ских полей. Екатеринбург, 2006. С. 114–117
3. *Журавлёва Р.Б.* Новый вариант зондирований с комплексированием измерений при возбуждении структуры вертикальным и горизонтальным магнитными диполями. // Уральский геофизический вестник, 2007. №2–3. С. 61–65.
4. *Козулин Ю.Н.* К теории частотного электромагнитного зондирования многослойных структур // Известия АН СССР. Серия геофизика,1960. Вып. 8.
5. *Ратушняк А.Н.* Рассеяние гармонического ЭМ поля на 3D проводящих объектах. // Известия ВУЗов. Горный журнал, 2006. №1. С. 151–163.

****

МАГНИТОАКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ МАГНЕТИТОВЫХ РУД ПЕСЧАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
(Средний Урал)

Иванченко В.С., Глухих И.И., Строкина Л.Г., Хейнсон А.П. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург
Алешин К.Б. – Уральский государственный горный университет, Екатеринбург

Аннотация. В статье приведены результаты исследования магнитоакустической эмиссии образцов сульфидно-магнетитовых руд Песчанского месторождения (Средний Урал). По форме кривой сигналов магнитоакустической эмиссии при перемагничивании было выделено пять типов образцов. Для объяснения полученных результатов также были проведены минералогические исследования, термомагнитный анализ и изучены петли гистерезиса. Полученные результаты свидетельствуют, что сложный минералогический состав образца находит своё отражение в форме сигналов магнитоакустической эмиссии и позволили выделить несколько магнитных фаз, являющихся источником сигналов: магнетит, пирротин (моноклинный), тонковкрапленный, возможно затронутый процессами окисления магнетит, обратнонамагниченный пирротин.

MAGNETOACOUSTIC EMISSION OF MAGNETITE ORES OF THE PESCHANSK DEPOSIT
(Middle Urals)

Ivanchenko V.S., Glukhikh I.I., Strokina L.G., Kheinson A.P. – Institute of geophysics, UB of RAS, Yekaterinburg
Aleshin K.B. – The Urals State Mining University, Yekaterinburg

Abstract. The results of investigation of magnetoacoustic emission of sulfide-magnetite ore samples of Peschansk deposit (middle Urals) are adduced. Five sample types were distinguished according to the form of magnetoacoustic emission signal curve at magnetic reversal. For explanation of the obtained results authors also conducted mineralogical researches, thermomagnetic analysis and studied hysteresis loops. The received results testify that complex mineralogical structure of a sample is reflected in the form of magnetoacoustic emission signals and allowed to distinguish several magnetic phases which are a source of signals: magnetite**,** pyrrhotine (monoclinic), thin disseminated magnetite, very likely affected by oxidation processes, reversely magnetized

Магнитоакустическая эмиссия (МАЭ) отражает особенности магнитной текстуры природных ферримагнетиков, которая обусловлена условиями их образования, а также влиянием последующих наложенных физико-химических процессов (Глухих, Фоминых, 1970; Кудрявцева, 1988; Глухих, Иванченко, 1998).

На примере Естюнинского месторождения (Средний Урал) было показано отличие магнитоакустической эмиссии магнетитовых руд, образование которых свя-

зано с различными геологическими процессами (Глухих и др., 2007). Дальнейшее исследование МАЭ магнетитовых руд продолжено на сульфидно-магнетитовых рудах Песчанского месторождения.

Песчанское месторождение состоит из группы рудных тел и приурочено к северо-западному контакту Ауэрбаховского интрузивного массива, представленного диоритами, габбро-диоритами и габбро (Скарново-магнетитовые формации…, 1989). Вмещающие вулканогенно-осадочные породы прорваны дайками диабазовых и диоритовых порфиритов. Вмещающие интрузив породы, включая и сами интрузивные породы, интенсивно метаморфизованы под влиянием постмагматических эманаций и растворов. Рудные залежи на месторождении локализуются только в скарнах, состоящих из граната ряда гроссуляр-андродит и моноклинного пироксена. Из вторичных минералов развиты эпидот, кальцит, хлорит, кварц. Рудные тела сложены сплошными магнетитовыми, сульфидно-магнетитовыми и вкрапленными скарново-магнетитовыми рудами. Вкрапленные руды тесно ассоциируют со сплошными и отличаются повышенным содержанием сульфидов. Магнетитовое оруденение приурочено к концу роговиковой ступени приконтактового метаморфизма, когда отложение магнетита идет при незаконченном образовании граната и пироксена (там же). Сульфидное оруденение наложено на магнетитовое и сопровождается разложением граната и пироксена. Наличие повышенных скоплений сульфидов, представленных пиритом, пирротином, халькопиритом, марказитом, сфалеритом, арсенопиритом, допускает возможность гидросиликатного подтипа оруденения. В сульфидно-магнетитовых рудах отмечается магнетит второй генерации, который развивается по пирротину (там же).

Нами исследованы МАЭ образцов магнетитовых руд с Ново-Песчанского участка, Западно-Песчанской и Южной залежей. На Ново-Песчанском участке два крупных рудных тела приурочены к контакту известняков с вулканогенно-осадочными образованиями, а остальные, более мелкие, к контактам даек диабазовых порфиритов и диоритов. Исследуемые образцы представлены сплошными магнетитовыми рудами (содержание магнетита от 70 до 90%) с небольшой вкрапленностью сульфидов (пирит, халькопирит, пирротин) и вкрапленными (скарновыми) рудами с содержанием магнетита от 40 до 60%. Отмечаются зерна гематита, подверженные лейкоксенизации. Микротвердость магнетита колеблется в пределах 5,09–6,79 кГ/мм^2.

Западно-Песчанская залежь удалена от контакта с интрузивным массивом на 400 м к западу и приурочена к контакту известняков с порфиритами и туфами. Отмечается большое количество дорудных и пострудных даек диабазовых порфиритов, в различной степени скарнированных и оруденелых. Образцы представлены сплошными магнетитовыми (содержание магнетита 70–95%) и вкрапленными магнетитовыми (содержание магнетита от 20 до 60%) рудами. Практически во всех образцах присутствует сульфидная составляющая, представленная не только пиритом и халькопиритом, но значительным количеством пирротина. В нескольких образцах магнетит практически отсутствует, и магнитная фракция представлена пирротином.

Южная залежь приурочена к контакту диоритов и известняков, залегая под горизонтальной апофизой диоритов, внедрившихся по верхнему контакту известняков. Исследованные образцы, в основном, аналогичны образцом Западно-Песчанской залежи. В них присутствует значительная доля сульфидов (пирротин, сфалерит).

Измерения МАЭ выполнены по методике, описанной в работах (Глухих, Иванченко, 1998; Глухих и др., 2000). В качестве информационных параметров используются: величина намагничивающего поля H_{max}, при которой наблюдается максимальное значение МАЭ; диапазон намагничивающего поля, в котором проявляются

Таблица 1. Параметры магнитоакустической эмиссии типов руд Песчанского месторождения

Типы руд	Залежь	Информационные параметры МАЭ					Магнитные свойства		
		H_{max}, кА/м		амплитуда, отн. ед.		диапазон, кА/м	H_c, кА/м	температура Кюри, °С	
		1 фаза	2 фаза	1 фаза	2 фаза			1 фаза	2 фаза
оруденелые породы, < 20% Mt	ЮЗ	13,3	28,0	2,1	2,6	185	6,1	552	302
	НПУ	-	-	-	-	-	-	-	-
	ЗПЗ	-	-	-	-	-	-	-	-
	среднее	13,3	28,0	2,1	2,6	185	6,1		
вкрапленные бедные, 20– 40% Mt	ЮЗ	18,2	30,8	3,3	8,1	153	5,4	595	337
	НПУ	12,6	21,0	1,6	-	95	4,7	-	-
	ЗПЗ	16,8	-	1,0	-	52	5,2	582	(450)
	среднее	16,1	27,2	2,5	8,1	121	5,1		
богатые, 40–70% Mt	ЮЗ	16,8	32,2	2,6	3,4	99	6,3	590	337
	НПУ	12,6	24,2	3,1	2,3	104	5,2	577	-
	ЗПЗ	14,0	26,6	3,5	3,4	99	5,7	572	(400)
	среднее	13,7	26,5	3,2	3,1	101	5,7		
сплошные, < 70% Mt	ЮЗ	18,2	26,6	5,2	4,4	127	6,2	582	338
	НПУ	11,2	25,2	3,5	0	94	5,6	579	-
	ЗПЗ	14,0	28,0	6,8	5,1	101	5,7	577	(450)
	среднее	14,0	27,0	5,7	4,9	104	5,8		
пирротин	ЮЗ	-	-	-	-	-	-	-	-
	НПУ	0	0	0	0	0	0	580	320
	ЗПЗ	19,6	50,4	2,3	1,0	140	-	544	337

процессы МАЭ, и амплитуда МАЭ. По кривой перемагничивания определены максимальная индукция B_{max} и коэрцитивная сила H_c. Использовалась также информация о температуре Кюри °С и форме термомагнитной кривой. Осредненные данные по типам руд приведены в табл. 1.

Анализ приведенных результатов показывает, что принципиальных различий МАЭ магнетитов различных типов руд, выделяемых по содержанию магнетита, не наблюдается. И это вполне объяснимо, поскольку для месторождения характерен единый скарновый процесс образования магнетита.

Внимание заслуживает наблюдаемое различие внутри каждого типа руд между рудами трех изучаемых залежей. Возможно, эти различия связаны с различным составом контактирующих с известняками пород (вулканогенно-осадочные, порфириты и туфы и диориты) и температурным режимом (удаление от интрузива). Поэтому для классификации кривых МАЭ предложено использовать форму кривых МАЭ. По этому признаку исследованные образцы разделены на пять типов.

К ***первому типу*** относятся образцы, у которых МАЭ не регистрируется (рис. 1). По минералогическому описанию в них отсутствует или присутствует очень незначительная тонкая вкрапленность магнетита. Встречающийся пирротин (до 10%), по-видимому, представлен промежуточной разновидностью, поскольку при полном отсутствии кривой перемагничивания начальная магнитная восприимчивость все же отмечается.

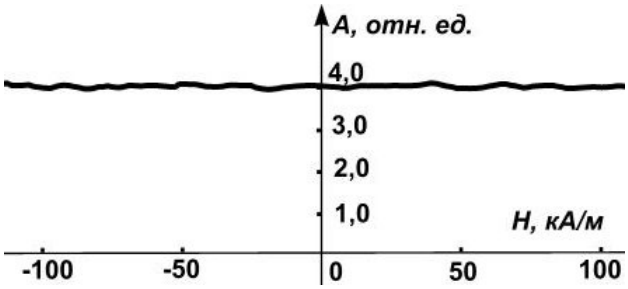


Рис. 1. Первый тип кривых МАЭ (ЗПЗ-9)

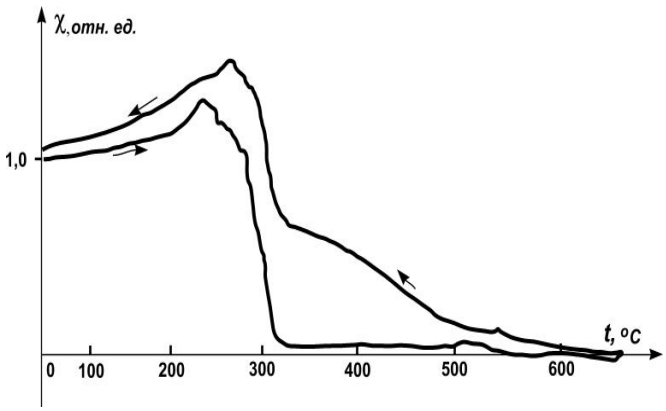


Рис. 2. Термомагнитные кривые образца 1 типа МАЭ (ЗПЗ-9)

Термомагнитная кривая (рис. 2) необратима. Температура Кюри магнитной фазы

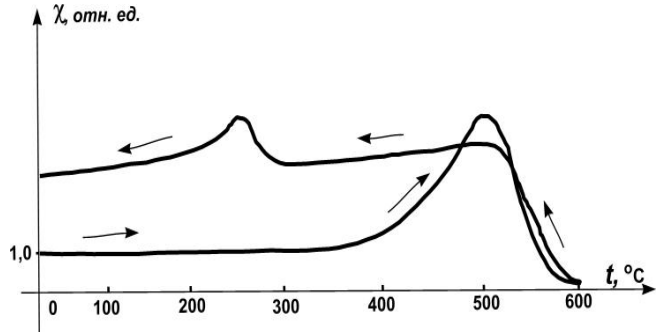


Рис. 3. Термомагнитные кривые образца 1 типа МАЭ (НПУ-6)

310–325 °С. При вторичном нагреве четко фиксируются пирротиновая и магнетитовая (температура Кюри 544 °С) фазы.

Встречаются образцы, у которых при нагреве до 600 °С в воздухе происходит образование моноклинного пирротина и магнетита из гексагонального пирротина или сидерита (рис. 3).

Второй тип образцов отличается одновершинной кривой МАЭ (рис. 4). Максимальное значение МАЭ наблюдается в магнитном поле 8,0 кА/м. Такой параметр

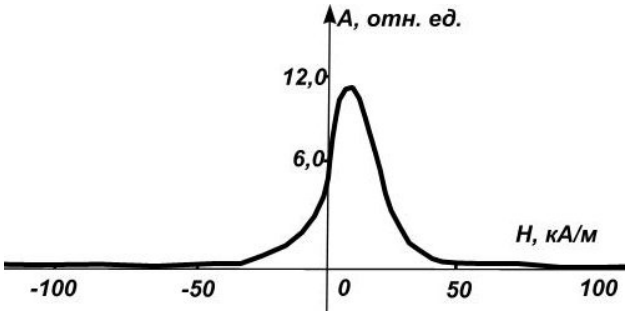


Рис. 4. Второй тип кривых МАЭ (НПЗ 1д)

МАЭ близок к параметру МАЭ сплошных руд Естюнинского месторождения, связанных со скарновой метасоматической стадией образования (Глухих и др., 2007). Термомагнитная кривая обратима, отмечается одна магнетитовая фаза с температурой Кюри 583 °С.

Для ***третьего типа*** образцов характерны двухвершинные кривые МАЭ. Первый максимум наблюдается в магнитном поле ~13 кА/м, второй в поле ~26 кА/м (рис. 5). Амплитуды максимумов кривой МАЭ увязываются с содержанием магнетита и пирротина. Термомагнитные кривые для этой группы образцов подразделяются на типы: обратимые однофазные, температура Кюри магнитной фазы 572–577 °С, что соответствует магнетиту (рис. 6а); обратимые двухфазные, температуры Кюри фаз 338 и 582 °С, типичные для пирротина и магнетита (рис. 6б). Амплитуда первой (пирротиновой) фазы меняется в широких пределах, и при ее уменьшении температура перехода сдвигается в область температур 150–200 °С. Небольшие количества примесей титана и ванадия понижают температуру Кюри магнетитов Южной залежи и Ново-Песчанского участка.

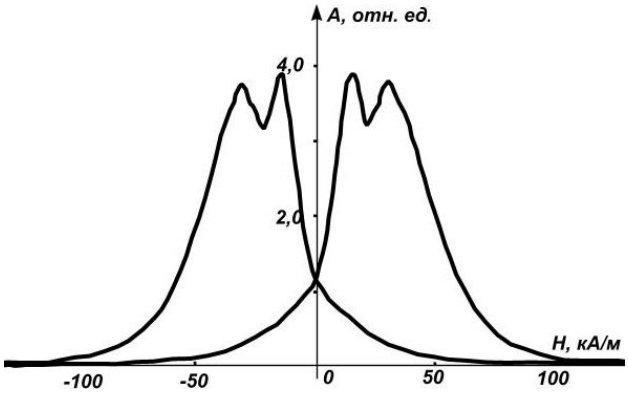
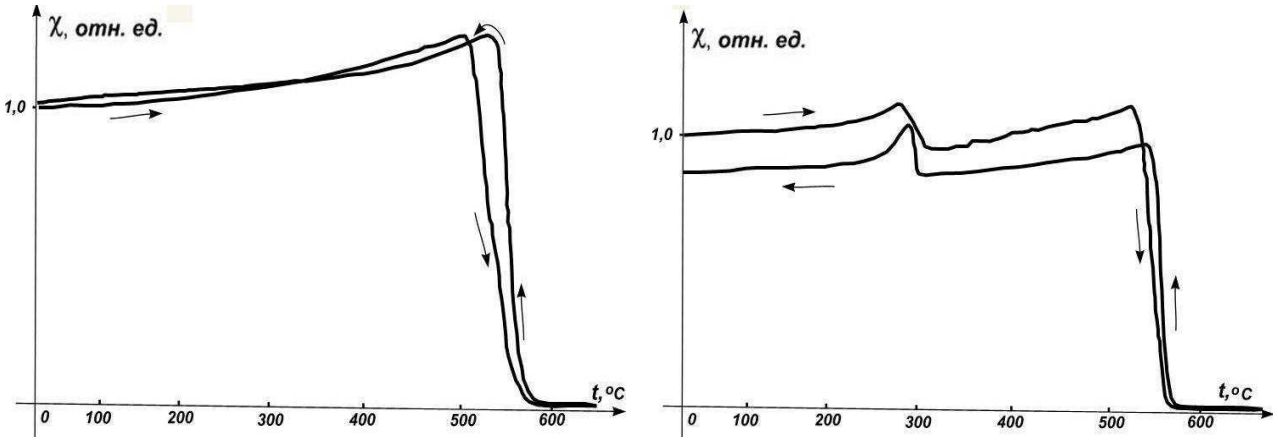


Рис. 5. Третий тип кривых МАЭ (ЗПЗ-17)

Образцы ***четвертого типа*** обладают двухвершинной кривой МАЭ с асимметрией левой (при возрастании магнитного поля) ветви кривой (рис. 7). Магнитное поле первого максимума кривой ~14 кА/м, второго – ~27 кА/м. Максимум асимметрии проявляется в магнитном поле ~минус 5,5 кА/м. Наличие аналогичной асимметрии на Естюнинском месторождении было



а) б)

Рис. 6. Термомагнитные кривые образцов третьего типа МАЭ: а – НПУ-15; б – ЮЗ-8

связано с присутствием пирротина с обратной намагниченностью относительно основной массы магнетита (Глухих и др., 2007). Термомагнитные кривые образцов

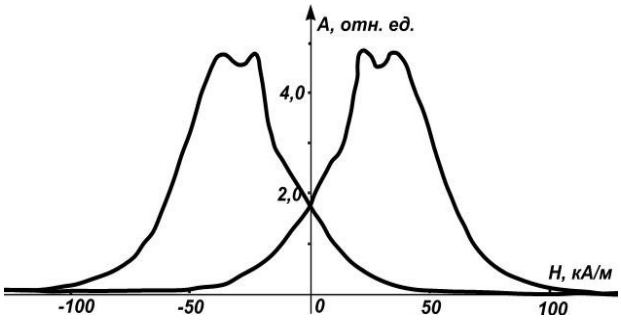


Рис. 7. Четвертый тип кривых МАЭ (ЮЗ-13)

обратимы и, практически, однофазны.

Температуры Кюри основной магнитной фазы 572–582 °С, что соответствует магнетиту. На некоторых термомагнитных кривых отмечается наличие дополнительных магнитных фаз с температурами переходов ~150 и ~450 °С (рис. 8).

В образцах ***пятого типа*** присутствует магнитная фаза, МАЭ которой не заканчивается в диапазоне применяемых магнитных полей (рис. 9а и 9б), то есть магнитная фаза не намагничивается до насыщения. На этом фоне из образцов пятого типа выделяется подтип 1, кривая МАЭ которого имеет один максимум в магнитном поле ~20 кА/м (рис. 9а). Диапазон проявления этой МАЭ находится в районе 42 кА/м. Визуально в таких образцах магнетит не отмечается, но на термомагнитной кривой наблюдаются две магнитные фазы (рис. 10а). Преобладающей является фаза с температурой Кюри 337 °С. По минералогическому описанию в образце (ЗПЗ-23) присутствует 80% пирротина.

Вторая фаза, присутствующая в незначительном количестве, представлена тонкой вкрапленностью магнетита с температурой Кюри 595 °С. Для второго подтипа образцов характерна двухвершинная кривая МАЭ (рис. 9б). Амплитуды максимумов могут быть различны и наблюдаются в магнитных полях ~13 и ~28 кА/м.

Термомагнитные кривые (рис. 10б) указывают на наличие двух магнитных фаз: пирротиновой с температурой Кюри 302–339 °С и магнетитовой с температурой Кюри 552–600 °С. По минералогическому

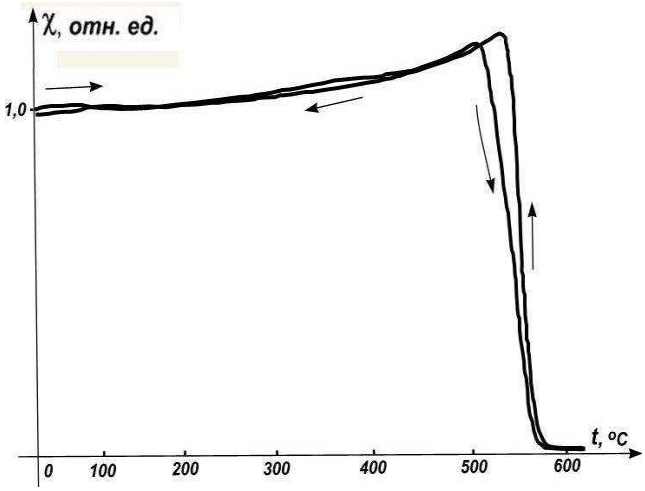


Рис. 8. Термомагнитная кривая образцов четвертого типа МАЭ (НПУ-12)

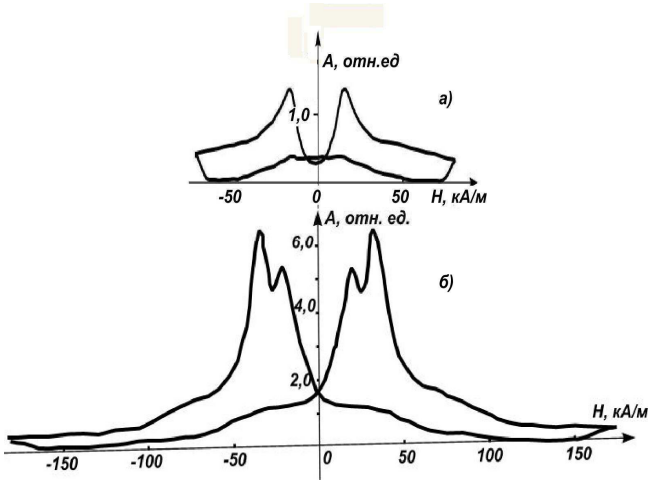


Рис. 9. Пятый тип кривых МАЭ: а – подтип 1 (ЗПЗ-23); б – подтип 2 (ЮЗ-11)

описанию содержание пирротина для образцов этого типа колеблется в пределах 20–55%, магнетита – от 3 до 70%. Пирротин представлен удлиненными шестоватыми кристаллами (рис. 11).

Известно (Горкунов и др., 2002), что максимумы на кривой МАЭ обусловлены движением доменных границ с различными энергетическими состояниями, и

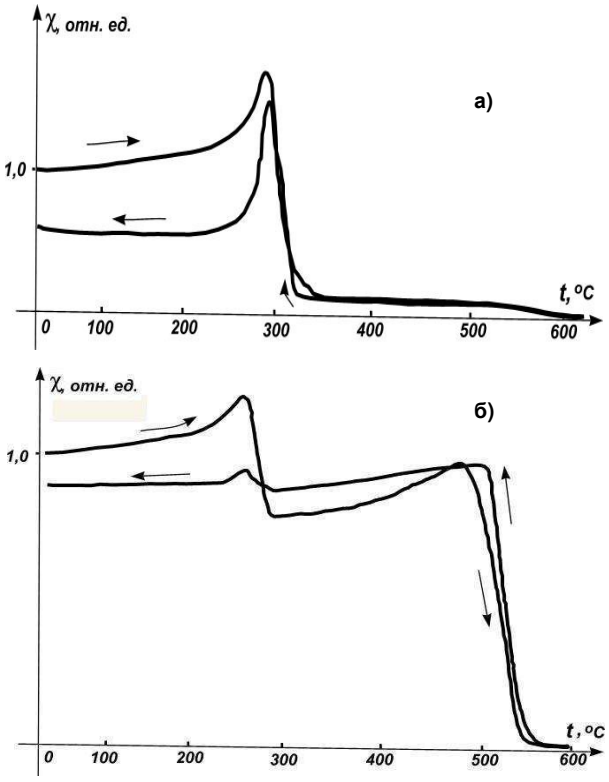


Рис. 10. Термомагнитные кривые образцов пятого типа МАЭ: а – подтип 1 (ЗПЗ-23); б – подтип 2 (ЮЗ-11, ось Х)

поэтому можно считать, что в форме кривой МАЭ находят отражение различные источники МАЭ. Взяв за основу один из наиболее четко выраженных максимумов, можно разложить кривую МАЭ на составляющие, которые дадут приближенную информацию об этих источниках. В данной работе они названы фазами. Но остается нерешенной проблема их идентификации с конкретным минералогическим образованием. Для исследованных образцов возможно предположение, что первая фаза связана с магнетитом, вторая – с пирротином, третья – с обротнонамагниченным пирротином второй генерации (или с магнетитом, об-

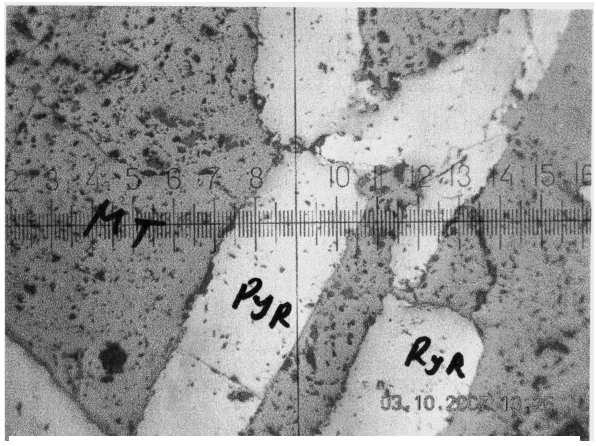


Рис. 11. Шлиф пирротина

разовавшимся по пирротину ?), четвертая – с тонкораспыленным магнетитом или магнетитом, затронутым процессами окисления.

Нельзя исключить и вариант, что все эти фазы присущи всем разновидностям магнитных минералов, но их проявление на кривых МАЭ зависит от каких-то пока неизвестных особенностей магнитной текстуры.

Результаты измерений по выделяемым на месторождении типам руд (богатые, бедные, вкрапленные) приведены в табл. 2.

В табл. 3 приведены средние значения параметров МАЭ выделенных фаз для разных типов образцов при их классификации по форме кривой МАЭ.

Анализ приведенных в табл. 2 и 3 данных также показывает, что принципиальных различий в средних значениях

Таблица 2. Параметры магнитоакустической эмиссии различных типов руд классификации по форме кривых. МАЭ Песчанского месторождения

Типы руд	Информационные параметры МАЭ													Магнитные свойства			
	тип, подтип	$H_{макс.}$; кА/м				амплитуда; отн. ед.				диапазон: кА/м				H_c; кА/м	θ, °C	θ, °C	тип кривой
		$H_{1ф}$	$H_{2ф}$	$H_{3ф}$	$H_{4ф}$	$A_{1ф}$	$A_{2ф}$	$A_{3ф}$	$A_{4ф}$	$Д_{1ф}$	$Д_{2ф}$	$Д_{3ф}$	$Д_{4ф}$				
	Западно-Песчанская залежь																
богатые	3	14,8	26,3	-	-	34,5	26,6	-	-	74	61	-	-	5,6	576	-	обр.
	4	13,9	26,9	-4,5	-	38,5	31,9	5,7	-	59	63	40	-	5,7	578	-	н/о
бедные	4	14,1	28,8	-4,8	-	15,0	21,0	2,0	-	54	88	32	-	5,6	-	-	-
	2	18,9	-	-	-	3,0	-	-	-	40	-	-	-	3,5	584	-	н/о
без магнет.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	325	н/о
	5_1	-	21,8	-	56,0	-	8,8	-	3,9	-	46	-	200	-	600	340	н/о
	Ново-Песчанский участок																
богатые	3	12,7	28,9	-	-	20,5	6,8	-	-	83	58	-	-	5,5	577	-	обр.
	4	12,9	28,8	-6,8	-	26,2	14,7	5,0	-	60	61	47	-	4,8	579	-	н/о
вкрапленные	3	11,9	26,9	-	-	5,9	2,3	-	-	75	45	-	-	5,2	-	-	-
	4	14,7	28,1	-7,5	-	35,3	15,2	6,6	-	70	68	58	-	4,9	-	-	-
бедные	3	11,7	28,4	-	-	17,8	6,3	-	-	83	67	-	-	4,5	-	-	-
без магнет.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	311	н/о
	Южная залежь																
богатые	3	14,7	26,8	-	-	69,2	29,6	-	-	81	59	-	-	6,8	583	332	обр.
	4	14,8	25,6	-1,8	-	55,8	32,8	9,5	-	57	62	47	-	5,6	-	-	-
	5_2	14,6	29,1	-	50,4	10,0	75,0	-	5,0	22	90	-	220	5,6	587	336	обр.
вкрапленные	3	15,4	23,7	-	-	21,4	14,7	-	-	56	60	-	-	5,2	-	-	-
	5_2	12,3	26,5	-	49,9	15,4	22,4	-	14,4	23	65	-	225	6,4	592	336	-

Таблица 3. Средние параметры МАЭ выделенных фаз для различных типов образцов Песчанского месторождения

Тип образца	Информационные параметры МАЭ												Магнитные свойства		
	$H_{макс}$, кА/м				амплитуда, отн. ед.				диапазон, кА/м				H_c, кА/м	$\theta_{1ф}$, ºС	$\theta_{2ф}$, ºС
	$H_{1ф}$	$H_{2ф}$	$H_{3ф}$	$H_{4ф}$	$A_{1ф}$	$A_{2ф}$	$A_{3ф}$	$A_{4ф}$	$Д_{1ф}$	$Д_{2ф}$	$Д_{3ф}$	$Д_{4ф}$			
первый	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	318
второй	18,9	-	-	-	3,0	-	-	-	40	-	-	-	3,5	584	-
третий	13,5	26,8	-	-	28,2	14,3	-	-	74	57	-	-	5,5	579	332
четвертый	14,1	27,5	-5,1		27,6	23,1	5,8		60	68	45		5,3	576	-
пятый, п1	-	21,8	-	56,0	-	8,8	-	3,8	-	46	-	200	-	600	340
пятый, п2	13,9	27,8	-	50,1	12,7	48,7	-	9,7	23	78	-	222	6,0	590	336

параметров МАЭ выделяемых фаз в различных тпах руд и образцов не наблюдается. Отмечаемое понижение знаичения магнитного поля максимумов первой и третьей фаз и коэрцитивной силы магнетитовых руд Ново-Песчанского участка может быть связано, как уже было указано выше, с особенностями залегания рудных тел.

Таким образом, выполненные исследования сульфидно-магнетитовых руд Песчанского месторождения, относящихся к скарновому типу образования, позволили выделить несколько магнитных фаз, являющихся источниками МАЭ:

– магнетит. Максимум МАЭ наблюдается в магнитном поле 13,9 кА/м, диапазон проявления МАЭ от 23 до 75 кА/м. Наблюдаемые вариации магнитного поля максимума МАЭ от 11,9 до 18,9 кА/м связаны с особенностями проявления процесса скарнообразования (удаление от интрузивного массива, состав контактирующих с известняками пород и др.);

– пирротин (моноклинный) и, возможно, магнетит, образовавшийся по пирротину. Максимум МАЭ отмечается в магнитном поле 26 кА/м, диапазон проявления от 46 до 78 кА/м;

– тонковкрапленный, возможно, затронутый процессами окисления магнетит. Максимум МАЭ в магнитном поле 53 кА/м, диапазон проявления > 200 кА/м;

– обратнонамагниченный пирротин. Максимум МАЭ в магнитном поле минус 5,1 кА/м, диапазон проявления ~45 кА/м.

Авторы выражают благодарность главному геологу Богословского рудоуправления Казанцеву А.В. за представленную для исследований коллекцию образцов.

Литература

Глухих И.И., Иванченко В.С., Угрюмова И.С. Экспериментальные исследования магнитоакустической эмиссии природных ферримагнетиков // Уральский геофизический вестник, 2000. № 1. С. 40–46.

Глухих И.И., Иванченко В.С., Уткин В.И. Магнитоакустическая эмиссия магнетитовых руд сложного генезиза // Доклады Академии наук, 2007. Т. 413. № 2. С. 251–253.

Глухих И.И., Фоминых В.Г. Магнитные свойства и состав титанолмагнетитов некоторых месторождений Урала // Методика магнитных измерений и интерпретации в геофизике: Сборник. Свердловск: УФАН СССР, 1970. С. 66–76.

Горкунов Э.С., Ульянов А.И., Хамитов В.А. Магнитоупругая акустическая эмиссия в ферромагнитных материалах. Влияние структурных изменений на магнитоупругую акустическую эмиссию (обзор) // Дефектоскопия, 2002. № 5. С. 86–112.

Кудрявцева Г.П. Ферромагнетизм природных оксидов. М.: Недра, 1998. 232 с.

Скарново-магнетитовые формации Урала: Средний и Южный Урал / Под ред. В.И. Смирнова, А.М. Дымкина. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. 212 с.