбергера	Точка Кюри, °С	Тип кривой	Параметры МАЭ		Элементный состав, отн. ед.						
				остаточная, А/м	индуцированная, А/м				Амплитуда, отн. ед.	$H_{\text{макс}}$, кА/м	$H_{\text{макс}}^*$, кА/м	Диапазон, кА/м	Ti	V	Cr	Mn	Co
Северная залежь																	
4817	3 м, зап.	3.24	0.43	141.5	18.1	7.8	543	3	1.97	17.3	19.5	-8...+47	4147	212	392	543	77.0
4816	2 м, зап.	3.21	0.32	26.3	13.6	1.9	560	2	0.37	15.8	19.5	-39	4584	226	268	565	75.7
4815	Контакт	3.21	0.41	54.0	17.3	3.1	550	—	0	0	0	—	4267	205	261	555	76.6
4818a	Жила	2.72	0.011	0.21	0.44	0.48	550,400	—	—	—	—	—	1156	44.8	22.5	368	32.1
4818b	Жила	2.68	0.009	0.20	0.4	0.50	—	—	—	—	—	—	242	13.7	4.76	100.4	41.3
4821	3 м, вост.	3.32	0.37	6.5	15.7	0.42	550,460	3	0.9	20.2	13.5	-16...+43	4267	20	261	555	76.6
4820	4 м, вост.	3.19	0.29	49.8	12.3	4.1	540,493	3	2.2	12.1	15.0	-4...+35	2294	175	71.9	520	52.1
4819	5 м, вост.	3.38	0.56	135.8	23.8	5.7	553	1	0.2	23.4	26.0	1-51	4027	198	132	524	77.1
Главная залежь																	
4823	Контакт	3.08	0.36	62.5	15.2	4.1	535, 485	3	0.45	21.3	17.5	-8...+43	4454	438	84.6	722	62.2
4822b	0.1 м, вост.	3.34	0.42	131.4	17.8	7.4	—	3	1.15	15.5	18.5	-6...+43	5542	589	16.2	774	79.8
4822a	4 м, вост.	3.30	0.60	224.9	25.3	8.9	550, 530	3	1.43	16.2	18.5	-6...+43	4306	412	163	675	80.1
4824	14 м. вост.	3.55	0.35	15.7	14.9	1.2	565	3	2.5	14.3	13.0	-25...+51	4454	438	84.6	722	65.2
4825	Жила 2	2.62	0.014	0.28	0.60	0.46	570, 375	—	—	—	—	—	169.9	6.74	2.57	44.4	38.9
4829	Жила 3	2.77	0.015	0.28	0.63	0.45	—	—	—	—	—	—	304	9.14	1.19	75.7	55.4
4830	Без жил	3.73	0.80	50.8	33.7	1.5	550, 462	3	1.88	14.7	16.5	-10...+43	5069	686	33.7	675	98.8
4831-3	Там же	2.96	0.62	83.9	26.3	3.2	—	—	—	—	—	—	4827	584	9.67	697	83.3
4832	Там же	3.87	0.97	20.1	41.1	0.49	545	1	0.8	16.0	21.5	4-39	5854	696	82.2	715	113
4833	Там же	3.90	7.63	1377.3	321.8	4.3	540	1	1.58	15.5	21.0	3-39	7453	920	31.4	793	103

Примечание $H_{макс}^*$ рассчитано по максимальному диапазону проявления магнитоакустической эмиссии по образцу в целом; прочерк — нет сигналов магнитоакустической эмиссии.

Note. $H_{макс}^*$ is designed for a maximum range of manifestations magnetoacoustic emission from sample as a whole; dash — no magnetoacoustic emission signals.

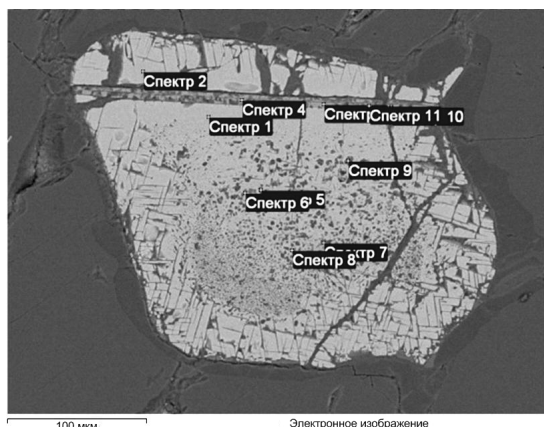


Рис. 7. Образец 4823. Магнетитовая руда в контакте с мощной плагиоклазовой жиллой.

Структура распада твердого раствора. Схема точек микрозондирования основной матрицы.

Fig. 7. Sample 4823. Magnetite ore in contact with a strong plagioclase vein.

The structure of the solid solution decomposition. Points scheme microprobe basic matrix.

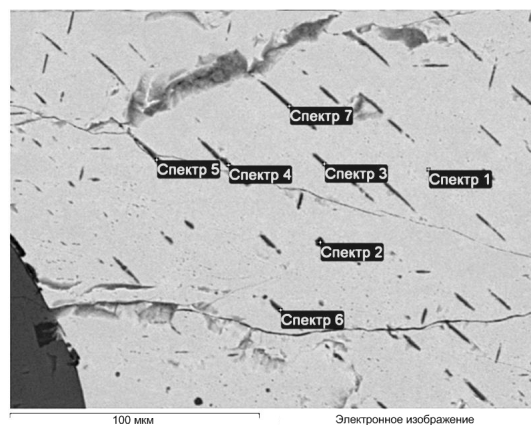


Рис. 8. Образец 4817. Магнетитовая руда, отобранная в 3 м от плагиоклазовой жиллы.

Схема точек микрозондирования основной матрицы. Структура распада твердого раствора (выделение ламелей шпинели).

Fig. 8. Sample 4817. Magnetite ore, selected in 3 meters from the plagioclase vein.

Points scheme microprobe basic matrix. The structure of the solid solution decomposition (separation lamellae of spinel).

практически на одном уровне (4960–5721 отн. ед.). Магнитоакустическая эмиссия наблюдается в более широком диапазоне полей (до 47–51 кА/м), и увеличивается поле максимума сигнала МАЭ (17.3 и 23.4 кА/м к западу и востоку соответственно). В образце из непосредственного контакта с жилой МАЭ отсутствует.

Для руд Главной залежи (образцы отобраны к востоку от жилы) увеличение значений параметров при удалении отмечается только для остаточной намагниченности и коэффициента Кенигсбергера. Наблюдается магнитоакустическая эмиссия на образце с непосредственного контакта с жилой. Магнитные характеристики и параметры МАЭ образца руды на расстоянии 14–15 м от плагиоклазовой жилы укладываются в диапазон магнитных характеристик и параметров МАЭ образцов руд, отобранных с участка, где такие жилы отсутствуют.

Проведено детальное исследование образцов непосредственно из зоны контакта с жилой плагиоклазитов, из ближней зоны (3 м) и с участка с отсутствием плагиоклазовых жил (дальняя зона).

Образец 4823. Рис. 7. Главная залежь, контакт с жилой. Средние содержания химических элементов в возможной магнитной фазе (мас. %): Fe – 75.2, Ti – 0.9, V – 0.6, Al – 0.5. Две магнитные фазы с точками Кюри 485°C (маггемит) и 535°C (магнетит с примесью титана, ванадия и алюминия). Плотность 3.08 г/см³. Остаточная намагниченность 62.5 А/м. Параметры магнитоакустической эмиссии $H_{\text{макс}} = 21.3$ кА/м и $H_{\text{мед}} = 17.5$ кА/м. Структура распада твердого раствора (выделение ильменита), отмечаются сульфиды.

Образец 4817. Рис. 8. Северная залежь, 3 м от контакта. Средние содержания химических элементов в возможной магнитной фазе (мас. %): Fe – 70.8, Ti – 2.4, V – 0, Al – 1.1, Mg – 1.2, Cr – 0.5. Одна магнитная фаза с точкой Кюри 543°C (магнетит с примесями в решетке). Плотность 3.34 г/см³. Остаточная намагниченность 141.5 А/м. Параметры магнитоакустической эмиссии $H_{\text{макс}} = 17.3$ кА/м, $H_{\text{мед}} = 19.6$ кА/м. Структура распада твердого раствора (выделение ламелей шпинели).

Образцы 4832 и 4833. Рис. 9а и б. Главная залежь, участок без плагиоклазовых жил. Средние содержания химических элементов в возможной магнитной фазе (мас. %): Fe – 73.4, Ti – 1.1, V – 0.5, Al – 0.7, Mg – 0.9. Одна магнитная фаза, средняя точка Кюри 543°C (магнетит с примесями в решетке). Плотность 3.88 г/см³. Остаточная намагниченность средняя – 698.5 А/м при изменениях от 20.1 до 1377.4 А/м. Параметры магнитоакустической эмиссии $H_{\text{макс}} = 15.7$ кА/м, $H_{\text{мед}} = 21.3$ кА/м. Структура распада твердого раствора (выделение шпинели).

В общем случае делать заключение о влиянии температурного режима при остывании плагиоклазовых жил на закономерное изменение магнитных характеристик образцов и состав магнитных фаз затруднительно, но несомненны два факта: приуроченность к полям развития плагиоклазитовых жил процесса маггемитизации и формирования разных типов доменных структур магнитных фаз, различающихся по проявлению магнитоакустической эмиссии. Непосредственно в зонах контакта формируются доменные структуры с преобладанием жестко закрепленных до-

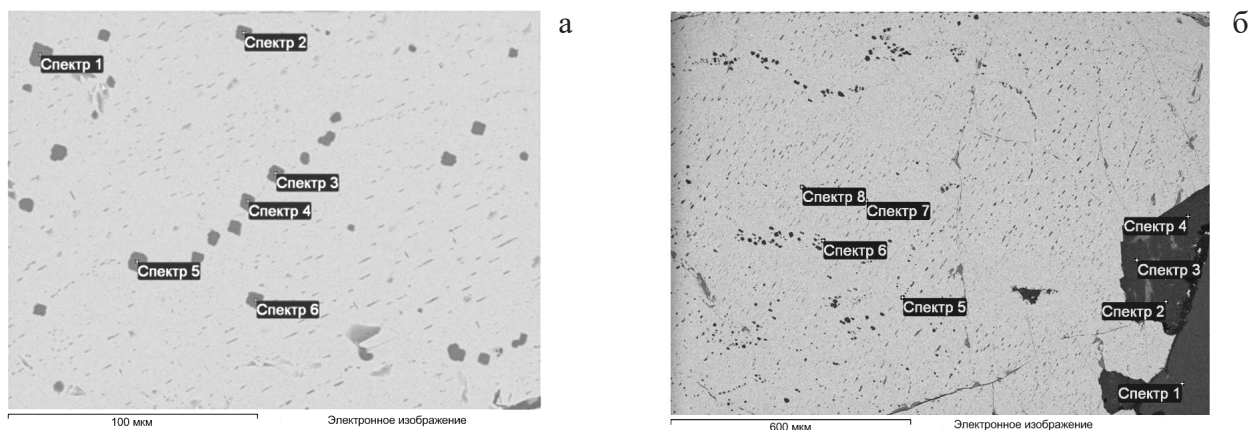


Рис. 9. Магнетитовая руда, отобранная на участке без плагиоклазовых жил.

а – образец 4832, б – образец 4833. Схема точек микрозондирования основной матрицы. Структура распада твердого раствора.

Fig. 9. Magnetite ore, selected on the site without plagioclase veins.

а – sample 4832, б – sample 4833. Points scheme microprobe basic matrix. There is a structure of the solid solution decomposition.

Таблица 5. Свойства образцов для двух значений поля $H_{\text{макс}}$

Table 5. The properties of the samples for two values of the field $H_{\text{макс}}$

Параметр	№ образца	Описание, место отбора	Δ , г/см ³	J_r , кА/м	J_i , кА/м	$Q = J_r/J_i$	Θ , °С	$H_{\text{мед}}$, кА/м	Диапазон, кА/м	Спектральный анализ, отн. ед.		
										Ti	V	Cr
$H_{\text{макс}} = 16\text{--}19$ кА/м	4832	1 тип, Главная залежь	3.87	20.0	41.1	0.49	545	22.2 19.5 20.0	33.5 31.0 35.0	5854	686	82.2
	4828	2 тип, Главная залежь	3.01	3.62	12.9	0.28	570, 560	23.5 23.5	47.0 47.0	3230	344	512
	4822а	3 тип, Главная залежь	3.30	224	25.2	8.9	550/530	16.4 13.5 12.4	45.3 35.0 37.3	4306	412	163
	4828	3 тип, Главная залежь	3.01	3.62	12.9	0.28	570, 560	20.0	54.0	3230	344	512
	4919	1 тип, Северная залежь	3.38	1357	237	5.7	553	25.3 19.3 18.2	27.0 31.0 34.0	4037	198.7	132.5
$H_{\text{макс}} = 22\text{--}25$ кА/м	4823	3 тип, Главная залежь	3.98	62.5	15.2	4.1	535/485	12.4 17.5 11.5	37.3 52.0 39.0	4454	438	84.5

менных границ (вплоть до полного отсутствия МАЭ). По мере удаления от источника тепловой энергии увеличивается объем доменных границ с меньшей степенью закрепления на дефектных структурах, что характеризуется последовательным уменьшением магнитного поля, в котором наблюдается максимальное значение магнитоакустической эмиссии.

При сопоставлении двух групп образцов со значениями поля максимальных амплитуд МАЭ 16–19 и 22–25 кА/м (табл. 5) не устанавливается закономерной связи с другими физическими свойствами и количеством элементов-примесей.

Полученная информация свидетельствует о том, что формирование доменной структуры определя-

ется составом и условиями кристаллизации первичного рудного расплава и влиянием последующих процессов, приводящих к образованию структур распада твердого раствора и маггемита.

В общем случае доменная структура природного ферримангнетика должна определять и величину естественной остаточной намагниченности. Свойства двух групп образцов с малыми и достаточно высокими значениями остаточной намагниченности приведены в табл. 6.

Магнитные фазы этих двух групп практически не отличаются: основная представлена магнетитом с меняющимся количеством элементов-примесей, вызывающих снижение точки Кюри до 540°С, вто-

Таблица 6. Свойства образцов при двух значениях остаточной намагниченности**Table 6.** The properties of the samples for the two values of the residual magnetization

Залежь	№ образца	Намагниченность, А/м		Q	Θ , °C	Δ , г/см ³	Параметры МАЭ		Результаты спектрального анализа, отн. ед.		
		J_r	J_i				$H_{\max}$	$H_{\text{мед}}$	Ti	V	Cr
Главная	4828	3.6	12.9	0.28	570, 560	3.01	17.2	22.3	3230	344	512
	4837 ₁	3.2	15.5	0.20	545	3.68	0	0	2245	239	28.4
	4838 ₂	8.1	21.9	0.37	555	3.51	19.3	21.0			
Северная Западная	4821	5.5	15.6	0.42	550/460	3.32	20.2	15.3	3051	259	168
	4834 ₃	6.8	12.5	0.55	550/435	3.49	0	0	1605	154	37
	4835 ₁₂	6.7	11.9	0.51	540/400	3.57	0	0	1540	157	48
	4836 ₁₂₃	3.9	9.8	0.40	550/480	3.55	0	0			
	среднее	5.1	12.3	0.42		3.48	19	19	2016	230	159
Главная Северная	48381	1371	19.9	68.7	555	3.82	19.3	21.0			
	4833	1377	321	4.3	540	3.90	15.5	16.5	7473	920	31.4
	4842 ₂	1361	381	35.7	560/455	3.83	16.4	19.7	3081	362	54.8
	4844 ₁	1146	70.8	16.2	560	4.42	19.0	24.8	5850	629	9.0
	4846 ₁₂	1072	41.7	26.1	560/475	3.68	16.9	21.3	1031	72	16.7
	среднее	1232	146.0	24.1		3.89	17.4	20.7	4351	495	30.0

Таблица 7. Химический состав и намагниченность образцов**Table 7.** Chemical composition and magnetization of samples

Результаты анализа на CPM-35 и XRF-1800									
№ образца	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Cr	J_r , А/м
4837	21.21	1.265	0.090	42.34	5.17	12.17	18.17	0.012	3.2
4834	19.49	0.957	0.060	43.70	5.91	10.38	20.13	0.014	5.6
4835	20.09	0.965	0.062	43.68	5.41	10.05	18.76	0.018	4.6
4842	28.47	1.935	0.145	37.37	5.38	11.66	15.31	0.024	1361
4844	61.43	3.542	0.225	16.29	6.38	6.97	6.31	0.005	1146
4846	23.13	0.669	0.034	43.20	3.06	12.33	18.18	0.006	1076

Примечание. Оксиды в мас. %.

Note. Oxides in mass. %.

ричная – маггемитом с точками Кюри от 400 до 480°C. Увеличение остаточной намагниченности может быть обусловлено повышением содержания магнетита (титаномагнетита) (средняя плотность образцов со средним значением остаточной намагниченности 5.13 А/м составляет 3.48 г/см³, а образцов со средним значением остаточной намагниченности 1232 А/м – 3.89 г/см³ и включениями ильменита (содержание титана возрастает с 2016 до 4361 отн. ед.)). И при этом параметры МАЭ вновь свидетельствуют о формировании двух типов доменных структур: с жестко закрепленными доменными границами для образцов с малыми значениями остаточной намагниченности (среднее $H_{\max} = 18.9$ кА/м или отсутствие МАЭ) и менее жестко закрепленными для образцов с большими значениями остаточной намагниченности (среднее $H_{\max} = 17.4$ кА/м).

Исследования естественной остаточной намагниченности магнетитов и магнетит-содержащих пород контактово-метасоматического генезиса выполнены В.А. Шапиро [6]. С учетом характеристик

стабильности видов остаточной намагниченности в работе сделан вывод, что естественная остаточная намагниченность магнетитсодержащих пород обусловлена измененной термоостаточной намагниченностью, образовавшейся при кристаллизации рудного раствора, вязкой и динамической намагниченностями. Особенно большую роль в увеличении остаточной намагниченности образца может сыграть динамическая намагниченность при его отборе и обработке. Различная степень стабильности этих видов остаточной намагниченности, показанная в этой же работе, позволяет предполагать наличие доменов с разной степенью закрепления доменных границ.

Наличие двух типов доменных структур по результатам изучения мозаичных доменных структур на разных типах титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения отмечали авторы работы [4]. Выделенный ими первый тип соответствует доменной структуре с менее жестко закрепленными доменными границами, а второй – с более жестко закрепленными. Авторами этой работы также уста-

новлено вполне закономерное распределение этих структур в зависимости от формы, размера и дефектов зерен титаномагнетита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы.

– Магнетизм титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения связан в основном с одной магнитной фазой, образование которой объясняется условиями кристаллизации первичного рудного расплава. Различие состава первичного рудного расплава обусловило разное количество элементов-примесей в кристаллической решетке основной магнитной фазы, что вызвало изменение температуры Кюри в целом по месторождению в диапазоне 535–570°C, а также разные показатели наиболее вероятных значений температур Кюри для Северной и Главной залежей. На участках с повышенным содержанием хрома появляется вторая магнитная фаза с точкой Кюри 560°C (хроммагнетит или хромильменитмагнетит). В зонах развития процессов окисления отмечается образование маггемита с точками Кюри от 400 до 480°C.

– Показана зависимость изменения остаточной намагниченности образцов от размера вкрапленности от гигантозернистой (1.09 А/м) до мелко вкрапленной и дисперсной (4803–7870 А/м).

– Наличие разных структур распада твердого раствора в титаномагнетите руд Гусевогорского месторождения, достаточно большой и разнообразный объем немагнитных включений в магнетитовой матрице и локальные неоднородности термодинамических воздействий обусловили широкий спектр структурно-чувствительных характеристик (индуцированной и остаточной намагниченностей). Диапазон изменения индуцированной намагниченности на образцах от 0.37 до 321.8 А/м, остаточной – от 0.19 до 7685 А/м. Такой широкий диапазон изменения намагниченности титаномагнетитовых руд вызван как изменением количества рудной минерализации, так и текстурно-структурными особенностями ее выделения, обусловившими образование разных доменных структур, предопределяющих формирование остаточной намагниченности.

– Для исследованных руд выделяются два типа доменных структур: с более и менее жестко закрепленными доменными границами. Первый тип доменной структуры, для которой максимальная амплитуда МАЭ наблюдается в магнитных полях более 20 кА/м, обуславливает появление естественной термоостаточной, кристаллизационной и химической намагниченностей. Доменная структура под воздействием последующих физико-химических

процессов и механических воздействий изменяется, что приводит к образованию второго типа доменной структуры с менее жестко закрепленными доменными границами. Это может объяснить максимальные значения магнитоакустической эмиссии в магнитных полях менее 16 кА/м. С этой доменной структурой связано образование намагниченностей вязкой и динамической, возникающих при механических воздействиях на этапе отбора и обработки образцов.

– Остаточная намагниченность образцов, являющаяся суммой термоостаточной, химической, кристаллизационной, вязкой и динамической, вследствие возможного преобладания динамической намагниченности не всегда адекватно отражает естественную остаточную намагниченность титаномагнетитовых руд в естественном залегании.

Продолжение работы по изучению динамической намагниченности на величину остаточной намагниченности непосредственно в естественном залегании мы считаем задачей будущих исследований.

Работа выполнена в рамках проекта фундаментальных исследований УрО РАН № 15-11-5-9 и гранта РФФИ-Урал № 13-05-96019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванченко В.С., Глухих И.И., Строкина Л.Г., Хейнсон А.П. (2012) Магнитоакустическая эмиссия магнетитов. *Геология и геофизика*. **53**(2), 277-284.
2. Минералы: Справочник. Т. II. Вып. 3. (1967) (Под ред. Ф.В. Чухрова и Э.М. Бонштедт-Куплетской). М.: Наука, 57-79.
3. Фоминых В.Г., Глухих И.И., Никулова А.А. (1973) О характере термомагнитных кривых титаномагнетитов и магнетитов различных типов железорудных месторождений Урала. *Минералогия рудных месторождений Урала*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 20-23.
4. Фоминых В.Г., Науменко А.П., Нагирияк Ф.И. (1976) Мозаичные структуры титаномагнетитов Гусевогорского месторождения и их влияние на магнитные свойства. *Акцессорные и рудные минералы Урала. Мин. сборник № 12*. Свердловск: ИГиГ УНЦ АН СССР, 21-30.
5. Формация титаномагнетитовых руд и железистых кварцитов. Железорудные месторождения Урала. (1984). (Отв. ред. А.М. Дымкин). Свердловск: УНЦ АН СССР, 264 с.
6. Шапиро В.А. (1970) Намагниченность массивной залежи магнетита. *Методика магнитных измерений и интерпретации в геофизике*. Свердловск: УФАИ СССР, 29-46.
7. Яковлев В.Л., Лаптев Ю.В., Яковлев А.М. (2014) Геоинформационная оценка изменчивости качества титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения. *Литосфера*, (5), 122-128.

The question of magnetism titanomagnetite ores Gusevogorskoye deposits (measuring on the samples)

V. S. Ivanchenko*, N. A. Beloglazova*, I. I. Glukhikh*, O. A. Kusonsky*
V. P. Moloshag**, S. V. Kalugina***

*Institute of Geophysics, Urals Branch of RAS

**Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

***"EVRAZ KGOK"

Put in order the results of measurements of a number of magnetic parameters on samples of titanomagnetite ores Gusevogorskoye deposit by standard methods: magnetoacoustic emission, the Curie temperature, residual and induced magnetization. It is shown that ore magnetism is conditioned by one the magnetic phase, but with the changing content of trace elements. It was noted the presence of maghemite a second magnetic phase in areas with advanced oxidation processes only. Is also noted a wide range of changes by induced (0.37–321.8 A/m) and residual (0.19–7685 A/m) of the magnetizations. Obviously, this is due to both the change in the amount of mineralization and textural-structural features highlight it. These processes led to the formation of different domain structures and predetermine the magnitude and direction of residual magnetization. The residual magnetization of the sample, which is the sum thermoremanent, chemical, crystal, viscous and dynamic magnetizations, due to the possible prevalence of the dynamic magnetization is not always adequately reflect the NRM of titanomagnetite ores in-situ.

Key words: titanomagnetite, magnetoacoustic emission, the Curie point, the natural residual magnetization, ratio Koenigsberger, domain structure, magnetic susceptibility.

REFERENCES

1. Ivanchenko V.S., Glukhikh I.I., Strokina L.G., Khejnsion A.P. (2012) Magnetoacoustic emission of magnetites. *Geol. Geofiz.*, **53**(2), 277-284. (In Russian)
2. *Mineraly. Spravochnik. T. II. V. 3.* (1967) [Minerals: A Handbook. V. II. Is. 3] (Eds. F.V. Chukhrova and E.M. Bonshtedt-Cupletskaya). Moscow: Nauka Publ., 57-79. (In Russian)
3. Fominykh V.G., Glukhikh I.I., Nikulova A.A. (1973) The nature of thermomagnetic curves titaniferous magnetite and magnetite various types of iron ore deposits of the Urals. *Mineralogija rudnykh mestorozhdenij Urala. Trudy IGI UNITS AN SSSR* [Mineralogy of ore deposits of the Urals. Proc. of the Zavaritskiy IGG USC AN SSSR]. Sverdlovsk, 20-23. (In Russian)
4. Fominykh V.G., Naumenko A.P., Nagirnjak F.I. (1976) Mosaic structure of titanomagnetite Gusevogorskoye fields and their influence on the magnetic properties. *"Aktssornye i rudnye mineraly Urala". Min. sbornik № 12. Trudy IGI UNITS. AN SSSR* [The accessory and ore minerals of the Urals. Mineral collection no. 12. Proc. IGG USC AN SSSR]. Sverdlovsk, 21-30. (In Russian)
5. *Formatsiya titanomagnetitovykh rud i zhelezistykh kvartsitov. Zhelezorudnye mestorozhdenija Urala* (1984) [The formation of titanomagnetite ores and ferruginous quartzite. Iron ore deposits of the Urals] (Ed. A.M. Dymkin). Sverdlovsk: USC AN SSSR Publ., 264 p. (In Russian)
6. Shapiro V.A. (1970) The magnetization of massive magnetite deposits. *"Metodika magnitnykh izmerenij i interpretatsii v geofizike"* [Methods of magnetic measurements and interpretation in geophysics]. Sverdlovsk: UFAN SSSR, 29-46. (In Russian)
7. Jakovlev V.L., Laptev Yu.V., Jakovlev A.M. (2014) Geoinformation valuation of quality variability titanomagnetite ores Gusevogorskoye field. *Litosfera*, (5), 122-128. (In Russian)