

**О ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ МАГНЕТИТА В РУДЕ
НА ОСНОВАНИИ СОПОСТАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ
ОМИЧЕСКОГО (ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ) И АКТИВНОГО
(ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ ЧАСТОТОЙ 1 кГц) СОПРОТИВЛЕНИЙ**

Бахтерев В.В. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Изучены температурные зависимости электрического сопротивления при постоянном напряжении и активного сопротивления при переменном напряжении частотой 1 кГц гранат-магнетитовой руды из Гороблагодатского железорудного месторождения в интервале температур 20–800 °С. Выявлены температуры T_0 , при которых электрическое сопротивление при постоянном напряжении становится равным активному сопротивлению при переменном напряжении для образцов руд с различным содержанием магнетита P , %. Установлена корреляционная связь между параметром $H = T_0/20$ °С и P , % вида $P(\text{Fe}_3\text{O}_4, \%) = 98,6 - 2,5 H, R^2 = 0,93$.

Электрические параметры, высокая температура, постоянное и переменное напряжение, омическое и активное сопротивление, магнетит, магнетитовая руда.

**ON THE POSSIBILITY OF EVALUATING THE CONTENT OF MAGNETITE
IN THE ORE BASED ON THE COMPARISON OF THE TEMPERATURE
DEPENDENCE OF THE OHMIC (AT CONSTANT VOLTAGE) AND OF THE
ACTIVE (WHEN AC VOLTAGE FREQUENCY OF 1 kHz) ELECTRIC RESISTANCE**

Bakhterev V.V. – Institute of Geophysics, UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. In this article, we studied the dependence of the ohmic electrical resistance at a constant voltage and of the active resistance at alternating voltage (1 kHz) garnet-magnetite ore from the temperature (20–800 °C). We set the temperature (T_0), at which the electrical resistance values become equal to. This is done for all the samples with different content of magnetite (P , %). Established a correlation between the parameters $H = T_0/20$ °C and P , %: $P(\text{Fe}_3\text{O}_4, \%) = 98.6 - 2.5 H, R^2 = 0.93$.

Electric parameters, high temperature, constant voltage, AC voltage, ohmic and active electrical resistance, magnetite, magnetite ore.

Введение

Исследованию частотной дисперсии электрического сопротивления образцов горных пород посвящено достаточно большое количество работ, например (Воларович и др., 1965; Астраханцев, Улитин, 1968; Лебедев, Шепель, 1996). Изучена зависимость электрического сопротивления горных пород различной влажности в широком диапазоне частот. Приведено сравнение значений электрического сопротивления на постоянном токе и активного сопротивления на переменном токе. Величина сопротивления на постоянном токе всегда была больше, чем на переменном. Цитируемые и другие исследования выполнены только при нормальной температуре.

Впервые температурные зависимости электрического сопротивления при постоянном напряжении и активного сопротив-

ления при переменном напряжении (частота 1 кГц) в интервале 20–900 °С были получены А.Б. Успенской (Успенская, 1985) при исследовании кварца различного генезиса. Для кварца всех генетических групп во всем интервале температур электрическое сопротивление, измеренное при постоянном напряжении, выше сопротивления, измеренного при переменном напряжении. Различие в значениях электрических сопротивлений, измеренных при постоянном и переменном напряжении, для отдельных образцов сохраняется до разных температур (от 600 до 800 °С), выше которых становятся одного порядка. При нормальной температуре различие составляет 5–6 порядков. Это свидетельствует о том, что поляризационные процессы в разной мере присущи кварцам разной модификации, что обусловлено различным

содержанием газово-жидких включений и неоднородностей, которые вносят вклад в процесс поляризации.

При исследовании хромитовых руд (Бахтерев, 2005) были получены температурные зависимости электрического сопротивления для разных типов руд. Для разных образцов совпадение сопротивлений при постоянном и переменном напряжении было зафиксировано при разных температурах. Результаты измерения температурных зависимостей электрического сопротивления при постоянном и переменном напряжении одного образца гранат-магнетитовой руды приведены в работе (Бахтерев, Кузнецов, 2012б).

Научный и практический интерес к температурным зависимостям на постоянном и переменном токе объясняется тем, что они (их соотношение от температуры) не менее тесно связаны с составом и структурой вещества, чем отдельно взятые электрические параметры (Успенская, 1985; Бахтерев, 2009). Это стимулирует поиск новых физических параметров для повышения информативности при поисках и оценке качества минерального сырья. Кроме того, «совместное использование в анализе даже малоточных знаний различной природы оказывается более выгодным и эффективным, чем повышение точности какой-либо одной группы данных» (Садовский, 1968, с. 61).

Цель настоящей работы: исследовать температурные зависимости омического сопротивления при постоянном напряжении и активного сопротивления при переменном напряжении коллекции образцов магнетитовой руды и по их соотношению оценить возможность определения количества магнетита.

О некоторых особенностях электропроводности образцов при постоянном и переменном напряжении

Большинство минералов, горных пород, руд по механизму электропроводности ближе всего примыкают к диэлектрикам. Электропроводность диэлектриков характеризуется тем, что, во-первых, носителями тока являются ионы, электроны и

«дырки», причем, в зависимости от температуры и величины поля в переносе тока участвуют как ионы, так и электроны последовательно или одновременно; во-вторых, при низких температурах наблюдается значительное изменение тока со временем, связанное с поляризацией (Богородицкий и др., 1965; Орешкин, 1965; Сканава, 1949). Наблюдаемое изменение тока со временем обусловлено перераспределением электрического поля в диэлектрике, скорость которого зависит от процессов, вызывающих его изменение. Установление диэлектрической поляризации (поляризация смещения) приводит к быстрому спаданию тока (доли секунды). Процесс накопления объемного заряда (релаксационная поляризация) вызывает медленное спадание тока со временем (часы, сутки). Релаксационная поляризация, в отличие от диэлектрической, тесно связана с тепловым движением поляризующихся частиц. Абсорбционные заряды в диэлектрике образуют электрическое поле, направленное противоположно приложенному полю. Это электродвижущая сила поляризации, которая уменьшает силу тока, проходящего через образец. Релаксационная поляризация может достигать значительных величин, меняется от образца к образцу за счет как количества и физико-химической природы примесей, степени неоднородности образца, так и за счет внешних факторов: времени протекания тока, напряженности электрического поля, температуры (Богородицкий и др., 1965; Сканава, 1949). «Полный ток, являющийся следствием всех этих процессов, можно разделить на спадающий со временем абсорбционный ток и не зависящий от времени остаточный ток» (Сканава, 1949, с. 382).

С повышением температуры исследуемого образца поляризация падает, так как тепловое движение препятствует упорядочению частиц, возрастают диффузия и рекомбинация, способствующие «рассасыванию» объемного заряда, уменьшается величина обратного тока, снижающего проводимость. При высоких температурах остаточное сопротивление приближается к

значению «истинного» и при некоторой температуре может стать равным ему.

При переменном напряжении стационарное распределение заряда в диэлектрике образоваться не успевает вследствие непрерывного изменения направления поля. В переменном электрическом поле с увеличением частоты уменьшается роль приэлектродных эффектов и объемной поляризации, поэтому электрическое сопротивление в этом случае меньше, чем на постоянном токе.

При высоких температурах сопротивление при постоянном напряжении (омическое) и переменном напряжении (активное) совпадают. Это свидетельствует о том, что в этой области температур (где уже нет заметного спада тока со временем) потери определяются проводимостью, а для потерь проводимости характерно совпадение активного сопротивления при переменном напряжении и омического сопротивления при постоянном напряжении (Желудев, 1968).

Методика исследований и образцы

Методика определения электропроводности образцов горных пород и электрических параметров при высоких температурах описана ранее (Бахтерев, Кузнецов, 2012б). 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. Измерения электрического сопротивления осуществляли при постоянном и переменном напряжении. Прибор для измерения электрического сопротивления на постоянном токе – тераомметр Е6-13 с динамическим диапазоном от 10 до 10¹⁴ Ом и пределами допускаемой относительной погрешности измерений от ±2,5 до 4 % в конце диапазона. В качестве прибора для определения электрического сопротивления на переменном токе использован «Измери-

тель LCR цифровой». Рабочая частота прибора 1 кГц.

Образцы гранат-магнетитовой руды отобраны в карьере «Центральный» Гороблагодатского железорудного месторождения.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований приведены на рис. 1, 2 и в таблице.

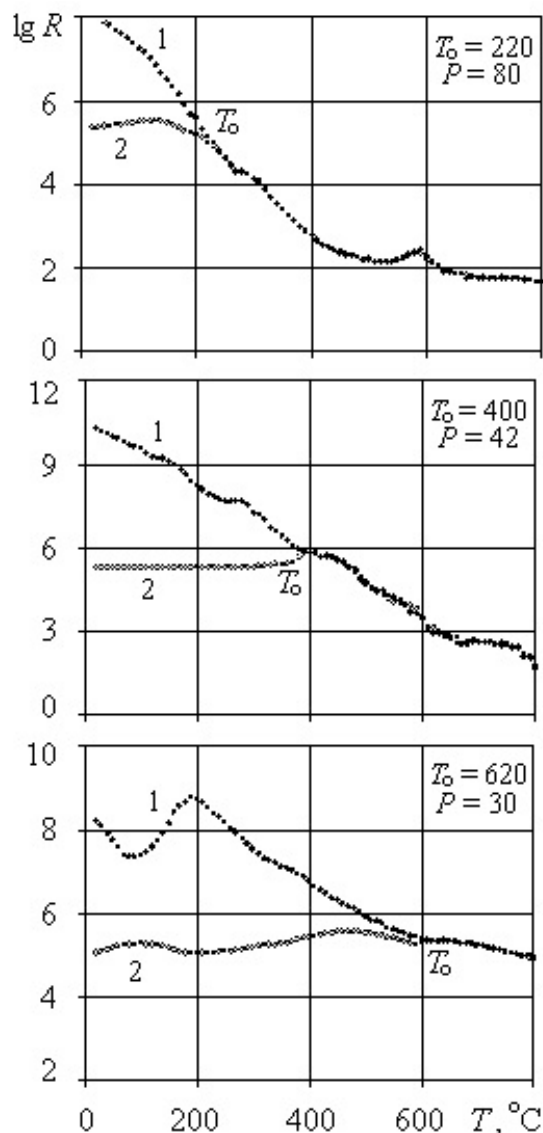


Рис. 1. Температурные зависимости электрического сопротивления при постоянном (кривые 1) напряжении и активного сопротивления (кривые 2) при переменном напряжении образцов магнетитовой руды.

T_0 – температура, при которой электрическое сопротивление при постоянном напряжении становится равным активному сопротивлению при переменном напряжении;

P , % – содержание магнетита в образце

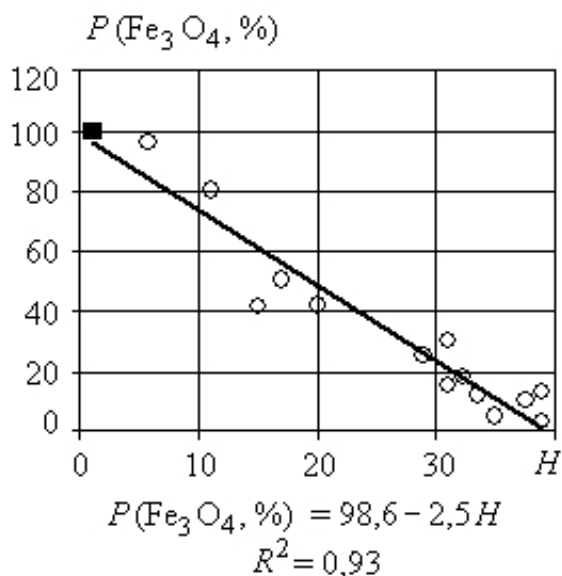


Рис. 2. Связь между температурой T_0 , при которой электрическое сопротивление при постоянном напряжении становится равным активному сопротивлению при переменном напряжении, и содержанием магнетита P , %: кружки – магнетитовая руда, квадрат – кристалл магнетита. Кривая – линия корреляции $P(\text{Fe}_3\text{O}_4, \%) = f(H)$. Здесь $H = T_0/20$ °C

В качестве примера на рис. 1 даны типичные температурные зависимости электрического сопротивления при постоянном (кривые 1) напряжении и активного сопротивления (кривые 2) при переменном напряжении образцов гранат-магнетитовой руды с различным содержанием магнетита.

При нормальной температуре (20 °C) наблюдается большое различие сопротивлений при постоянном и переменном напряжении (достигает 3–4 порядка). Различие обусловлено влиянием сложных поляризационных процессов, происходящих в неоднородной среде. По мере нагревания образцов различие уменьшается и при достижении некоторой температуры (T_0 , для разных образцов разной) становится практически одинаковым. Сопротивление на постоянном токе исследованных образцов во всем температурном интервале уменьшается на 4–6 порядков (Бахтерев, Кузнецов, 2012а). Диапазон изменений электрического сопротивления на переменном токе разный. Для некоторых исследованных

Таблица. Содержание магнетита в руде P , % и температура T_0 , при которой электрическое сопротивление при постоянном напряжении становится равным активному сопротивлению при переменном напряжении

№ п/п	T_0 , °C	P , %
1	115	96
2	220	80
3	300	41
4	340	50
5	400	42
6	580	25
7	620	30
8	625	15
9	635	18
10	670	12
11	700	5
12	750	10
13	777	3
14	780	13

образцов – сопротивление меняется в пределах одного порядка, для других образцов – достигает двух-трех порядков.

Выделим два момента. Во-первых, чем больше содержание магнетита в образце, тем ниже температура T_0 , при которой сопротивление на постоянном токе становится равным активному сопротивлению на переменном токе. Во-вторых, чем выше содержание магнетита в образце, тем значительнее вариации величины активного сопротивления на переменном токе во всем температурном интервале (см. рис. 1). В связи с изложенным представляют интерес результаты исследования монокристалла магнетита. Монокристаллы магнетита были выделены В.С. Иванченко (ИГФ УрО РАН) из зеленых кристаллических сланцев (Ольховское рудопроявление, Средний Урал) и предоставлены автору для исследований. Были получены температурные зависимости электрического сопротивления при постоянном напряжении и активного сопротивления при переменном на-

пряжении. Оказалось, что электрическое сопротивление при постоянном напряжении и активное сопротивление при переменном напряжении во всем температурном интервале 20–800 °С, во-первых, совпадают, во-вторых, варьируют в пределах почти трех порядков. Параметры P и H монокристалла отклоняются от кривой $P(\text{Fe}_3\text{O}_4, \%) = f(H)$ исследованных образцов магнетитовой руды, что вполне естественно, из-за различия их генезиса и минерального состава.

По температурным зависимостям электрического сопротивления при постоянном и переменном напряжении определены значения температур T_0 и сопоставили их с содержанием магнетита в образцах (см. таблицу и рис. 2).

Приведенные результаты справедливы для гранат-магнетитовой руды Гороблагодатского месторождения, для других типов руд и месторождений они могут отличаться в силу их генетических особенностей и минерального состава.

Автор благодарен А.Ж. Кузнецову (УГГУ), предоставившему из личной коллекции образцы магнетитовой руды для настоящего исследования, Г.А. Куприяновой (Институт Уралмеханобр), выполнившей химические анализы, В.С. Иванченко (ИГФ УрО РАН) – за предоставленные монокристаллы магнетита.

Работа поддержана Уральским отделением РАН, проект № 15-18-5-19.

Заключение

Получены температурные зависимости электрического сопротивления при постоянном напряжении и активного сопротивления при переменном напряжении частотой 1 кГц образцов гранат-магнетитовой руды.

Установлена связь между температурой T_0 , при которой электрическое сопротивление при постоянном напряжении становится равным активному сопротивлению при переменном напряжении, и содержанием магнетита в руде $P, \%$.

Для исследованных гранат-магнетитовых руд Гороблагодатского железорудного месторождения она выражается соотноше-

нием $P(\text{Fe}_3\text{O}_4, \%) = f(H)$. Здесь $H = T_0/20$ °С.

В комплексе с полученными ранее (Бахтерев, Кузнецов, 2012а; б) эмпирическими зависимостями $\lg R_0 = f(E_0)$, дающими дополнительную информацию о типоморфных признаках магнетитового оруденения (парагенезис, тип руды, минеральный состав) и пространственном положении относительно сиенитового массива исследуемых образцов, выявленная связь $P, \% = f(T_0)$, возможно, позволит оперативно (без дополнительных затрат средств и времени) оценить содержание магнетита в руде.

Литература

- Астраханцев Г.В., Улитин Р.В. Комплексная электропроводность горных пород на звуковых частотах и способы ее изучения в полевых условиях // Электрометрия при поисках сульфидных месторождений. Свердловск, 1968. С. 41–47.
- Бахтерев В.В. Особенности высокотемпературной электропроводности хромитовых руд и вмещающих их гипербазитов // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 8. С. 794–803.
- Бахтерев В.В. Диэлектрические потери в рудообразующих хромшпинелидах в интервале температур 20–800 °С // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 7. С. 840–845.
- Бахтерев В.В., Кузнецов А.Ж. Высокотемпературная электропроводность магнетитовых руд в связи с их генезисом и минеральным составом (на примере Гороблагодатского скарново-магнетитового месторождения) // Геология и геофизика. 2012а. Т. 53. № 2. С. 270–276.
- Бахтерев В.В., Кузнецов А.Ж. Влияние Кушвинского сиенитового интрузива на электрические параметры магнетита в рудах и вмещающих породах Гороблагодатского железорудного месторождения // Уральский геофизический вестник. 2012б. № 1(19). С. 6–11.
- Богородицкий Н.П., Волокобинский Ю.М., Воробьев А.А., Тареев Б.М. Теория диэлектриков. М.; Л.: Энергия, 1965. 344 с.
- Воларович М.П., Валеев К.А., Пархоменко Э.И. Удельное сопротивление горных пород в постоянном и переменном элек-

трических полях // Физика Земли. 1965. № 5. С. 51–56.

Желудев И.С. Физика кристаллических диэлектриков. М.: Наука, 1968. 463 с.

Лебедев Т.С., Шепель С.И. Влияние водонасыщенности и пористости на электрические свойства пород, вскрытых Криворожской сверхглубокой скважиной (Украина) // Геофизический журнал. 1996. Т. 18. № 1. С. 62–72.

Орешкин П.Т. Электропроводность огнеупоров и релаксационные явления на барьерных слоях. М.: Metallurgy, 1965. 152 с.

Садовский М.А. Насущные задачи геофизики в комплексе наук о Земле // Вестник АН СССР. 1968. № 1. С. 60–63.

Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей). М.; Л.: Гостоптехиздат, 1949. 500 с.

Успенская А.Б. Температурные зависимости электрического сопротивления жильного кварца оловорудных месторождений // Новые данные о минералах / Отв. редактор Г.П. Барсанов. М.: Наука, 1985. Вып. 32. С. 146–154.