

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ХРОМИТОВЫХ РУД И ВМЕЩАЮЩИХ ИХ ГИПЕРБАЗИТОВ

В.В. Бахтерев

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

Физическими, физико-химическими, минералого-петрографическими методами изучены образцы хромитовых руд и вмещающих их гипербазитов. Образцы для исследований отобраны из месторождений хромитов, расположенных в различных структурно-вещественных комплексах промышленно-хромитоносных гипербазитовых формаций Урала. Получены зависимости их электрического сопротивления при постоянном и переменном напряжении и тангенса диэлектрических потерь от температуры в интервале 20—850 °С. Выявлен возможный диапазон изменений электрических параметров исследованных руд и вмещающих пород из различных структурно-вещественных комплексов, отличающихся составом гипербазитов, строением, физико-химическими условиями формирования и специализацией на различные типы оруденения по составу рудных хромшпинелидов. Приведены корреляционные связи между различными электрическими параметрами руд и вмещающих пород.

Электрические параметры, высокая температура, гипербазиты, хромитовая руда.

HIGH-TEMPERATURE ELECTRIC CONDUCTION OF CHROMITE ORE AND THE HOST ULTRAMAFICS

V.V. Bakhterev

Physical, physicochemical, and petrographic methods were applied to investigate temperature dependences of dc and ac electric resistance and dielectric loss, as well as their correlation, in the range from 20 to 850 °C in chromite and serpentinite samples. The samples of ore and the host rock represent chromite-bearing ultramafic assemblages in the Urals, which differ in structure, mineralogy, and chemistry of rocks and their physicochemical formation conditions and mineralization types (composition of Cr-spinel).

Electric parameters, high temperature, ultramafics, chromite ore

ВВЕДЕНИЕ

Среди гипербазитов Урала, несмотря на различные подходы в формационном делении гипербазитов, основанные либо на вещественно-металлогеническом, либо парагенетическом принципах, в настоящее время выделяют позднепротерозойскую гарцбургит-ортопироксенит-норитовую (расслоенные интрузии), палеозойскую офиолитовую и палеозойскую дунит-клинопироксенитовую (платиноносный пояс) формации [1—4]. Первые две формации являются промышленно-хромитоносными, отличаются своим положением в структуре Урала и приурочены к различным стадиям тектономагматического развития. Представителем первого формационного типа (расслоенные интрузии) на Урале является Сарановское месторождение. Оруденение здесь локализовано в расслоенной серии пород, сложенных слоями дунитов, энстатитовых дунитов, дунит-гарцбургитов и гарцбургитов, с которыми переслаиваются пласты хромитов [5]. Горные породы здесь характеризуются повышенной железистостью, хромшпинелиды обладают повышенным содержанием железа. В составе железа повышено содержание Fe_2O_3 . Сарановские руды исключительно глиноземистые.

Другой формационный тип, представителями которого являются многочисленные месторождения и рудопроявления, характеризуется наличием высокохромистых малоглиноземистых руд и магнезиальным составом вмещающих пород. В строении гипербазитов палеозойской офиолитовой формации выделяют ряд структурно-вещественных комплексов, различающихся между собой составом гипербазитов, внутренним строением, геодинамическими обстановками формирования и специализацией на различные типы хромитового оруденения по составу рудных хромшпинелидов. В настоящее время имеются многочисленные результаты исследований гипербазитов и связанных с ними хромитовых месторождений [например, 4, 6—12]. Детально расписаны геологические и петрохимические критерии возможной рудоносности. Однако хромитовые оруденения характеризуются исключительной сложностью условий локализации и широкой изменчивостью типоморфных признаков. Осложняющим фактором, влияющим на качество хромитовых руд, являются широко проявившиеся многоэтапные процессы метаморфизма. Разнообразие точек зрения на генезис и условия концентрации хромитового оруденения не позволяют однозначно решать вопрос о перспективности того или иного гипербазитового массива. Существующие геофизические методы не дают должного эффекта [10, 13, 14]. Для более плодотворного проведения разведочных

работ на хромиты исключительное значение имеют исследования закономерностей формирования и локализации хромитового оруденения, выявление рудоконтролирующих элементов и разработка новых методологических подходов к прогнозу и оценке хромитовых месторождений. Изучение высокотемпературной электропроводности гипербазитов, в различной мере насыщенных хромшпинелью, могут выявить новые поисковые признаки хромитовых руд с одновременной оценкой их метаморфизма. Неравномерное размещение структурно-вещественных комплексов в гипербазитовых массивах объясняется условиями их формирования в верхней мантии в определенных геодинамических обстановках. Хромитовые месторождения структурно-вещественных комплексов различаются по региональным закономерностям размещения в земной коре, условиям образования, характеру связи с вмещающими породами, морфологии и параметрам залежей, а также составу руд, определяющему их промышленную ценность. Изучение хромитов представляет и общегеологический интерес, так как они, являясь компонентами мантии Земли, несут информацию о геодинамических процессах, с которыми связано формирование литосферы.

Настоящая работа посвящена оценке и анализу поведения высокотемпературной электропроводности хромитовых руд и вмещающих их гипербазитов из расслоенных интрузий и различных структурно-вещественных комплексов палеозойских офиолитов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

Методика включает физические, физико-химические и минералого-петрографические методы. Методика и установка для высокотемпературных исследований электропроводности образцов горных пород описана нами ранее [15, 16]. Электрическое сопротивление (R) измеряли двухэлектродной установкой в режиме динамического нагрева через каждые 10 градусов в интервале температур 20—850 °С. Скорость нагревания 4 град/мин. Температуру определяли в 10 мм от образца хромель-алюмелевой термопарой. Исследуемые образцы вырезали в форме кубика с ребром 15 мм и помещали между плоскими электродами (один электрод — медь, второй — нержавеющая сталь). В качестве измерительного прибора использован тераомметр Е6-13, позволяющий определять электрическое сопротивление постоянному току в диапазоне от 10 до 10^{14} Ом и относительной ошибкой от $\pm 2,5$ до 4 % в зависимости от диапазона. В качестве измерительного прибора для определения электрических параметров на переменном токе использован „Измеритель L, C, R цифровой“ Е7-8. Прибор позволяет измерять тангенс диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) и активное сопротивление. Рабочая частота прибора 1000 Гц.

Большинство минералов и горных пород, в том числе и ультраосновных, являются ионными кристаллическими диэлектриками. На кривой $\lg R = f(T)$ ионных кристаллических диэлектриков установлены две области, отличающиеся типом проводимости, и в этих обеих областях изменение логарифма сопротивления приближенно является линейной функцией температуры [17]. Первый тип — электропроводность, обусловленная движением основных ионов кристаллической решетки, так называемая собственная электропроводность. Она существенна при высоких температурах. Второй тип — электропроводность, обусловленная движением относительно слабо закрепленных ионов. К таковым относятся ионы примесей и ионы, находящиеся в дефектных местах кристаллической решетки. Электропроводность, обусловленная движением основных ионов кристаллической решетки, присуща для тех же ионных кристаллов, которые обладают и электропроводностью второго типа, так как кристаллы, не содержащие ни дефектных мест, ни примесей, в природе не встречаются. Характеристикой соединения является только высокотемпературная электропроводность, так как электропроводность при низких температурах резко зависит от всякого рода примесей. В физике диэлектриков электрическое сопротивление описывают формулой [17]:

$$R = \frac{6kT}{n_0 \delta^2 q^2 \nu} \exp\left(\frac{E_0}{kT}\right) \quad (1)$$

Здесь E_0 — энергия активации, которую необходимо затратить на освобождение иона (носителя заряда) от связей в кристаллической решетке; n_0 — общее число ионов в 1 см^3 , участвующих в переносе тока; q — заряд иона; δ — длина свободного пробега; ν — частота колебаний иона в полустойчивом положении; k — постоянная Больцмана; T — температура в градусах Кельвина.

Большинство исследователей [15, 18—23], проводивших измерения электрического сопротивления при температурах 20—850 °С, экспериментально выявили зависимость, которую можно выразить в виде

$$\lg R = A + \frac{B}{T}. \quad (2)$$

Сопоставляя формулы (1) и (2) находим, что

$$A = \lg \frac{6kT}{n_0 \delta^2 q^2 \nu}, \quad B = \frac{0,43 E_0}{k}. \quad (3)$$

Таблица 1. Петрографическая характеристика исследованных образцов хромитовой руды

№ образца	Формационный тип вмещающих гипербазитов	Структурно-вещественный комплекс	Месторождение хромитов, гипербазитовый массив	Петрографическое описание образца
1	Палеозойские офиолитовые	Дунит-гарцбургитовый	Пьяноборское, Ключевской	Массивная руда с содержанием серпентина 3,5 % высокохромистая магнезиальная слабо метаморфизована, залегает среди аподунитовых серпентинитов
П-4	»	»	»	То же
4	»	»	»	Полосчатое чередование руды и серпентина. Полосы руды от 10 до 1 мм, преобладают первые; полосы серпентина от 5 до 2 мм
Б-10	Палеозойские офиолитовые	Верлит-дунитовый	Барсучье, Ключевской	Высокохромистая с повышенной железистостью густо вкрапленная руда со слабо выраженной полосчатостью. Полосчатость представлена чередованием участков, обедненных и обогащенных хромшпинелидами. Руда залегает среди серпентинизированных дунитов
1073к	Палеозойские офиолитовые	Дунит-верлит-клинопироксеновый	Кладовка, Каркодинский	Полосчатая руда. Полосчатость представлена чередованием рудных и безрудных полос. Мощность рудных полос 5—10 мм, нерудных — 2—5 мм. Залегает среди дунитов
3117А	Палеозойские офиолитовые	Гарцбургитовый	Карасье, Первомайский	Густо вкрапленная руда, брекчиевидная с содержанием нерудных минералов (серпентина) около 10—15 %. Вмещающие породы — апогарцбургитовые серпентиниты
И-1	Расслоенные интрузии	»	Сарановское	Густо вкрапленная руда с содержанием хромшпинелидов около 70—80 %, с равномерным распределением хромшпинелидов

Однако линейная зависимость (2) наблюдается только в том случае, когда с повышением температуры в исследуемом образце не происходят никакие физико-химические реакции. Температурный ход электрического сопротивления серпентинитов характеризуется в интервале температур 20—850 °С нарушением линейной зависимости. Аномалии электрического сопротивления чаще бывают приурочены к стадии наиболее интенсивного выделения химически связанной воды [18]. Поэтому для определения параметров высокотемпературной электропроводности серпентинитов используют только линейные участки температурной кривой.

Для определения электрических параметров кривые высокотемпературной электропроводности были построены в координатах $\lg R$, $1/T$. 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. Коэффициент электрического

Таблица 2. Петрофизические параметры и содержание основных оксидов исследованных образцов хромитовой руды и некоторых серпентинитов

Параметр	Хромитовая руда							Серпентиниты		
	1	П-4	4	Б-10	1073к	3117А	И-1	1073	С-1	С-2
Плотность, г/см ³	3,94	4,15	2,85	3,34	3,42	3,62	3,77	2,48	2,40	2,73
П.п.п., %	1,73	1,74	5,78	6,27	4,64	2,22	3,69	16,0	13,43	10,97
Cr ₂ O ₃ , %	52,7	52,1	17,8	32,5	37,0	36,5	34,7			
FeO, %	9,96	15,0	10,2	10,8	14,9	11,6	12,5	2,82	1,00	7,07
Fe ₂ O ₃ , %	3,90	4,4	4,3	4,0	3,3	2,4	4,7	7,11	3,46	7,45
FeO/Fe ₂ O ₃	2,55	3,41	2,84	2,7	4,52	4,83	2,66	0,40	0,29	0,95
E_0 , эВ	0,52	0,70	0,95	1,15	0,56	0,64	0,61	1,15	0,45	0,80
$\lg R_0$	-0,35	-2,26	-1,62	-2,2	2,0	-0,70	0,65	-4,9	2,5	-1,0

сопротивления A в формуле (2), численно равный электрическому сопротивлению R_0 при $(1/T) = 0$, определен как величина отрезка, отсекаемого касательной к кривой $\lg R = f(1/T)$ на оси ординат. Так были определены параметры высокотемпературной электропроводности E_0 и R_0 в области собственной проводимости для всех исследованных образцов.

Для настоящего исследования отобраны образцы хромитовых руд и вмещающих их гипербазитов из месторождений обоих формационных типов и различных структурно-вещественных комплексов. В табл. 1 дана краткая характеристика образцов хромитовых руд. В табл. 2 приведены петрофизические параметры и основные оксиды хромитовых руд и некоторых исследованных образцов серпентинитов. Приведенные в табл. 2 потери веса при прокаливании (п.п.п., %) получены по данным термогравиметрического анализа. Исследованные образцы руд и вмещающих пород отличаются по минеральному и химическому составу, степени метаморфизма. По текстуре руды двух типов: с равномерной вкрапленностью хромшпинелидов и полосчатые. Полосчатость представлена чередованием участков, обедненных и обогащенных хромшпинелидами, либо чередованием рудных и безрудных полос.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

В качестве примера на рис. 1—3 приведены кривые $\lg R = f(T)$ и $\lg (\operatorname{tg} \delta) = f(T)$ для части исследованных хромитов и вмещающих их серпентинитов. Установлено, что все исследованные образцы по величине электрического сопротивления постоянному току при нормальной температуре различаются примерно на 4 порядка. Такое различие сохраняется во всем температурном интервале. Электрическое сопротивление образцов хромитов при нормальной температуре варьирует в пределах одного порядка. С повышением температуры это различие увеличивается. Подобную картину мы ранее наблюдали при исследовании некоторых серпентинитов [19, 24]. При этом, хотя и не очень отчетливо, прослеживается увеличение градиента проводимости с ростом температуры. Вероятно, причину этого надо искать в различии химического состава рудообразующих хромшпинелидов.

Характер кривых $\lg R = f(T)$, полученных при переменном напряжении, хромитов и вмещающих серпентинитов различен. Но внутри каждой группы характер кривых одинаковый у всех исследованных образцов. Электрическое сопротивление серпентинитов варьирует в пределах одного порядка во всем температурном интервале. Внутри группы хромитов в интервале 20—200 °C вариации сопротивления также укладываются в один порядок. Начиная с температур 300—400 °C и до 850 °C диапазон увеличивается до двух порядков и кривые $\lg R = f(T)$ идут практически параллельно. Здесь, как и при постоянном напряжении, электрическое сопротивление меньше у образцов с более высоким содержанием хромшпинелидов.

Так как реальные диэлектрики обладают некоторой электропроводностью, то в них имеются потери энергии, связанные с протеканием в них электрического тока (джоулевы потери), величина которых не зависит от частоты. Когда говорят о диэлектрических потерях, то имеют в виду потери при переменном напряжении. В переменном электрическом поле диэлектрические потери складываются из потерь проводимости и потерь, обусловленных установлением различных видов поляризации (релаксационные потери). Если проводимость диэлектрика мала, то диэлектрические потери имеют чисто релаксационный характер и в температурном ходе имеют максимум. При наличии заметной сквозной проводимости температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь усложняется. По мере роста потерь проводимости релаксационные потери играют все меньшую роль и могут быть замаскированы потерями проводимости.

Кривые зависимости тангенса диэлектрических потерь от температуры некоторых исследованных образцов хромитовых руд и серпентинитов представлены на рис. 3. В температурном ходе тангенса угла диэлектрических потерь исследованных образцов серпентини-

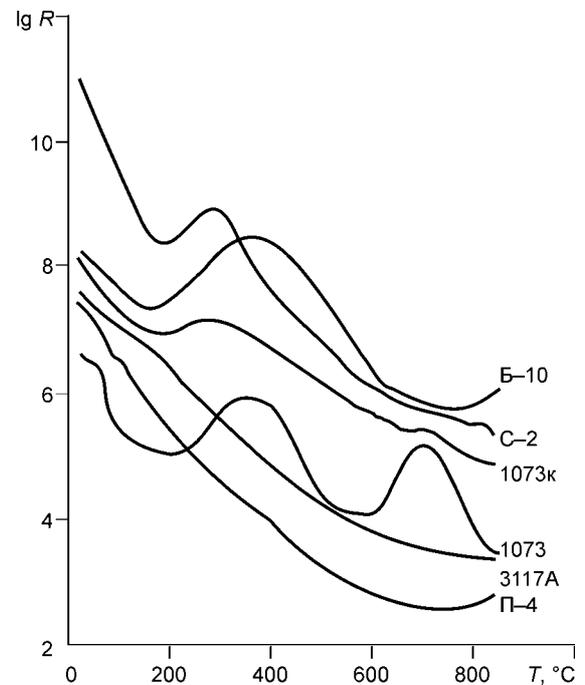


Рис. 1. Зависимости электрического сопротивления при постоянном напряжении от температуры образцов хромитовой руды (обр. П-4, 3117А, Б-10, 1073к) и серпентинитов (обр. 1073, С-2).

Электрическое сопротивление R дано в Ом·см.

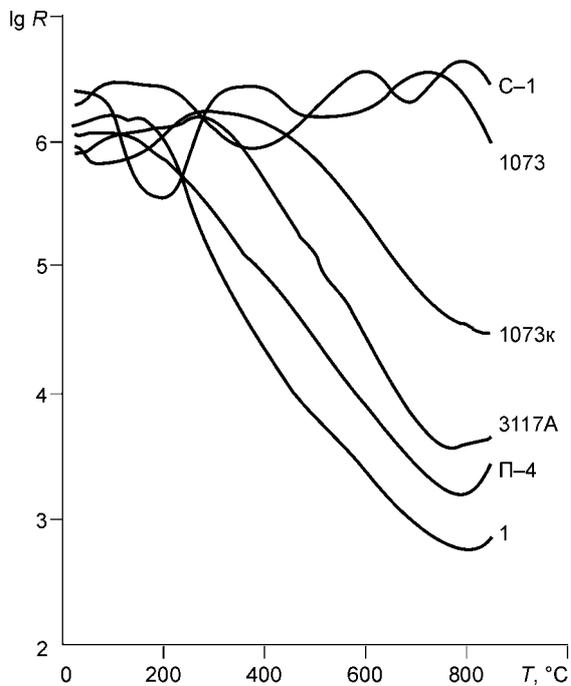


Рис. 2. Зависимости электрического сопротивления при переменном напряжении от температуры образцов хромитовой руды (обр. 1, П-4, 3117А, 1073к) и серпентинитов (обр. 1073, С-1).

тов и части хромитовых руд выделены два максимума в области температур 100—150 и 600—730 °С. Максимум в области температур 100—150 °С связан с поровой влагой, которая с повышением температуры удаляется. Влажность исследованных серпентинитов 0,5—1,5 % определена путем взвешивания образцов до и после длительного (около 20 ч) выдерживания в шкафу при температуре около 100 °С. При исследовании контрольных образцов серпентинитов после удаления из них таким образом поровой воды максимума в температурном ходе $\text{tg } \delta$ уже не наблюдали. На температурной кривой $\text{tg } \delta$ хромитовых руд максимум в области температур 100—150 °С регистрировали только в образцах с содержанием хромшпинелидов не более 50—60 %. В образцах с более высоким содержанием хромшпинелидов этот максимум уже не выделяется и замаскирован потерями проводимости. Второй максимум

при температуре 600—730 °С отмечается на кривых для всех образцов как серпентинитов, так и хромитовых руд. Для серпентинитов он связан с присутствием кристаллизационной воды, и величина его на фоне потерь проводимости зависит также от содержания кристаллизационной воды. Это можно проследить по кривым $\lg \text{tg } \delta = f(T)$ для трех образцов серпентинитов 1073, С-1, С-2 (см. рис. 3), потери веса при прокаливании которых обусловлены потерей кристаллизационной воды и равны соответственно 16,0, 13,43, 10,97 %. В такой же последовательности убывает величина релаксационного максимума на общем фоне потерь в температурном ходе при температуре около 700 °С. Диэлектрические потери образцов хромитовых руд обусловлены в основном сквозной проводимостью, на фоне которых проявляется максимум, обусловленный релаксационными потерями. Однако релаксационный максимум при температуре 600—730 °С имеет иную причину, чем в серпентинитах. В массивной хромитовой руде, нацело состоящей из хромшпинелида, нет ни кристаллизационной, ни иной воды при этих температурах. Возможно, появление релаксационных потерь (и максимума в температурном ходе) связано с изменением структуры вещества при нагревании. Известно [25], что при нагревании закись железа, входящая в состав хромшпинелидов, переходит в оксид железа, который входит в кристаллическую решетку хромшпинелида, вследствие чего нарушается ее строение. Установлено, что на поверхности зерен кемпирсайского хромшпинелида, нагретого до 530 °С, появляются анизотропные участки, а при температуре 600—650 °С в таких участках уже различимы (под микроскопом) мельчайшие игольчатые образования, представленные гематитом. В кемпирсайском хромшпинелиде закись железа входит только в состав железистого хромита ($\text{FeO Cr}_2\text{O}_3$), а в сарановском — еще и в состав магнетита. В сарановском в отличие от кемпирсайского анизотропная пленка на поверхности зерен хромшпинелида появляется при более высоких температурах 650—700 °С. Закись железа, входящая только в состав $\text{FeO Cr}_2\text{O}_3$, легче переходит в оксид, чем в том случае, когда закись железа входит, кроме того, и в состав магнетита FeOFe_2O_3 . Вышесказанное, возможно, объясняет су-

Рис. 3. Зависимость тангенса диэлектрических потерь от температуры образцов хромитовой руды (обр. 1, П-4, И-1) и серпентинитов (обр. 1073, С-1, С-2).

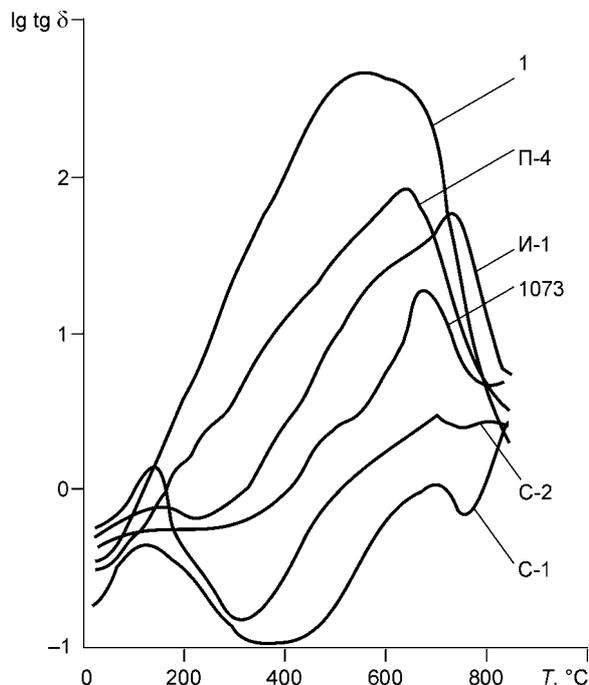


Рис. 4. Зависимость от температуры электрического сопротивления при постоянном напряжении (кривые 1) и переменном напряжении (кривые 2) для обр. И-1 и Б-10.

уществование релаксационных максимумов в температурном ходе в области температур 600—650 °С (см. рис. 3, обр. 1 и П-4 из Пьяноборского месторождения; Ключевской массив палеозойских гипербазитов. Кемпирсайские месторождения также залегают среди палеозойских гипербазитов) и в области температуры 730 °С (см. рис. 3, обр. И-1, Сарановское месторождение).

По измеренным кривым $\lg R = f(T)$ и $\lg (\operatorname{tg} \delta) = f(T)$ определяли энергию активации E_0 в температурном интервале 400—600 °С, так называемый коэффициент электрического сопротивления R_0 , значения $\operatorname{tg} \delta$ и электрического сопротивления при определенных температурах. Энергия активации для исследованных образцов хромитовых руд изменяется в интервале для руд 0,5—1,6 эВ, для вмещающих пород 0,4—1,8 эВ; тангенс диэлектрических потерь при 20 °С для руд 0,4—0,5, для вмещающих пород 0,1—0,2; при температуре 500 °С, где наибольшая дифференциация, — для руд 4—500, для вмещающих пород 0,35—1,2. Такой разброс в значениях параметров обусловлен различным минеральным составом, структурно-текстурными особенностями, степенью метаморфизма исследованных образцов. Эти факторы действуют одновременно. На данном этапе при ограниченном числе исследованных образцов оценить влияние каждого фактора на измеряемые параметры не представляется возможным. Так, при одинаковом содержании хромита в четырех образцах, отобранных из четырех различных структурно-вещественных комплексов, установлено различное содержание FeO и Fe₂O₃, что свидетельствует о несколько разном составе хромшпинелидов и вмещающих пород. При этом породы в различной степени метаморфизованы. Колебания эти, возможно, не очень велики, но тем не менее они оказывают влияние на электрические параметры: энергия активации этих образцов меняется в три раза. Следует подчеркнуть, что при нормальной температуре исследованные руды и вмещающие породы не различаются. Далее рассматриваются корреляционные связи между различными электрическими параметрами.

Связь между электрическим сопротивлением при постоянном и переменном напряжениях. Для потерь проводимости характерно совпадение активного сопротивления при переменном напряжении с сопротивлением при постоянном напряжении. Исследованные образцы хромитовых руд и серпентинитов по характеру связи между электрическим сопротивлением при постоянном напряжении с сопротивлением при переменном напряжении разделены на две группы. Для одних характерно совпадение сопротивления при постоянном напряжении с сопротивлением при переменном напряжении только при достаточно высоких температурах. На рис. 4 (обр. И-1) приведен такой пример (равномерно-вкрапленная руда). Диэлектрические потери второго типа характерны для диэлектриков с резко выраженной анизотропией электропроводности. Для них характер потерь зависит от направления поля (см. рис. 4, обр. Б-10, полосчатая руда). В направлении полосчатости сопротивление переменному току и постоянному току, т. е. по тери определяются в этом случае проводимостью. В перпендикулярном направлении полосчатости сопротивление переменному току почти на два порядка меньше, чем сопротивление постоянному току во всем исследованном температурном интервале (см. рис. 4, обр. Б-10). Чем обусловлено такое поведение диэлектрических потерь и какова генетическая информативность этого параметра, покажут дальнейшие исследования.

Связь между электрическим сопротивлением и тангенсом диэлектрических потерь. Заслуживает внимания корреляционная связь $\lg R = f(\lg \operatorname{tg} \delta)$, представленная на рис. 5. Характер связи для хромитов и вмещающих гипербазитов различный. Для хромитов она может быть аппроксимирована двумя прямыми. В низкотемпературной области (до

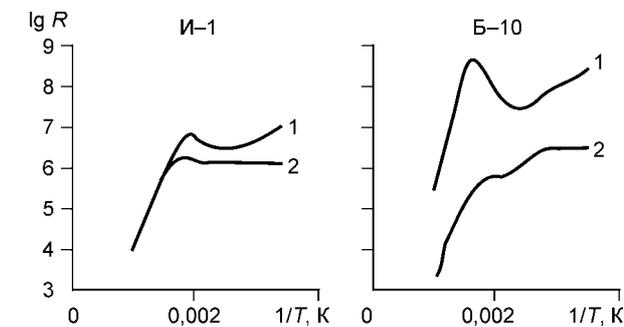
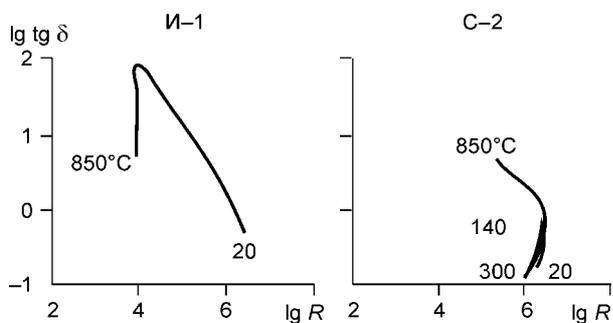


Рис. 5. Корреляционная связь между электрическим сопротивлением и диэлектрическими потерями ($\lg \operatorname{tg} \delta$) хромита (обр. И-1) и вмещающего серпентинита (обр. С-2) в интервале температур 20—850 °С.

Приведены значения температур, при которых меняется характер зависимости $\lg R = f(\lg \operatorname{tg} \delta)$.

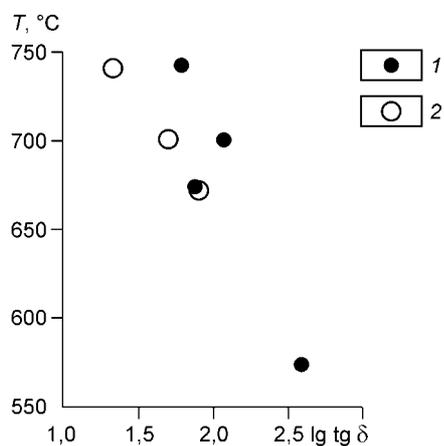


Рис. 6. Связь между значением температуры, при которой зависимость $\lg \operatorname{tg} \delta = f(\lg R)$ меняется на обратную, и величиной $\lg \operatorname{tg} \delta$ при этой температуре.

1 — массивная и вкрапленная руда с равномерным распределением хромшпинелидов; 2 — полосчатая руда.

точки перегиба) с увеличением температуры электрическое сопротивление уменьшается, а потери растут. Величина ($\operatorname{tg} \delta$) достигает максимального значения в точке перегиба. При дальнейшем увеличении температуры потери резко падают при почти неизменном электрическом сопротивлении. В низкотемпературной области уравнение регрессии имеет вид $\lg R = a \lg (\operatorname{tg} \delta) + b$. Для исследованных образцов определены коэффициенты a и b . Коэффициент a изменяется от $-1,1$ до $-0,7$; b — от $+4,6$ до $+6,7$; т. е. в этой тем-

пературной области с уменьшением электрического сопротивления диэлектрические потери увеличиваются. В области температур $550\text{--}750\text{ }^\circ\text{C}$ (для разных образцов свое значение этой температуры) эта связь меняется на обратную. Хотя уравнение регрессии имеет тот же вид $\lg R = a \lg (\operatorname{tg} \delta) + b$. Коэффициенты a и b имеют другие значения. Коэффициент a изменяется от $+0,2$ до $+0,4$; b — от $+3,5$ до $+4,1$; т. е. в высокотемпературной области с уменьшением электрического сопротивления диэлектрические потери уменьшаются. Точка перегиба — некая характеристика образца. Связь между ($\operatorname{tg} \delta$) в точке перегиба и температурой перегиба показана на рис. 6. В этой температурной области изменяется, возможно, механизм электропроводности и поляризации. Иной, более сложный, характер имеет связь между R и $\operatorname{tg} \delta$ для гипербазитов, вмещающих рудные тела, что видно из рис. 5 (обр. С-2). Вид зависимости меняется несколько раз при температурах $140, 300, 650\text{ }^\circ\text{C}$, что связано, вероятно, с проявлением физико-химических процессов при указанных температурах. На рис. 7 приведены корреляционные зависимости между электрическим сопротивлением и диэлектрическими потерями для совокупности исследованных образцов при фиксированных температурах $400, 700$ и $840\text{ }^\circ\text{C}$. Интересно отметить следующее. При температуре $700\text{ }^\circ\text{C}$ значения $\lg R = f(\lg \operatorname{tg} \delta)$ всех исследованных образцов (хромитовой руды и вмещающих серпентинитов) укладываются на одну прямую линию, формируя разные ее участки. Корреляционное уравнение, выражающее связь диэлектрических потерь и электрического сопротивления, измеренных при температуре $700\text{ }^\circ\text{C}$, для совокупности исследованных образцов серпентинитов и хромитовой руды, рассчитанное по [26], имеет вид $\lg \operatorname{tg} \delta = 4,52 - 0,72 \lg R$ с основной ошибкой $\sigma = \pm 0,18$. Известно, что при высоких температурах электрическое сопротивление горных пород является функцией их химического и минерального составов, структурных и текстурных особенностей. По мере повышения температуры влияние структурно-текстурных особенностей уменьшается, а при температурах более $600\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$ может практически не наблюдаться. Различие же горных пород по их химическому и минеральному составам обуславливает их дифференциацию по электрическому сопротивлению вплоть до температуры плавления.

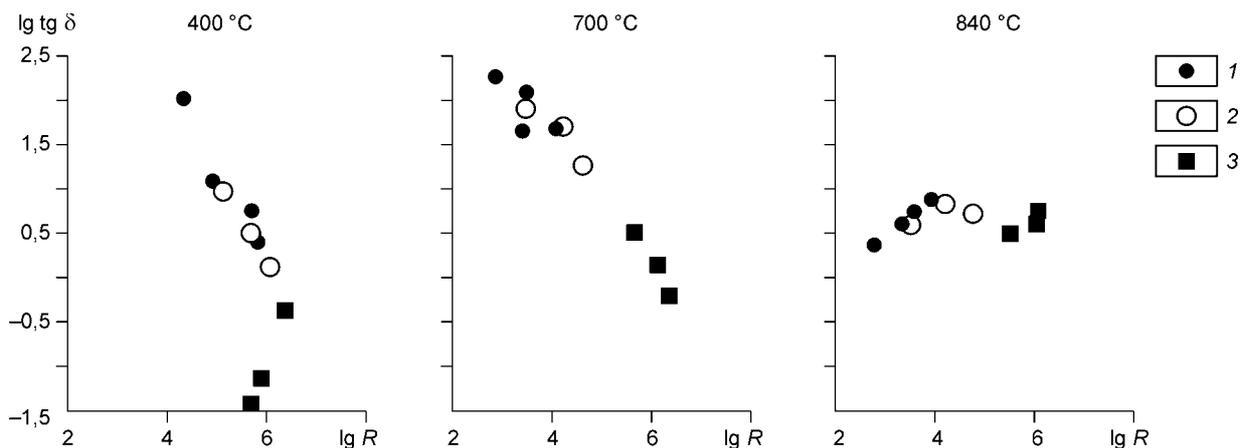


Рис. 7. Корреляционная связь между диэлектрическими потерями и электрическим сопротивлением хромитов и вмещающих их серпентинитов при температурах $400, 700$ и $840\text{ }^\circ\text{C}$.

1 — массивная и вкрапленная руда с равномерным распределением хромшпинелидов; 2 — полосчатая руда; 3 — вмещающие породы.

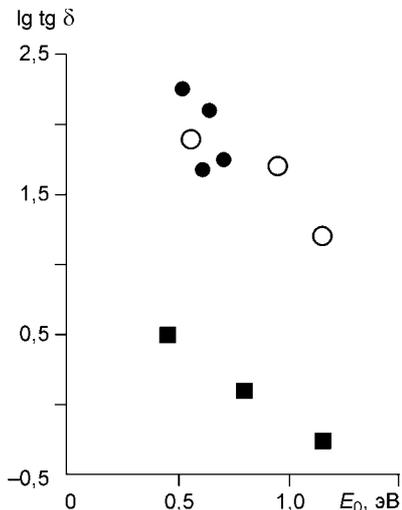


Рис. 8. Связь между энергией активации E_0 и диэлектрическими потерями при 700°C .

Усл. обозн. см. на рис. 7.

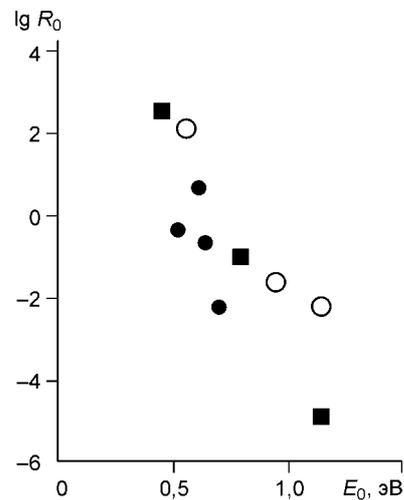


Рис. 9. Связь между E_0 и $\lg R_0$ для температурного интервала $400\text{—}600^\circ\text{C}$.

Усл. обозн. см. на рис. 7.

Связь между энергией активации и диэлектрическими потерями при температуре образца 700°C показана на рис. 8. Энергия активации определена в температурном интервале $400\text{—}600^\circ\text{C}$ (температурный интервал существования серпентиновых минералов). Четко выделяются три группы точек, характерные для равномерно-вкрапленной руды, полосчатой руды и вмещающих пород.

Связь между энергией активации и так называемым коэффициентом электрического сопротивления. Результаты приведены на рис. 9, где показана связь между E_0 и $\lg R_0$ для исследованных образцов и прослеживается обратная линейная связь между параметрами. Она выражается формулой $\lg R_0 = cE + d$, где c и d — постоянные коэффициенты. Аналогичная зависимость отмечена ранее для других горных пород [27, 28]. Для всех пород авторы работ [27, 28] отмечают примерно одинаковые значения коэффициентов в случае преобладающей собственной проводимости. Однако изменение минерального и химического составов, генетических особенностей серпентинитов оказывает влияние на электрические параметры высокотемпературной электропроводности. Хотя коэффициент электрического сопротивления R_0 не имеет вполне определенного физического смысла, очевидно, что его величина может меняться за счет различных кристаллохимических особенностей соединения. В теории диэлектриков [17] указывается лишь на возможные основные причины его изменения. Некоторые из этих причин таковы: изменение концентрации подвижных ионов (в процессе электропроводности участвуют только те ионы, которые под влиянием теплового движения сорваны со своих узлов и находятся в более свободном состоянии); механизма перескока; размеров кристаллической решетки; внутрикристаллического электрического поля. Зависимость от температуры слабая, от температуры энергии активации, напротив, очевидна. Энергия активации E_0 зависит от прочности кристаллической решетки, природы подвижных ионов и от их положения в решетке.

Исходя из кристаллохимических особенностей минералов, слагающих горные породы, и физических представлений об электропроводности диэлектриков [17], коэффициенты c и d для разных пород должны различаться. Наши результаты подтверждают это. Для значений $\lg R_0 = f(E_0)$, приведенных на рис. 9 (офиолитовые гипербазиты), коэффициенты c и d равны соответственно -11 и $+7$. Для нижнетагильских серпентинитов (дунит-клинопироксенитовые гипербазиты — платиноносный пояс Урала) нами [29] ранее получены значения: $c = -7,8$, $d = +7,4$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены зависимости электрического сопротивления при постоянном и переменном напряжениях и диэлектрических потерь от температуры в интервале $20\text{—}850^\circ\text{C}$ хромитовых руд и вмещающих гипербазитов из различных структурно-вещественных комплексов Урала. Выявлен широкий диапазон изменений электрических параметров при высокотемпературных исследованиях. Приведены корреляци-

онные связи между различными электрическими параметрами исследованных руд и вмещающих пород. Описанные результаты позволяют надеяться на то, что можно будет расчленять структурно-вещественные комплексы по параметрам высокотемпературной электропроводности слагающих их гипербазитов.

Работа выполнена в рамках программы 10 ОНЗ РАН „Экспериментальные исследования физико-химических проблем геологических процессов“.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Штейнберг Д.С.** Формационное расчленение, генезис и металлогения ультрабазитов // Формационное расчленение, генезис и металлогения ультрабазитов. Свердловск, 1988, с. 3—11.
2. **Золоев К.К., Булыкин Л.Д.** Формационные типы гипербазитов Урала и их металлогения // Вопросы геологической корреляции и металлогения Урала. М., 1983, с. 72—82.
3. **Булыкин Л.Д., Андреев М.И.** Главные генетические типы хромитовых месторождений Урала и закономерности их размещения // Геология и полезные ископаемые Урала. Свердловск, 1990, с. 65—74.
4. **Перевозчиков Б.В.** Мелко-, среднемасштабные прогнозные параметры хромитового оруденения Урала // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского, Вып. 4. Пермь, Пермский ун-т, 2002, с. 210—228.
5. **Иванов О.К.** Расслоенные хромитоносные ультрамафиты Урала. М., Наука, 1990, 243 с.
6. **Соколов Г.А.** Хромиты Урала, их состав, условия кристаллизации и закономерности распространения. М., 1948, 128 с. (Тр. Института геологических наук АН СССР, Вып. 97, Серия рудных месторождений, № 12).
7. **Варлаков А.С.** Генетические особенности хромитового оруденения и прогнозные критерии // Хромиты Урала, Казахстана, Сибири и Дальнего Востока (материалы семинара по оценке перспектив хромитоносности ультраосновных массивов). М., 1974, с. 21—35.
8. **Поиски**, разведка и оценка хромитовых месторождений. М., Недра, 1987, 165 с.
9. **Реестр** хромитопроявлений в альпинотипных ультрабазитах Урала. Пермь, КамНИИКИГС, 2000, 474 с.
10. **Комплексные** геофизические исследования при прогнозе, поисках и разведке хромитовых месторождений / Под ред. Т.А. Смирновой, Л.А. Певзнера. М., Недра, 1986, 260 с.
11. **Лоскутов И.Ю., Велинский В.В.** Петрохимические критерии хромитоносности альпинотипных гипербазитов // Геология и геофизика, 1989, № 12, с. 60—69.
12. **Кутолин В.А., Волохов И.М., Каратаева Г.Н.** К оценке возможности определения формационной принадлежности гипербазитов по петрохимическим данным // Геология и геофизика, 1966, № 5, с. 87—93.
13. **Петряев В.Е., Редозубов А.А., Глухих И.И., Угрюмова И.С.** Особенности геофизических полей на участке проявления хромитового оруденения на Вересоборском гипербазитовом массиве // Геология и минерально-сырьевые ресурсы европейской территории России и Урала (материалы региональной конференции, Кн. 2). Екатеринбург, 2000, с. 139—140.
14. **Руденских Н.В., Волькинштейн М.Я., Зиновьев В.Н., Сараев Н.Ф.** Особенности методики поисков и оценки месторождений хромита на Урале // Там же, с. 153.
15. **Бахтерев В.В.** О характере изменения при высоких температурах электрического сопротивления серпентинитов из Баженовского месторождения (Урал) // Геология и геофизика, 2000, т. 41, № 9, с. 1325—1330.
16. **Бахтерев В.В.** Методика измерения электрического сопротивления гипербазитов при высоких температурах // Уральский геофизический вестник, № 1. Екатеринбург, 2000, с. 18—20.
17. **Сканави Г.И.** Физика диэлектриков (область слабых полей). М.; Л., Гостехтеориздат, 1949, 500 с.
18. **Бахтерев В.В., Булыкин Л.Д.** Параметры электропроводности при высоких температурах дунитов в зависимости от степени их серпентинизации // Докл. РАН, 2001, т. 379, № 6, с. 793—796.
19. **Бахтерев В.В., Булыкин Л.Д.** Вариации электрического сопротивления дунитов в зависимости от температуры и степени серпентинизации (на примере Урала) // Геология и геофизика, 2002, т. 43, № 10, с. 960—967.
20. **Пархоменко Э.И.** Геоэлектрические свойства минералов и горных пород при высоких давлениях и температурах. М., Недра, 1989, 198 с.
21. **Мецик М.С., Щербаченко Л.А.** Электрические свойства слюд. Иркутск, Изд-во Иркут. ун-та, 1990, 328 с.
22. **Самотейкин В.В., Гладушко О.А.** Особенности электропроводности щелочно-силикатных стекол // Стекло и керамика, 2002, № 1, с. 7—9.

23. **Гусейнов А.А.** Исследование электропроводности биотитов при высоких температурах // Физика Земли, 1999, № 11, с. 75—82.
24. **Бахтерев В.В., Булыкин Л.Д.** Особенности высокотемпературной электропроводности гипербазитов из Тургорьякского массива // Уральский геофизический вестник, № 5. Екатеринбург, 2003, с. 10—15.
25. **Карякин Л.И., Пятикоп П.Д.** Изменение хромшпинелидов при нагревании // Докл. АН СССР, 1955, т. 102, № 3, с. 601—603.
26. **Митропольский А.К.** Техника статистических вычислений. М., Наука, 1971, 576 с.
27. **Бондаренко А.Т., Саврасов Д.И.** Об электропроводности эклогитов и кимберлитов трубок Якутии при высоких температурах в связи с вопросами строения верхней мантии // Геология и геофизика, 1969, № 5, с. 72—80.
28. **Бондаренко А.Т., Фельдман И.С.** Параметры электропроводности оливинитов при высоких температурах и давлениях // Физика Земли, 1973, № 5, с. 63—72.
29. **Бахтерев В.В.** Оценка формационной принадлежности гипербазитов Урала по параметрам их высокотемпературной электропроводности // Докл. РАН, 2004, т. 398, № 3, с. 371—373.

*Рекомендована к печати 2 февраля 2005 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию 5 апреля 2004 г.,
после доработки — 24 января 2005 г.*