

Высокотемпературная электропроводность хромитов как функция их состава и метаморфизма (на примере Алапаевского ультрамафитового массива, Средний Урал)

В. В. Бахтерев

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

Поступила в редакцию 26.01.2022 г., принята к печати 18.04.2022 г.

Объект исследования. Хромитовые руды и массивные хромититы с глиноземистым (низкохромистым) хромшпинелидом (Поденное месторождение) и хромитовые руды с высокохромистым хромшпинелидом (Курмановское месторождение) Алапаевского гипербазитового массива. **Материалы и методы.** Фактический материал собран при полевых исследованиях. Собранные образцы хромитовых руд и массивных хромититов изучались в прозрачных шлифах, химическим анализом, электрическими методами (электропроводность, диэлектрические потери). **Результаты.** Получены температурные зависимости электрического сопротивления и диэлектрических потерь в интервале температур 20–800°C. Определены электрические параметры $\lg R_0$ и E_0 . Выявлена обратная линейная зависимость между параметрами. Она выражается формулой $\lg R_0 = a - bE_0$. Электрические параметры для трех групп образцов различаются в зависимости от степени метаморфических изменений. Установлено, что с увеличением метаморфизма увеличивается $\lg R_0$ и уменьшается E_0 . В исследованных образцах хромитовой руды Поденного месторождения E_0 варьирует от 0.61 до 0.96, $\lg R_0$ – от 2.5 до –0.41; Курмановского месторождения – E_0 варьирует от 0.81 до 1.35, $\lg R_0$ – от 0.95 до –2.8. Для исследованных образцов хромититов Поденного месторождения E_0 варьирует от 0.21 до 0.41, $\lg R_0$ – от –0.08 до 1.67. При этом коэффициенты a и b различны для каждой группы образцов. Для некоторых образцов определили химический состав, а для шести образцов (по два образца из каждой группы) – содержание оксидов двух- и трехвалентного железа в исходном образце и образце-дубликате после его прокалки до 800°C. Относительное изменение отношений окисного и закисного железа в исходном образце ($\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$)* и образце-дубликате ($\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$)** $H = [(\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3)^*/(\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3)^{**}]$ сопоставили с положением максимума диэлектрических потерь на шкале температур. В координатах H – T , °C конкретные образцы в зависимости от метаморфических изменений, занимают в нем определенное место. **Выводы.** Приведенные результаты позволяют говорить о возможной полезности полученной дополнительной информации в качестве петрогенетических индикаторов хромитовых месторождений с одновременной оценкой степени метаморфических изменений.

Ключевые слова: электрические параметры, постоянное и переменное напряжение, электрическое сопротивление, диэлектрические потери, хромитовая руда, глиноземистые (среднехромистые) и высокохромистые хромшпинелиды, хромититы, метаморфизм

High-temperature electrical conductivity of chromite ores from the Alapaevsky hyperbasite massif, Middle Urals, as a function of their composition and metamorphism

Vladimir V. Bakhterev

Yu.P. Bulashevich Institut of Geophysics, UB RAS, 100 Amundsen st., Ekaterinburg 620016, Russia, e-mail: ugv@bk.ru

Received 26.01.2022, accepted 18.04.2022

Research subject. Chromite ores and massive chromitites with alumina (low chromium) chrome spinelide (the Podennoye deposit) and chromite ores with high-chromium chrome spinelide (Kurmanovskoye deposit) of the Alapaevsky hyperbasite massif. **Materials and methods.** Samples of chromite ores and massive chromitites collected during field research were studied in transparent sections using chemical analysis and electrical methods (electrical conductivity, dielectric losses). **Results.** The temperature dependences of electrical resistance and dielectric losses in the temperature range of 20–800°C were obtained. The electrical parameters $\lg R_0$ and E_0 were determined, and the inverse linear relationship bet-

Для цитирования: Бахтерев В.В. (2022) Высокотемпературная электропроводность хромитов как функция их состава и метаморфизма (на примере Алапаевского ультрамафитового массива, Средний Урал). *Литосфера*, 22(4), 526–535. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-4-526-535>

For citation: Bakhterev V.V. (2022) High-temperature electrical conductivity of chromite ores from the Alapaevsky hyperbasite massif, Middle Urals, as a function of their composition and metamorphism. *Lithosphere (Russia)*, 22(4), 526–535. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-4-526-535>

ween them was revealed. The electrical parameters for the three groups of samples were found to differ depending on the degree of metamorphic changes. It was established that an increase in metamorphism leads to an increase in $\lg R_0$ and a decrease in E_0 . For the studied samples of chromite ore from the Podennoye deposit, E_0 and $\lg R_0$ vary from 0.61 to 0.96 and from 2.5 to -0.41, respectively. In the Kurmanovskoye field, these parameters vary from 0.81 to 1.35 and from 0.95 to -2.8, respectively. For the studied samples of chromitites from the Podennoye deposit, E_0 varies from 0.21 to 0.41, while $\lg R_0$ varies from -0.08 to 1.67. In this case, the coefficients a and b are different for each group of samples. For some samples, the chemical composition was determined, and for six samples (two samples from each group), the content of ferrous and trivalent iron oxides in the original sample and a duplicate sample after calcination at temperature of up to 800°C was determined. Relative change in the ratio of ferrous and trivalent iron oxides in the initial sample $(\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3)^*$ and a duplicate sample $(\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3)^{**}$ $H = [(\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3)^*/(\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3)^{**}]$ was compared with the position of the maximum of dielectric losses on the temperature scale. In the coordinates $H-T$, °C, the studied samples, depending on the metamorphic changes, occupy a certain place. **Conclusions.** The study indicates the potential of the obtained information to be used as petrogenetic indicators of chromite deposits with a simultaneous assessment of the degree of metamorphic changes.

Keywords: electrical parameters, constant voltage, AC voltage, electrical resistance, dielectric losses, chromite ore, alumina (medium chromium) and high chromium chromium spinelides, chromitites, metamorphism

ВВЕДЕНИЕ

Алапаевский массив сложен преимущественно гарцбургитами с подчиненным развитием дунитов и шлирово-полосчатого дунит-гарцбургитового комплекса (Шилова, 1977; Реестр..., 2000; Чашухин и др., 2002; Перевозчиков, 2006; Чашухин и др., 2010; Чашухин, Вотяков, 2012). Ультрабазиты претерпели интенсивный метаморфизм, включающий в себя серпентинизацию и тальк-карбонатизацию. Рудопроявления объединены в два рудных поля: Северное и Южное. Преобладают руды, сложенные глиноземистым (среднехромистым) хромшпинелидом, реже встречены руды с высокохромистым хромшпинелидом.

Поденное месторождение расположено в Северном рудном поле в гарцбургитовом комплексе среди серпентинизированных гарцбургитов. Гарцбургиты неистощенные (содержание пироксенов 20–35%). Местами вмещающие породы карбонатизированы, хлоритизированы. Тип руды по составу хромшпинелидов глиноземистый магнезиальный, разновидность рудных хромшпинелидов – алюмохромит. Руды среднеметаморфизованные. В хромшпинелидах повышена железистость. “Главная особенность состава рудных глиноземистых хромшпинелей Алапаевского массива – их тождество составу аксессуарной хромшпинели из непосредственно вмещающих гарцбургитов и дунитов” (Чашухин, Вотяков, 2012, с. 152). “Засорение гарцбургитов рудной хромшпинелью здесь исключено, так как контакты рудных тел с вмещающими породами резкие. Это свидетельствует, во-первых, о ведущем процессе метаморфической дифференциации при формировании оруденения, во-вторых, о локальном характере этого процесса, не выходящего за пределы конкретных рудопроявлений” (там же, с. 152).

Курмановское месторождение находится в юго-западной части массива среди серпентинизирован-

ных дунитов дунит-гарцбургитового комплекса. Гарцбургиты истощенные (содержание пироксенов 10–20%). Хромитовое оруденение вкрапленное, с нехарактерным для Алапаевского массива высокохромистым магнезиально-алюмохромитовым составом рудообразующего хромшпинелида. Линзовидные тела вкрапленных руд приурочены к сложным шлирово-полосчатым комплексам дунит-перидотитового состава среди гарцбургитов в зоне полосовидного чередования гарцбургитов и дунитов. Разновидность рудных хромшпинелидов – алюмохромит. Руды слабометаморфизованные. При одинаковой хромистости рудообразующий хромшпинелид Северного рудного поля имеет большую железистость по сравнению с такой Южного. Курмановское месторождение залегает в жильно-полосчатом дунит-гарцбургитовом комплексе в зоне полосовидного чередования гарцбургитов и дунитов. “Дуниты в объеме дунит-гарцбургитового комплекса Алапаевского массива занимают подчиненное положение. Их временные соотношения с гарцбургитами различны. Например, в расположенном в западной части Курмановском месторождении наблюдаются как постепенные переходы от дунитов к гарцбургитам, так и несомненно резкие контакты. В последнем случае дуниты слагают жилы и тела, секущие петроструктуру гарцбургитов, т. е. имеют постгарцбургитовую природу. В восточной части наблюдались только апогарцбургитовые дуниты. Оба типа дунитов различаются по составу слагающих минералов” (там же, с. 146–147). “Сравнительный анализ глиноземистого и высокохромистого типов оруденения показал значительное их сходство... что может объясняться подобными условиями их формирования. Оба типа оруденения сформировались в позднем этапе образования рудовмещающих комплексов в условиях широкого проявления складчатости и сколовых деформаций. Различия между двумя типами оруденения, выраженные в составе

хромшпинели, масштабы оруденения, в составе и структуре рудовмещающих гарцбургитов и дунитов и некоторых типоморфных признаках, отражают разную степень деплетирования гарцбургитового и дунит-гарцбургитового комплексов, обусловленную разными геодинамическими обстановками их формирования” (Перевозчиков, 2006, с. 299). “Однако в ряде месторождений и рудных тел зафиксировано чередование хромититов с варьирующим от высокохромистого до глиноземистого составом рудной хромшпинели” (Чашухин и др., 2010, с. 255). По результатам изучения одного из рудных тел хромитового месторождения Поляков Камень в Алапаевском массиве авторы пришли к выводу, что “сонахождение в пределах хромитовых месторождений руд с различным составом хромшпинели является следствием их метаморфизма” (там же, с. 259).

Цель настоящей работы – показать сходство и различие электрических параметров хромитовых руд с глиноземистым (низкохромистым) и высокохромистым хромшпинелидом; определить их электрические параметры (энергию активации E_0 , так называемый коэффициент электрического сопротивления $\lg R_0$, диэлектрические потери), установить характер распределения этих параметров во взаимосвязи с их генезисом.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБРАЗЦЫ

Для определения электрических параметров при высоких температурах образцы вырезали в форме кубика с ребром 0.02 м (из некоторых проб готовили по два образца-кубика). Измерения выполнены в открытой системе при атмосферном давлении. Электрическое сопротивление измеряли на двухэлектродной установке через каждые 10°C в интервале температур 20–800°C в режиме динамического нагрева. Скорость нагрева 0.066 град/с. Температуру в системе определяли платиноплатинородиевой термопарой в 0.01 м от образца. Температурные зависимости электрического сопротивления получали при постоянном напряжении, а тангенс угла диэлектрических потерь – при переменном.

Прибор для измерения электрического сопротивления при постоянном напряжении – тераомметр Е6-13 с динамическим диапазоном от 10 до 10^{14} Ом и пределами допустимой относительной погрешности измерений от ± 2.5 до 4.0% в конце диапазона.

Для определения энергии активации E_0 и коэффициента электрического сопротивления $\lg R_0$ кривые высокотемпературной электропроводности были построены в координатах $\lg R$, $1/T$, К (рис. 1) (T – температура в градусах Кельвина). Энергия активации E_0 определена по величине тангенса угла наклона касательной к кривой $\lg R = f(1/T)$ в неко-

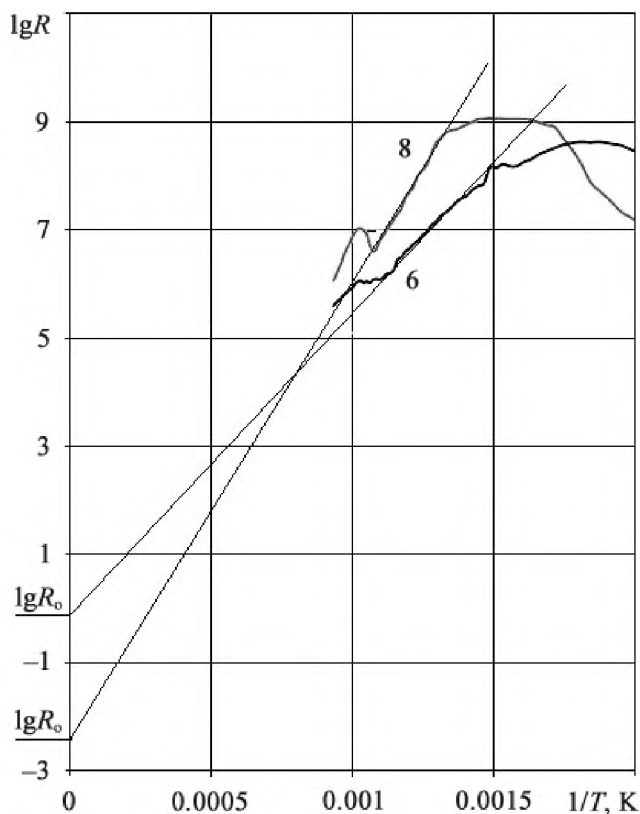


Рис. 1. Определение электрических параметров исследованных образцов.

Числа рядом с кривыми – номера образцов, описанных в тексте и табл. 1 и 3.

Fig. 1. Determination of the electrical parameters of the studied samples.

The numbers next to the curves are the numbers of the samples described in the text and Tables 1 and 3.

торой точке прямолинейного участка в температурной области, где кривая $\lg R = f(1/T)$ не искажена аномальными эффектами. Этому условию удовлетворяет окрестность температуры магнитного превращения. Коэффициент электрического сопротивления $\lg R_0$ определен как величина отрезка, отсекаемого касательной к кривой $\lg R = f(1/T)$ на оси ординат (Сканави, 1949).

В качестве измерительного прибора для вычисления тангенса угла диэлектрических потерь при переменном напряжении использовался “Измеритель L, C, R цифровой” Е7-8. Рабочая частота прибора 1000 Гц.

Всего исследовано 34 образца: по 12 образцов хромитовой руды из каждого месторождения; 10 образцов массивных хромититов из Курмановского месторождения; 2 образца – из Пьяноборского месторождения.

Из некоторых образцов изготовлены прозрачные шлифы, описанные под микроскопом. Химические

анализы выполнены в аналитической лаборатории ОАО “Уралмеханобр” (г. Екатеринбург, аналитик Г.А. Куприянова). Для 10 проб в исходном образце и образце-дубликate после прокаливании до 800°C определяли содержание оксидов двух- и трехвалентного железа. Относительное изменение отношений окисного и закисного железа в исходном образце и в образце-дубликate после прокаливании сопоставляли с положением максимума диэлектрических потерь на шкале температур. Для двух образцов (№ 9 и 10) из Пьяноборского месторождения (Ключевской гипербазитовый массив) выполнен рентгенофазовый анализ в ИХТТ УрО РАН (г. Екатеринбург, аналитик Н.И. Игнатьева).

ОПИСАНИЕ НЕКОТОРЫХ ИССЛЕДОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

Образцы Поденного месторождения (III Поденный рудник)

Образец 1. Макроскопически сильно трещиноватая порода серовато-желтовато-коричневого цвета, пронизанная субпараллельными, реже секущими рудными прожилками черного цвета (убоговкрапленная). На магнитную стрелку умеренно реагирует. Структура руды мелкозернистая, аллотриоморфно-зернистая. Текстура породы массивная, трещиноватая.

Ориентировочный состав шлифа (в проходящем свете), %: серпентин – 85, хромшпинелид – 2, гидроксиды железа – 10, магнетит – 2, оливин – 1, единичные зерна хлорита, брусита, карбоната.

Серпентин представлен в основном хризотилом в виде длинных более или менее параллельных волокон, чередующихся с полосками выветрелого (ожелезненного) хризотила, рассекаемыми поперечными прожилками антигорита с примесью тонко распыленного рудного (магнетита), количество которого местами превышает содержание антигорита.

Гидроксиды железа приурочены к центральной части узелковых линз, располагающихся субпараллельно между собой, но под углом 25–30° к волокнам хризотила, образуя ступенчатую структуру.

Оливин в виде линзочек длиной до 500 мкм и толщиной 10–15 мкм, иногда 100 мкм, располагаются внутри агрегатов гидроксидов железа, редко серпентина.

Хромшпинелид развивается в виде пятен, вкраплений и различно ориентированных прожилков. Встречаются также редкие неравномерно рассеянные вкрапленники.

Магнетит образует тонкую (в пределах первых микрометров) вкрапленность, неравномерно рассеянную по породе.

Образец 2. Макроскопически густовкрапленная, близко к сплошной, руда черного цвета.

Между агрегатами рудного минерала встречается вмещающая порода из рассеянных минералов зеленовато-беловато-серого цвета. Структура руды гипидиоморфно-зернистая, аллотриоморфно-зернистая. Структура нерудной части волокнисто-петельчатая, решетчатая.

Ориентировочный состав шлифа (в проходящем свете), %: хромшпинелид – 80, серпентин – 9, оливин – 2, гидроксиды железа – 5; хлорит, карбонат, брусит, опал – 4.

Хромшпинелид – сплошные агрегаты, интенсивно корродированные серпентином и другими нерудными. В результате разведания граница между замещаемым и замещенным минералами неровная, зазубренная, с бухтами и заливами проникновения одного минерала в другой. Эта структура часто переходит в структуру остатков от замещения хромита в серпентине и, наконец, в скелетную (рудный замещается от центра к периферии, т. е. нарушенные грани его сохраняются, образуя кристаллический скелет зерна).

Образец 3. Макроскопически густовкрапленная руда черного цвета с включениями светло-серых и серых нерудных минералов. На магнитную стрелку умеренно реагирует. Текстура неравномерно-вкрапленная, цепочечная неясно-прожилковая. Структура аллотриоморфно-зернистая, коррозионная, трещиноватая. Нерудная масса петельчатая, поперечно-волокнистая, перекрещенно-волокнистая.

Ориентировочный состав шлифа (в проходящем свете), %: хромшпинелид – 58, серпентин – 31, брусит – 5, гидроксиды железа – 3, карбонат – 1, оливин – 1, хлорит – 1.

Серпентин образует сложную сеть тонких переплетающихся жилок с петлями размером (20–50) × (50–100) мкм неправильной формы и представлен хризотилом. Вдоль его волокон отмечаются цепочки рудного минерала тонкозернистой структуры. Отверстия петель заполнены другим хризотилом буроватого цвета и небольшими реликтами зерен оливина. Часть хризотиловых полосок ориентирована поперек длинных волокон, образуя поперечно-волокнистую структуру.

Хромититовые агрегаты и зерна подвергнуты интенсивной коррозии, почти нацело просвечивают рубиново-красным цветом и содержат неправильные включения и прожилки серпентина, реже – брусита и карбоната.

Гидроксиды железа неравномерно окрашивают серпентин в буроватые тона, приурочиваясь в основном к ядрам сеток. Здесь же присутствуют незначительные агрегаты оливина, карбоната и брусита.

В отраженном свете хромититовые агрегаты располагаются кольцами, цепочками, овалами вытянутой формы. Рассечены многочисленными трещинами, выполненными серпентином толщиной от 5–10 до 100–150 мкм.

Образец 4. Хромитит. Немагнитен. Текстура массивная, редко прожилковая и трещиноватая. Структура гипидиоморфно-зернистая, крупно- и мелкозернистая, коррозионная, петельчатая.

Состав: хромшпинелид – 95, серпентин – 5%.

В отраженном свете микроскопа хромшпинелид разбит малочисленными короткими трещинками мощностью не более 40 мкм. К ним приурочено значительное количество эмульсионных включений, составляющее 1–2% площади агрегата хромшпинелида, редко – 10–15%. Агрегаты хромшпинелида, являющиеся включениями в серпентине, содержат значительно больше вкраплений серпентина (30–35% площади), а размер их достигает 60–100 мкм. В проходящем свете хромшпинелид нацело просвечивает светлым рубиново-красным цветом.

Образец 5. Хромитит. Немагнитен. Текстура густовкрапленная, нодулярная, петельчатая, трещиноватая, прожилковая. Структура крупнозернистая, гипидиоморфно-зернистая, порфировидная, коррозионная, поперечно-пластинчатая.

Состав, %: хромшпинелид – 80, хризотил – 15, антигорит – 4, роговая обманка – менее 1.

Макроскопически выявляются крупные (2–5 мм) овальные агрегаты хромита, которые огибаются витиеватыми прожилками серпентина мощностью от долей миллиметра до 2 мм, а также образуют неправильной формы гнезда размером 2–5 мм. В шлифе секущие прожилки мощностью 0.5–2.0 мм пронизывают все пространство агрегатов хромшпинелида, от которых отходят менее мощные короткие изгибающиеся жилки мощностью менее 1 мм.

В отраженном свете микроскопа хромшпинелид наблюдается в виде сильно трещиноватых агрегатов, в которых количество трещин колеблется от 2–5 на один индивид до 15–20 и более. Трещины разноориентированы, но в первом случае часть из них все же имеют примерно одинаковое направление (субпараллельны), а во втором случае они располагаются хаотично. В проходящем свете микроскопа хромшпинелид совершенно черный, не просвечивает.

Образцы Курмановского месторождения

Образец 6. Макроскопически это плотная светло-серо-зеленоватая порода с черными вкраплениями рудного минерала (средневкрапленная). Текстура полосчатая, пунктирно-прожилковая, неравномерно-рассеянно-вкрапленная. Действует на магнитную стрелку.

Ориентировочный состав шлифа (в проходящем свете), %: серпентин – 54, хромшпинелид – 30, гидроксиды железа – 7, магнетит – 5, опал, брусит, карбонат, хлорит – 4.

Серпентин представлен полосками длиноволокнистого хризотила, образующего решетчатую

структуру. Центральные части решеток выкрошены при изготовлении шлифа, они были представлены, по-видимому, гидроксидами железа. Однако значительная часть ячеек сохранилась и представлена более крупночешуйчатым хлоритом и крупнозернистым карбонатом, бруситом. Полоски хризотила имеют зональное строение: центральная их часть выполнена бесцветной разностью, а периферическая – сильно ожелезнена и приобрела буроватый, темно-бурый и черный (на просвет) цвет. Местами все описанные разности серпентина секутся прожилками антигорита мощностью 60–150 мкм и длиной до 1000 мкм.

Хромшпинелид представлен агрегатами, состоящими из нескольких зерен (“рябчиковая” текстура) размером до 2000 мкм и отдельных рассеянных зерен размером до 500 мкм. Форма неправильная, границы извилистые, корродированные. Зерна содержат включения и прожилки серпентина, разбиты открытыми трещинками и имеют ясно выраженное зональное строение: центральные части просвечивают красноватым цветом (хромпикотит), а периферическая оболочка (100–200 мкм) – черная, непросвечивающая (пикрохромит).

Опал, карбонат, хлорит и брусит выполняют центральные части решеток, а брусит, кроме того, встречается среди основных полосок серпентина.

В отраженном свете (полировка) хромшпинелид сильно трещиноватый с многочисленными прожилками серпентина и магнетита.

Образец 7. Макроскопически это густовкрапленная хромитовая руда. Текстура нодулярная, структура гипидиоморфно-зернистая, реже аллотриоморфная. На магнитную стрелку не реагирует.

Ориентировочный состав шлифа (в проходящем свете микроскопа), %: хромшпинелид – 50, серпентин – 42, гидроксиды железа – 8; редкие чешуйки хлорита, зерна карбоната, опала, брусита.

Серпентин представлен удлинёнными полосками хризотила, чередующимися с табличками антигорита, хлорита и гидроксидами железа. Решетчатая структура развита слабо, а размер ячеек не превышает 200 мкм, в среднем составляя 50–70 мкм. Центральная их часть выполнена главным образом карбонатом, реже антигоритом и гидроксидами железа. Последние развиваются в виде полосок, чередующихся с хризотилом, выполняют стенки решеток. Цвет их от буровато-коричневого, темно-бурого до черного, непросвечивающего.

Хромшпинелид образует изометричные кристаллы округлой (нодулярной) формы. В основном темный, редко просвечивает рубиново-красным цветом рассредоточенными участками, сильно трещиноватый, содержит многочисленные включения и прожилки серпентина.

В отраженном свете микроскопа (полировка) хромшпинелид рассечен многочисленными прожилками серпентина, который корродирует его

зерна с краев с образованием “останцов” хромшпинелида в серпентине или отделены от основной массы хромшпинелида многочисленными трещинками.

Образец 8. Представлен убогой вкрапленностью хромшпинелида, неравномерно рассеянной среди пятнистой нерудной составляющей в виде разноокрашенных (зеленовато-серых и буровато-коричневых на просвет) сгустков.

Ориентировочный состав шлифа (в проходящем свете), %: серпентин – 65, хромшпинелид – 15, гидроксиды железа – 10, прочие – 10.

В проходящем свете (прозрачный шлиф) выявляется текстура, обусловленная неравномерным распределением различных по структуре участков породы от порфирированной до решетчатой (полоски серпентина располагаются перпендикулярно волокнам и образуют решетку с угловатыми отверстиями, выполненными хризотилом, серпофитом, кабанатом и хлоритом).

Хромшпинелид – второй по распространенности минерал исследуемого шлифа. Образует расщепленные неправильной формы зерна и агрегаты размером 0.5–1.0 мм с сильно изрезанными (корродированными) краями, с включениями серпентина в виде изометричных, чаще вытянутых полосок размером 60–150 мкм и длиной до 500 мкм. Зерна неоднородны, по-видимому, по составу: черные (непросвечивающие, обогащены хромом), слабо просвечивающие красноватым цветом (обогащены железом), просвечивающие красным (алюмохроматы). Все эти различия наблюдаются в разных зернах, но чаще в одном зерне.

Гидроксиды железа представлены бурыми, темно-бурыми и темными (до черного) пятнами, ассоциирующими с решетчатыми разностями серпентина, то занимая центральные части решеток, то располагаясь в виде каемок по их периферии.

Хлорит, карбонат, опал и брусит в виде тонкошуйчатых и тонкокристаллических (5–10 мкм) пластинок и зерен в основном выполняют центральные части решеток серпентина.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований показаны на рисунках и в таблицах. На рис. 2, 3 представлены температурные зависимости электрического сопротивления образцов хромитовой руды и массивных хромитов. Чтобы не загромождать рисунки, приведена лишь часть результатов. Отмеченные при описании образцов особенности отразились на характере их электропроводности при высоких температурах. При 20°C электрическое сопротивление всех исследованных образцов находится в диапазоне 10^8 – 10^{12} Ом·см; с повышением температуры сопротивление уменьшается и при 800°C достигает значений 10^4 – 10^6 Ом·см. Температурные кривые дру-

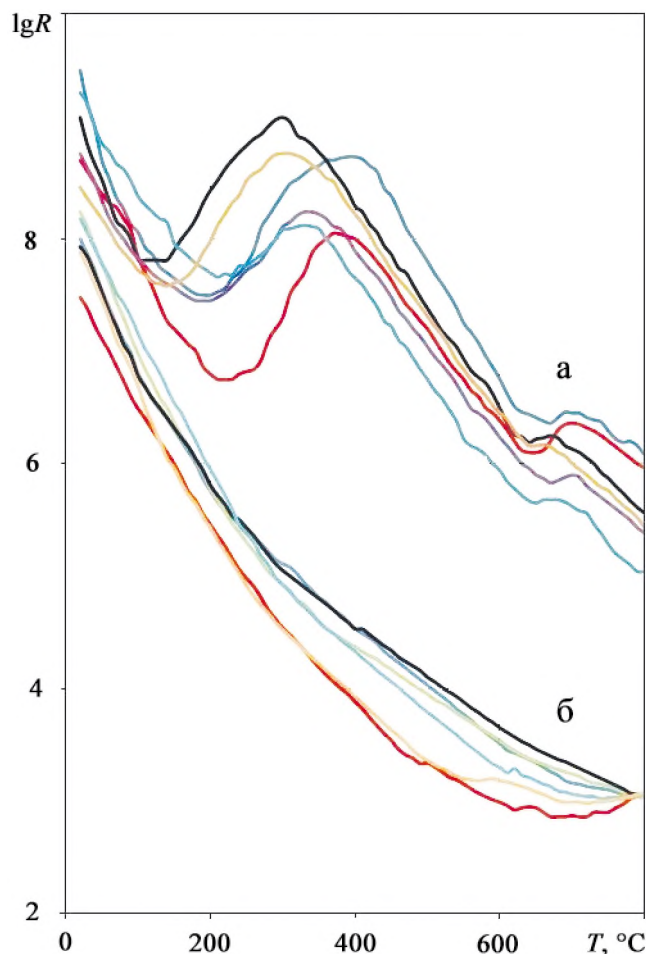


Рис. 2. Температурные зависимости электрического сопротивления образцов хромитовой руды (а) и массивных хромитов (б) из Поденного месторождения.

Fig. 2. Temperature dependences of electrical resistance of samples of chromite ore (a) and massive chromitites (b) from the Podennoye deposit.

гих образцов, не помещенные на рисунках, не выходят за пределы обозначенных интервалов. Кажущееся однообразие кривых обманчиво. Во всем температурном интервале характер зависимости электрического сопротивления отдельных образцов меняется различным и сложным образом. Электрические параметры $\lg R_0$ и E_0 однозначно идентифицируются при построении температурной зависимости электрического сопротивления в системе координат $\lg R - 1/T$, К (см. рис. 1).

На рис. 4 показана связь между $\lg R_0$ и E_0 исследованных образцов. По величине и диапазону электрических параметров образцы разделяются на три группы (хромитовая руда Поденного и Курмановского месторождений, массивные хромититы Поденного месторождения) (табл. 1). Точки со значениями параметров хромитовых руд Поденно-

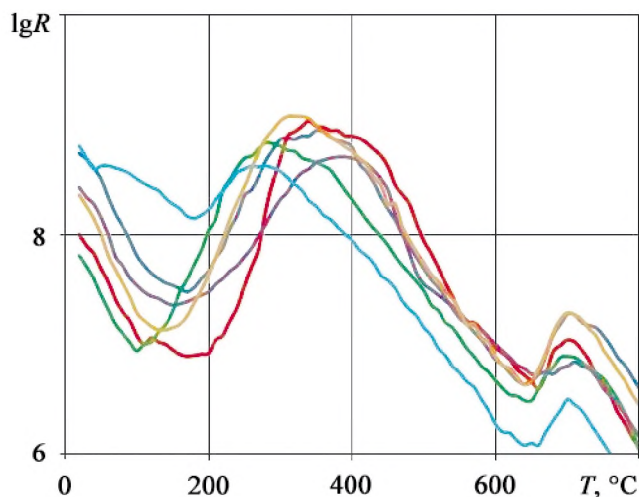


Рис. 3. Температурные зависимости электрического сопротивления образцов хромитовой руды из Курмановского месторождения.

Fig. 3. Temperature dependences of the electrical resistance of chromite ore samples from the Kurmanovskoye deposit.

го и Курмановского месторождений выстраиваются в одну прямую, формируя ее участки. При этом уравнения связи $\lg R_0 = a - b E_0$ незначительно различаются лишь величиной коэффициентов a и b (табл. 2). Для образцов хромитовой руды оно не очень существенно. Различие значимо лишь в величине и диапазоне параметров разных групп образцов хромитовой руды с низко- и высокохромистым хромшпинелидом. В пределах каждой группы образцов величины параметров зависят от степени метаморфических изменений руды. Наибольшие изменения имеют руды Поденного месторождения. Здесь у них $\lg R_0$ больше, а E_0 меньше, чем соответствующие показатели у образцов из Курмановского месторождения.

Отдельную прямую формируют точки со значениями параметров массивных хромититов Поденного месторождения. Здесь же нанесены значения параметров двух образцов массивного хромитита из Пьяноборского месторождения (Ключевского массив), представленного на 97% высокохромистым хромшпинелидом. Точки (образцы) находятся на продолжении прямой, сформированной хромититами с низкохромистым хромшпинелидом (см. рис. 4, положение точек 9, 10, пунктирная линия). Тип руды по составу хромшпинелидов высокохромистый магнезиальный. Руда слабо метаморфизована. По данным рентгенофазового анализа эти образцы определены как преимущественно пиксхромит.

Полученный результат согласуется с данными исследований магнетитовых руд, где по мере удаления от интрузива (в связи с уменьшением степе-

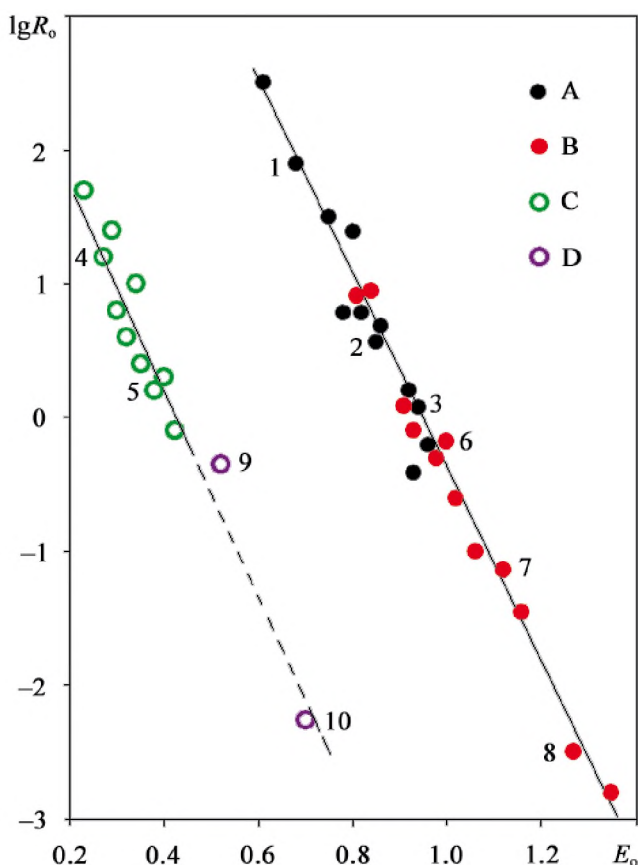


Рис. 4. Корреляционная связь между энергией активации E_0 и коэффициентом электрического сопротивления $\lg R_0$ исследованных образцов хромитовых руд и хромититов

A, C – вкрапленная руда и массивные хромититы Поденного месторождения соответственно; B – вкрапленная руда Курмановского месторождения; D – массивные хромититы Пьяноборского месторождения (Ключевского гипербазитовый массив); точки – экспериментальные значения $\lg R_0 = f(E_0)$; прямые – линии корреляции; числа рядом с точками – номера образцов, описанных в тексте и табл. 1, 2.

Fig. 4. Correlation between the activation energy e_0 and the electrical resistance coefficient $\lg R_0$ of the studied samples of chromite ores and chromitites.

A, C – interspersed ore and massive chromitites of the Podennoye deposit respectively; B – interspersed ore of the Kurmanov deposit; D – massive chromitites of the Pianobor deposit (Klyuchevskoy hyperbasite array); points – experimental values $\lg R_0 = f(E_0)$; straight lines – correlation lines; numbers next to the points – the numbers of samples described in the text and Tables 1, 2.

ни изменения магнетитовой руды) меняется величина параметров: увеличивается E_0 и уменьшается $\lg R_0$ (Бахтерев, 2018).

На рис. 5 в качестве примера представлены температурные зависимости диэлектрических потерь трех образцов (по одному из каждой группы), опи-

Таблица 1. Химический состав и электрические параметры некоторых исследованных образцов хромитовой руды

Table 1. Chemical composition and electrical parameters of some studied chromite ore samples

№ образца	Содержание оксидов, %							Электрический параметр	
	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	E ₀	lgR ₀
1	0.48	38.40	0.75	5.89	1.01	7.30	37.80	0.68	1.95
2	30.81	13.00	13.60	9.10	8.44	3.62	22.50	0.85	0.57
3	28.80	14.10	12.50	8.93	8.10	3.80	23.80	0.94	0.08
4	37.54	1.24	24.73	10.03	9.96	3.90	14.01	0.27	1.20
5	41.62	0.81	23.68	13.15	13.40	3.06	15.95	0.38	0.20
6	15.00	32.70	4.94	8.46	6.65	4.71	26.90	1.00	-0.18
7	29.53	19.50	7.49	8.30	7.70	3.34	25.70	1.12	-1.14
8	6.85	40.80	2.37	7.57	5.47	4.75	29.20	1.27	-2.50
9	52.70	—	—	—	9.96	3.90	—	0.52	-0.35
10	52.10	—	—	—	15.00	4.40	—	0.70	-2.26

Примечание. Прочерк – не определялось.

Note. Dash – not defined.

Таблица 2. Параметры (E₀, lgR₀) и коэффициенты (a, b) в уравнении связи lgR₀ = a – bE₀ исследованных образцов хромитовых руд и хромититов

Table 2. Parameters (E₀, lgR₀) and coefficients (a, b) in the coupling equation lgR₀ = a – bE₀ of the studied samples of chromite ores and chromitites

Образец	E ₀ , эВ	lgR ₀	R ²	a	b
Руда Поденного месторождения	0.61–0.96	2.50...–0.41	0.9352	7.234	7.782
Хромититы Поденного месторождения	0.21–0.41	–0.08...1.67	0.9130	3.183	7.900
Руда Курмановского месторождения	0.81–1.35	0.95...–2.80	0.9835	6.683	7.094
Руда Курмановского и Поденного месторождений совместно	0.61–1.35	2.50...–2.80	0.9771	6.765	7.191

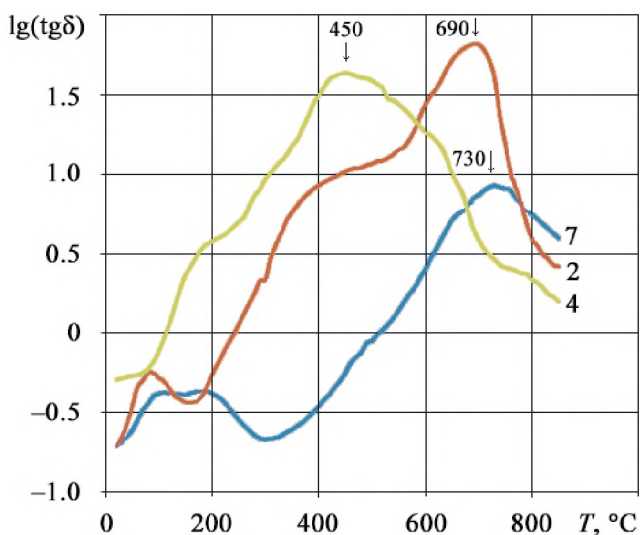


Рис. 5. Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь исследованных образцов хромитовой руды lg(tgδ).

Числа рядом с кривыми линиями – номера образцов, описанных в тексте и табл. 1, 3.

Fig. 5. Temperature dependences of the tangent of the dielectric loss angle of the studied samples of chromite ore lg(tgδ).

The numbers next to the curved lines are the numbers of the samples described in the text and Tables 1, 3.

санных в тексте и табл. 1, 2. На кривых отчетливо отмечается максимум диэлектрических потерь. Это указывает на то, что потери носят релаксационный характер (Сканави, 1949). Известно также, что в процессе метаморфизма (в нашем случае нагревание образца до 800°C в определенном смысле является эквивалентом) состав хромшпинелида изменяется. Это изменение выражается главным образом в том, что часть закисного железа переходит в окисную форму. Образующаяся при этом окись железа входит в кристаллическую решетку хромшпинелида, вследствие чего нарушается ее строение (Карякин, Пятикоп, 1955). Это преобразование для разных образцов происходит при разных температурах и связано с химическим, минералогическим составом и предысторией (Пашкеев и др.,

Таблица 3. Содержание оксидов хрома и железа и температура максимума диэлектрических потерь в исследованных образцах хромитовой руды**Table 3.** The content of chromium and iron oxides and the temperature of the maximum dielectric losses in the studied chromite ore samples

№ образца	Содержание оксидов, %			(FeO:Fe ₂ O ₃)*	Содержание оксидов, %		(FeO:Fe ₂ O ₃)**	Н, отн. ед.	T, °C
	Cr ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃		FeO	Fe ₂ O ₃			
	До прокаливания				После прокаливания				
2	30.81	8.44	3.62	2.33	5.52	8.11	0.68	3.42	690
3	28.80	8.10	3.80	2.13	5.30	8.94	0.59	3.61	685
4	37.54	9.96	3.90	2.55	7.52	4.70	1.60	1.59	450
5	41.62	13.40	3.06	4.38	10.15	3.73	2.72	1.61	470
6	15.00	6.42	4.71	1.36	2.60	8.48	0.31	4.39	735
7	29.53	7.70	3.34	2.31	4.69	9.40	0.50	4.61	730
9	52.70	9.96	3.90	2.55	7.52	4.75	1.58	1.61	550
10	52.10	15.00	4.40	3.41	12.10	6.13	1.97	1.73	555

2011). С составом связана и прочность кристаллической решетки (Ферсман, 1958). Чем прочнее кристаллическая решетка минерала, тем при более высокой температуре происходит ее разрушение, что отражается на положении максимума на температурной зависимости диэлектрических потерь.

Ранее в работе автора (Бахтерев, 2021) были исследованы температурные зависимости диэлектрических потерь образцов хромитовых руд из ряда месторождений некоторых гипербазитовых массивов Урала. Было установлено, что положение максимума диэлектрических потерь для всех исследованных образцов меняется от 450 до 900°C. При этом соотношение закисного и окисного железа в исходном образце (FeO/Fe₂O₃)* и после его прокаливания (FeO/Fe₂O₃)** изменяется от 1.61 до 11.14. Это связано с различной степенью метаморфизма образцов.

Здесь мы определили химический состав образцов, в которых – установили содержание окисного и закисного железа в исходном образце и образце-дубликате после его прокаливания до 800°C. Определили H и сопоставили с положением максимума диэлектрических потерь на шкале температур. Исследованные образцы (они описаны в тексте и табл. 3) заняли в этой взаимозависимости от степени метаморфизма определенное место (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрические свойства горных пород как весьма чувствительные индикаторы их вещественного состава и генетических процессов являются важными источниками информации. Изучение высокотемпературной электропроводности гипербазитов, в различной мере насыщенных хромшпинелью, могут выявить новые поисковые признаки хромитовых руд, в первую очередь вкрапленного типа, с

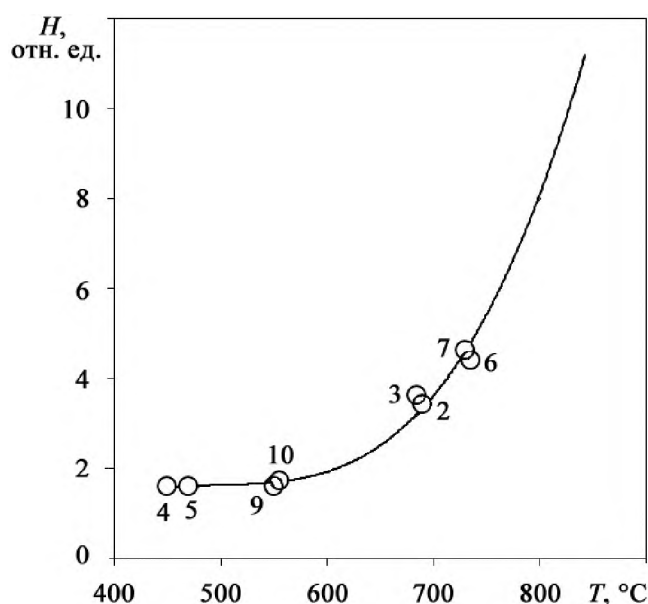


Рис. 6. Значение параметра H в зависимости от положения максимума диэлектрических потерь на шкале температур T исследованных образцов.

Кружки и числа рядом с ними – номера образцов, описанных в тексте и табл. 1, 3; сплошная линия – линия корреляции $H = f(N)$, где $N = 10^{-2} T$, °C, описанная ранее (Бахтерев, 2021).

Fig. 6. The value of the parameter H depending on the position of the maximum dielectric losses on the temperature scale T of the samples studied.

Circles and numbers next to them are the numbers of the samples described in the text and Tables 1, 3; a solid line is the correlation line $H = f(N)$, where $N = 10^{-2} T$, °C, described earlier (Bakhterev, 2021).

одновременной оценкой их метаморфических изменений.

Приведенные результаты в комплексе с другими физико-химическими параметрами могут быть использованы в качестве индикатора экспрессной оценки типа оруденения. Кроме того, исследование взаимосвязи структурных и физических свойств (электрического сопротивления, диэлектрических потерь) рудных хромшпинелидов дает информацию для прогнозирования технологических свойств хромитовых руд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахтерев В.В. (2018) Комплексные исследования электрических параметров образцов магнетитовых руд в связи с их генезисом и минеральным составом (на примере Гороблагодатского скарново-магнетитового месторождения). *Изв. вузов. Геология и разведка*, (6), 77-84. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2018-6-77-84>
- Бахтерев В.В. (2021) Диэлектрические потери в рудообразующих хромшпинелидах из офиолитовых комплексов Урала. *Изв. УГГУ*, 2(62), 73-80. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-73-80>
- Карякин Л.И., Пятикоп П.Д. (1955) Изменение хромшпинелидов при нагревании. *Докл. АН СССР*, 102(3), 601-603.
- Пашкеев А.И., Михайлов Г.Г., Пашкеев И.Ю., Невраева К.И. (2011) Изменение фазового состава и физических свойств хромовых руд массива Рай-Из при окислительном обжиге. *Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Сер.: Металлургия*, вып. 16, 29-35.
- Перевозчиков Б.В. (2006) Хромовые руды офиолитовых комплексов. *Офиолиты: геология, петрология, металлогения и геодинамика*. Мат-лы Междунар. науч. конф. (12-е Чтения памяти А.Н. Заварицкого). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 295-300.
- Реестр хромитопоявлений в альпийских ультрабазах Урала. (2000) Пермь: КамНИИКИГС, 474 с.
- Сканави Г.И. (1949) Физика диэлектриков (область слабых полей). М.; Л.: Изд-во технико-теоретической литературы, 500 с.
- Ферсман А.Е. (1958) Избранные труды. Т. 4. М.: АН СССР, 588 с.
- Чашухин И.С., Сурганов А.В., Булыкин Л.Д., Гмыра В.Г., Чашухина В.А. (2002) Закономерности состава аксессуарного и рудообразующего хромшпинелида в ультрамафитах Алапаевского массива. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 149, 281-289.
- Чашухин И.С., Чашухина В.А., Гмыра В.Г. (2010) О взаимоотношениях высокохромистых и глиноземистых хромитовых руд в месторождениях Среднего Урала. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 157, 255-259.
- Чашухин И.С., Вотяков С.Л. (2012) Ультрамафиты Алапаевского массива (Средний Урал): петрология, геохимия, хромитовосность. *Литосфера*, (4), 140-157.
- Шилова Т.А. (1977) О хромшпинелидах Алапаевского массива. *Минералогия и геохимия гипербазитов Урала*. Минерал. сборник № 13. Свердловск: УНЦ АН СССР, 33-45.

REFERENCES

- Bakhterev V.V. (2018) 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). *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Geology and Explor.*, (6), 77-84. (In Russ.) <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2018-6-77-84>
- Bakhterev V.V. (2021) Analysis of dielectric losses in chromespinelide samples from the ophiolite complexes of the Urals. *Izv. UGGU*, 2(62), 73-80. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-73-80>
- Chashchuhin I.S., Chashchuhina V.A., Gmyra V.G. (2010) On the relationship of high-chromium and aluminous chromite ores in the deposits of the Middle Urals. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 157, 255-259. (In Russ.)
- Chashchuhin I.S., Surganov A.V., Bulykin L.D., Gmyra V.A., Chashchuhina V.A. (2002) Regularities in the composition of accessory and ore-forming chromium spinel in Alapaevsk massif ultramafic rocks. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 149, 281-289. (In Russ.)
- Chashchuhin I.S., Votyakov S.L. (2012) The ultramafites of Alapaevsk massif (Middle Urals): petrology, geochemistry and chromite-bearing. *Lithosphere (Russia)*, (4), 140-157. (In Russ.)
- Fersman A.E. (1958) Selected writings. V. 4. Moscow, AN SSSR, 588 p. (In Russ.)
- Karyakin L.I., Pyatikop P.D. (1955) Change of chrome spinels upon heating. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 102(3), 601-603. (In Russ.)
- Pashkeev A.I., Mihailov G.G., Pashkeev I.Ju., Nevraeva K.I. (2011) Changes in the phase composition and physical properties of chromium ores of Rai-Iz massif during oxidative roasting. *Vest. Yuzhno-Ural'sk. Gos. Univ. Ser.: Metallurg.*, vyp. 16, 29-35. (In Russ.)
- Perevozchikov B.V. (2006) Chromium ores from the ophiolite complexes. *Ophiolity: Geology, petrology, metallogeny and geodynamics*. Mat-ly Intern. Sci. Conf. (XII Reading memory of A.N. Zavaritsky). Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 295-300. (In Russ.)
- Register of chromite occurrences in alpine-type ultramafic rocks of the Urals. (2000) Perm, KamNIKIIGGS, 474 p. (In Russ.)
- Shilova T.A. (1977) About Alapaevsk massiv chrome spinels. *Mineralogy and geochemistry of ultramafic rocks of the Urals*. Mineral collection No. 13. Sverdlovsk, IGG UNTs AN SSSR, 33-45. (In Russ.)
- Skanavi G.I. (1949) Physics of dielectrics (region of weak fields). Moscow, Leningrad. Publishing of technology-theoretical literature, 500 p. (In Russ.)