

МАГНИТОАКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИРОДНЫХ ПИРРОТИНОВ

В.С. Иванченко, И.И. Глухих, Л.Г. Строкина, К.Б. Алешин*, В.Ф. Рудницкий*

Институт геофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия

** Уральский государственный горный университет, 620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия*

Рассматриваются данные по изучению параметров эффекта магнитоакустической эмиссии на пирротинах из магнетитовых и колчеданных руд месторождений Урала. Показано, что различие в сигналах, в первую очередь, обусловлено разнообразными типами доменной структуры, образующейся при кристаллизации пирротина в форме пинакоидов или призм.

По параметрам магнитоакустической эмиссии выделяются пять типов пирротинов. Эта информация может быть использована в качестве типоморфных особенностей пирротинов различного генезиса.

Магнитоакустическая эмиссия, доменная структура, движение доменных стенок, пирротин, магнитное поле, ферримагнетик, антиферромагнетик.

MAGNETOACOUSTIC EMISSION OF NATURAL PYRRHOTITE

V.S. Ivanchenko, I.I. Glukhikh, L.G. Strokina, K.B. Aleshin, and V.F. Rudnitskii

We consider data of study of the parameters of magnetoacoustic emission performed on pyrrhotite from magnetite and pyrite ores from the deposits of the Urals. It is shown that the difference in signals is mainly due to different types of domain structure which forms during the crystallization of pyrrhotite as pinacoids or prisms.

Five types of pyrrhotite are recognized depending on the parameters of magnetoacoustic emission. This information can be used as typomorphic features of pyrrhotite of different geneses.

Magnetoacoustic emission, domain structure, movement of domain walls, pyrrhotite, magnetic field, ferrimagnetic material, antiferromagnetic material

ВВЕДЕНИЕ

Природный пирротин ($\text{FeS}_{(1+x)}$) широко распространен в некоторых типах сульфидных месторождений, где иногда является главным минералом руд и сопровождается рядом промышленно-ценных рудных минералов. Происхождение, как правило, эндогенное (магматическое, гидротермальное, также контактово-метасоматическое). Редко и в небольших количествах может возникать в экзогенных условиях — при диагенезе осадков [Рамдор, 1962].

Магнитные свойства пирротина зависят от структурного типа: троилит FeS и промежуточные гексагональные пирротины—антиферромагнетики, моноклинный пирротин—ферримагнетик с температурой Кюри 300—320 °С. В статье [Бродская, 1980а] было установлено, как изменяются магнитные свойства пирротинов в зависимости от их температурной предыстории. М.А. Грабовский и О.И. Жерденко [1964] исследовали доменную структуру пирротина с помощью оптического микроскопа. В Институте геофизики УрО РАН поведение доменной структуры изучается с помощью эффекта магнитоакустической эмиссии (МАЭ)¹. Преимуществом этого метода является получение информации о перестройке доменной структуры не только на поверхности исследуемого образца, но и во всем перемагничиваемом объеме.

При использовании эффекта магнитоакустической эмиссии в области дефектоскопии перемагничивание образцов происходит с частотой 50 Гц. Наиболее значимым параметром в неразрушающем контроле является амплитуда сигнала МАЭ. Ее величина напрямую связана с размером зерна исследуемого материала, наличием дефектов, температурой закалки, температурой отжига [Горкунов и др., 2002]. Перемагничивание с частотой 0.1 Гц искусственных ферромагнитных материалов приводит к очень резкому уменьшению амплитуды сигнала и увеличению времени на измерения. Однако на природных ферримагнетиках при частоте перемагничивания 0.1 Гц сигнал МАЭ хорошо регистрируется, и соотношение сигнал/шум достигает 30/1. При этом зависимость сигнала от величины намагничивающе-

¹ Явление магнитоакустической эмиссии, обусловленное возникновением акустических импульсов при перемагничивании ферромагнитного образца магнитным полем, было открыто в 1924 г. С.В. Хипсом и детально исследовалось в 1974 г. А.Е. Лордом и др. Широко используется при разработке методов неразрушающего контроля.

го поля имеет сложную зависимость и характеризуется разным количеством максимумов с различной амплитудой.

Ранее в работах [Иванченко, Глухих, 2009; Иванченко и др., 2012] было показано наличие эффекта магнитоакустической эмиссии в диапазоне частот 50—200 кГц для магнетитов и магнетитовых руд различного генезиса. Появление МАЭ в этом диапазоне частот объясняется смещением доменных границ при изменении магнитного состояния образца (перемагничивание внешним магнитным полем низкой частоты).

В работах [Иванченко и др., 2007; Глухих и др., 2007] рассматривается МАЭ сложных сульфидно-магнетитовых руд, в которых присутствие пирротина отмечается наличием дополнительного максимума на кривой зависимости амплитуды сигнала МАЭ от намагничивающего поля. Но целенаправленно внимание пирротину как источнику магнитоакустической эмиссии не уделялось. При использовании усредненных параметров МАЭ для типов руд не всегда можно было объяснить некоторые наблюдаемые эффекты и, в частности, наличие в образцах сильной анизотропии МАЭ. Поэтому возникла потребность изучения МАЭ образцов, магнитная минерализация которых представлена преимущественно пирротинном.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения магнитоакустической эмиссии выполнены на установке по методике, описанной в работах [Иванченко, Глухих, 2009; Иванченко и др., 2012], на кубических образцах размером 2.4 м^3 . Перемагничивание производится магнитным полем с частотой 0.1 Гц и амплитудой до 180 кА/м. Прием акустических сигналов осуществляется пьезокерамическими датчиками.

Частотный диапазон регистрации от 135 до 145 кГц. В качестве параметров МАЭ используется величина намагничивающего поля максимального сигнала МАЭ, диапазон проявления МАЭ и амплитуда сигнала. Получаемая в результате измерений зависимость МАЭ от приложенного магнитного поля является результатом аддитивного сложения МАЭ, вызванной различными источниками, для выделения которых применяется разложение общей кривой МАЭ на отдельные составляющие с одним максимумом. Таким единичным источником возбуждения МАЭ при изменении доменной структуры является группа доменных границ, обладающих определенной граничной энергией и степенью подвижности. Очевидно, что тип доменной структуры напрямую связан с генезисом образца. На рис. 1 приведен пример регистрации сигнала МАЭ и разложения общей кривой на отдельные составляющие, которые могут быть связаны с различными источниками МАЭ. На рис. 1 (кривая 1) показан сигнал магнитоакустической эмиссии при перемагничивании от $-H$ (-180 кА/м) до $+H$ ($+180 \text{ кА/м}$), а также сигнал МАЭ при перемагничивании от $+H$ ($+180 \text{ кА/м}$) до $-H$ (-180 кА/м) — кривая 2. Для исследования эффекта анизотропии МАЭ измерения проводились при направлениях намагничивающего поля перпендикулярно трем граням кубического образца.

ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ

Для исследования были отобраны образцы пирротинов из медно-цинковых руд Узельгинского месторождения (1Р, 3Р, 5Р, 6Р, 8Р и 12Р) и образцы, содержащие преимущественно пирротинную минерализацию из магнетитовых руд Естунинского (8420/1231.7) и Новопесчанского (Южная залежь: обр. ЮЗ-10, ЮЗ-11; Западно-Песчанская залежь: обр. ЗПЗ-9, ЗПЗ-23) месторождений.

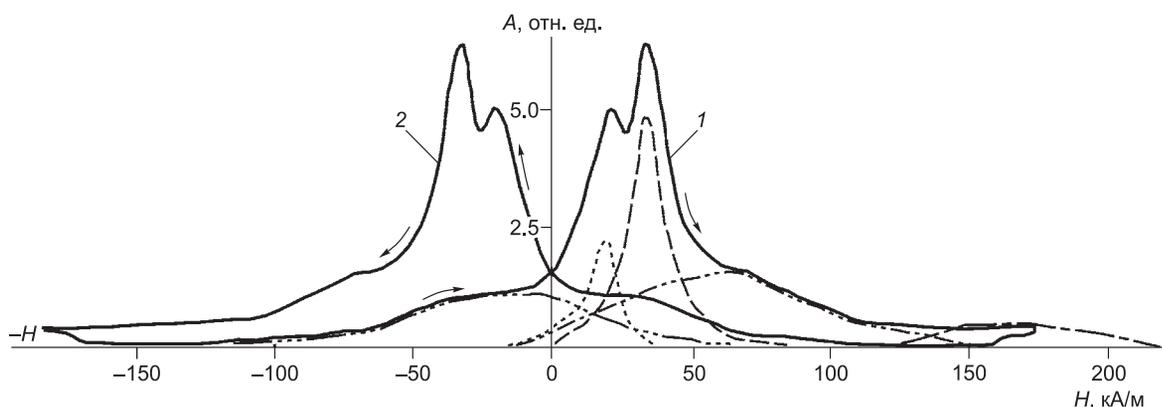


Рис. 1. Разложение кривой МАЭ на составляющие.

A — амплитуда сигнала. Описание см. в тексте.

Естюнинское месторождение относится к субформации слаботитанистых магнетитовых руд и приурочено к западному экзоконтакту Тагильского сиенит-диоритового массива [Скарново-магнетитовые формации..., 1989]. Новоестюнинская рудоносная зона, откуда отобран образец для исследований [Рудницкий и др., 2000], залегает в мощной толще интенсивно метаморфизованных кислых вулканитов. На месторождении выделяется несколько типов руд, отличающихся по парагенезису минералов, по текстурным и структурным особенностям, по характеристикам магнетита в них [Фоминых, 1981]. Наиболее разнородной является группа сплошных руд, которые, по-видимому, являются результатом перекристаллизации (дробление, наложение скарнового процесса и сульфидной минерализации) ранее образованных руд. Обр. 8420/1231.7 отобран из зоны распространения этого типа руд. При минералогическом описании установлено, что большая часть рудной вкрапленности в образце представлена пирротинном. Пирротин аллотриоморфно-зернистый, с редкими идиоморфными зёрнами. Средний размер зёрна 1 мм. Кроме того, отмечены изометричные, иногда идиоморфные зёрна магнетита различного размера с решетчатой и пластинчатой структурами распада.

Новопесчанское 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]. Рудные залежи сложены сплошными магнетитовыми, сульфидно-магнетитовыми и вкрапленными скарново-магнетитовыми рудами. Сульфидное оруденение наложено на магнетитовое. Для исследований МАЭ отобраны образцы пирротиновых руд с Западно-Песчанской (ЗПЗ) и Южной (ЮЗ) залежей.

В обр. ЗПЗ-9 магнетит отсутствует, сульфидная минерализация (общее количество 30 %) представлена пирротинном (10 %), халькопиритом (10 %), пиритом и арсенопиритом по 5 %. Встречающийся пирротин, по-видимому, представлен промежуточной разновидностью, поскольку при полном отсутствии кривой перемагничивания начальная магнитная восприимчивость все же отмечается. Термомагнитная кривая необратима. Температура Кюри магнитной фазы 310—325 °С. При вторичном нагреве появляется магнетитовая (температура Кюри 544 °С) фаза [Иванченко и др., 2007].

По минералогическому описанию в обр. ЗПЗ-23 магнетит также отсутствует. Половину образца составляет сульфидная группа, представленная на 80 % пирротинном и на 10 % халькопиритом и пиритом. Пирит импрегнирован в пирротин, причем его мелкие зёрна (≈ 0.02 мм) выполняют направления спайности пирротина, располагаясь цепочками субперпендикулярно либо в виде изогнутых ламелл. Структура пирротина гипидиоморфно-зернистая со средним размером зёрен 0.5 мм. В отдельных зёрнах выявлена «субграфическая» структура, т.е. мельчайшие (≈ 0.001 мм) лейсты минерала расположены хаотически, местами они прямые, местами изогнуты (так называемые «мирмекиты»). Это свидетельствует о вторичной переработке (метаморфизме) данного зёрна. Кроме того, отмечается тесное взаимопоращение пирротин — пирит, причем пирит идиоморфен (практически идеальные кубы), а пирротин — ксеноморфен. Размер кубов пирита до 0.05 мм. Видны следы динамометаморфизма (зёрна волнообразно изогнуты). Точка Кюри по термомагнитной кривой 337 °С [Иванченко и др., 2007].

Обр. ЮЗ-10 практически нацело состоит из сульфидов, магнетита не более 3 %, и он пронизан тончайшими прожилками халькопирита. Содержание пирротина 30 %, пирита 40 %, халькопирита 20 %. Пирротин, как правило, располагается в оторочке халькопирита. При описании по ортогональным плоскостям (по сравнению с осью X) по оси Z наблюдается пирита 20 %, магнетита 20 %, пирротина 30 %, халькопирита 20 %; по оси Y — пирита 70 %, магнетита 20 %, пирротина 10 %, халькопирита 10 %. В структурном отношении в плоскости X пирротин аллотриоморфно-зернистый с размерами зёрен 0.7—3.0 мм; в плоскости Y — то же самое, но размер зёрен значительно больше — до 8 мм (до 20 %); в плоскости Z пирротина очень мало, единичные, хотя и достаточно крупные (до 1 мм) аллотриоморфные зёрна. Точка Кюри пирротина 302 °С [Иванченко и др., 2007].

В обр. ЮЗ-11 20 % магнетита, 20 % пирита, 5 % халькопирита, 55 % пирротина. Пирротин представлен удлиненно-шестоватыми кристаллами длиной до 15 мм и шириной до 1 мм (рис. 2). Пирит и халькопирит располагаются по периферии зёрен пирротина. Пирротин удлиненно-лучистый с мощностью зёрен от 0.3 до 1.5—2.0 мм. В плоскости Y аллотриоморфный пирротин. Более четко вы-

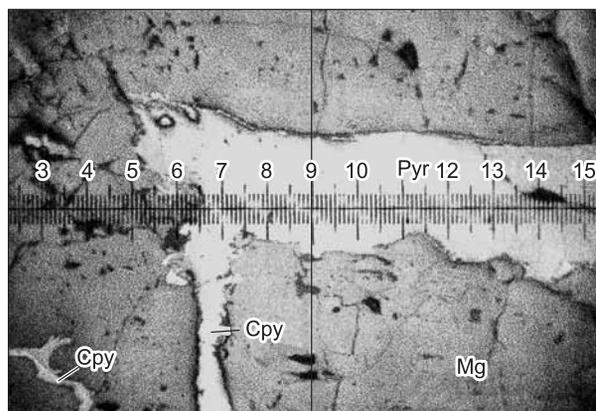


Рис. 2. Микрофотография аншлифа обр. ЮЗ-11.

Pyр — пирротин, Cpy — халькопирит, Mg — магнетит. Отраженный свет, увел. 40, николи параллельны.

ражена удлинённо-игольчатая (призматическая) структура пирротина. Соответственно, такую же структуру повторяет магнетит. Содержание пирротина до 70 %, магнетита до 30 %, халькопирита и пирита единичные зерна. В плоскости Z пирротина 50 %, магнетита 30 %. Иногда видны линейно-удлинённые обособления. Пирротин уже не такой ровный, а, скорее, спутанно-волоконистый и представлен как аллотриоморфно-зернистыми, так и удлинённо-лучистыми разностями. Содержание пирита 20 %, халькопирита единичные зерна. Точка Кюри пирротина по термомагнитной кривой 335 °С.

Узельгинское медно-цинковое месторождение расположено в юго-западной части Малоучалинской антиклинали [Прокин, 1987]. В геологическом разрезе месторождения выделяются пять толщ. Четвёртое рудное тело, откуда отобраны образцы для исследований, частично расположено в толще основных эффузивов и представляет пологозалегающую пластообразную линзу, на 90 % сложенную сплошными рудами. Пирротиновые руды занимают центральную часть четвёртого рудного тела. Содержание пирротина от 1 до 95 %, Размер зерен пирротина — от нескольких до 60 мкм. Выделяются модификации пирротина — гексагональная и моноклинная [Пшеничный, 1979]. Относительно генезиса руд принята гипотеза вулканогенно-осадочного образования. Образцы нацело состоят из массивного пирротина. Средний размер зерна — 0.3—0.4 мм. Крайне редко видны единичные мельчайшие (до 0.03 мм) зерна халькопирита и практически субмикроскопические зерна магнетита. Общее количество нерудных включений достигает 5—7 %. В образцах 5P, 6P, 8P и 12P встречаются единичные мелкие зерна (≈ 0.05 мм), псевдоморфозы магнетита по гематиту (мушкетовит).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измеренная на образцах ЗПЗ-23 и 8420/1231.7 МАЭ при трех направлениях намагничивающего поля (в трех плоскостях) различается незначительно, в большинстве случаев в небольших пределах может меняться амплитуда сигнала, поэтому на рис. 3 представлены измеренные кривые МАЭ по одному направлению за один цикл перемагничивания $-H \rightarrow +H \rightarrow -H$.

Исключение составляют обр. ЮЗ-10, ЮЗ-11, для которых наблюдается резкое отличие кривых как по амплитуде, так и по форме при перемагничивании по всем трем направлениям, поэтому результаты измерений приведены полностью (рис. 4).

По выделенным группам доменных границ (единичные источники МАЭ), смещение которых вызывает максимум амплитуды МАЭ в определенном магнитном поле, выделяются несколько типов образцов.

Первый тип — образцы, не обладающие магнитоакустической эмиссией.

Второй тип — образцы, магнитоакустическая эмиссия которых обусловлена одной группой доменных границ и проявляется в диапазоне полей от 10 до 60 кА/м с максимумом в области 22—24 кА/м; выделение дополнительной группы доменных границ (МАЭ с максимумом 32—39 кА/м) достаточно условно.

Третий тип — образец, магнитоакустическая эмиссия которого вызвана тремя группами доменных границ и проявляется в диапазонах полей от -5 до $+55$, от 8 до 158, от -75 до $+59$ кА/м и соответственно с максимальными значениями 23—25, 67—75, $-8 \dots -9$ кА/м.

Четвёртый тип — образец, магнитоакустическая эмиссия которого обусловлена тремя группами доменных границ и регистрируется в области полей от -72 до $+94$, от -40 до $+120$, от -95 до $+41$ кА/м с максимумами соответственно 11, 40 и -27 кА/м.

Пятый тип — образцы, магнитоакустическая эмиссия которых вызвана смещением пяти групп доменных границ и проявляется соответственно в диапазоне полей от 0 до 38, от -2 до $+84$, от 0 до 160, от -120 до $+245$, от -137 до $+104$ кА/м с максимальными значениями 16.7—19.0, 30—32, 53—80, 95—175 и $-40 \dots -13$ кА/м.

В образцах четвёртого и пятого типов, магнитоакустическая эмиссия которых имеет максимумы в полях 11—20 кА/м, отмечается магнетит. Последний присутствует, но в очень незначительном количестве, и в образцах второго типа с условно выделяемой МАЭ с максимумом в полях 32—39 кА/м.

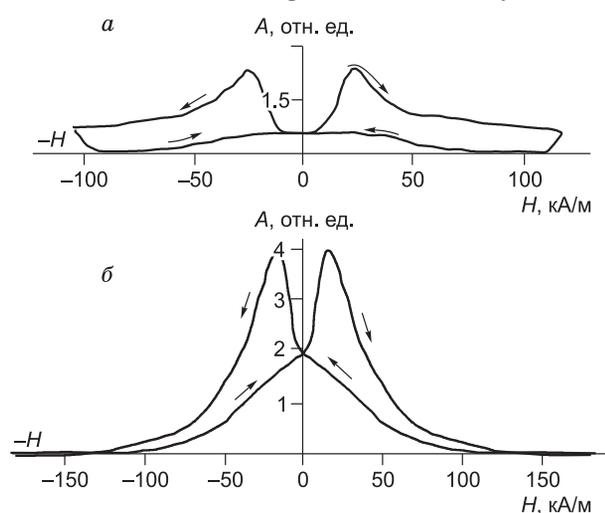


Рис. 3. Кривая МАЭ обр. ЗПЗ-23 (а) и обр. 8420/1231.7 (б).

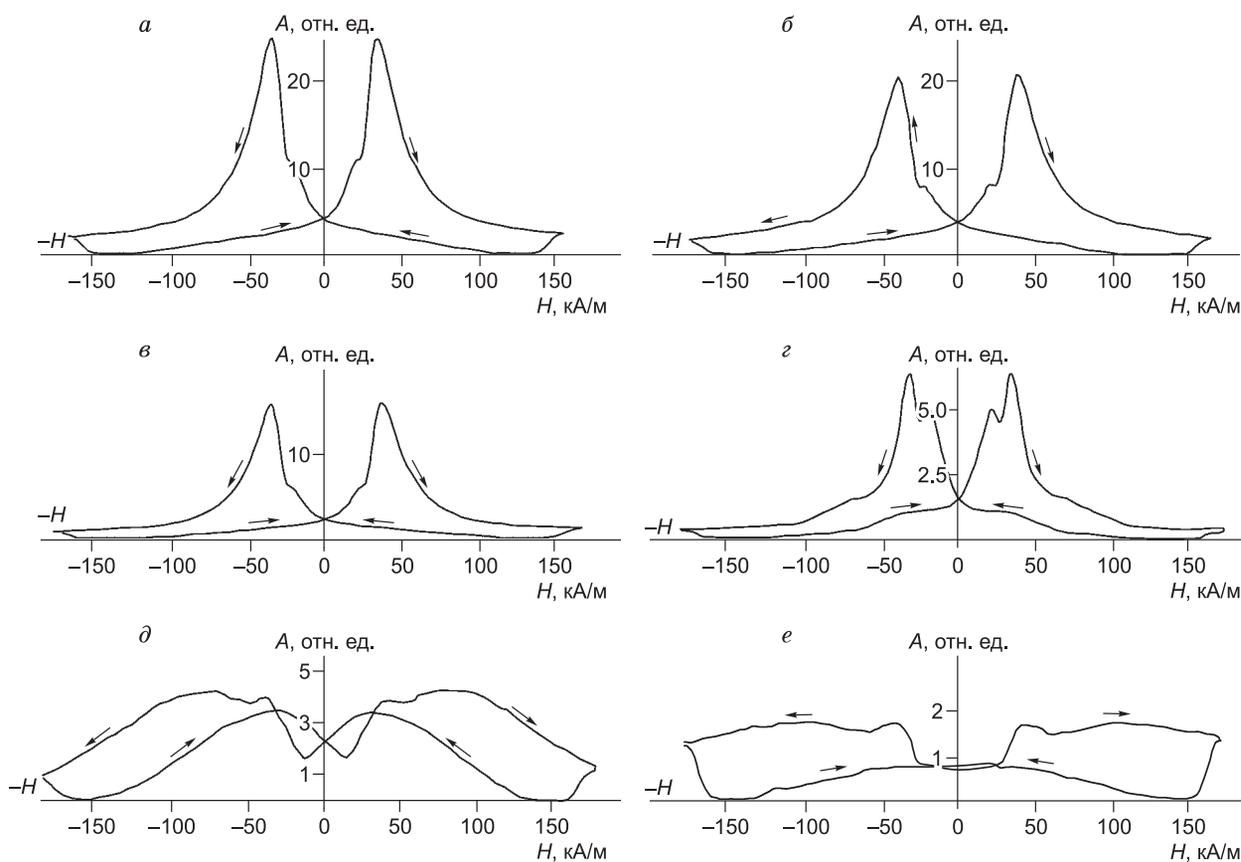


Рис. 4. Кривая МАЭ обр. ЮЗ-10 (а—в) и обр. ЮЗ-11 (г—е).

а, г — по оси X; б, д — по оси Y; в, е — по оси Z.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При исследовании связи магнитных свойств природных пирротинов $\text{FeS}_{(1+x)}$ с их составом [Нагата, 1965; Бродская и др., 1973; Бродская, 1980б] установлено, что весь ряд пирротинов при комнатной температуре разделяется на три области: $0 < x < 0.1$ — антиферромагнитную; $0.1 < x < 0.14$ — ферри-магнитную; $x \approx 0.1$ — промежуточную.

Доменная структура пирротинов разного генезиса, ее связь с присутствием различных фаз и особенности смещения доменных границ при перемагничивании детально изучены в работах А.М. Грабовского и О.И. Жерденко [1963, 1964, 1965]. Ими было показано, что начало смещения доменных границ и их исчезновение происходит в различных по величине магнитных полях при кристаллизации пирротина или в виде пинакоидов, или в виде призм. На плоскостях пинакоида движение доменных границ начинается при 4.4 кА/м (выполнен пересчет из данных, приведенных в указанных работах в эрстедах). Наиболее активно движение доменных границ — в поле 32 кА/м, а их исчезновение — при 72 кА/м. При наложении намагничивающего поля перпендикулярно плоскости движения границ и их исчезновение происходят в значительно меньших полях (1.6 и 22 кА/м). Доменные структуры на поверхности призмы более стабильны. В этом случае движение доменных границ начинается при 7.4 кА/м. При величине 59 кА/м происходит укрупнение доменов, а в поле 90 кА/м начинается уменьшение числа границ. При наложении перпендикулярного поля изменение доменной структуры начинается в поле 10.4 кА/м, а укрупнение доменов и исчезновение границ происходит в поле 101.4 кА/м и более. Такое различие динамики доменных структур авторами объясняется присутствием нескольких осей легкого намагничивания в пинакоидах и одной оси легкого намагничивания в призме при большом коэффициенте анизотропии. Кроме того, в работе [Грабовский, Жерденко, 1965] было отмечено появление в сильных полях доменной структуры в антиферромагнитном пирротине при наличии включений ферримагнитной фазы. В однородном же антиферромагнитном пирротине и на зернах, близких по размеру к однодоменным, доменная структура не наблюдалась. Таким образом, магнитоакустическая эмиссия

пирротиновой минерализации при кристаллизации в форме пинакоидов будет наблюдаться в более слабых намагничивающих полях ($\approx 4\text{--}70$ кА/м), чем при кристаллизации в форме призм ($\approx 7\text{--}101$ кА/м и выше). А также возможно появление МАЭ в области сильных полей.

Используя полученную информацию по исследованным образцам, можно сделать следующие выводы. В обр. ЗПЗ-9 пирротин (первый тип) представлен антиферромагнитной разновидностью, не образующей доменной структуры. Отмечается слабая начальная магнитная восприимчивость и безгистерезисная динамическая кривая перемагничивания, что может быть обусловлено однодоменностью зерен ферримагнитной фазы. МАЭ в этой ситуации отсутствует. Образцы аналогичного типа встречаются и на Узельгинском месторождении.

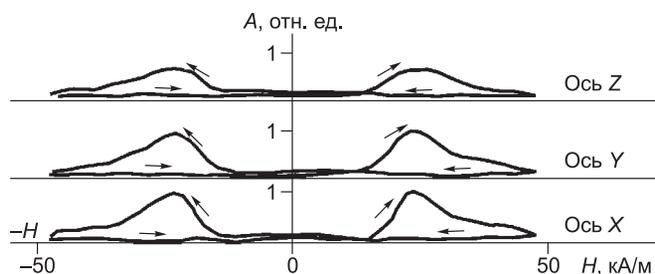
В образцах Узельгинского месторождения изменение доменной структуры пирротинов (второй тип) вызывает магнитоакустическую эмиссию в диапазоне от 11 до 61 кА/м (максимум в поле 22—24 кА/м) (рис. 5). Анизотропия МАЭ практически отсутствует. Эти данные позволяют предполагать, что пирротин вулканогенно-осадочного образования со слабыми ферримагнитными свойствами (небольшая амплитуда сигналов МАЭ) кристаллизовался в форме пинакоидов. Процесс мушкетовитизации не оказывает влияния на МАЭ.

В обр. ЗПЗ-23 доменная структура пирротина (третий тип) аналогична доменной структуре образцов Узельгинского месторождения. Магнитоакустическая эмиссия отмечается в интервале от -5 до $+55$ кА/м, максимум МАЭ в поле 23—25 кА/м (см. рис. 3, а). Анизотропия МАЭ практически отсутствует. Для этого образца характерно проявление магнитоакустической эмиссии в диапазоне полей от -17 до $+158$ кА/м с максимумом 67—75 кА/м, что может быть объяснено появлением доменной структуры в антиферромагнитной матрице при наличии ферримагнитных включений [Грабовский, Жерденко, 1963] или присутствием призматических форм кристаллизации. Отсутствие анизотропии МАЭ в значительной мере свидетельствует о кристаллизации пирротина в форме пинакоидов и неоднородности антиферромагнитной матрицы.

Магнитоакустическая эмиссия обр. 8420/1231.7 (Естюнинское месторождение) (см. рис. 3, б) обусловлена кроме пирротина вкрапленностью магнетита. Для магнетита Естюнинского типа характерно проявление магнитоакустической эмиссии в диапазоне от -18 до $+37$ кА/м и с максимумом в поле 9.6 кА/м [Иванченко и др., 2012], поэтому МАЭ, наблюдаемую в интервале от -72 до $+94$ кА/м и с максимумом в поле 11 кА/м, можно считать связанной с магнетитовой вкрапленностью. Магнитоакустическая эмиссия в диапазоне полей от -40 до $+120$ кА/м и с максимумом в поле 40 кА/м обусловлена изменением доменной структуры пирротинов (четвертый тип), кристаллизовавшихся в форме призм.

В обр. ЮЗ-10 и ЮЗ-11 (Южная залежь Новопесчанского месторождения) магнитоакустическая эмиссия вызвана изменением доменной структуры пирротина и магнетита. Для магнетитов этого месторождения магнитоакустическая эмиссия наблюдается в диапазоне от -18 до $+80$ кА/м и с максимумами в полях 18—21 и 37 кА/м [Иванченко и др., 2012]. МАЭ, обусловленная присутствием пирротина, отмечается для этих образцов в очень широком интервале от -129 до $+245$ кА/м и вызвана несколькими источниками, а наличие анизотропии МАЭ свидетельствует о кристаллизации пирротина в форме призм. Для обр. ЮЗ-10 (см. рис. 4, а—в) анизотропия проявляется в том, что смещение границ при перестройке доменной структуры в одном направлении вызывает появление МАЭ от -17 до $+235$ кА/м с максимумом в поле 108 кА/м и амплитудой сигнала 3.9 отн. ед., а при перемагничивании по двум другим направлениям от 0 до 106 кА/м (максимумы в полях 50 и 53 кА/м, амплитуды сигналов 3.0 и 4.8 отн. ед.) и от -129 до $+245$ кА/м (максимумы в полях 57 и 64 кА/м, амплитуды сигналов 4.8 и 3.0 отн. ед.). МАЭ с максимальной амплитудой в магнитных полях более 60 кА/м может быть обусловлена как повышенной жесткостью закрепления доменных границ в призматических кристаллах, так и неоднородностью антиферромагнитной матрицы.

Еще более ярко анизотропия МАЭ отмечается на обр. ЮЗ-11 (см. рис. 4, з—е). При намагничивании по одной из осей (см. рис. 4, з) МАЭ наблюдается от -12 до $+38$ кА/м (максимум в поле 19 кА/м, амплитуда 2.3 отн. ед.) и от 0 до 80 кА/м (максимум в поле 32 кА/м, амплитуда 3.8 отн. ед.), как уже отмечалось выше, что характерно для магнетитовой составляющей для этого месторождения. При наблюдении по другим осям (см. рис. 4, д, е) МАЭ, связанная с магнетитовой минерализацией, отмечается



от 20 до 60 кА/м с максимумом в поле 40 кА/м и амплитудой менее 1.0 отн. ед. В интервале от 0 до 160 кА/м (максимум в поле 80 кА/м, амплитуда 1.6 отн. ед.) МАЭ связана с изменением доменной структуры пирротинов, кристалли-

Рис. 5. Кривая МАЭ обр. 6Р.

зовавшихся в форме призм, а в диапазоне от 135 до 215 кА/м (максимум в поле 175 кА/м, амплитуда сигнала 0.5 отн. ед), вероятнее всего, обусловлена изменением доменной структуры, появляющейся в антиферромагнитной матрице при ферромагнитной неоднородности в больших полях [Грабовский, Жерденко, 1965] (см. рис. 4, *з*). При намагничивании по другим направлениям (см. рис. 4, *д*, *е*) на зернах пирротина образуется доменная структура, жесткость закрепления доменных границ которой приводит к проявлению МАЭ в магнитных полях от -32 до $+230$ кА/м с максимумами в полях 95 и 111 кА/м и амплитудами соответственно 4.0 и 1.7 отн. ед. Из суммарной кривой МАЭ по одному из направлений (см. рис. 4, *д*) возможно выделение сигнала МАЭ, характерного для призматических пирротинов с максимумом в поле ~ 75 кА/м и амплитудой ~ 1 отн. ед.

Для образцов пирротинов с Евстунинского и Новопесчанского месторождений наблюдается МАЭ на нисходящей ветви кривой перемагничивания (см. рис. 3, 4). Для призматических кристаллов диапазон полей, в которых встречается этот эффект, от -140 до $+104$ кА/м с максимумами в полях $-13\dots -40$ кА/м и соответственно для пинакоидов от -75 до $+59$ кА/м и $-8.3\dots -8.5$ кА/м. Появление МАЭ в этой области полей может быть связано с участками (зернами) обратнонамагниченных пирротинов, поскольку сульфидная стадия процесса рудоотложения является наложенной на раннюю магнетитовую стадию [Скарново-магнетитовые формации..., 1989]. В такой ситуации не исключено образование естественной обратной намагниченности вновь образованных минералов под влиянием намагниченности вмещающих рудных тел.

ВЫВОДЫ

Магнитоакустическая эмиссия пирротинов отражает динамику движения доменных границ при перемагничивании. Разложение общего сигнала МАЭ на отдельные составляющие, характеризующиеся диапазоном намагничивающего поля, в котором наблюдаются эти сигналы, значением поля максимума и амплитудой, позволяет различать доменные структуры, образующиеся в ферромагнитных пирротинах при кристаллизации их в различных формах (пинакоид и призма). Для пинакоидов смещение доменных границ вызывает магнитоакустическую эмиссию в диапазоне намагничивающих полей от -5 до $+61$ кА/м при наиболее интенсивном движении границ в намагничивающем поле $22\text{—}25$ кА/м. В призматических кристаллах магнитоакустическая эмиссия, обусловленная смещением доменных границ, наблюдается в намагничивающих полях от 0 до 160 кА/м, с максимальными значениями $40\text{—}80$ кА/м. Для пинакоидов доменные структуры, образующиеся при намагничивании по трем перпендикулярным направлениям, однотипны, что проявляется в отсутствии анизотропии МАЭ. Для призм и игольчатых кристаллов доменные структуры отличаются, анизотропия МАЭ проявляется достаточно сильно.

Наличие неоднородного строения ферромагнитной матрицы вызывает в сильных магнитных полях появление дополнительной доменной структуры в антиферромагнитном пирротине. Появление этой дополнительной доменной структуры и объясняет магнитоакустическую эмиссию с максимальными значениями в намагничивающих полях от 64 до 175 кА/м.

Магнитоакустическая эмиссия, возникающая на нисходящей ветви кривой перемагничивания (диапазон намагничивающих полей от -120 до $+104$ кА/м, максимальные значения $-40\dots -83$ кА/м), позволяет установить наличие обратнонамагниченных участков (зерен) пирротина.

ЛИТЕРАТУРА

Бродская С.Ю. Пирротин как геотермометр повторного нагрева породы // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1980а, № 3, с. 48—55.

Бродская С.Ю. Магнитные свойства пирротина и их роль в изучении условий формирования горных пород // Решение геологических задач геомагнитными методами. Ч. 1. М., Наука, 1980б, с. 73—84.

Бродская С.Ю., Ветошкин Н.Д., Жерденко О.И. Связь магнитных свойств природных пирротинов с их составом // Физика Земли, 1973, № 2, с. 112—120.

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.

Глухих И.И., Иванченко В.С., Уткин В.И. Магнитоакустическая эмиссия магнетитовых руд сложного генезиса // ДАН, 2007, т. 413, № 2, с. 231—253.

Грабовский М.А., Жерденко О.И. О доменной структуре пирротина // Магнетизм горных пород и палеомагнетизм. Материалы Пятой Всесоюзной конференции по палеомагнетизму. Красноярск, Изд-во СО АН СССР, 1963, с. 15—23.

Грабовский М.А., Жерденко О.И. Доменная структура пирротинов различного генезиса // Геология рудных месторождений, 1964, № 3, с. 90—97.

Грабовский М.А., Жерденко О.И. Сдвоенная доменная структура некоторых пирротинов // Настоящее и прошлое магнитного поля Земли. М., Наука, 1965, с. 110—117.

Иванченко В.С., Глухих И.И. Экспериментальное исследование магнитоакустической эмиссии природных ферромагнетиков. Екатеринбург, УрО РАН, 2009, 92 с.

Иванченко В.С., Глухих И.И., Строкина Л.Г., Хейнсон А.П., Алешин К.Б. Магнитоакустическая эмиссия магнетитовых руд Песчанского месторождения // Уральский геофизический вестник, 2007, № 4, с. 23—30.

Иванченко В.С., Глухих И.И., Строкина Л.Г., Хейнсон А.П. Магнитоакустическая эмиссия магнетитов // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (2), с. 277—284.

Нагата Т. Магнетизм горных пород. М., Мир, 1965, 357 с.

Прокин В.А. Закономерности размещения колчеданных месторождений Южного Урала. М., Недра, 1987, 173 с.

Пшеничный Г.Н. Пирротиновые руды Узельгинского медно-колчеданного месторождения, их минералогия, строение и некоторые особенности формирования // Минералогия и геохимия сульфидных месторождений и рудных комплексов Южного Урала. Уфа, БФ АН СССР, 1979, с. 3—17.

Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М., Изд-во иностр. лит., 1962, 585 с.

Рудницкий В.Ф., Абрамова Н.А., Алешин К.Б., Матияш В.В. Тектурно-структурные особенности магнетитовых руд Новоестюнинской зоны Естюнинского месторождения (Средний Урал) // Изв. УГГГА. Сер. геология и геофизика, 2000, вып. 10, с. 128—132.

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

Фоминых В.Г. Естюнинский тип малотитанистых магнетитовых руд на Урале // Докл. АН СССР, 1981, т. 261, № 5, с. 1209—1211.

*Рекомендована к печати 3 сентября 2013 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию
22 июля 2013 г.*