

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 550.8:553.08:53/54

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ОБРАЗЦОВ МАГНЕТИТОВЫХ РУД В СВЯЗИ С ИХ ГЕНЕЗИСОМ
И МИНЕРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ
(на примере Гороблагодатского скарново-магнетитового месторождения)

В.В. БАХТЕРЕВ

*Институт геофизики УрО РАН
100, Амундсена ул., г. Екатеринбург 620016, Россия
e-mail: ugv@bk.ru*

Исследованы температурные зависимости электрического сопротивления (при постоянном и переменном напряжении частотой 1 кГц) образцов магнетитовой руды и магнетита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами Гороблагодатского железорудного месторождения в интервале температур 20–800 °С. Получены при 20 °С частотные зависимости активного электрического сопротивления и диэлектрических потерь в диапазоне 0,01–100 кГц. Для магнетитовой руды и магнетита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами в исследованных температурном и частотном диапазонах выявлена связь между электрическим сопротивлением (lgR) и диэлектрическими потерями ($lgtg\delta$). Характер связей различный, что позволяет однозначно разделить руду и магнетит. Установлены параметры высокотемпературной электропроводности (энергия активации E_0 и коэффициент электрического сопротивления lgR_0). Параметры исследованных образцов пироксен-ортоклаз-магнетитовых, гранат-магнетитовых, эпидот-хлорит-магнетитовых руд образуют прямую, как бы формируя её разные участки. Корреляционная связь между параметрами E_0 и lgR_0 образцов этих руд имеет вид $lgR_0 = 2,2-6,6 E_0$. Параметры образцов магнетита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами также образуют прямую, как бы формируя её разные участки $lgR_0 = 2,1-6,6 E_0$. Установлено, что по мере удаления от интрузива электрические параметры образцов магнетитовой руды изменяются: увеличивается E_0 , уменьшается lgR_0 . Для магнетита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами наблюдается обратная зависимость — по мере удаления от сиенит-порфиров уменьшается E_0 , увеличивается lgR_0 . Выявлены температуры T_0 , при которых электрическое сопротивление при постоянном напряжении становится равным активному сопротивлению при переменном напряжении для образцов гранат-магнетитовой руды с различным содержанием магнетита P , %. Установлена корреляционная связь между параметром T_0 и содержанием магнетита в руде $P(Fe_3O_4, \%) = 323,4 - 47,4 \ln(T_0)$, $R^2 = 0,93$.

К л ю ч е в ы е с л о в а: Электрические параметры; постоянное и переменное напряжение; магнетит; магнетитовая руда; омическое и активное сопротивление; диэлектрические потери; частотная дисперсия.

DOI:10.32454/0016-7762-2018-6-77-84

AN INTEGRATED STUDY OF THE ELECTRICAL PARAMETERS OF THE SAMPLES
OF MAGNETITE ORES IN RELATION TO THEIR GENESIS AND MINERAL COMPOSITION
(on the example of the goroblagodatskoe skarn-magnetite deposit)

BAKHTEREV V.V.

*Institute of Geophysics UB RAS
100, Amundsen street, Ekaterinburg 620016, Russia
e-mail: ugv@bk.ru*

The temperature dependences of electrical resistance (at DC and AC voltage at 1 kHz frequency) of the samples of the magnetite ore and magnetite from the contact of the syenite-porphiry with the volcanic-sedimentary rocks from the Goroblagodatskoye iron-ore deposit in the temperature range 20–800 °C have been studied. The frequency

dependences of the active electrical resistance and dielectric losses in the range 0,01–100 kHz have been obtained at 20 °C. For the magnetite ore and magnetite from the syenite-porphry contact with volcanogenic sedimentary rocks in the studied temperature and frequency ranges, the relationship between electrical resistance ($\lg R$) and dielectric losses ($\lg \delta$) has been revealed. The character of the relations is different, that allows to separate uniquely the magnetite ore and magnetite. The parameters of high-temperature conductivity (activation energy E_0 and electrical resistance coefficient $\lg R_0$) have been obtained. The parameters of the studied samples of pyroxene-orthoclase-magnetite, garnet-magnetite, epidote-chlorite-magnetite ores form a straight line, as if forming its different parts. The correlation between the parameters of E_0 and $\lg R_0$ samples of these ores has the following form: $\lg R_0 = 2,2 - 6,6 E_0$. The parameters of magnetite samples from the contact of syenite porphyry with volcanogenic-sedimentary rocks also form a straight line, as if forming its different parts, with the correlation form as following: $\lg R_0 = 2,1 - 6,6 E_0$. It has been found that with the increasing distance to the syenite intrusion, the electrical parameters of magnetite ore change: E_0 increases, $\lg R_0$ decreases. For magnetite from the contact of the syenite-porphry and volcanic-sedimentary rocks there is another picture — the further you are from the syenite-porphyrtes, the smaller E_0 is, and the bigger the $\lg R_0$ is. The T_0 temperatures, at which the electrical resistance at the constant voltage becomes equal to the active resistance at the alternating voltage for the samples of garnet-magnetite ore with the different magnetite content, $P, \%$, have been revealed. The correlation between the T_0 parameter and the magnetite content in the ore, $P(\text{Fe}_3\text{O}_4, \%) = 323,4 - 47,4 \ln(T_0)$, $R_2 = 0,93$, has been established.

Key words: electric parameters; high temperature; constant voltage; alternating voltage, magnetite; magnetite ore; ohmic and active electrical resistance; dielectric loss; frequency dispersion.

Гороблагодатское месторождение магнетитовых руд расположено в интенсивно дислоцированном вулканогенно-осадочном комплексе пород нижнего силура [8, 12, 16]. Базальты и их туфы, туфоконгломераты, туфогравелиты, туфопесчаники и согласно залегающие с ними рудные тела пластообразной формы, полого погружаются в восточном направлении, образуя моноклираль. В южной части месторождения моноклираль ограничена крутопадающим контактом Кушвинской диорит-сиенитовой интрузии.

Становление плутонического комплекса сопровождалось прорывом рудоносной толщи субвулканическими образованиями (дайками) сиенит-порфиров. При внедрении даек в магнетитовые руды в одних случаях происходило частичное растворение раннее образованных минералов, вместо которых образовывались калиевый полевой шпат, пироксен, скаполит, магнетит перекристаллизовывался, в результате формировались разные типы руд. По мере удаления от дайки степень преобразований уменьшалась до полного их исчезновения, где руды сохранили свои текстурно-структурные первичные особенности. По данным [6, 11], на месторождении выделяют три типа руд: «оспенный», скарновый, гидросиликатный. Все типы руд не различаются по набору элементов-примесей, но отличаются по их содержанию. «Наиболее чистым является магнетит «оспенных» руд: содержания марганца, магния и алюминия наименьшее среди руд Гороблагодатского месторождения, но при этом резко возрастает количество титана и ванадия. Скарновые руды характеризуются пониженными содержаниями титана и ванадия, высокими — алюминия и марганца. Гидросиликатным рудам свойственны минимальные значения титана, ванадия и магния, что является их отличительной чертой» [11, с. 14].

Магнетит характеризуется большой распространенностью не только в рудах, но и во вмещающих породах, представляет собой типоморфный минерал с довольно сложным и разнообразным химическим составом. Разные генерации магнетита,

возникающие на различных стадиях формирования месторождения и на разных расстояниях от интрузива различаются между собой по составу, формам и размерам выделений, физическим, в том числе электрическим, свойствам [1, 8, 9, 15].

В [2–4] исследована температурная зависимость электрического сопротивления образцов магнетитовой руды различного парагенезиса («оспенный», скарновый, гидросиликатный) в диапазоне 20–800°C. Установлены параметры высокотемпературной электропроводности (энергия активации E_0 и коэффициент электрического сопротивления $\lg R_0$). Выделено несколько областей, в каждой из которых руда представлена определённым минеральным составом и парагенезисом. Для каждого типа руд прослеживается связь между электрическими параметрами, которая имеет вид $\lg R_0 = a - bE_0$, где a и b — коэффициенты. Так, установлено, что параметры образцов пироксен-ортоклаз-магнетитовых, гранат-магнетитовых, эпидот-хлорит-магнетитовых руд образуют прямую, формируя её разные участки. Корреляционная связь между параметрами этих руд имеет вид: $\lg R_0 = 2,2 - 6,6E_0$ (рис. 1).

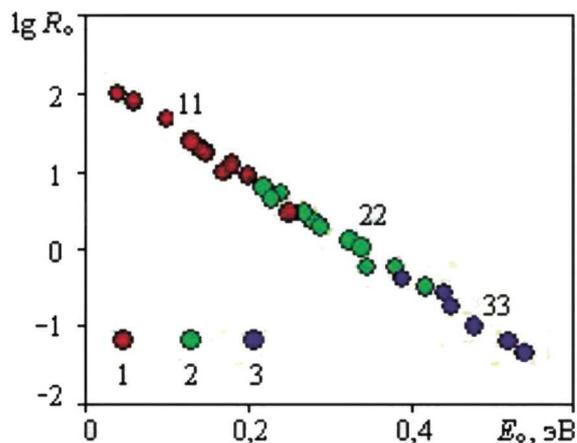


Рис. 1. Зависимости $\lg R_0 = f(E_0)$ пироксен-ортоклаз-магнетитовых — «оспенных» (1), гранат-магнетитовых — скарновых (2), эпидот-хлорит-магнетитовых — гидросиликатных (3) руд: числа рядом с точками — номера образцов

Пироксен-магнетитовые руды («оспенный» парагенезис) — высокотемпературные образования, хорошо раскристаллизованы, имеют максимальные размеры зёрен. Эти руды пространственно ближе всех из типов руд находятся к интрузиву. Образцы этих руд обладают самыми большими значениями коэффициентами электрического сопротивления lgR_0 (0,5—2,1) и самыми малыми значениями энергии активации E_0 (0,07—0,02) из всех исследованных образцов. Дальше от интрузива расположены среднетемпературные руды — гранат-магнетитовые (скарновые). Ещё дальше — низкотемпературные слабокристаллизованные, мелкозернистые (гидросиликатные). По мере удаления от интрузива электрические параметры образцов руды изменяются: увеличивается E_0 , уменьшается lgR_0 [3, 4].

С другой стороны, движение магматического расплава приводило к пластичным деформациям и частичному переплавлению минералов в примыкающих к дайкам вулканогенно-осадочному комплексу пород с образованием магнетитовых кайм. Кайма магнетитовых руд формировалась путём оттягивания магнетита к внешней кромке даек. В самой дайке зёрна магнетита приобретали удлинённые формы, ориентировка которых совпадает с положением контакта [10]. На рис. 2 приведена фотография одной из двух полировок исследованных образцов-кубиков из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами (образец вырезан перпендикулярно контакту).

В Тагило-Кушвинском железорудном районе известны многочисленные мелкие месторождения, рудопроявления и точки минерализации. Обращает внимание слабая их изученность. Многие из них находятся в удалении от «материнских» интрузий и изначально считались малоперспективными. С позиции первично вулканогенно-осадочного генезиса магнетитовых руд необходима переоценка перспективности рудоносности выявленных в районе мелких месторождений, рудопроявлений и точек минерализации. При проведении поисковых и оценочных работ необходимо учитывать кроме геологических поисковых критериев и предпосылок, а также результаты исследований высокотемпературной электропроводности магнетита — магнетитовой руды (для разбраковки магнетита от руды и

магнетита из контакта сиенитов с вмещающими породами).

Цель настоящей работы: исследовать температурную и частотную зависимости электрического (омического) сопротивления при постоянном напряжении и активного сопротивления при переменном напряжении образцов магнетитовых руд и магнетита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами. Определить их электрические параметры (энергию активации и коэффициент электрического сопротивления), установить характер их распределения в связи с генезисом и минеральным составом, оценить содержание магнетита в руде. На основе комплексного использования электрических параметров повысить информативность и достоверность разведки.

Методика исследования и образцы. Методика определения электропроводности образцов горных пород и электрических параметров при высоких температурах описана в [3, 4]. Образцы для исследований вырезали в форме кубика с ребром 0,02 м. Измерения выполнены в открытой системе при атмосферном давлении. Электрическое сопротивление измеряли на двухэлектродной установке через каждые 10°C в интервале температур 20—800°C. Скорость нагревания 0,066 град./с. Температуру в системе определяли платино-платинородиевой термопарой в 0,01 м от образца. Температурные зависимости электрического сопротивления получали при постоянном напряжении, активного сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь — при переменном напряжении.

Прибор для измерения электрического сопротивления при постоянном напряжении — тераомметр Е6-13 с динамическим диапазоном от 10 до 10¹⁴ Ом и пределами допустимой относительной погрешности измерений от ±2,5 до 4% в конце диапазона.

Для определения энергии активации E_0 и коэффициента электрического сопротивления lgR_0 кривые высокотемпературной электропроводности были построены в координатах $lgR, 1/T$. Энергия активации E_0 определена по величине тангенса угла наклона касательной к кривой $lgR = f(1/T)$ в некоторой точке прямолинейного участка в температурной области, где кривая $lgR = f(1/T)$ не искажена аномальными эффектами. Этому условию удовлет-



Рис. 2. Фотография полировки образцов-кубиков из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами: числа — номера образцов в полировке

воряет окрестность температуры магнитного превращения. Коэффициент электрического сопротивления $\lg R_0$ определён как величина отрезка, отсекаемого касательной к кривой $\lg R = f(1/T)$ на оси ординат.

В качестве измерительного прибора для определения температурных зависимостей активного электрического сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь при переменном напряжении использовался «Измеритель L, C, R цифровой» E7-8. Прибор позволяет измерять тангенс угла диэлектрических потерь и активное сопротивление. Рабочая частота прибора 1000 Гц. Частотную дисперсию активного сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь исследовали при комнатной температуре в интервале 0,01–100 кГц (прибор — «Измеритель иммитанса» LCR-819).

Значительная часть минералов, горных пород, руд в большей степени является диэлектриком. Из всего многообразия физических свойств важнейшими, характеризующими вещество как диэлектрик, являются электрические свойства: поляризация, диэлектрическая проницаемость, электропроводность. При этом большинство минералов — ионные кристаллические диэлектрики.

Электропроводность диэлектриков характеризуется тем, что, во-первых, носителями тока являются ионы, электроны и «дырки», причём 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 и накоплением объёмного заряда в диэлектрике [5, 13, 14]. Наблюдаемое изменение тока со временем обусловлено перераспределением электрического поля в диэлектрике, скорость которого зависит от процессов, вызывающих это изменение.

В горных породах поляризация является результирующей нескольких различных процессов. Возникновение того или иного вида поляризации определяется физико-химическими свойствами среды, вещественным составом, структурными и текстурными особенностями. Ввиду неодинакового времени установления различных видов поляризации диэлектрическая проницаемость реального вещества в зависимости от частоты может меняться существенно. В горных породах, представляющих многофазные системы, возможно одновременное проявление большинства видов поляризации, что значительно осложняет зависимости электрического сопротивления, диэлектрических потерь от частоты электрического поля. Частотная зависимость сопротивления, диэлектрических потерь является характеристикой материала и определяется для каждого материала не только свойствами молекул, но и наличием и составом примесей, дисперсностью среды. В качестве примера на рис. 3 пока-

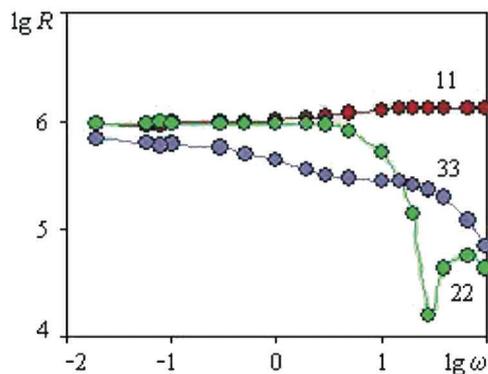


Рис. 3. Частотные зависимости электрического сопротивления образцов магнетитовых руд: числа — номера образцов (см. рис. 1)

заны частотные зависимости электрического сопротивления различных типов руд.

Установление диэлектрической поляризации (поляризация смещения) приводит к быстрому спаду тока (доли секунды). Процесс накопления объёмного 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 счёт как количества и физико-химической природы примесей, степени неоднородности образца, так и за счет внешних факторов: времени протекания тока, напряженности электрического поля, температуры [5, 14]. «Полный ток, являющийся следствием всех этих процессов, можно разделить на спадающий со временем абсорбционный ток и не зависящий от времени остаточный ток» [14, с. 382].

С повышением температуры исследуемого образца поляризация падает, так как тепловое движение препятствует упорядочению частиц, возрастают диффузия и рекомбинация, способствующие «рассасыванию» объёмного 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 объёмной 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 [7].

В качестве примера на рис. 4 даны типичные температурные зависимости электрического сопротивления при постоянном (кривые 1) напряжении и активного сопротивления (кривые 2) при переменном напряжении образцов эпидот-хлорит-магнетитовой руды. При нормальной температуре (20°C) наблюдается большое различие сопротивлений при постоянном и переменном напряжении (до четырех порядков). 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 четыре—шесть порядков [3, 4]. Диапазон изменений электрического сопротивления на переменном токе разный. Для некоторых

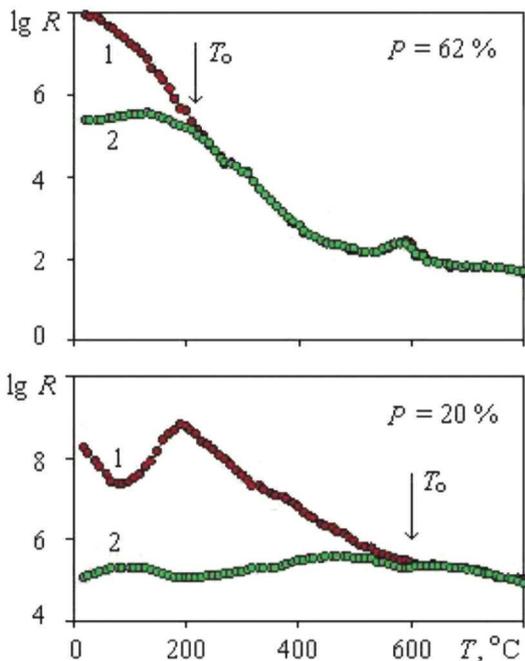


Рис. 4. Зависимости $\lg R = f(T)$ электрического сопротивления при постоянном (кривые 1) напряжении и активного сопротивления (кривые 2) при переменном напряжении образцов магнетитовой руды; T_0 — температура, при которой электрическое сопротивление при постоянном напряжении становится равным активному сопротивлению при переменном напряжении; $P, \%$ — содержание магнетита в образце

исследованных образцов — сопротивление меняется в пределах одного порядка, для других — достигает двух—трёх порядков.

Установлено, чем больше содержание магнетита в образце, тем ниже температура T_0 , при которой сопротивление на постоянном токе становится равным активному сопротивлению на переменном токе. По температурным зависимостям электрического сопротивления при постоянном и переменном напряжении для образцов гранат-магнетитовой руды определили значения температур T_0 и сопоставили их с содержанием магнетита (рис. 5).

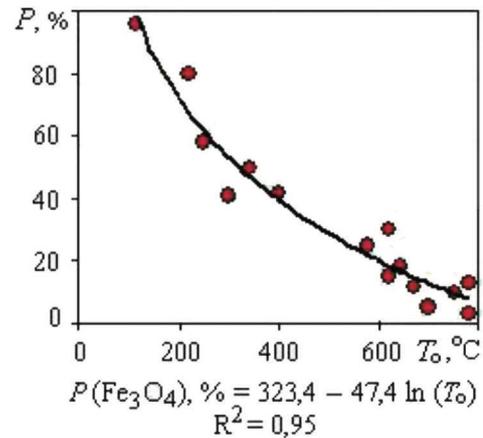


Рис. 5. Связь между температурой T_0 , при которой электрическое сопротивление при постоянном напряжении становится равным активному сопротивлению при переменном напряжении, и содержанием магнетита $P, \%$: кружки — экспериментальные значения $P(\text{Fe}_3\text{O}_4), \%$ = $f(T_0)$; кривая — линия корреляции

Особенности электрических параметров (электропроводности) магнетита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами. В качестве примера сопоставлены кривые $\lg R = f(T)$ образцов магнетита (рис. 2, образцы 1 и 4) из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами (рис. 6). Для всех исследованных образцов магнетита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами при температурах выше 200–500°C установлено совпадение электрического сопротивления при постоянном напряжении с электрическим сопротивлением при переменном напряжении. При этом электрическое сопротивление в температурной области 20–500°C в случае переменного напряжения выше электрического сопротивления при постоянном напряжении. Этот, впервые обнаруженный факт, пока не находит объяснения. Хотя, возможно, причиной такого поведения электропроводности, может быть «чистота» магнетита от разного рода примесей.

На рис. 7 показана связь между E_0 и $\lg R_0$ исследованных образцов магнетита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными поро-

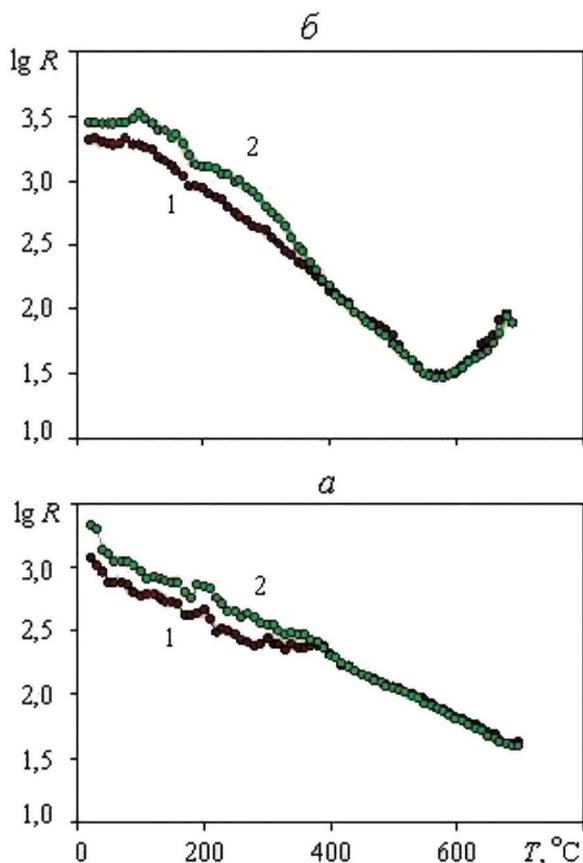


Рис. 6. Зависимости $\lg R = f(T)$ электрического сопротивления при постоянном (кривые 1) напряжении и активного сопротивления (кривые 2) при переменном напряжении образцов магнетита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами: а) и б) — образцы 1 и 4 из полировки (см. рис. 2)

дами. Прослеживается связь между электрическими параметрами, которую можно выразить (как и для магнетитовой руды) в виде: $\lg R_0 = a - bE_0$, где a и b — коэффициенты. Для совокупности образцов магнетитовой руды (рис. 1) и магнетита из кон-

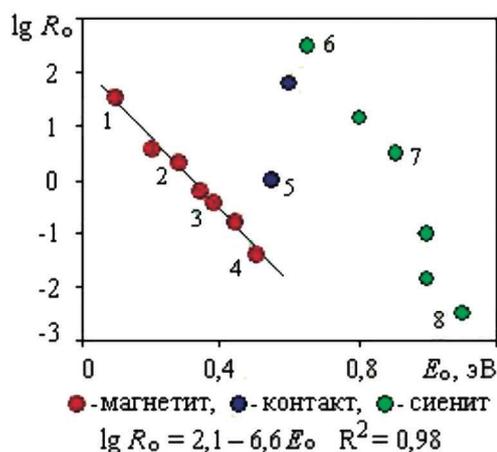


Рис. 7. Зависимости $\lg R_0 = f(E_0)$ исследованных образцов магнетита и сиенита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами: кружки — экспериментальные значения $\lg R_0 = f(E_0)$; прямая — линия корреляции; числа около некоторых точек — номера образцов-кубиков в полировке (см. рис. 2)

такта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами (рис. 7) коэффициенты b совпадают: $b = 6,6$. Различаются уравнения величиной коэффициента a . Корреляционное уравнение, выражающее связь между параметрами образцов магнетита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами, имеет вид $\lg R_0 = 2,1 - 6,6E_0$. Однако хотя уравнение регрессии имеет тот же вид, а коэффициенты a и b — близки, характер изменения параметров магнетита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами существенно иной. По мере удаления от интрузива электрические параметры образцов магнетитовой руды (рис. 1), так же, как и исследованных ранее [4] изменяются следующим образом: увеличивается E_0 , уменьшается $\lg R_0$. Для образцов магнетита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами эта зависимость обратная: с удалением от контакта сиенит-порфиров уменьшается E_0 ,

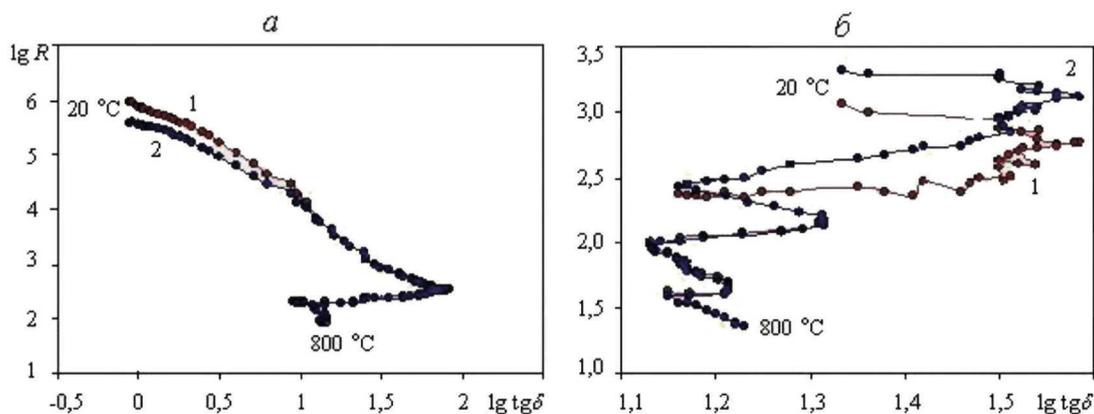


Рис. 8. Типичные корреляционные связи между электрическим сопротивлением при постоянном напряжении (кривые 1), при переменном напряжении (кривые 2) и диэлектрическими потерями гранат-магнетитовой руды (а) и магнетита из контакта сиенит-порфиров с вулканогенно-осадочными породами (б) в температурном диапазоне 20—800°C

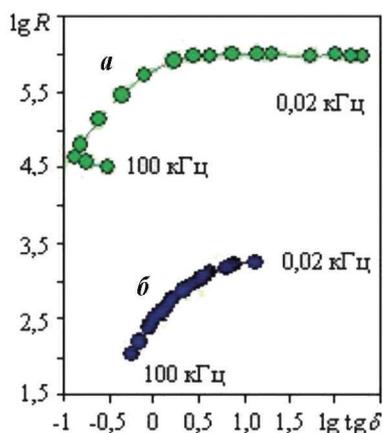


Рис. 9. Корреляционные связи между электрическим сопротивлением при переменном напряжении и диэлектрическими потерями гранат-магнетитовой руды (а) и магнетита из контакта сиенит-порфиоров с вулканогенно-осадочными породами (б) в частотном диапазоне 0,02–100 кГц

увеличивается $lg R_0$ (рис. 7). Заслуживают внимания корреляционные связи между электрическим сопротивлением и диэлектрическими потерями $lg R = f(lgtg\delta)$ в температурном интервале 20–800°C (рис. 8) и частотном диапазоне 0,02–100 кГц (рис. 9). Характер связей для магнетитовой руды и магнетита из контакта сиенит-порфиоров с вулканогенно-осадочными породами различный. Для магнетитовой руды она может быть аппроксимирована тремя прямыми. В низкотемпературной области с увеличением температуры электрическое сопротивление уменьшается, а диэлектрические потери растут. В среднетемпературной области (для отдельных образцов от 230 до 570°C) с увеличением температуры электрическое сопротивление также уменьшается, а диэлектрические потери растут, однако скорость изменения этих параметров выше, чем в низкотемпературной области. Величина $lgtg\delta$ достигает максимального значения в точке перегиба (для образца, приведённого на рис. 8, а, это происходит при температуре 530°C). При дальнейшем увеличении температуры диэлектрические потери и электрическое сопротивление падают. Точки перегиба — некая характеристика образца. В этой температурной области, возможно, меняется механизм электропроводности и поляризации. Иной, более сложный характер имеет связь между R и $lgtg\delta$ для магнетита из контакта сиенит-порфиоров с вулканогенно-осадочными породами (рис. 8, б). Возможно следующее объяснение.

В физике диэлектриков известно, что «кристаллические диэлектрики сложной структуры по характеру диэлектрических потерь можно разделить на два типа: слюды и кварца. Для диэлектриков первого типа характерно совпадение сопротивления при переменном напряжении с сопротивлением при постоянном напряжении только при достаточно высоких температурах, т. е. когда заметного спада тока уже нет [14, с. 416]. В области же более низких температур сопротивление постоянному току превышает сопротивление переменному току» [14, с. 417].

«К типу кварца принадлежат кристаллы с резко выраженной анизотропией электропроводности. Для этих кристаллов характер диэлектрических потерь зависит, по видимому, от направления поля. Для кварца, например, в направлении его оптической оси сопротивление переменному току почти совпадает с сопротивлением постоянному току. В направлении же, перпендикулярном оптической оси сопротивление переменному току меньше сопротивления постоянному току на целый порядок» [14, с. 417].

Закключение

Электрические параметры образцов магнетита из контакта сиенит-порфиоров с вулканогенно-осадочными породами (электрическое сопротивление при постоянном и переменном напряжении, характер изменения диэлектрических потерь, характер изменения энергии активации и коэффициента электрического сопротивления) отличаются от параметров образцов магнетитовой руды.

Эти отличия могут быть использованы для детального прослеживания изменений состава руд по удалению от интрузива; проводить разбраковку точек минерализации: разделять магнетит рудный и магнетит из контакта сиенит-порфиоров с вмещающими породами.

Обсуждаемый комплекс электрических методов позволяет получить дополнительную информацию о типоморфных признаках магнетитового оруденения (парагенезис, тип руды, минеральный состав) и пространственном положении относительно сиенитового массива исследуемых образцов. Выявленная связь $P, \% = f(T_0)$ оперативно (без дополнительных затрат средств и времени), возможно, позволит оценить содержание магнетита в руде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баклаев Я.П., Бочарникова Т.Д. Зависимость изменения состава и некоторых свойств магнетита от условий их образования // Скарново-магнетитовые месторождения Урала / Отв. ред. Г.Б. Ферштатер, Я.П. Баклаев. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1978. С. 82–92.
2. Бахтерев В.В. Высокотемпературная электропроводность магнетитовой руды (магнетита) в связи с генетическими особенностями месторождения. // Доклады РАН. 2010. Т. 433. № 4. С. 496–498.
3. Бахтерев В.В. Электропроводность при высоких температурах образцов магнетитовых руд — возможный индикатор их минерального состава и генетических особенностей месторождения // Изв. вузов. Геология и разведка. 2012. № 5. С. 40–45.

4. Бахтерев В.В., Кузнецов А.Ж. Высокотемпературная электропроводность магнетитовых руд в связи с их генезисом и минеральным составом // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 2. С. 270–276.
5. Богородицкий Н.П., Волокобинский Ю.М., Воробьев А.А., Тареев Б.М. Теория диэлектриков. М.-Л.: Энергия, 1965. 344 с.
6. Железородная база России / Под ред. В.П. Орлова, М.И. Верихина, Н.И. Голивкина. М.: Геоинформмарк, 1998. 842 с.
7. Желудев И.С. Физика кристаллических диэлектриков. М.: Наука, 1968. 463 с.
8. Карасик М.А. Промышленные типы контактово-метасоматических месторождений в Тагило-Кушвинском районе и особенности распределения элементов-примесей в рудах этих месторождений // Железородная база Тагило-Кушвинского промышленного района. Свердловск: УФАН СССР, 1957. С. 64–98.
9. Кузнецов А.Ж. Распределение элементов-примесей в магнетитах Гороблагодатского железорудного месторождения // Изв. вузов. Геология и разведка. 2003. № 5. С. 21–24.
10. Кузнецов А.Ж. Влияние микросиенитов и сиенит-порфиров на породы и руды Гороблагодатского железорудного месторождения (Урал) // Металлогения древних и современных океанов — 2004. Достижения на рубеже веков. Т. 1. Проблемы металлогенического анализа месторождений черных и цветных металлов. Материалы десятой научной студенческой школы. Миасс: ИМин. УрО РАН, 2004. С. 152–155.
11. Кузнецов А.Ж. Строение и условия формирования магнетитовых залежей Гороблагодатского железорудного месторождения (Средний Урал). Автореф. дис ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2008. 22 с.
12. Овчинников Л.Н. Контактво-метасоматические месторождения Северного и Среднего Урала // Тр. Горно-геологического института УФАН СССР. В. 89. Свердловск, 1960. 495 с.
13. Орешкин П.Т. Электропроводность огнеупоров и релаксационные явления на барьерных слоях. М.: Металлургия, 1965. 152 с.
14. Сканава Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей). М.-Л.: Гостехтеориздат, 1949. 500 с.
15. Типоморфизм минералов: Справочник / Под ред. Л.В. Чернышевой. М.: Недра, 1989. 560 с.
16. Штейнберг Д.С. Геологическое строение Тагило-Кушвинского железорудного района // Железородная база Тагило-Кушвинского промышленного района. Свердловск: УФАН СССР, 1957. С. 5–20.

REFERENCES

1. Baklaev Ya.P., Bocharnikova T.D. Zavisimost' izmeneniya sostava i nekotorykh svoystv magnetita ot usloviy ih obrazovaniya [Dependence of changes in the composition and some properties of magnetite on the conditions of their formation]. *Skarnovo-magnetitovye mestorozhdeniya Urals* — [Skarn-magnetite deposits of the Urals]. Ed.: G.B. Fershtater, Ya.P. Baklaev. Sverdlovsk: Ural scientific center, USSR Academy of Sciences Publ., 1978, pp. 82–92 (In Russian).
2. Bakhterev V.V. Vysokotemperaturnaya jelektroprovodnost' magnetitovoy rudy (magnetita) v svyazi s geneticheskimi osobennostyami mestorozhdeniya [High-temperature electric conductivity of magnetite ore (magnetite) in connection with genetic properties of the deposit]. *Doklady RAN* — [Doklady Earth Sciences], 2010, Vol. 433, no. 4, pp. 496–498 (In Russian).
3. Bakhterev V.V. Jelektroprovodnost' pri vysokih temperaturah obrazcov magnetitovykh rud — vozmozhnyj indikator ih mineral'nogo sostava i geneticheskikh osobennostej mestorozhdeniya [The high-temperature conductivity of magnetite ore as the possible basis for predicting the mineral composition and the genetic peculiarities of the deposits]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2012, no. 5, pp. 40–45 (In Russian).
4. Bakhterev V.V., Kuznetsov A.Zh. Vysokotemperaturnaya jelektroprovodnost' magnetitovykh rud v svyazi s ih genezisom i mineral'nym sostavom [High-temperature conductivity of magnetite ores in relation to their genesis and mineral composition (by the example of the Goroblagodatskoe skarn-magnetite deposit)]. *Geologiya i geofizika* — [Russian Geology and Geophysics], 2012, Vol. 53, no. 2, pp. 270–276.
5. Bogoroditsky N.P., Volokobinskii Yu.M., Vorob'ev A.A., Tareev B.M. *Teoriya dijelektrikov* — [Theory of dielectrics], Moscow-Leningrad, Energy Publ., 1965. 344 p. (In Russian).
6. *Zhelezorudnaya baza Rossii* — [Iron ore base of Russia], Editor M.I. Orlov, M.I. Verihin, N.I. Golivkin, Moscow, Geoinformmark [Geoinformmark Publ.], 1998, 842 p. (In Russian).
7. Zheludev I.S. *Fizika kristallicheskikh dijelektrikov* — [Physics of crystal dielectrics], Moscow, Nauka Publ., 1968, 463 p. (In Russian).
8. Karasik M.A. Promyshlennyye tipy kontaktovo-metasomaticheskikh mestorozhdenij v Tagilo-Kushvinskom rajone i osobennosti raspredeleniya jelementov-primesej v rudah jetih mestorozhdenij [Industrial types of contact-metasomatic deposits in Tagil-Kushvinsky district and peculiarities of distribution of impurity elements in ores of these deposits]. *Zhelezorudnaya baza Tagilo-Kushvinskogo promyshlennogo rajona* — [Iron ore base of Tagil-Kushvinsky industrial district], Sverdlovsk, Ural branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1957, pp. 64–98 (In Russian).
9. Kuznetsov A.Zh. Raspredelenie jelementov-primesej v magnetitah Goroblagodatskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya [Distribution of impurity elements in magnetites of Goroblagodatsky iron ore Deposit]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2003, no. 5, pp. 21–24. (In Russian).
10. Kuznetsov A.Zh. Vlijanie mikrosienitov i sienit-porfirov na porody i rudy Goroblagodatskoye iron ore Deposit (Ural) [Influence microsyenite and syenite-porphyrines in the rocks and ores Goroblagodatskoye iron ore Deposit (Ural)]. *Metallogeniya drevnih i sovremennykh okeanov — 2004. Dostizheniya na rubezhe vekov. T. 1. Problemy metallogenicheskogo analiza mestorozhdenij chernykh i cvetnykh metallov. Materialy desyatoy nauchnoj studencheskoj shkoly* — [Metallogeny of ancient and modern oceans-2004. Achievements at the turn of the century. Vol. 1. Problems of metallogenic analysis of ore deposits of ferrous and non-ferrous metals. Materials of the tenth scientific student school], Miass, IMin. Ural branch of the RAS Publ., 2004, pp. 152–155 (In Russian).
11. Kuznetsov A.Zh. Stroenie i usloviya formirovaniya magnetitovykh zalezhej Goroblagodatskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya (Srednij Ural) Doct. Diss. [Structure and conditions of formation of magnetite deposits of Goroblagodatsky iron ore Deposit (Middle Urals). Doct. Diss.], Yekaterinburg, Ural state mining University Publ., 2008 (In Russian).
12. Ovchinnikov L.N. Kontaktovo-metasomaticheskie mestorozhdeniya Severnogo i Srednego Urals [Contact-metasomatic deposits of the Northern and Middle Urals]. *Trudy Gorno-geologicheskogo instituta UFAN SSSR* — [Proceedings of the mining and geological Institute of the Ural branch of the USSR Academy of Sciences], Vol. 89, Sverdlovsk, 1960, 495 p. (In Russian).
13. Orshkin P.T. *Jelektroprovodnost' ognepuporov i relaksacionnye javleniya na bar'ernykh slozakh* — [The electrical conductivity of the refractories and relaxation phenomena on the barrier layers], Moscow, Metallurgija [Metallurgy Publ.] 1965, 152 p. (In Russian).
14. Skanavi G.I. *Fizika dijelektrikov (oblast' slabyyh polej)* [Dielectric physics (region of weak fields)], Moscow-Leningrad, Gostekh-teorizdat Publ., 1949, 500 p. (In Russian).
15. *Tipomorfizm mineralov: Spravochnik* — [Typomorphism of minerals: Reference book], Ed.: E.M. Chernysheva, M., Nedra Publ., 1989, 560 p. (In Russian).
16. Shteinberg D.C. Geologicheskoe stroenie Tagilo-Kushvinskogo zhelezorudnogo rajona [Geological structure of Tagil-Kushvinsky iron ore district]. *Zhelezorudnaya baza Tagilo-Kushvinskogo promyshlennogo rajona* — [Iron ore base of the Tagil-Kushvinsky industrial district], Sverdlovsk: Ural branch of the USSR Academy of Sciences. Publ., 1957, pp. 5–20 (In Russian).