

## ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ГИПЕРБАЗИТОВ ИЗ ВОЙКАРО-СЫНИНСКОГО МАССИВА

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

**Аннотация.** Изучены образцы серпентинизированных гипербазитов, вмещающих хромитовую руду. Руда представлена убогой и редкой вкрапленностью глиноземистого магнезиального типа. В дунитах вокруг рудных тел отмечается вкрапленность хромшпинелидов. Получены температурные зависимости электрического сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь в интервале температур 20-800 °С. Определены электрические параметры  $IgRo$ ,  $Eo$  исследованных образцов и установлен характер их распределения.

*Серпентинизация гипербазитов, электрическое сопротивление, энергия активации, высокая температура.*

## SPECIAL FEATURES OF THE HIGH TEMPERATURE CONDUCTIVITY OF THE HYPERBAZITES FROM THE VOIKARO-SYNIN MASSIF

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

**Abstract.** The article considers the research of the serpentinized hyperbasites samples from the massif that contains poor dispersed chromite deposit. The chromite deposit consists of sparse sprinkles of alumina magnesia type. The holding massif includes relatively dense sprinkles of chromespinellides. The experiments allowed to establish dependence of electrical resistance and dielectric loss tangent on temperature in the range of 20-800 °C. Parameters of high-temperature resistance  $IgRo$ ,  $Eo$  for the tested samples and type of distribution of these parameters were defined.

*Serpentinization of ultramafics, electrical resistance, activation energy, high temperature.*

### **Введение**

Гипербазиты являются важным контролирующим фактором хромитовых месторождений. Однако строение, состав, хромитоносность каждого гипербазитового массива имеют свои особенности. Хромитовое оруденение характеризуется значительной изменчивостью типоморфных признаков и исключительной сложностью локализации. Осложняющими факторами, влияющими на сохранность и качество хромитовых руд, являются процессы метаморфизма (Павлов, Григорьева-Чупрынина, 1973; Луцкина, 1983; Малахов, 2003). Разнообразие точек зрения на генезис и условия концентрации хромшпинелидов не позволяют однозначно решать вопрос о перспективности того или иного гипербазитового массива. Существующие геофизические методы не дают должного эффекта (Комплексные..., 1986). Для более плодотворного проведения разведочных работ на хромиты исключительное значение имеют исследова-

ния закономерностей формирования и локализации хромитового оруденения, выявление рудоконтролирующих элементов и разработка новых методологических подходов к прогнозу и оценке хромитовых месторождений. Изучение высокотемпературной электропроводности гипербазитов, вмещающих хромитовое оруденение, может выявить новые нетрадиционные поисковые признаки хромитовых руд. Изучение хромитов представляет и общегеологический интерес, так как они, являясь породами мантийного генезиса, несут информацию о геодинамических процессах, с которыми связано формирование литосферы.

Геология и хромитоносность Войкаро-Сынинского массива описаны в ряде работ, например (Савельева, 1977; Савельев, 1977; Макеев, Перевозчиков, Афанасьев, 1985; Реестр..., 2000; Перевозчиков, Овечкин, Попов, 2004; Перевозчиков, 2006). Основные перспективы массива связаны с хромитовыми рудами глиноземистого маг-

незиального типа, локализованными в гарцбургитовом комплексе. По данным (Перевозчиков, 2006) в пределах массива гарцбургитовый структурно-вещественный комплекс занимает около 70%. Морфологические, структурные и вещественные характеристики хромитопоявлений глиноземистого типа весьма изменчивы и находятся в тесной зависимости от положения в структуре гарцбургитового структурно-вещественного комплекса. По условиям локализации, морфологии и характеру контактов рудных тел, структурно-текстурным особенностям и густоте вкрапленности хромитовых руд в глиноземистом типе выделены два класса: бедных, редковкрапленных, убоговкрапленных руд в дунитовых телах и богатых, густовкрапленных, сплошных руд в проницаемых зонах среди гарцбургитов (Перевозчиков, Овечкин, Попов, 2004).

Класс бедных хромитовых руд локализован исключительно внутри дунитовых тел. Типоморфными чертами класса являются шпировая, жилообразная, линзовидная, неправильная формы и постепенные границы рудных тел, преобладание убого-вкрапленных, редковкрапленных руд глиноземистого магнезиального типа. Границы тел как постепенные, так и резкие. Размеры оруденения небольшие, рудные зоны обычно включают несколько линзовидных тел мощностью до первых метров. Важной особенностью рудовмещающего комплекса является то, что вокруг рудных тел в дунитах отмечается повышенная вкрапленность хромшпинелидов (до 5-10%) (Реестр..., 2000; Перевозчиков, Овечкин, Попов, 2004).

Нашими прошлыми работами исследована электропроводность образцов руд и вмещающих гипербазитов из ряда месторождений Алапаевского и Ключевского гипербазитовых массивов (Бахтерев, 2008а). Изученные руды – высокохромистые массивные, густовкрапленные. Все образцы вмещающих пород были без видимой вкрапленности хромшпинелидов. Месторождения различаются структурно-вещественными комплексами, степенью

метаморфизма пород и руд. Получены зависимости их электрического сопротивления от температуры в интервале 20-800 °С. Установлены параметры высокотемпературной электропроводности (энергия активации  $E_0$  и коэффициент электрического сопротивления  $R_0$ ). Для исследованных объектов все точки с координатами  $E_0, lgR_0$  отклоняются от базовой линии  $lgR_0=a-bE_0$ , установленной для безрудных массивов и площадей. Отклонение тем больше, чем ближе к рудопоявлению отобран образец. Для всех исследованных объектов характер распределения точек с координатами  $E_0, lgR_0$  одинаков. В то же время, графическое изображение этой связи в координатах  $E_0, lgR_0$  четко показывает, что поля распределения фигуративных точек разных объектов не совпадают. Такое поведение высокотемпературной электропроводности является отражением своеобразия геологических условий, истории становления и развития исследованных гипербазитовых массивов и месторождений в них (Бахтерев, 2008а, б).

Цель настоящей работы – исследовать температурную зависимость электрического сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь пород с повышенной вкрапленностью хромшпинелидов, вмещающих убоговкрапленные и редковкрапленные руды глиноземистого магнезиального типа; определить их электрические параметры  $lgR_0, E_0$  и установить характер этого распределения.

#### **Методика исследований и образцы**

Установка и методика измерения электропроводности образцов горных пород при высоких температурах и определение электрических параметров описаны ранее (Бахтерев, 2000; 2008б). Электрическое сопротивление ( $R$ ) измеряли двухэлектродной установкой в режиме динамического нагрева через каждые 10 градусов в интервале температур 20-800 °С. Скорость нагревания 4 град/мин. Температуру определяли на расстоянии 10 мм от образца хромель-алюмелевой термопарой. Исследуемые образцы вырезали в форме кубика с ребром 15 мм и по-

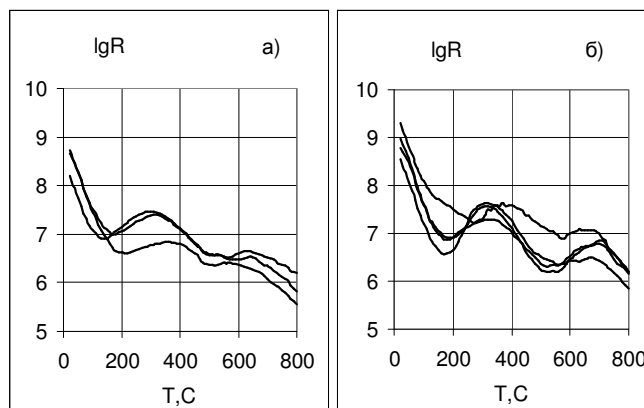
мещали между плоскими электродами (один электрод медь, второй — нержавеющая сталь). Измерительный прибор – тераомметр Е6-13А. Прибор позволяет измерять электрическое сопротивление постоянному току в диапазоне от 10 до  $10^{14}$  Ом. Относительная ошибка составляет  $\pm(2,5-4)\%$  и зависит от диапазона измерений. В качестве измерительного прибора для определения тангенса угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ) использован «Измеритель L, C, R цифровой» Е7-8. Рабочая частота прибора 1000 Гц.

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. Коэффициент электрического сопротивления  $lgR_0$  определен как величина отрезка, отсекаемого касательной к кривой  $lgR=f(1/T)$  на оси ординат.

Образцы для исследования отобраны в северной («фоновой») части Войкар-Сынинского массива (3 образца), из безрудных площадей вмещающих пород Аркашорского рудопроявления (5 образцов). Эти образцы без видимой вкрапленности хромшпинелидов приняты в качестве «фоновой» породы. Остальные образцы отобраны из керна нескольких скважин (участок Ямботывис). Всего отобрано и изучено около 70 образцов. Во всех образцах визуально оценено содержание хромшпинелидов в количестве от единичных зерен до убогой вкрапленности. Образцы для исследования любезно предоставлены кандидатом геолого-минералогических наук Н.В. Вахрушевой (УГГУ, Екатеринбург).

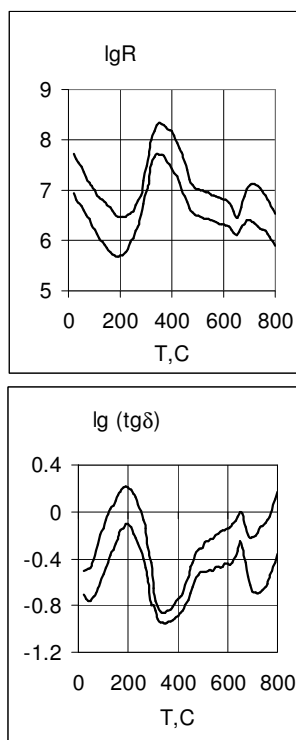
**Результаты и их обсуждение**

Для всех исследованных образцов измерены температурные зависимости электрического сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь в интервале 20-800 °С.



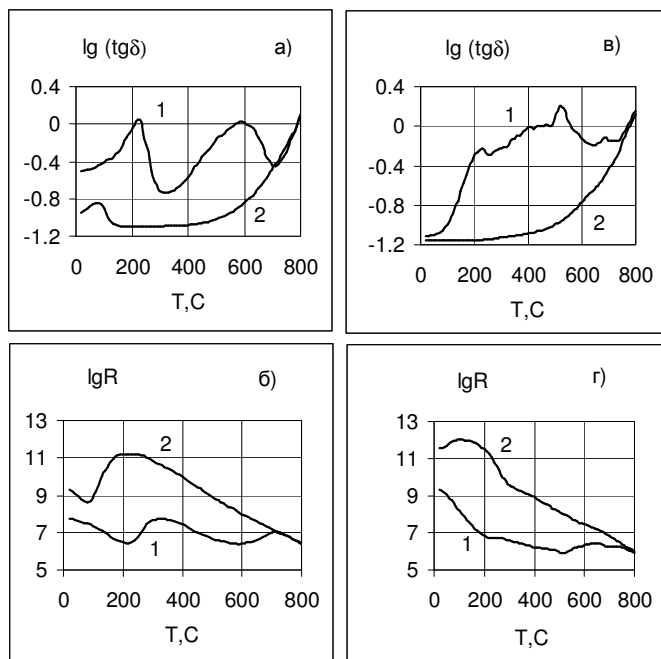
**Рис. 1.** Температурные кривые электрического сопротивления образцов серпентинитов из северной (фоновой) части Войкар-Сынинского массива (а) и безрудных площадей Аркашорского рудопроявления (б). Здесь и на рис. (2-7) электрическое сопротивление  $R, \text{Ом}$

В качестве примера на рис. 1, 2 приведены типичные кривые  $lgR=f(T)$  и  $lg(tg\delta)$  для части исследованных образцов из северной «фоновой» части массива (рис. 1а), безрудных площадей вмещающих пород Аркашорского рудопроявления (рис. 1б) и дунитов, вмещающих оруденение Ямботывисского участка (рис. 2). По измеренным кривым  $lgR=f(T)$  определили энергию акти-



**Рис. 2.** Типичные температурные кривые электрического сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь вмещающих пород

вации в температурном интервале 400-600 °С и коэффициент электрического сопротивления.



**Рис. 3.** Температурные кривые электрического сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь образцов дунита (а, б) и гарцбургита (в, г) при первом (кривые 1) и втором (кривые 2) прокаливании

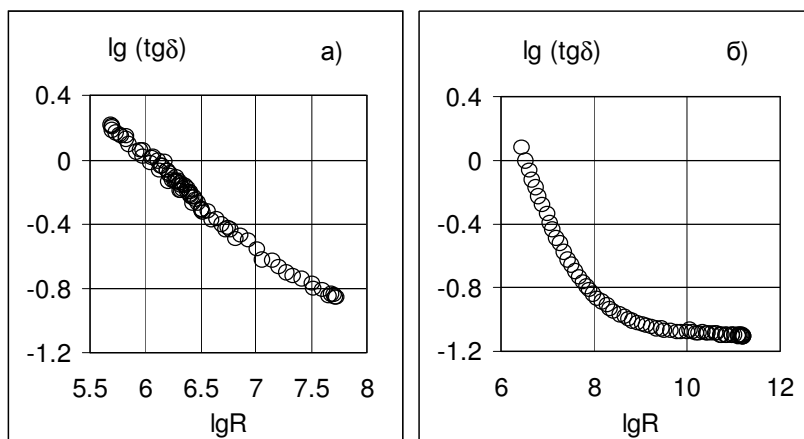
Установлено, что все исследованные образцы по величине электрического сопротивления при нормальной температуре различаются примерно на один порядок. Такое различие сохраняется во всем температурном интервале. Электрическое сопротивление образцов горных пород составляет при нормальной температуре  $10^8$ - $10^9$  Ом, а при 800 °С –  $10^5$ - $10^6$  Ом. По характеру кривых  $lgR=f(T)$  и  $lg(tg\delta)$  все исследованные гипербазиты аналогичны.

На всех кривых четко выделяются экстремумы в температурных интервалах 100-400 °С и 600-700 °С. При повторном испытании контрольных образцов в температурном ходе электрического сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь экстремумов уже не наблюдали (рис. 3).

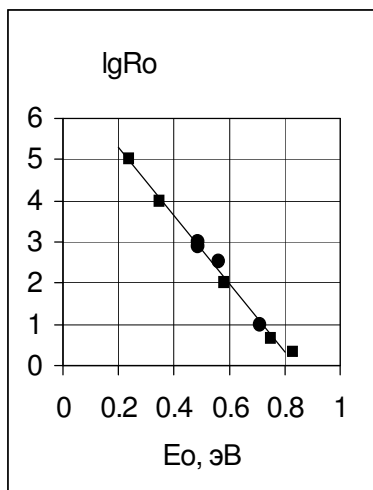
Диэлектрические потери носят преимущественно релаксационный характер. Частицы, которые обуславливают релаксационную поляризацию, могут быть различной природы: это могут быть дипольные молекулы, слабо связанные ионы или электроны. Такие частицы независимо от их природы называются релаксаторами. Для релаксационных потерь характерен максимум в температурном ходе тангенса угла диэлектрических потерь.

В нашем случае релаксаторами являются молекулы различно связанной воды. При повторном нагревании монотонное увеличение диэлектрических потерь с ростом температуры связано со сквозной проводимостью. Кроме того, в случае, когда диэлектрические потери носят преимущественно релаксационный характер, существует прямая связь между  $tg\delta$  и значением электрического сопротивления (Борисова, Койков, 1979). Такая связь установлена для наших образцов и показана на рис. 4.

Аномалии на кривых  $lgR=f(T)$  и  $lg(tg\delta)$  связаны с удалением при нагревании образцов различно связанной воды, что подтверждается многочисленными дериватографическими исследованиями (Макеев, Перевозчиков, Афанасьев, 1985) пород массива. По данным термического анализа наблюдаемые эндоэффекты при темпе-

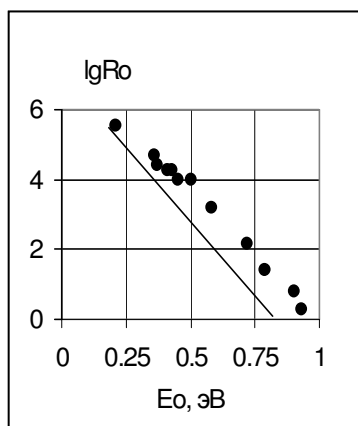


**Рис. 4.** Связь между электрическим сопротивлением и тангенсом угла диэлектрических потерь образца серпентинизированного дунита при первом (а) и втором (б) прокаливании.



**Рис. 5.** Связь между  $lgR_0$  и  $E_0$  фоновых образцов. Кружки – экспериментальные значения образцов гипербазитов из северной фоновой части массива; квадраты – значения образцов из безрудных участков Аркашорского рудопроявления; прямая линия – корреляция  $lgR_0=f(E_0)$  образцов серпентинитов из участков, не содержащих оруденения

ратурах 120-210 °С связаны со свободной или поровой водой; 300-460 °С – дегидратацией брусита; 600-790 °С – дегидратацией серпентиновых минералов: хризотила, серпентина, лизардита, антигорита. В этой же работе (Макеев, Перевозчиков, Афанасьев, 1985) указано, что в направлении с севера на юг степень метаморфизма пород массива возрастает. Особенности термического поведения серпентинизированных гипербазитов согласуются с характером температурных кривых их электропроводности и тангенса угла диэлектрических потерь



**Рис. 6.** Связь между  $lgR_0$  и  $E_0$  исследованных образцов из скважины 32. Прямая линия – то же, что на рис. 5

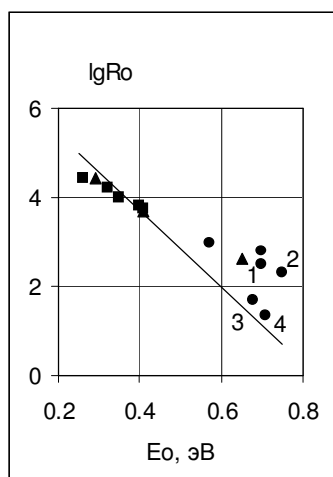
(Бахтерев, 2000; Бахтерев, Булыкин, 2003).

На рис. 5 показана связь между  $E_0$  и  $lgR_0$  исследованных образцов «фоновых» пород. Она выражается формулой  $lgR_0=a-bE_0$ , где  $a$  и  $b$  – постоянные коэффициенты, равные, соответственно, 7,1 и 8,5. Аналогичная зависимость получена нами ранее для других гипербазитовых массивов. (Бахтерев, 2004; 2008б).

Исходя из кристаллохимических особенностей минералов, слагающих горные породы, и физических представлений об электропроводности диэлектриков, коэффициенты  $a$  и  $b$  для разных пород должны различаться. Экспериментальные результаты подтверждают это. Так для разных массивов и площадей, не содержащих оруденения, получены разные значения коэффициента  $b$ : 13,2 – для Тургоякского массива; 12,1 – для Баженовского массива; 7,8 – для нижнетагильских серпентинитов. Коэффициент  $a$  для всех исследованных объектов практически одинаков (Бахтерев, 2008б).

На рис. 6 показана связь между энергией активации и коэффициентом электрического сопротивления исследованных образцов серпентинитов из скважины 32.

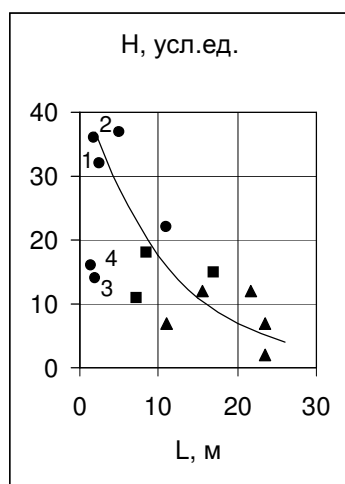
По данным Вахрушевой Н.В. разрез представлен в различной степени серпентинизированными дунитами массивными, реже сланцеватыми вследствие сильной трещиноватости. Руда представлена серией рудных шлиров во вмещающем дуните. Контакты постепенные, иногда резкие. Дунит среднезернистый местами полностью серпентинизирован. Руда чаще убоговкрапленная, иногда густовкрапленная. В скважине в интервале 6-19 м выделено несколько прослоев хромшпинелидов. Образцы отобраны выше, ниже и между прослоями руды. Расстояние от места отбора образцов до руды составляет от 1 до 4 м. Фигуративные точки в координатах  $lgR_0$  и  $E_0$  всех исследованных образцов отклоняются почти одинаково от базовой линии. Отсюда можно заключить, что все образцы взяты на примерно равном расстоянии от оруденения. Аналогичный результат полу-



**Рис. 7.** Связь между  $lgR_0$  и  $E_0$  исследованных образцов из скважин 23, 29, 30. Цифры – номера проб, описанных в тексте. Прямая линия – то же, что на рис. 5

чен еще по двум скважинам.

На рис. 7 показана связь между энергией активации и коэффициентом электрического сопротивления исследованных образцов серпентинитов из скважин 23, 29, 30. Каждой скважиной вскрыто по одному рудному телу. Образцы 1 и 2 на рис.7 отображены выше рудного тела на расстоянии 2,5 и 1,8 м, соответственно; образцы 3 и 4 – ниже рудного тела на расстоянии 2 и 1,5 м, соответственно. С приближением к рудному телу фигуративные точки в координатах



**Рис. 8.** Связь между отклонением фигуративных точек ( $H$ , усл.ед.) в координатах  $lgR_0$ ,  $E_0$  от прямой линии – корреляции  $lgR_0=f(E_0)$  образцов серпентинитов из участков, не содержащих оруденения, и расстоянием от места отбора образца до рудного тела ( $L$ , м). Цифры – номера проб, описанных в тексте

натах  $lgR_0$ ,  $E_0$  отклоняются от базовой линии, что согласуется с нашими предыдущими исследованиями (Бахтерев, 2008а). Ниже рудного тела, с удалением от него – приближаются. Этот результат получен впервые. Возможно, здесь скрыта какая-то информация о направленности процесса рудообразования.

На рис. 8 показана связь между величиной отклонения фигуративной точки в координатах  $lgR_0$ ,  $E_0$  от базовой прямой ( $H$ , усл.ед.) и расстоянием между местом взятия образца и рудным телом ( $L$ , м).

Хотя разброс точек достаточно большой, однако связь четко прослеживается. Такой разброс, вероятно, связан еще и со сложным строением разреза. Рудопроявления массива, как правило, состоят из нескольких зон вкрапленных руд мощностью 1-3 м и протяженностью от нескольких десятков до сотен метров, отстоящих друг от друга на 5-25 м. (Перевозчиков, Овечкин, Попов, 2004; Перевозчиков, 2006). Поэтому, возможно, такой разброс точек на рис. 8 частично объясняется совместным влиянием не только того рудного тела, которое вскрыто данной скважиной, но и других близко расположенных тел.

#### Заключение

Исследованы образцы гипербазитов, вмещающих убоговкрапленные, бедновкрапленные руды глиноземистого магнетитового типа. Все образцы – с видимой вкрапленностью хромшпинелидов. Получены температурные зависимости электрического сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь в интервале 20-800 °С. Определены электрические параметры  $lgR_0$ ,  $E_0$ . На конкретных примерах показан характер их распределения в зависимости от расстояния места взятия образца до рудного тела.

Для безрудных площадей установлена зависимость  $lgR_0=a-bE_0$  с коэффициентами  $a=7,1$ ;  $b=8,5$ .

В скважине 32 образцы отобраны выше, ниже и между прослоями руды. Расстояние от руды, где взят образец, составляет от 1 до 4 м. Фигуративные точки в координатах  $lgR_0$ ,  $E_0$  всех исследованных

образцов отклоняются от базовой линии почти одинаково. По такому распределению фигуративных точек можно лишь предположить, что все образцы взяты примерно на равном расстоянии от оруденения.

По ряду скважин выявлено, что с приближением к рудному телу фигуративные точки в координатах  $IgRo$ ,  $Eo$  отклоняются от базовой линии, ниже по скважине с удалением от рудного тела – приближаются. Этот результат получен впервые.

### **Литература**

**Бахтерев В.В.** О характере изменения при высоких температурах электрического сопротивления серпентинитов из Баженовского месторождения (Урал) // Геология и геофизика. 2000а. Т. 41, № 9. С. 1325-1330.

**Бахтерев В.В.** Методика определения электрического сопротивления ультрабазитов при высоких температурах // Уральский геофизический вестник. 2000б. № 1. С. 18-20.

**Бахтерев В.В.** Оценка формационной принадлежности гипербазитов Урала по параметрам их высокотемпературной электропроводности // Докл. РАН. 2004. Т. 398, № 3. С. 371-373.

**Бахтерев В.В.** Сравнительное исследование высокотемпературной электропроводности руд и вмещающих горных пород ряда хромитовых месторождений из дунит-гарцбургитовых (альпинотипных) гипербазитов Урала // Геология и геофизика. 2008а. Т. 49, № 1. С. 78-84.

**Бахтерев В.В.** Высокотемпературные исследования гипербазитов Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2008б. 151 с.

**Бахтерев В.В., Булыкин Л.Д.** Особенности высокотемпературной электропроводности гипербазитов из Тургоякского массива // Уральский геофизический вестник. 2003. № 5. С. 10-15.

**Борисова М.Э., Койков С.Н.** Физика диэлектриков. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1979. 240 с.

Комплексные геофизические исследования

при прогнозе, поисках и разведке хромитовых месторождений / Под ред. Т.А. Смирновой, Л.А. Певзнера. М.: Недра, 1986. 260 с.

**Луцкина Н.В.** Классификация хромитовых месторождений для прогнозирования // Разведка и охрана недр. 1983. № 2. С. 7-12.

**Макеев А.Б., Перевозчиков Б.В., Афанасьев А.К.** Хромитоносность Полярного Урала. Сыктывкар, 1985. 152 с.

**Малахов И.А.** Положение различных типов хромитового оруденения в разрезе ультрамафитов Урала, их состав и особенности метаморфизма // Эволюция внутриконтинентальных подвижных поясов: тектоника, магматизм, метаморфизм, седиментогенез, полезные ископаемые. Мат-лы науч. конф. (IX чтения А.Н. Заварицкого). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2003. С. 185-189.

**Павлов Н.В., Григорьева-Чупрынина И.И.** Закономерности формирования хромитовых месторождений. М.: Наука, 1973. 199 с.

**Перевозчиков Б.В.** Хромовые руды офиолитовых комплексов. // Офиолиты: геология, петрология, металлогения и геодинамика. Мат-лы между науч. конф. (XII Чтения памяти А.Н. Заварицкого). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. С. 295-300.

**Перевозчиков Б.В., Овечкин А.М., Попов И.И.** Типоморфные черты хромитового оруденения глиноземистого магнезиального типа Войкаро-Сынинского массива // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского: Сб. науч. статей. Вып. 6. Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 2004. С. 135-146.

Реестр хромитопроявлений в альпинотипных ультрабазитах Урала. Пермь: КамНИИКИГС, 2000. 474 с.

**Савельев А.А.** Хромиты Войкаро-Сынинского массива // Генезис ультрабазитов и связанного с ними оруденения. Сб. статей. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1977. С. 63-77.

**Савельева Г.Н.** Альпинотипные гипербазиты Войкаро-Сынинского массива (Полярный Урал) // Генезис ультрабазитов и связанного с ними оруденения. Сб. статей. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1977. С. 3-17.