

Особенности электропроводности при высоких температурах труднообогатимых титаномагнетитовых руд из Гусевогорского месторождения

Владимир Васильевич БАХТЕРЕВ*

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность определяется поиском и отбором наиболее информативных характеристик и физических свойств труднообогатимых титаномагнетитовых руд в связи с необходимостью научно обоснованных критериев их обнаружения, оценки качества при селективной добыче и выборе оптимальной технологии обогащения.

Методика исследования. Для исследования электрических свойств были использованы образцы в форме кубика с ребром 0,02 м. Измерения выполнены в открытой системе при атмосферном давлении. Электрическое сопротивление измеряли двухэлектродной установкой через каждые 10 градусов в интервале температур 20–800 °С. Скорость нагревания 0,066 град/с. Измерительный прибор – тераомметр Е6-13 с динамическим диапазоном от 10 до 10¹⁴ Ом и относительной ошибкой измерений от ±2,5 % до 4 % в конце диапазона.

Результаты. Физическими, минералого-петрографическими методами изучена коллекция образцов труднообогатимых титаномагнетитовых руд из Гусевогорского месторождения (Северный карьер). Установлены функциональные связи между электрическими параметрами высокотемпературной электропроводности (E_0 – энергия активации, $\lg R_0$ – так называемый коэффициент электрического сопротивления), величиной и характером электрического сопротивления $\lg R$ в интервале температур 20–800 °С исследованных образцов труднообогатимых руд с их структурно-текстурными особенностями и минеральным составом. По структурно-текстурным особенностям, минеральному составу и электрическим параметрам исследованные образцы четко разделяются на три группы.

Выводы. Приведенные результаты в комплексе с другими физико-химическими параметрами могут быть использованы в качестве надежного индикатора экспрессной оценки изучаемого материала. Существенные различия электрических параметров титаномагнетитовых руд дают дополнительную информацию об их качестве. В комплексе с другими методами позволяют надеяться на возможность использовать эти параметры при селективной выемке руд, требующих различных режимов обогащения.

Ключевые слова: труднообогатимые титаномагнетитовые руды, структура и текстура, высокая температура, электрические параметры.

Введение

Гусевогорское месторождение относится к типу малотитанистых титаномагнетитовых руд, приуроченных к дунит-пироксенит-габбровой формации Платиноносного пояса Урала. Оруденение связано с различными типами пород: оливинитами, верлитами, пироксенитами.

«Минеральный состав руд довольно разнообразен. Рудные минералы включают магнетит четырех генераций, ильменит двух генераций, титаномагнетит, ульвошпинель и шпинель состава герцинит-плеонаст; нерудные – моноклинный (диаллаг) и ромбический пироксены, плагиоклазы. Вторичные минералы в руде представлены серпентином, амфиболом, цизитом, эпидотом и хлоритом. Вмещающими породами являются диаллаговые, оливиновые и плагиоклазовые пироксениты, амфиболиты, верлиты и габбро» [1].

Для титаномагнетитовых руд 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. В соответствии с разработанной геологической службой комбината классификацией текстур руд, учитывающей количественное соотношение пяти фракций титаномагнетита, выделяются следующие типы: крупновкрапленные (крупность зерен >3 мм), средневкрапленные (1–3 мм), мелковкрапленные (0,2–1 мм), тонковкрапленные (0,074–0,2 мм) и дисперсно-вкрапленные (< 0,074 мм) [2, 3].

Наличие нескольких морфологических разновидностей вкрапленности титаномагнетита и широкий диапазон колебаний размеров зерен и агрегатов обуславливают текстурную неоднородность руд на месторождении и выступают в качестве одного из ведущих факторов, влияющих на эффективность обогащения. Легкообогатимые

✉ ugv@bk.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-1174-1301>

руды – крупно- и средневкрапленные; труднообогатимые руды по текстурным критериям соответствуют дисперсно- и тонковкрапленной разновидности [4–6]. «Для структур вкрапленных магматических титаномагнетитовых руд характерно определенное соотношение между силикатами и рудными минералами. Силикаты выделяются в форме хорошо образованных идиоморфных кристаллических зерен, а рудные минералы выполняют лишь интерстиции между ними, формируя типичные сидеронитовые структуры» [4]. Структуры и текстуры руд соответствуют структурам и текстурам вмещающих пород. В мелкозернистых пироксенитах отмечается мелкокрапленное оруденение, в крупнозернистой породе наблюдаются крупные рудные вкрапления [7]. Сложный химический и фазовый составы, а также особенности онтогении титаномагнетита оказывают существенное влияние на электрические свойства минерала, являются одними из параметров количественной оценки неоднородности.

Исследования состава и структуры ряда минералов показали, что большинство их свойств меняются при уменьшении размеров индивидов, особенно заметно с величины 0,1 мм [8]. На примере песчаника и известняка показано влияние микроструктуры горных пород на макроскопические теплофизические свойства, в частности эффективную теплопроводность [9]. Это может позволить провести классификацию горных пород по литологической микроструктуре с различными типами насыщения и определить взаимосвязь между микроструктурой горной породы и ее теплофизическими свойствами.

Подобные «размерные модификации» рассматриваются как разновидность минерального вида – микроминералы. Они известны в физике как «малые частицы», что определяет их аномальные свойства [10]. Выявлены уникальные физические свойства наноматериалов, в первую очередь магнитные и электрофизические: электропроводность, диэлектрическая проницаемость. На этом основано создание новых материалов с заданными свойствами. Так, в зависимости от способа выращивания кристаллов получают разную структуру. В результате меняется частотный спектр диэлектрических потерь в интервале частот 10^{-3} – 10^3 Гц [11].

Установлено, что «для всех типов пород (базальты, пироксениты, перидотиты), характеризующихся мелкодисперсным (пылевидным) выделением рудного минерала, отмечается весьма существенное завышение электропроводности по сравнению с породами, в которых эти выделения находятся в виде зерен крупных размеров» [12].

Оценка технологических типов титаномагнетитовых руд важна на стадии разработки с целью селективной выемки. При этом электрические свойства, в том числе и при высоких температурах, горных пород как весьма чувствительные индикаторы вещественного их состава, структурных и текстурных особенностей являются важным источником информации. Цель настоящей работы – исследовать температурную зависимость электрического сопротивления труднообогатимых титаномагнетитовых руд в интервале температур 20–800 °С; выявить и установить функциональные связи между электрическими параметрами высокотемпературной электропроводности (E_0 – энергия активации, $\lg R_0$ – так называемый коэффи-

циент электрического сопротивления), величиной и характером электрического сопротивления $\lg R$ исследованных образцов труднообогатимых руд с их структурно-текстурными особенностями и минеральным составом.

Методика исследований

Методика определения электропроводности образцов горных пород и электрических параметров при высоких температурах описана ранее [13]. Образцы для исследований вырезали в форме кубика с ребром 0,02 м. Измерения выполнены в открытой системе при атмосферном давлении. Электрическое сопротивление измеряли двухэлектродной установкой через каждые 10 градусов в интервале температур 20–800 °С. Скорость нагревания 0,066 град/с. Температуру в системе определяли платино-платинородиевой термопарой в 0,01 м от образца. Прибор для измерения электрического сопротивления – тераомметр Е6-13 с динамическим диапазоном от 10 до 10^{14} Ом и пределами допустимой относительной погрешности измерений от $\pm 2,5$ до 4 % в конце диапазона.

Для определения энергии активации E_0 и коэффициента электрического сопротивления $\lg R_0$ кривые высокотемпературной электропроводности были построены в координатах $\lg R$, $1/T$ (рис. 1). Энергия активации E_0 определена по величине тангенса угла наклона касательной к кривой $\lg R = f(1/T)$ в некоторой точке прямолинейного участка в температурной области, где кривая $\lg R = f(1/T)$ не искажена аномальными эффектами. Этому условию удовлетворяет окрестность температуры магнитного превращения. Кроме того, исследование электрических свойств в области точки Кюри представляет самостоятельный интерес. Электрические параметры могут быть использованы при оценке особенностей магнитных превращений в этого рода материалах [14]. Коэффициент электрического сопротивления $\lg R_0$ определен как величина отрезка, отсекаемого касательной к кривой $\lg R = f(1/T)$ на оси ординат.

Образцы для исследований отобраны из Северного карьера труднообогатимых титаномагнетитовых руд, представленных верлитами, оливиновыми и диаллаговыми пироксенитами с различной текстурой и структурой, формой выделения от средневкрапленной до дисперсной.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2–4 приведены температурные зависимости электрического сопротивления исследованных образцов. Чтобы не загромождать рисунки, приведены зависимости лишь для части исследованных образцов. Другие кривые, не помещенные на рисунки, вписываются в приведенные интервалы значений электрического сопротивления. Генетические, минералогические, структурно-текстурные особенности образцов отразились на характере их электропроводности при высоких температурах. Выделено три группы образцов, различающихся величиной электрического сопротивления при нормальной температуре и характером температурной зависимости в интервале 20–800 °С.

Первая группа образцов (рис. 2)

Образец 4858. Оливиновый пироксенит с вкрапленностью титаномагнетита, среднезернистый. Магнетит в виде отдельных зерен между зернами пироксена и в виде вкрапленности в прожилках серпентина в оливине. Магнетита 1–1,5 %. Зерно 0,3–0,4 мм.

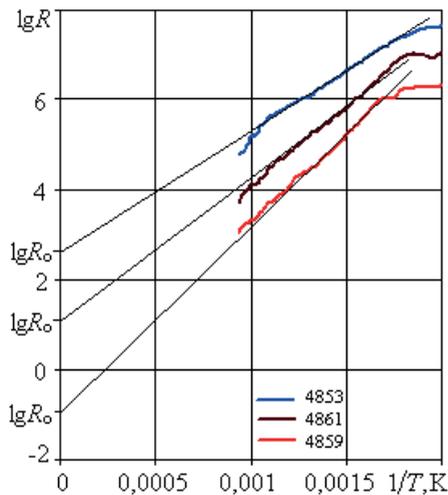


Рисунок 1. Определение электрических параметров исследованных образцов. Числа рядом с кривыми – номера образцов, описанных в тексте

Figure 1. Determination of electrical parameters of the studied samples. Numbers next to curves – numbers of samples described in the text

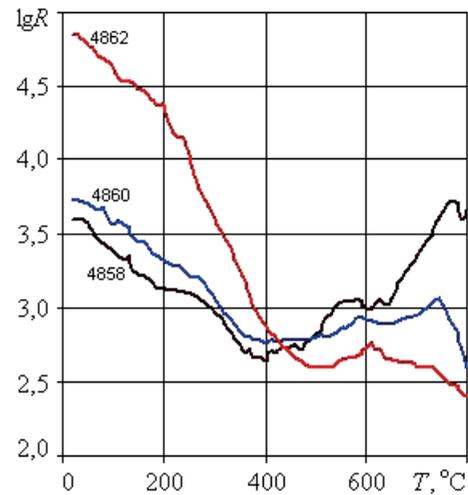


Рисунок 2. Температурные зависимости электрического сопротивления первой группы образцов титаномагнетитовой руды. Числа рядом с кривыми – то же, что на рис. 1

Figure 2. Temperature dependences of the electrical resistance of the first group of titanomagnetite ore samples. The numbers next to the curves are the same as in fig. 1

Образец 4860. Пироксенит диаллаговый, оливин- и амфиболсодержащий. Убоговкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда, среднезернистая, сидеронитовая. Магнетит заполняет пространство между зернами клинопироксена; образует тонкие вкрапления в прожилках серпентина внутри зерен оливина. Магнетита 10–15 %. Размер зерен магнетита 0,2–0,3 мм.

Образец 4862. Пироксенит диаллаговый, оливин и амфиболсодержащий, мелко-, тонкозернистый, мелко-, тонковкрапленный. Убого-редковкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда, среднезернистая, сидеронитовая. Магнетит заполняет пространство между зернами клинопироксена и образует тонкие вкрапления в прожилках серпентинита и зернах оливина. Магнетита 25–30 %. Размер зерен магнетита 0,5–0,1 мм, иногда до 2 мм.

Особенность электропроводности образцов этой группы: при нормальной температуре сопротивление этих образцов самое низкое (в пределах 4,5–56 кОм), с повышением температуры нагревания почти монотонно уменьшается, достигая наименьших значений в районе 420–450 °С. Здесь все исследованные образцы этой группы имеют почти одинаковое сопротивление (570–600 Ом). Далее кривые «расходятся веером» и изменяются сложным образом с повышением температуры до 800 °С. При температуре 800 °С имеют самый большой из всех исследованных образцов разброс (0,26–4,50 кОм.).

С уменьшением размера зерна магнетита от 0,4 мм до 0,1 мм в исследованных образцах E_0 увеличивается от 0,16 до 0,45 эВ; $\lg R_0$ уменьшается от +2,92 до –1,5.

Вторая группа образцов (рис. 3)

Образец 4853. Верлит безрудный с прослоями плагиоклазита и рудного диаллага.

Образец 4859. Пироксенит оливиновый тонко-мелкозернистый, тонко-мелковкрапленный. Убоговкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда, среднезернистая,

сидеронитовая. Магнетит в виде поликристаллического агрегата заполняет пространство между зернами клинопироксена. Магнетита 10–15 %.

Образец 4861. Пироксенит с вкрапленностью титаномагнетита, руда среднезернистая, сидеронитовая. Магнетит заполняет пространство между зернами клинопироксена и образует вкрапления в прожилках серпентина внутри зерен оливина. Магнетита 5–7 %.

Все температурные кривые электрического сопротивления находятся в диапазоне примерно 100 Ом, монотонно уменьшаются со значений (10^8 – 10^{10}) Ом, равных при нормальной температуре до (10^3 – 10^5) Ом при 800 °С.

Третья группа образцов (рис. 4)

Образец 4854. Пироксенит оливиновый тонко-мелкозернистый с шлировым оруденением. Убоговкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда, среднезернистая, сидеронитовая. Текстура шлирово-вкрапленная. Магнетит заполняет пространство между зернами оливина, а также образует обособления размером до 3 мм по короткой оси из зерен размером 1–2 мм. Наблюдаются также тонкие вкрапления в прожилках серпентина в оливине. Магнетита 15–20 %. Размер зерна 1–2 мм.

Образец 4855. Верлит безрудный, дисперсный с процессами окисления и оливинизации.

Образец 4857. Пироксенит оливиновый тонко-мелкозернистый с шлировым оруденением. Убоговкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда, среднезернистая, сидеронитовая. Магнетит заполняет пространство между зернами клинопироксена и образует тонкие вкрапленники в прожилках серпентина в оливине. Количество магнетита 30–35%. Размер зерна магнетита 1,5–2,0 мм.

Тонкодисперсные руды наиболее труднообогатимые. Размер зерна магнетита во всех исследованных образцах группы примерно 1–2 мм.

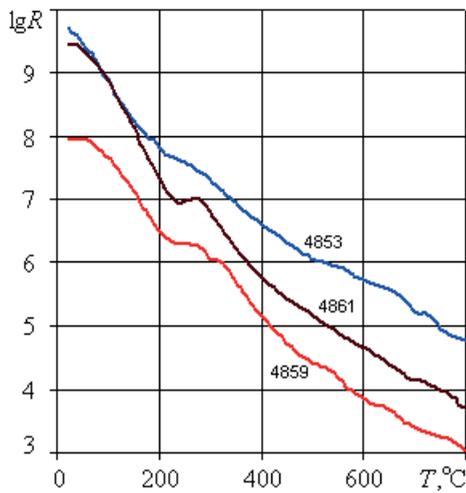


Рисунок 3. Температурные зависимости электрического сопротивления второй группы образцов титаномагнетитовой руды
Figure 3. Temperature dependences of electrical resistance of the second group of titanomagnetite ore samples

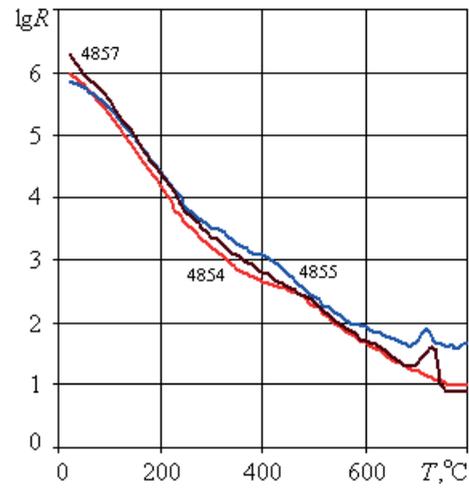


Рисунок 4. Температурные зависимости электрического сопротивления третьей группы образцов титаномагнетитовой руды
Figure 4. Temperature dependences of the electrical resistance of the third group of titanomagnetite ore samples

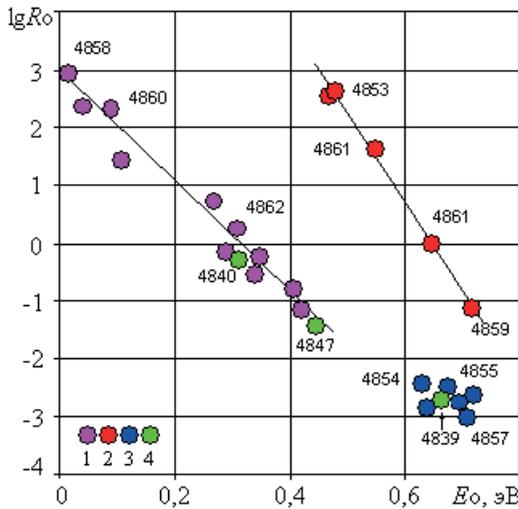


Рисунок 5. Связь между E_0 и $\lg R_0$ исследованных образцов труднообогатимых руд: 1, 2, 3 – группы образцов; 4 – образцы, исследованные ранее [15]. Числа около некоторых точек – номера образцов, описанных в тексте. Линии – прямые корреляции групп образцов: 1, 2 – соответственно $\lg R_0 = 2,91-9,33 E_0$, $R^2 = 0,96$; $\lg R_0 = 9,81-15,14 E_0$, $R^2 = 0,99$
Figure 5. Relationship between E_0 and $\lg R_0$ of the studied samples of complex ores: 1, 2, 3 – groups of samples; 4 – samples studied earlier [15]. The numbers near some points are the numbers of the samples described in the text. Lines – direct correlations of groups of samples: 1, 2 – respectively, $\lg R_0 = 2,91-9,33 E_0$, $R^2 = 0,96$; $\lg R_0 = 9,81-15,14 E_0$, $R^2 = 0,99$

При нормальной температуре имеют сопротивление промежуточное между сопротивлением образцов других групп, между собой различаются до нескольких единиц Ом во всем температурном интервале, монотонно уменьшаясь от $(9-21) \cdot 10^5$ Ом при нормальной температуре, до $(8-60)$ Ом при 800°C . Электрические параметры всех образцов примерно одинаковы ($\lg R_0$ изменяется от $-2,42$ до $-3,00$; E_0 изменяется от $0,63$ до $0,71$ эВ).

Во всем температурном интервале характер зависимости для отдельных образцов изменяется различным и сложным образом. Однако для всех образцов на кривых $\lg R = f(T)$ выделяется линейный участок в области температуры Кюри $450-650^\circ\text{C}$. Его положение и протяженность на температурной кривой для отдельных образцов имеет разное значение. Для этой области $450-650^\circ\text{C}$ были определены параметры высокотемпературной электропроводности E_0 и $\lg R_0$ всех исследованных образцов.

Результаты приведены на рис. 5, где показана связь между E_0 и $\lg R_0$ исследованных образцов. Графическое изображение этой связи в координатах E_0 , $\lg R_0$ обнаруживает обширное поле распределения фигуративных точек, которое вмещает в себя результаты исследования всех образцов. По этим параметрам также выделяются три группы образцов, отличающиеся параметрами и их вариацией. Четко прослеживается связь между параметрами для групп образцов 1 и 2 в виде $\lg R_0 = a - b \cdot E_0$, где a , b – коэффициенты. Для каждой группы образцов коэффициенты имеют свои значения. Связано это с различными генетическими, минералогическими, структурно-текстурными особенностями образцов.

По данным П. В. Лузянина (главный геофизик ООО «ЕВРАЗ КГОК»), руда, из которой отобраны образцы № 4839, 4840, 4847, тонкодисперсная и трудно поддается обогащению. Эти образцы были изучены нами ранее [15].

Заключение

Исследована высокотемпературная электропроводность образцов труднообогатимых титаномагнетитовых руд из Северного карьера Гусевогорского месторождения.

Получены температурные зависимости электрического сопротивления в интервале $20-800^\circ\text{C}$ образцов труднообогатимых титаномагнетитовых руд. Установлены параметры высокотемпературной электропроводности (энергия активации E_0 и коэффициент электрического сопротивления $\lg R_0$). Выявлены функциональные связи между электрическими параметрами высокотемпе-

ратурной электропроводности исследованных образцов труднообогатимых руд с их структурно-текстурными особенностями и минеральным составом. По структурно-текстурным особенностям, минеральному составу и электрическим параметрам исследованные образцы четко разделяются на три группы.

Существенные различия электрических параметров титаномагнетитовых руд дают дополнительную информацию

об их качестве. В комплексе с другими методами результаты исследований быть использованы при селективной выемке руд, требующих различных режимов обогащения.

Исследованные образцы по параметрам E_0 , $\lg R_0$ разделились на три группы. Также отличаются по величине электрического сопротивления при нормальной температуре и характеру температурной зависимости в интервале температур 20–800 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бузмаков В. Н., Володина Ю. В. Оценка влияния минерального состава рудных тел титаномагнетитов Гусевогорского месторождения на концентрацию ванадия в продуктах их переработки // Известия УГГУ. 2020. Вып. 3(59). С. 62–68. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-62-68>
2. Пироксениты Качканара / В. Г. Фоминых [и др.]. Свердловск: ИГГ УФАИ СССР, 1967. 84 с.
3. Железорудная база России. Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. В. П. Орлова. М.: Геоинформмарк. 2007. 871 с.
4. Пирогов Б. И., Броницкая Е. С., Астахова Ю. М., Волков Е. С. Особенности вещественного состава титаномагнетитовых руд магматического генезиса, определяющие их обогатимость // Разведка и охрана недр. 2013. № 2. С. 47–51. <https://www.elibrary.ru/ofunqw>
5. Пирогов Б. И., Быстров И. Г. Типоморфные особенности титаномагнетита в связи с обогатимостью железных руд магматического генезиса // Разведка и охрана недр. 2015. № 7. С. 49–54.
6. Яковлев В. Л., Лаптев Ю. В., Яковлев А. М. Геоинформационная оценка изменчивости титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения // Литосфера. 2014. № 5. С. 122–128.
7. Иванов О. К., Зворская С. А. Новые данные о структуре Качканарско-Гусевогорского габбро-пироксенитового плутона (Урал) // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. № 4. С. 931–935.
8. Конеев Р. И., Кушмурадов О. К., Туресебеков А. Х. Микроминералогия – предмет, методы, применение. Ташкент: Изд. ТГУ, 1994. 89 с.
9. Горбань И. А., Динариев О. Ю., Сафонов С. С. Исследование влияния микроструктуры горных пород на макроскопические теплофизические свойства // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: труды 52-й науч. конф. МФТИ. Ч. III. Аэрофизика и космические исследования. М.: МФТИ, 2009. Т. 2. С. 24–27.
10. Петров Ю. И. Физика малых частиц. М.: Наука, 1982. 359 с.
11. Нгуен Х. Т., Миловидова С. Д., Сидоркин А. С., Рогазинская О. В. Диэлектрические свойства композитов на основе нанокристаллической целлюлозы с триглицидсульфатом // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. Вып. 3. С. 491–494.
12. Пархоменко Э. И., Бондаренко А. Т. Электропроводность горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Недра, 1972. 278 с.
13. Бахтерев В. В. Электропроводность при высоких температурах образцов магнетитовых руд – возможный индикатор их минерального состава и генетических особенностей месторождения // Известия вузов. Геология и разведка. 2012. № 5. С. 40–45.
14. Белов К. П. Ферромагнетики и антиферромагнетики вблизи точки Кюри // Успехи физических наук. 1958. Т. LXV. Вып. 2. С. 207–256. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0065.195806i.0207>
15. Бахтерев В. В. Особенности электропроводности при высоких температурах титаномагнетитов из Гусевогорского месторождения // Уральский геофизический вестник. 2017. № 2(30). С. 16–21. <https://doi.org/10.25698/UGV.2017.2.11701>

Статья поступила в редакцию 02 июля 2023 года

Features of electrical conductivity at high temperatures of complex titanomagnetite ores from the Gusevogorsky deposit

Vladimir Vasil'evich BAKHTEREV*

Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance is determined by the search and selection of the most information-intensive characteristics and physical properties of complex titanomagnetite ores in connection with the need for scientifically based criteria for their detection, quality assessment during selective mining and selection of optimal enrichment technology.

Research methodology. To study the electrical properties, samples in the shape of a cube with an edge of 0.02 m were used. The measurements were carried out in an open system at atmospheric pressure. Electrical resistance was measured with a two-electrode setup every 10 degrees in the temperature range 20–800 °C. Heating rate 0.066 deg/s. The measuring device is an E6-13 teraohmmeter with a dynamic range from 10 to 10¹⁴ Ohms and a relative measurement error from ±2.5% to 4% at the end of the range.

Results. A collection of samples of complex titanomagnetite ores from the Gusevogorsky deposit (Northern quarry) was studied using physical, mineralogical and petrographic methods. Functional connections have been established between the electrical parameters of high-temperature electrical conductivity (E_0 – activation energy, $\lg R_0$ – the so-called electrical resistance coefficient), the value and nature of the electrical resistance $\lg R$ in the temperature range 20–800 °C of the studied samples of complex ores with their structural and textural features and mineral composition. Based on structural and textural features, mineral composition and electrical parameters, the studied samples are clearly divided into three groups.

Conclusions. The presented results, in combination with other physicochemical parameters, can be used as a reliable indicator of rapid assessment of the material being studied. Significant differences in the electrical parameters of titanomagnetite ores provide additional information about their quality. In combination with other methods, we hope for the possibility of using these parameters in the selective extraction of ores that require different enrichment regimes.

Keywords: complex titanomagnetite ores, structure and texture, high temperature, electrical parameters.

REFERENCES

1. Buzmakov V. N., Volodina Yu. V. 2020, Assessment of the influence of the mineral composition of ore bodies of titanomagnetites of the Gusevogorsky deposit for the concentration of vanadium in the products of their processing. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 3 (59), pp. 62–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-62-68>
2. Fominykh V.G. [et al.]. 1967, Pyroxenites of Kachkanar, Sverdlovsk, 84 p. (In Russ.)
3. Orlova V. P. 2007, Iron ore base of Russia. 2nd. Edition. Moscow, 871 p. (In Russ.)
4. Pirogov B. I., Bronitskaya E. S., Astakhova Yu. M., Volkov E. S. 2013, Features of the material composition of titanomagnetite ores of magmatic origin, determining their enrichment. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 2, pp. 47–51. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/ofunqw>
5. Pirogov B. I., Bystrov I. G. 2015, Typomorphic features of titanomagnetite in connection with the enrichment of iron ores of magmatic origin. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 7, pp. 49–54. (In Russ.)
6. Yakovlev V. L., Laptev Yu. V., Yakovlev A. M. 2014, Geoinformation assessment of the variability of titanomagnetite ores of the Gusevogorsky deposit. *Litosfera* [Lithosphere], no. 5, pp. 122–128. (In Russ.)
7. Ivanov O. K., Zvorskaya S. A. 1990, New data on the structure of the Kachkanar-Gusevogorsky gabbro-pyroxenite pluton (The Urals). *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], vol. 313, no. 4, pp. 931–935. (In Russ.)
8. Koneev R. I., Kushmuradov O. K., Turesebekov A. Kh. 1994, Micromineralogy – subject, methods, application. Tashkent, 89 p. (In Russ.)
9. Gorban I. A., Dinariev O. Yu., Safonov S. S. 1982, Study of the influence of rock microstructure on macroscopic thermal and physical properties. *Sovremennyye problemy fundamental'nykh i prikladnykh nauk* [Modern problems of fundamental and applied sciences]. Moscow, 359 p. (In Russ.)
10. Petrov Yu. I. 1982, Physics of small particles. Moscow, 359 p. (In Russ.)
11. Nguyen Kh. T., Milovidova S. D., Sidorkin A. S., Rogazinskaya O. V. 2015, Dielectric properties of composites based on nanocrystalline cellulose with triglycine sulfate. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics], vol. 57, issue 3, pp. 491–494. (In Russ.)
12. Parkhomenko E. I., Bondarenko A. T. 1972, Electrical conductivity of rocks at high pressures and temperatures. Moscow, 278 p. (In Russ.)
13. Bakhterev V. V. 2012, Electrical conductivity at high temperatures of magnetite ore samples is a possible indicator of their mineral composition and genetic characteristics of the deposit. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka* [News of universities. Geology and exploration], no. 5, pp. 40–45. (In Russ.)
14. Belov K. P. 1958, Ferromagnets and antiferromagnets near the Curie point. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], vol. LXV, issue 2, pp. 207–256. (In Russ.) <https://doi.org/10.3367/JFNR.0065.195806i.0207>
15. Bakhterev V. V. 2017, Features of electrical conductivity at high temperatures of titanomagnetites from the Gusevogorsky deposit. *Ural'skiy geofizicheskii vestnik* [Ural Geophysical Bulletin], no. 2 (30), pp.16–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.25698/UGV.2017.2.11701>

The article was received on July 02, 2023

✉ ugv@bk.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-1174-1301>