ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(7):14-28
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 550.382.3 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_14

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТРУДНООБОГАТИМЫХ РУД ГУСЕВОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В.С. Иванченко[1], И.И. Глухих[1], А.Г. Вдовин[1], Н.А. Белоглазова[1], П.Б. Ширяев[2]

[1] Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия, e-mail: ivanchenko@mail.ru
[2] Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Работа является продолжением исследований, проводимых на Гусевогорском месторождении в последние годы. Наряду с легкообогатимыми рудами на месторождении встречались участки с труднообогатимыми рудами, хотя содержание железа в них составляло более 20%. Были проведены исследования магнитной восприимчивости скважинным магнитометром в буровзрывных скважинах на таких участках. При этом содержание железа, полученное по корреляционным кривым между содержанием железа и магнитной восприимчивостью, часто не совпадали с данными химического анализа, проведенного на комбинате. На этих участках были отобраны образцы для исследования в лабораторных условиях. На образцах были измерены параметры магнитоакустической эмиссии, проведен термомагнитный анализ, изучены физические свойства; проведен минералогический анализ. Минералогическое описание, проведенное для исследуемых образцов с различной формой и размером зерен рудообразующих минералов, показало незначительные различия в их минералогическом составе. Определяющим фактором различия магнитных свойств является не количество магнетита, а форма его присутствия. Исследования показали, что обогатимость руд определяется дисперсностью (размером вкрапленности) магнетита. Этот параметр проявился в тех магнитных свойствах, которые мы измеряем. Полученные результаты должны быть использованы при оценке технологических свойств руд.

Ключевые слова: труднообогатимые титаномагнетитовые руды, магнитоакустическая эмиссия, термомагнитный анализ, магнитная восприимчивость, доменная структура, минералогический состав, содержание и дисперсность магнетита.

Благодарность: Работа выполнена в рамках темы № АААА-А19-119020690012-5 государственного задания ИГФ УрО РАН и № АААА-А18-118052590032-6 государственного задания ИГГ УрО РАН.

Для цитирования: *Иванченко В. С., Глухих И. И., Вдовин А. Г., Белоглазова Н. А., Ширяев П. Б.* Магнитные свойства труднообогатимых руд Гусевогорского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 7. – С. 14–28. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-7-0-14.

Magnetic properties of rebellious ore of Guseva Gora deposit

V.S. Ivanchenko[1], I.I. Glukhikh[1], A.G. Vdovin[1], N.A. Beloglazova[1], P.B. Shiryayev[2]

[1] Institute of Geophysics of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, e-mail: ivanchenko@mail.ru
[2] Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Abstract: This study continues the research implemented in the Guseva Gora deposit for some years past. The free-milling ore sites alternate with the areas of rebellious ore although the iron

© В.С. Иванченко, И.И. Глухих, А.Г. Вдовин, Н.А. Белоглазова, П.Б. Ширяев. 2021.

content of such ore is more than 20%. In such rebellious ore areas, magnetic susceptibility was tested by downhole magnetometers in blast holes. The data of iron content from the iron content–magnetic susceptibility correlation curves often disagreed with the chemical analysis results. Furthermore, samples of ore were taken in the tested sites for laboratory examination. The magnetoacoustic emission parameters of the samples were measured, their thermomagnetic analysis was performed, and the physical properties were studied. The samples were also subjected to the mineralogical analysis. The mineralogical description of the test samples, with different shapes and sizes of grains of ore-forming minerals, showed some minor differences between them. Evidently, the determinant of the difference in the magnetic properties is not the quantity of magnetite but the form of its occurrence. Processibility of ore is governed by the degree of dispersion of magnetite (size of droplets). This parameter shows itself in the magnetic properties measured. The research findings must be used in assessment of process properties of ore.

Key words: rebellious titanium–magnetite ore, magnetoacoustic emission, thermomagnetic analysis, magnetic susceptibility, domain structure, mineral composition, magnetite content and dispersiveness.

Acknowledgements: This work was carried out within the framework of the topic no. AAAAA 19-119020690012-5 of the state task of the IGF of the Ural Branch of the RAS and No. AAAAA 18-118052590032-6 of the state task of the IGG of the Ural Branch of the RAS.

For citation: Ivanchenko V. S., Glukhikh I. I., Vdovin A. G., Beloglazova N. A., Shiryayev P. B. Magnetic properties of rebellious ore of Guseva Gora deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(7):14-28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-7-0-14-28.

Введение

Для титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения характерны разные морфогенетические типы текстур — массивные, вкрапленные, пятнистые, пятнисто-вкрапленные, вкрапленно-полосчатые, полосчатые, с преобладанием вкрапленных. Вкрапленные руды обычно представляют собой агрегат зерен титаномагнетита самых разных размеров — от тысячных долей до первых десятков миллиметров.

По материалам детальной разведки месторождения была предложена классификация руд по содержанию железа общего ($Fe_{общ}$) на богатые ($Fe_{общ}$ более 20%), средние ($Fe_{общ}$ от 16 до 20%), бедные ($Fe_{общ}$ от 14 до 16%) и некондиционные ($Fe_{общ}$ менее 14%).

Впоследствии такая классификация была признана неприемлемой, так как не учитывала главный параметр руд — извлечение железа магнитного в концентрат. Геологической службой Качканарского ГОКа была разработана классификация руд, учитывающая количественное соотношение пяти фракций титаномагнетита. Были выделены следующие типы: крупновкрапленные (крупность зерен > >3 мм), средневкрапленные (1–3 мм), мелковкрапленные (0,2–1 мм), тонковкрапленные (0,074–0,2 мм) и дисперсновкрапленные (<0,074 мм) [1, 2].

Наличие нескольких морфологических разновидностей вкрапленности титаномагнетита и широкий диапазон колебаний размеров зерен и агрегатов обусловливают текстурную неоднородность руд на месторождении и выступают в качестве одного из ведущих факторов, влияющих на эффективность обогащения [3]. Легкообогатимые руды — крупно- и средневкрапленные; труднообогатимые руды по текстурным критериям соответствуют дисперсно- и тонковкрапленной разновидности.

«По характеристикам минерального состава, текстурным и структурным особенностям вкрапленные титаномагнетитовые руды месторождения делятся

на три технологических сорта: нормальнообогатимые (содержание железа в магнитной фракции — 62,5% и более), труднообогатимые, содержащие 62,5–60,0% железа и весьма труднообогатимые — верлиты и полностью серпенимнизированные оливиновые пироксениты, содержащие менее 60,0% железа».

Наиболее оптимальной системой классификации руд с учетом, принятой на ГОКе технологии обогащения, оказалась упрощенная схема их разделения по технологическим типам и текстурным разновидностям [1] (табл. 1).

Ежегодно на Качканарском ГОКе «Ванадий» добывается около 50 млн т железной руды со средним содержанием железа в руде порядка 15%. Определение содержания железа в карьере осуществляется с помощью магнитных методов, а на обогатительной фабрике — с помощью химического анализа. Из-за различия в магнитных свойствах добываемых магнетитовых руд, особенно труднообогатимых, содержание железа, определяемое в карьере, зачастую не совпадает с содержанием железа, определяемого с помощью химического анализа. Как правило, содержание железа, определяемое в карьере по значению магнитной восприимчивости, выше, чем содержание железа, определяемое на обогатительной фабрике по химическому анализу. Магнитный метод опробования в карьерах основан на измерении магнитной восприимчивости горных пород в буровзрывных скважинах и использовании корреляционной зависимости при переходе к содержанию полезного компонента (железа) в массиве. Основные погрешности этого метода обусловлены вариациями коэффициента корреляции в зависимости от содержания элементов-примесей в титаномагнетите, структурно-текстурных особенностей руд и других геолого-геофизических факторов [4].

Дополнительные исследования магнитных свойств труднообогатимых титаномагнетитовых руд позволят более точно определять технологический тип руды, корректировать корреляционные зависимости между содержанием железа в руде и ее магнитной восприимчивостью, и тем самым повысить точность определения содержания железа в карьере, и, в итоге, эффективность извлечения полезных компонентов [5].

Физическая основа измерения магнитной восприимчивости горных пород приборами, применяемыми в составе геофизической станции «Карьер-2», со-

Таблица 1

Технологическая классификация титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения
Technological classification of Guseva Gora titanium–magnetite ore

Технологические типы руд	Технологические показатели при исходном содержании $Fe_{общ}$ 17%	Количество магнитных фракций 0–0,2 мм, %	Текстурные разновидности руд
Легкообогатимые	$\beta \geqslant 62{,}5$; $\nu = 7{,}0$; $\varepsilon = 66{,}0$	0–15	крупно- и средневкрапленные
Среднеобогатимые	$\beta = 62{,}2$; $\nu = 7{,}3$; $\varepsilon = 64{,}3$	15–50	мелковкрапленные
Труднообогатимые	$\beta \leqslant 60$; $\nu = 8{,}0$; $\varepsilon = 60{,}0$	50–100	тонко- и дисперсновкрапленные
β — содержание железа в концентрате, %; ν — содержание железа в «хвостах», %; ε — извлечение железа в концентрат, %.			

стоит в подмагничивании пород первичным электромагнитным полем генераторной катушки и измерении возникающего при изменении намагниченного состояния горных пород (наведенного, вторичного) электромагнитного поля. Амплитуда вторичного поля зависит от степени изменения намагниченности пород (величины магнитной восприимчивости). Основной процесс, который обуславливает изменение намагниченного состояния горных пород при значениях первичного поля, создаваемого применяемыми приборами, связан со смещением границ доменов, возникающих в титаномагнетитовых зернах. Формирование доменной структуры и ее динамика под воздействием приложенного магнитного поля определяется структурно-текстурными особенностями выделения магнитных минералов, наличием и распределением элементов-примесей, внутренними и внешними напряжениями и т.д., т.е. теми же факторами, которые практически предопределяют технологический тип руд.

Одним из эффективных методов исследования динамики смещения доменных границ является измерение магнитоакустической эмиссии, возникающей при перемагничивании среды одновременно со скачками Баркгаузена [6—8]. Экспериментальные результаты исследования магнитоакустической эмиссии природных ферримагнетиков (магнетитовые руды Естюнинского и Ново-Песчанского месторождений) приведены в работе [9], где показана принципиальная возможность выделения по параметрам магнитоакустической эмиссии генетических и структурных типов руд.

Результаты измерений

Для исследования в Северном карьере Качканарского ГОКа были отобраны образцы труднообогатимых титаномагнетитовых руд, представленных верлитами, оливиновыми и диаллаговыми пироксенитами с различной текстурой и структурой. Форма выделения рудного минерала от средневкрапленной до дисперсной. В комплекс измерений на образцах входило изучение магнитоакустической эмиссии (МАЭ), термомагнитные исследования и измерения магнитной восприимчивости. Для измерений параметров МАЭ и магнитной восприимчивости из отобранных образцов были изготовлены кубики с гранью 24 мм. Для термомагнитных исследований проба дробилась до стадии 1 мм и перемешивалась. В качестве параметров магнитоакустической эмиссии использованы: величина магнитного поля, при которой наблюдается максимальное значение; диапазон магнитных полей, в которых проявляется магнитоакустическая эмиссия и ее амплитуда [10, 11]. Измерения на образцах выполнены в трех направлениях. Намагничивающее магнитное поле направлялось вдоль плоскости куба. На этих же образцах на стандартом приборе КТ-3 выполнены измерения магнитной восприимчивости. Поправка за объем образца не вводилась. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Магнитоакустическая эмиссия

Все исследованные образцы труднообогатимых руд были разделены на три группы (см. табл. 2), которые характеризуются:

- отсутствием магнитоакустической эмиссии (образцы 4851/2, 4852/1, 4853/1, 4853/2, 4855/1, 4855/2, 4856/1, 4856/2, 4858/1, 4858/2, 4860/1);
- слабой магнитоакустической эмиссией (образцы 4851/1, 4952/2, 4860/2, 4861/1, 4861/2, 4862/1, 4862/2);
- средней магнитоакустической эмиссией (образцы 4854/1, 4854/2, 4857/1, 4857/2, 4859/1, 4859/2).

При анализе результатов измерений необходимо учитывать, что на Гусево-

Таблица 2

Результаты исследований магнитных свойств образцов труднообогатимых руд Гусевогорского месторождения
Studies of magnetic properties of rebellious ore samples from Guseva Gora deposit

№ образца	Параметры МАЭ				Точка Кюри, °С	Плотность, г/см^3	Магнитная восприимчивость, 10^{-3} ед. СИ	Описание образцов
	диапазон, кА/м	H_{max}, кА/м	амплитуда, отн. ед.	частота, кГц				
Отсутствие магнитоакустической эмиссии								
4851/2	–	–	–	138	508 573 569	2,87	15,3 15,7 17,1	Верлит (оливина более 60%), тонкозернистый
4852/1	–	–	–	138	489 557 560	3,30	9,7 9,3 9,3	Пироксенит оливиновый тонко-, средне-зернистый
4853/1	–	–	–	138	556 573	2,72	0 0 0	Верлит безрудный с прослойками плагиоклазита и рудного диаллага
4853/2	–	–	–	138	556 573	2,74	0 0 0	
4855/1	–	–	–	138	466 535 535	2,90	5,75 7,35 6,75	Верлит безрудный, дисперсный с процессами окисления и оливинозации
4855/2	–	–	–	138	466 535 535	2,92	5,15 5,15 6,00	
4856/1	–	–	–	138	495 571 575	3,42	15,8 15,8 15,0	Пироксенит оливиновый, тонко-, мелкозернистый,
4856/2	–	–	–	138	495 571 575	3,42	14,4 15,4 14,6	
4858/1	–	–	–	138	540 570	3,20	2,30 1,05 1,50	Прожилки верлита дисперсного в пироксените диаллаговом, среднезернистом
4858/2	–	–	–	138	540 570	3,03	5,70 4,03 3,75	
4860/1	–	–	–	138	503 565 561	3,41	15,6 13,8 15,6	Пироксенит диаллаговый, оливин и амфиболсодержащий, мелко-, среднезернистый

Слабая магнитоакустическая эмиссия								
4851/1	9,2–34,0 11,9–2,1 0–40,0	20,2; 27,5 3,7–31,2 3,0–39,0	0,47 0,31 0,47	138	508 573 569	2,87	16,6 17,4 17,4	Верлит (оливина более 60%), тонкозернистый,
4852/2	-13,7–7,4 -13,7–5,2 -13,7–5,2	27,4 27,4 27,4	0,79 0,44 0,44	138	489 557 560	3,43	15,2 17,7 16,2	Пироксенит оливиновый тонко-, среднезернистый,
4860/2	-55,3–7,6	16,0	0,31	138	503 565 561	3,43	16,6 16,6 16,0	Пироксенит диаллаговый, оливин и амфиболсодержащий, мелко-, средне-зернистый
4861/1	-23,6–5,7	11,3–16,7	0,53	138	500 570 571	3,34	16,6 16,4 17,3	Пироксенит оливиновый, дисперсный, с процессами окисления и оливинизации
4861/2	-60,0–0,0	-14,0–14,2	0,31	138	500 570 571	3,41	12,6 11,7 12,9	
4862/1	-48,2–3,2	13,0–21,0	0,44	138	460 563 563	3,58	24,2 25,0 24,5	Пироксен, диаллаговый оливин и амфиболсодержащий, мелко-, тонко-зернистый
4862/2	-37,5–6,4	10,7–32,1	0,50	138	460 563 563	3,52	18,5 19,5 19,5	
Средняя магнитоакустическая эмиссия								
4854/1	-29,0–3,8 -38,4–2,0 -49,2–1,9	14,6 15,4 15,4	4,35 2,90 1,91	138	500 556 556	3,47	32,0 40,8 42,0	Пироксенит оливиновый тонкозернистый со шлировым оруденением
4854/2	-43,2–6,9 -25,6–1,5 -35,0–4,6	13, 15,6 16,1	3,28 1,42 2,02	138	500 556 556	3,49	37,5 33,8 39,5	
4857/1	-45,0–7,1 -23,2–5,8 -27,8–4,7	16, 17,2 13,9	3.31 3,02 2,52	138	508 565 570	3,47	36,5 36,0 33,5	Пироксенит оливиновый, тонко-, мелкозернистый со шлировым оруденением
4857/2	-19,0–1,5 -30,0–8,3 -13,4–2,0	17,0 16,4 14,4	1,56 2,11 2,20	138	508 565 570	3,42	35,0 35,2 37,5	
4859/1	-30,7–5,9 -18,2–0,2 -14,8–9,2	17,6 17,2 15,7	1,58 1,01 0,60	138	475 565 565	3,50	20,2 20,3 17,9	Пироксенит оливиновый, тонко-, мелкозернистый,
4859/2	-21,4–3,5 -29,0–8,1 -31,5–8,4	17,1 0–29 9–45	0,79 0,79 0,79	138	475 565 565	3,40	17,1 17,9 17,1	

горском месторождении наблюдается неоднородность распределения рудных минералов, вследствие чего образцы, приготовленные из одного штуфа, могут относиться к разным группам по величине магнитоакустической эмиссии. Так, образцы 4852/1 и 4852/2, отобранные из одного штуфа, характеризуются отсутствием и слабой амплитудой МАЭ, соответственно. Такая же неоднородность наблюдается и в образцах 4860/1 и 4860/2.

Измерение МАЭ на образцах по трем взаимно перпендикулярным направлениям существенной анизотропии параметров магнитоакустической эмиссии не выявило. Используемая методика изучения магнитоакустической эмиссии предполагает, что исследуемый эффект МАЭ обусловлен процессом смещения доменных границ и их вынужденными колебаниями в точках задержки при наложении внешнего магнитного поля. Минералогическое описание, проведенное для исследуемых образцов с различной формой и размером зерен рудообразующих минералов, показало незначительные различия в их минералогическом составе. Очевидно, что определяющим фактором различия магнитных свойств является не количество магнетита, а форма его присутствия. Так, мелкодисперсный магнетит (титаномагнетит), образующий тонкие прожилки внутри клинопероксена и серпентинита, имеет однодоменную структуру, и для его перемагничивания, связанного с процессом вращения векторов, необходимы более сильные магнитные поля по сравнению с мелко- или средневкрапленным.

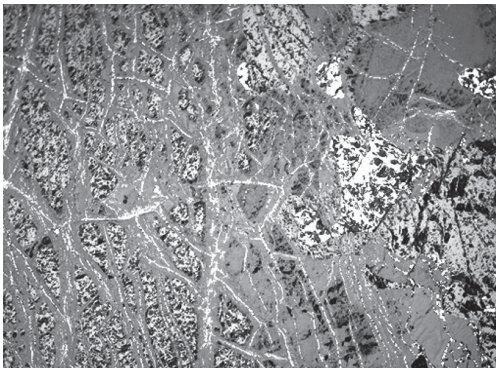

Рис. 1. Образец 4851/2. Убоговкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда. Зерна титаномагнетита в пространстве между зернами силикатов и тонкие включения титаномагнетита в прожилках серпентина. Отраженный свет без анализатора, 1,2 мм по длинной стороне кадра

Fig. 1. Sample 4851/2. Poor-impregnated ilmenite–titanium–magnetite ore. Titanomagnetite grains between silicate grains and titanomagnetite fines impregnated in serpentine strings. Reflected light without analyzer, 1.2 mm along the longer side of frame

Учитывая, что труднообогатимые руды Гусевогорского месторождения характеризуются большим содержанием дисперсной (менее 0,074 мм) и тонкой (0,074–0,2 мм) вкрапленности титаномагнетита, высока вероятность однодоменности зерен рудного материала, и как следствие, отсутствие появления магнитоакустической эмиссии. При повышении содержания в исследуемых образцах более крупных фракций магнетита происходит возникновение МАЭ.

Первая группа образцов с отсутствием МАЭ представлена тонкозернистыми верлитами; прожилками дисперсного верлита в среднезернистом диаллаговом пироксените; верлитами безрудными с прослойками плагиоклазита и рудного диаллагита с процессами окисления и оливинизации, а также пироксенитами: оливиновым тонко-мелкозернистым и мелко-среднезернистым диаллаговым оливин- и амфиболсодержащим. Структура сидеронитовая, текстура массивная. Магнетит (титаномагнетит) заполняет пространство между зернами клинопироксена или оливина или образует тонкие вкрапления в прожилках серпентина внутри зерен оливина. Размер зерен магнетита в среднем 0,2–0,3 мм. В силикатах наблюдаются разноориентированные червеобразные вростки зерен минерала, ширина которых менее

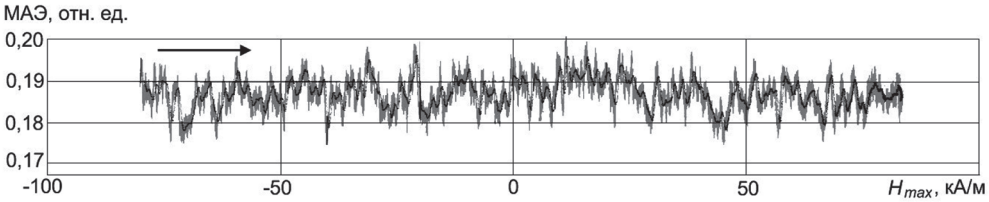

Рис. 2. Отсутствие магнитоакустической эмиссии, образец 4851/2
Fig. 2. Absence of magnetoacoustic emission, sample 4851/2

0,01 мм, а длина до 0,1 мм (структура «отпечаток пальца»).

На рис. 1 представлена фотография образца 4851/2. Убоговкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда. Содержание рудных минералов: магнетита 10–15%, ильменита 2–3%. Магнетит заполняет пространство между зернами клинопироксена, а также образует тонкие вкрапления в прожилках серпентина внутри зерен оливина. Размер зерен магнетита в среднем 0,2–0,3 мм. Ильменит выделяется в виде обособленных зерен, которые находятся в срастании с магнетитом. Размер сечений 0,2–0,3 мм. Сечения минерала, как правило, имеют удлиненную форму и образуют срастания с зернами титаномагнетита. Минерал распределен в породе равномерно. Отмечаются единичные зерна халькопирита, размером 0,02–0,03 мм, которые развиваются на контакте зерен силикатов.

На рис. 2 представлен пример регистрации МАЭ для этого образца.

Вторая группа образцов (слабая магнитоакустическая эмиссия) представлена тонкозернистыми верлитами; среднезернистыми дунитами; пироксенитами: тонко-срелнезернистым оливиновым; мелко-тонкозернистым диаллаговым оливин- и амфиболсодержащим; дисперсным оливиновым с процессами окисления и оливинизации. Структура сидеронитовая, текстура массивная. Магнетит (титаномагнетит) выделяется в виде агрегатов изометричных зерен размером около 1,5 мм. Агрегаты имеют неправильную, как правило, вытянутую форму и размер в среднем 2–3 мм по длинной оси. Также магнетит образует тонкую вкрапленность в прожилках серпентина в оливине. Вокруг крупных агрегатов в силикатах наблюдаются разноориентированные червеобразные вростки зерен минерала, ширина которых менее 0,01 мм, а длина до 0,1 мм (структура «отпечаток пальца»).

На рис. 3 представлена фотография образца 4862/1. Убого-, редковкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда. Содержание рудных минералов: магнетита 25–30%, ильменита до 1,5%, единичные зерна халькопирита. Ильменит

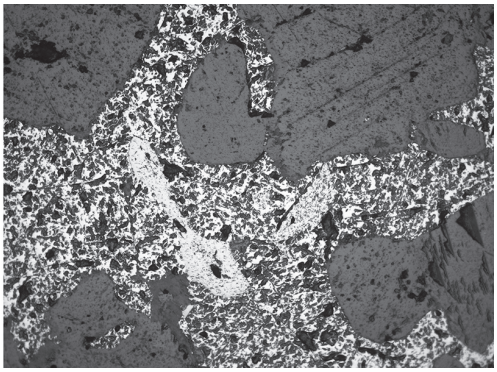

Рис. 3. Образец 4862/1. Убого-, редковкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда. Срастания зерен ильменита и магнетита. Отраженный свет без анализатора, 1,2 мм по длинной стороне кадра
Fig. 3. Sample 4862/1. Poor-impregnated and sparse-impregnated ilmenite–titanium–magnetite ore. Concretions of ilmenite and magnetite grains. Reflected light without analyzer, 1.2 mm along the longer side of frame

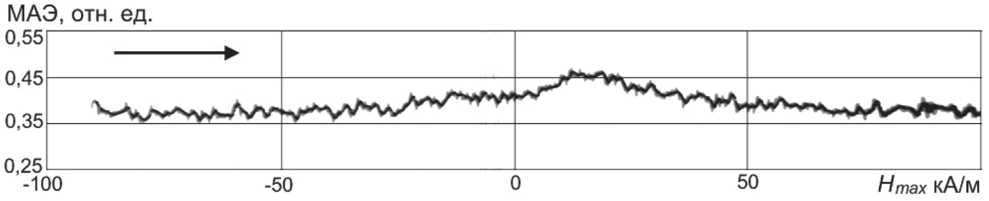

Рис. 4. Слабая магнитоакустическая эмиссия, образец 4862/1
Fig. 4. Weak magnetoacoustic emission, sample 4862/1

выделяется в виде обособленных зерен, которые находятся в срастании с магнетитом. Размер сечений 0,3–0,4 мм. Сечения минерала, как правило, имеют удлиненную форму и развиваются по краям зерен титаномагнетита. Минерал распределен в породе равномерно. Отмечаются единичные зерна халькопирита размером 0,02–0,03 мм, которые развиваются на контакте зерен силикатов.

Для второй группы образцов магнитоакустическая эмиссия небольшой амплитуды наблюдается в диапазоне полей от –60,0 до +75,7 кА/м (средние значения, соответственно –22,2 и +59,7 кА/м) с амплитудами от 0,31 до 0,79 отн. ед. (среднее значение 0,45 отн. ед.). Среднее значение поля, в котором магнитоакустическая эмиссия максимальна, равно 19,3 кА/м (рис. 4).

При исследовании некоторых образцов второй группы часто отмечается расплывчатый максимум МАЭ в диапазоне полей от 14,0 до +39,0 кА/м (рис. 5).

Третья группа образцов (средняя магнитакустическая эмиссия) представлена пироксенитами тонко-, мелкозернистыми со шлировым оруденением. Структура сидеронитовая, текстура шлировая с вкрапленным оруленением. Магнетит заполняет пространство между слабоудлинненными зернами оливина или клинопироксена, а также образует обособления, сложенные агрегатом зерен размером от 1–2 до 3 мм по короткой оси. Наблюдаются тонкие вкрапления магнетита в прожилках серпентина. Вокруг крупных агрегатов минерала в силикатах наблюдаются разноориентированные червеобразные вростки зерен магнетита, ширина которых менее 0,01 мм, а длина до 0,1 мм (структура «отпечаток пальца»).

На рис. 6 представлена фотография образца 4859/1. Убоговкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда. Содержание рудных минералов: магнетит 10–15%, ильменит 1–2%, шпинель — 2%. Магнетит в виде поликристаллического агрегата заполняет пространство между зернами клинопироксена. Размер зерен минерала 1,5–2 мм. Ильменит выделяется в виде отдельных зерен, которые всегда находятся в срастании с магне-

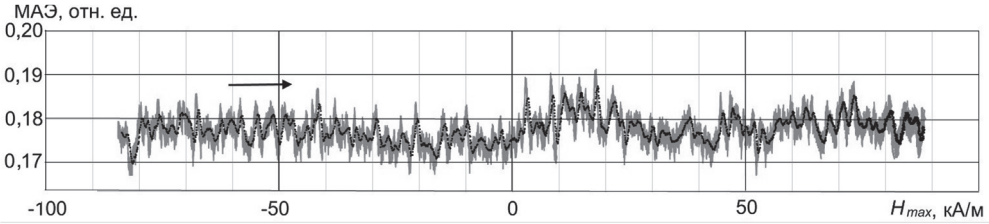

Рис. 5. Сигнал магнитоакустической эмиссии, образец 4851/1. Наблюдается расплывчатый максимум МАЭ
Fig. 5. Magnetoacoustic emission signal, sample 4851/1. Fuzzy MAE maximum is observed

титом. Размер сечений зерен минерала 0,2–0,3 мм по длинной оси. Минерал распределен в породе равномерно. Встречаются отдельные идиоморфные по отношению к силикатам, магнетиту и ильмениту зерна шпинели размером 1,5–2 мм.

Магнитоакустическая эмиссия третьей группы образцов проявляется в диапазоне от –49,3 до +94,6 кА/м (средние значения соответственно –29,1 и +69,2 кА/м). Максимальные амплитуды магнитоакустической эмиссии, наблюдаемые в пределах 0,60–4,35 отн. ед. (среднее значение 1,96 отн. ед.), фиксируются в полях 13,0–17,6 кА/м, среднее значение 15,9 кА/м (рис. 7).

В целом, по исследованным образцам труднообогатимых руд магнитоакустическая эмиссия отмечается в диапазоне приложенных вешних магнитных полей от –60 до +94,6 кА/м (средние значения соответственно –26,5 и +65,6 кА/м). Максимальная амплитуда магнитоакустической эмиссии наблюдается в полях от 13 до 27,4 кА/м при максимальном количестве случаев в поле 17,5 кА/м. Амплитуда магнитоакустической эмиссии изменяется от 0,31 до 4,35 отн. ед. Анализируя эти данные, можно отметить следующие закономерности:

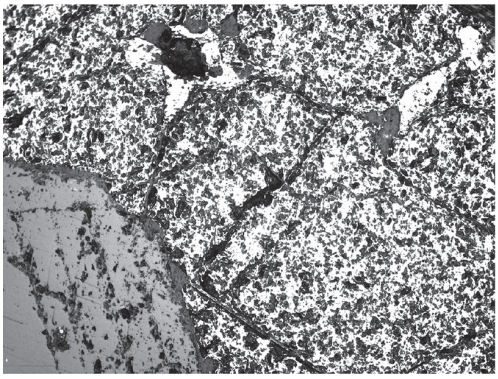

Рис. 6. Образец 4859/1. Убоговкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда. Срастание зерен ильменита, магнетита и шпинели. Отраженный свет, без анализатора. 1,2 мм по длинной стороне кадра

Fig. 6. Sample 4859/1. Poor-impregnated ilmenite–titanium–magnetite ore. Concretions of ilmenite, magnetite and spinel grains. Reflected light without analyzer, 1.2 mm along the longer side of frame

- магнитоакустическая эмиссия труднообогатимых руд наблюдается в широком диапазоне магнитных полей. Связано это может быть с более жестким закреплением доменных границ на немагнитных включениях в мелких (по размеру) частицах магнетита, (титаномагнетита) или больших градиентах внутренних напряжений в них;

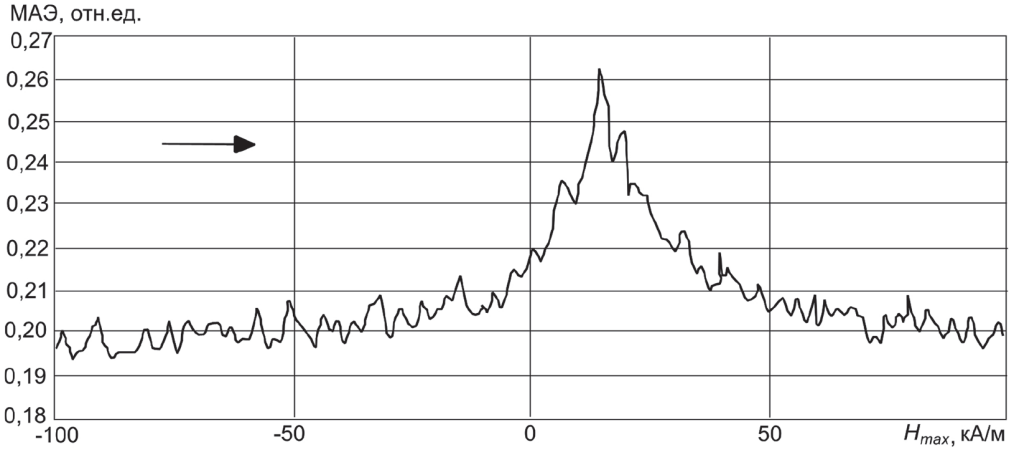

Рис. 7. Средняя магнитакустическая эмиссия, образец 4859/1

Fig. 7. Average magnetoacoustic emission, sample 4859/1

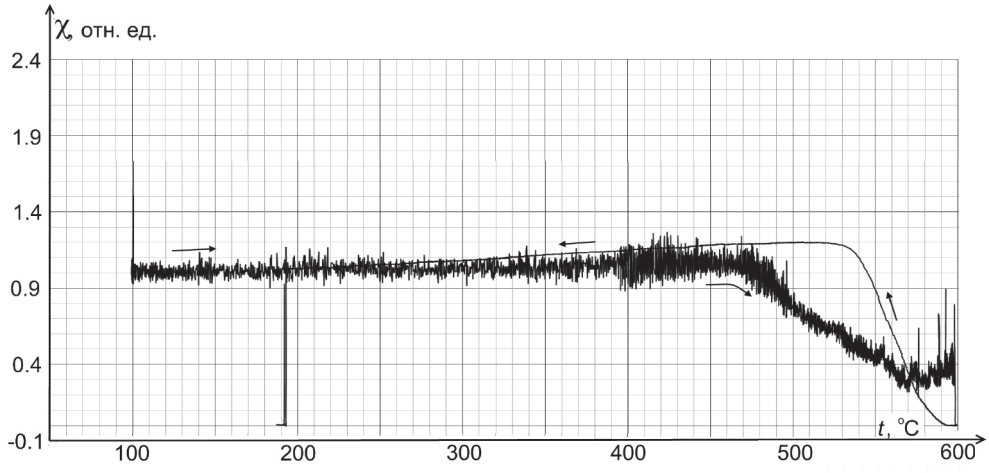

Рис. 8. Термомагнитные кривые первого типа (обр. № 4853)
Fig. 8. First-type thermomagnetic curves, sample 4853

• наблюдаемое отсутствие явно выраженного максимума на кривой магнитоакустической эмиссии может быть связано с большим объемом одинаковых по энергетическому состоянию доменных границ;

• полное отсутствие магнитоакустической эмиссии обусловлено выделением практически всей рудной массы в дисперсной форме, соответствующей однодоменному состоянию. Процесс перемагничивания в этой ситуации происходит путем вращения векторов намагниченности [12, 13].

Термомагнитные измерения

По зависимости обратимой магнитной восприимчивости от температуры выделяются два типа термомагнитных кривых: однофазные и двухфазные. На рис. 8 и 9 приведены характерные выделенные типы термомагнитных кривых.

Первый тип термомагнитных кривых соответствует присутствию только

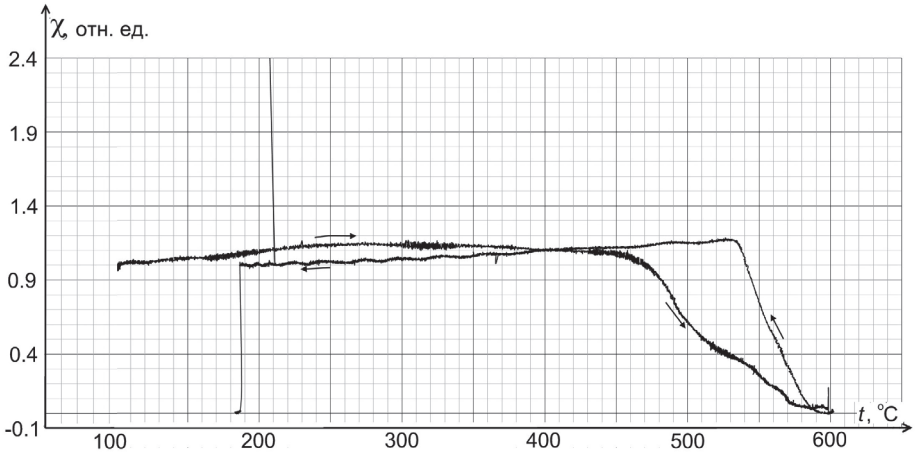

Рис. 9. Термомагнитные кривые второго типа (обр. № 4861)
Fig. 9. Second-type thermomagnetic curves, sample 4861

одной магнитной фазы. Изменение магнитной восприимчивости происходит в диапазоне температур от 460–430 до 560 °С. Температуры Кюри отмечаются в пределах 460–540 до 556 °С (по кривой при нагреве). Возможно, эта магнитная фаза соответствует определенной стадии процесса серпентинизации оливина [14, 15] и связана с дисперсной формой выделения рудного компонента. При этом высока вероятность того, что рудный компонент представлен твердым раствором маггемита и магнетита. Возможно, на это накладываются окислительно-восстановительные процессы, отмеченные в работе Юрьева и Гольцева [16]. Наличие этих процессов позволяет объяснить расхождение значений температур Кюри при нагреве и охлаждении. При охлаждении на кривой зависимости магнитной восприимчивости от температуры регистрируется температура Кюри 570–573 °С, что соответствует магнетиту. Наблюдается на образцах с отсутствием МАЭ.

Второй тип термомагнитных кривых характеризуется наличием двух магнитных фаз, соответствующих механической смеси двух магнитных рудных образований. Первая фаза аналогична описанной выше. Температуры Кюри отмечаются в диапазоне 460–508 °С, вторая фаза типична для магнетитов. Температуры Кюри меняются от 535–573 °С (по кривой нагрева). По-видимому, эта магнитная фаза связана с зернами магнетита (титаномагнетита), заполняющими пространство между зернами клинопироксена или оливина. При охлаждении определяется только одна температура Кюри в диапазоне 535–573 °С. Такой тип термомагнитных кривых характерен для образцов со слабой и средней величиной магнитоакустической эмиссии и частично для образцов с отсутствием магнито-акустической эмиссии. Поэтому достаточно обосновано предположение об образовании магнетита (титаномагнетита), отличающегося от дисперсного, на другой стадии рудообразования, что не противоречит существующим представлениям.

Измерения магнитной восприимчивости

В процессе исследований с каппаметром КТ-3 были выполнены измерения обратимой магнитной восприимчивости на частном цикле с намагничивающим полем 40 А/м и частотой перемагничивания 10 кГц. В табл. 1 представлены относительные (не приведенные к насыщенному объему) результаты измерений на кубиках по трем направлениям. Принципиального влияния анизотропии на значения магнитной восприимчивости не установлено. По значениям магнитной восприимчивости все исследованные образцы были разделены на три группы, которые практически совпали с группами, ранее выделенными по амплитуде МАЭ.

Для первой группы образцов магнитная восприимчивость меняется в диапазоне 0–17,1 · 10^{-3} СИ, второй 11,7–25,0 · · 10^{-3} СИ, третьей 17,1–42,0 · 10^{-3} СИ. По-видимому, единым процессом намагничивания, а именно процессом смещения доменных границ, можно объяснить установленную корреляционную связь магнитной восприимчивости и амплитуды магнитоакустической эмиссии.

При анализе плотностных свойств образцов и величины обратимой магнитной восприимчивости прослеживается некоторая зависимость между ними. Применительно к уже выделенным группам образцов диапазон изменения плотности составляет: для первой 2,72 — 3,43 г/см^3, для второй 2,87–3,58 г/см^3, для третьей 3,40–3,50 г/см^3. Сложный состав вмещающих пород образцов (пироксениты, дуниты, серпентиниты, верлиты) с различными плотностями поз-

воляет только в первом приближении рассматривать связь плотности с количеством магнитной фракции, магнитной восприимчивостью и параметрами магнитоакустической эмиссии.

Заключение

Таким образом, результаты выполненных исследований труднообогатимых руд Гусевогорского месторождения показывают, что магнитоакустическая эмиссия, которая наблюдается в таких рудах, имеет очень незначительную амплитуду или не наблюдается вовсе. При этом диапазон магнитных полей, в которых возникает МАЭ, гораздо шире, чем у легко- и среднеобогатимых руд. Обусловлено это тем, что в труднообогатимых рудах значительная часть рудной массы выделяется в дисперсной форме, соответствующей однодоменному состоянию рудного компонента. Наблюдаемую по результатам измерений качественную корреляционную связь магнитной восприимчивости и амплитуды магнитоакустической эмиссии можно объяснить единым процессом намагничивания (смещением доменных границ).

Полученные результаты необходимо также использовать при обогащении титаномагнетитовых руд. Меняя скорость вращения барабана сепаратора и угол сборки магнетита, можно добиться максимального извлечения магнитного материала.

Руды Гусевогорского месторождения характеризуются наличием ванадия, находящегося непосредственно в подрешетке магнетита. Есть ли связь между формой присутствия магнетита и содержанием в нем наиболее важных элементов-примесей (ванадия, титана)? Ответ на этот вопрос является темой наших будущих исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фоминых В. Г.*, *Самойлов П. И.*, *Максимов Г. С.*, *Макаров В. А.* Пироксениты Качканара. — Свердловск: УФАН СССР, 1967. — 84 с.

2. *Евстрахин В. А., Антоненко Л. К., Архипов Г. Н. и др.* Железорудная база России / Под ред. В. П. Орлова. — М.: Геоинформмарк, 2007. — 871 с.

3. *Schon J. H.* Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics. Elsevier, 2015. 512 p.

4. *Лаптев Ю. В.*, *Яковлев А. М.*, *Титов Р. С.* Методика геометризации качественных характеристик Гусевогорского месторождения титаномагнетитовых руд // Проблемы недропользования. — 2014. — № 2. — С. 174–184. URL: https://trud.igduran.ru/edition/2/28 (дата обращения: 27.01.2020).

5. *Быстров И. Г.* Оценка влияния неоднородности титаномагнетита на обогатимость железных руд магматического генезиса: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. — М.: ВНИИ минерального сырья им. Н.М. Федоровского, 2014. — 117 с.

6. *Piotrowski L., Chmielewski M., Kowalewski Z.* On the application of magnetoelastic properties measurements for plastic level determination in martensitic steels // Journal of Electrical Engineering. 2018. Vol. 69. Pp. 502–506.

7. *Костин В. Н.*, *Филатенков Д. Ю.*, *Чекасина Ю. А.*, *Василенко О. Н.*, *Сербин Е. Д.* Особенности возбуждения и регистрации магнитоакустической эмиссии в ферромагнитных объектах // Акустический журнал. — 2017. — Т. 63. — № 2. — С. 209–216.

8. *Neyra Astudillo, Miriam Rocio, Nunez Nicolas, Lopes Pumarega M. I., Ruzzante J., Padovese Linilson* Magnetic barkhausen noise and magneto acoustic emission in stainless steel plates // Procedia Materials Science. 2015. Vol. 8. Pp. 674–682.

9. *Иванченко В. С.*, *Глухих И. И.* Экспериментальное исследование магнитоакустической эмиссии природных ферримагнетиков. — Екатеринбург: УрО РАН, 2009. — 92 с.

10. *Костин В. Н., Василенко О. Н., Филатенков Д. Ю., Чекасина Ю. А., Сербин Е. Д.* Магнитные и магнитоакустические параметры контроля напряженно деформированного состояния углеродистых сталей, подвергнутых холодной пластической деформации и отжигу // Дефектоскопия. — 2015. — № 10. — С. 33–41.

11. *Проценко И. Г., Брусенцов Ю. А., Филатов И. С.* Определение структурных факторов, влияющих на параметры постоянных магнитов, с помощью магнитоакустической эмиссии // Вестник ТГТУ. — 2015. — Т. 21. — № 3. С. 519–525. DOI: 10.17277/vestnik.2015.2015.03.

12. *Piotrowski L., Chmielewski M., Augustyniak B.* On the correlation between magnetoacoustic emission and magnetostriction dependence on the applied magnetic field // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2016. Vol. 410. Pp. 34–40.

13. *Makowska K., Piotrowski L., Kowalewski Z. L.* Prediction of the Mechanical Properties of P91 Steel by Means of Magneto-acoustic Emission and Acoustic Birefringence // Journal of Nondestructive Evaluation. 2017. Vol. 36. No 43. Pp. 1–10. DOI: 10.1007/s10921-017-0421-9.

14. *Малахов И. А., Чащухин И. С.* О содержании магнетита в ультрабазитах Урала и его генетической роли при метаморфизме / Минералогия и геохимия гипербазитов Урала. Труды ИГГ. Мин. сб. № 13. — Свердловск, 1977. — С. 71–81.

15. *Чащухин И. С., Юников Б. А., Глухих И. И.* О составе магнетитов из серпентинитов Урала / Минералогия и геохимия гипербазитов Урала. Труды ИГГ. Мин. сб. № 13. — Свердловск, 1977. — С. 101–116.

16. *Юрьев Б. П., Гольцев В. А.* Исследование процесса окисления магнетита // Известия вузов. Черная металлургия. — 2016. — Т. 59. — № 10. — С. 735–739. ГИАБ

REFERENCES

1. Fominykh V. G., Samoylov P. I., Maksimov G. S., Makarov V. A. *Piroksenity Kachkanara* [Kachkanar pyroxenite], Sverdlovsk, UFAN SSSR, 1967, 84 p.

2. Evstrakhin V. A., Antonenko L. K., Arkhipov G. N. *Zhelezorudnaya baza Rossii*. Pod red. V. P. Orlova [Iron ore resources and reserves in Russia. Orlov V. P. (Ed.)], Moscow, Geoinformmark, 2007, 871 p.

3. Schon J. H. *Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics*. Elsevier, 2015. 512 p.

4. Laptev Yu. V., Yakovlev A. M., Titov R. S. Geometrization procedure of qualitative characteristics of Guseva Gora titanium–magnetite ore. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2014, no 2, pp. 174–184. [In Russ], available at: https://trud.igduran.ru/edition/2/28 (accessed 27.01.2020).

5. Bystrov I. G. *Otsenka vliyaniya neodnorodnosti titanomagnetita na obogatimost' zheleznykh rud magmaticheskogo genezisa* [Impact assessment of titanomagnetite nonuniformity on processibility of iron ore of magmatic genesis], Candidate's thesis, Moscow, 2014, 117 p.

6. Piotrowski L., Chmielewski M., Kowalewski Z. On the application of magnetoelastic properties measurements for plastic level determination in martensitic steels. *Journal of Electrical Engineering*. 2018. Vol. 69. Pp. 502–506.

7. Kostin V. N., Filatenkov D. Yu., Chekasina Yu. A., Vasilenko O. N., Serbin E. D. Features of magnetoacoustic emission excitation and recording in ferrous objects. *Akusticheskij zhurnal.* 2017, vol. 63, no 2, pp. 209–216. [In Russ].

8. Neyra Astudillo, Miriam Rocio, Nunez Nicolas, Lopes Pumarega M. I., Ruzzante J., Padovese Linilson. Magnetic barkhausen noise and magneto acoustic emission in stainless steel plates. *Procedia Materials Science*. 2015. Vol. 8. Pp. 674–682.

9. Ivanchenko V. S., Glukhikh I. I. *Eksperimental'noe issledovanie magnitoakusticheskoy emissii prirodnykh ferrimagnetikov* [Experimental magnetoacoustic emission tests of natural ferrimagnetics], Ekaterinburg, UrO RAN, 2009, 92 p.

10. Kostin V. N., Vasilenko O. N., Filatenkov D. Yu., Chekasina Yu. A., Serbin E. D.Magnetic and magnetoacoustic parameters of stress–strain control in carbon steel subjected to cold plastic deformation and baking. *Defektoskopiya*. 2015, no 10, pp. 33–41. [In Russ].

11. Protsenko I. G., Brusentsov Yu. A., Filatov I. S. Determination of structural factors which have influence on the parameters of permanent magnets using magnetoacoustic emission. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015, vol. 21, no 3, pp. 519–525. [In Russ]. DOI: 10.17277/vestnik.2015.2015.03.

12. Piotrowski L., Chmielewski M., Augustyniak B. On the correlation between magnetoacoustic emission and magnetostriction dependence on the applied magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2016. Vol. 410. Pp. 34–40.

13. Makowska K., Piotrowski L., Kowalewski Z. L. Prediction of the Mechanical Properties of P91 Steel by Means of Magneto-acoustic Emission and Acoustic Birefringence. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2017. Vol. 36. No 43. Pp. 1–10. DOI: 10.1007/s10921-017-0421-9.

14. Malakhov I. A., Chashchukhin I. S. Magnetite content of Ural ultrabasite and the role of its genesis in metamorphism. *Mineralogiya i geokhimiya giperbazitov Urala. Trudy IGG*, no 13. Свердловск, 1977, pp. 71–81.

15. Chashchukhin I. S., Yunikov B. A., Glukhikh I. I. Composition of magnetite from Ural serpentinite. *Mineralogiya i geokhimiya giperbazitov Urala. Trudy IGG*, no 13. Sverdlovsk, 1977, pp. 101–116.

16. Yur'ev B. P., Gol'tsev V. A. Magnetite oxidation analysis. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2016, vol. 59, no 10, pp. 735–739. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванченко Виктор Сергеевич[1] — канд. геол.-минерал. наук,
старший научный сотрудник, зам. директора Института,
e-mail: ivanchenko@mail.ru,
Глухих Игорь Иванович[1] — канд. геол.-минерал. наук,
старший научный сотрудник,
Вдовин Алексей Геннадьевич[1] — научный сотрудник,
Белоглазова Надежда Анатольевна[1] — канд. техн. наук,
зав. лабораторией,
Ширяев Павел Борисович — научный сотрудник,
Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН,
[1] Институт геофизики Уральского отделения РАН.
Для контактов: Иванченко В.С., e-mail: ivanchenko@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.S. Ivanchenko[1], Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Senior Researcher, Deputy Director of the Institute,
e-mail: ivanchenko@mail.ru,
I.I. Glukhikh[1], Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Senior Researcher,
A.G. Vdovin[1], Researcher,
N.A. Beloglazova[1], Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory,
P.B. Shiryayev, Researcher, Zavaritsky Institute of Geology
and Geochemistry of Ural Branch,
Russian Academy of Sciences, 620016, Ekaterinburg, Russia,
[1] Institute of Geophysics of Ural Branch,
Russian Academy of Sciences, 620016, Ekaterinburg, Russia.
Corresponding author: V.S. Ivanchenko, e-mail: ivanchenko@mail.ru.

Получена редакцией 14.07.2020; получена после рецензии 12.08.2020; принята к печати 10.06.2021.
Received by the editors 14.07.2020; received after the review 12.08.2020; accepted for printing 10.06.2021.