УДК 550.8:553.08:53/54

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ СУЛЬФИДНО-МАГНЕТИТОВЫХ РУД ГОРОБЛАГОДАТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

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

Аннотация. Исследована высокотемпературная электропроводность сульфидно-магнетитовых и бессульфидных руд Гороблагодатского месторождения. Сульфиды представлены пиритом, халькопиритом, пирротином. По характеру температурных кривых и электрическим параметрам выделены три группы образцов: пирит-халькопирит-магнетитовые, пирротин-магнетитовые и бессульфидные руды. Для каждой группы образцов установлена линейная связь между энергией активации *(E_o)* и коэффициентом электрического сопротивления *($\lg R_o$)* вида $\lg R_o = a - bE_o$. Полученные эмпирические зависимости $\lg R_o = f(E_o)$ могут дать дополнительную информацию при изучении типоморфных признаков магнетитового оруденения, а также позволят судить о пространственном положении относительно сиенитового массива исследуемых образцов.

Электрическое сопротивление, высокая температура, энергия активации, магнетит, пирит, халькопирит, пирротин, генезис, типы руд.

SPECIAL FEATURES OF THE HIGH TEMPERATURE CONDUCTIVITY OF THE SULPHIDE-MAGNETITE ORE FROM GOROBLAGODATSKY DEPOSIT

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

Abstract. The paper considers the research of the electric conductivity of the sulphide-magnetite and magnetite ores from Goroblagodatsky Deposit. The sulphides includes pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite. By the character of the temperature curves and electric parameters three types of ore are distinguished: a) pyrite-chalcopyrite-magnetite, b) pyrrhotite-magnetite, c) magnetite (not sulphide). It is find out that for the every type the linear relationships between activation energy (E_0), electric conductivity coefficient ($\lg R_0$) is valid and the function $\lg R_0 = a - bE_0$ is applicable. These empirical relationships $\lg R_0 = f(E_0)$ provide additional information concerning typomorphic features of magnetite mineralization. They also make possible to estimate the location of the probe relative to syenite massif.

Electrical resistance, high temperature, activation energy, magnetite, pyrite,chalcopyrite, pyrrhotite, genesis, types of ore.

Введение

Ранее (Бахтерев, 2009; 2010; Бахтерев, Кузнецов, 2011) были изучены образцы магнетитовых руд Гороблагодатского скарново-магнетитового месторожденения различного парагенезиса, минерального состава, генетического типа. Получены температурные кривые электрического сопротивления образцов руды, состоящей на 80–90% из магнетита в интервале 20–800 °С. По характеру температурных кривых и электрическим параметрам (величине электрического сопротивления R, энергии активации E_o и коэффициенту электрического сопротивления $\lg R_o$) выделены три группы образцов руд: бессульфидные, сульфидосодержащие (пирротин) и «оспенные».

Для исследованных образцов магнетитовых руд всех минеральных типов выявлена линейная связь между E_o и $\lg R_o$ вида $\lg R_o = a - bE_o$. Коэффициент a изменяется от 1,92 до 4,80 в зависимости от типа и минерального состава магнетитовой руды. Коэффициент b практически одинаков и равен 6,65 для всех исследованных образцов. Фигуративные точки в координатах E_o, $\lg R_o$ исследованных образцов расположены в области, ограниченной прямыми $\lg R_o = 4{,}80 - 6{,}65E_o$ и $\lg R_o = 1{,}92 - 6{,}65E_o$.

В выделенной области отдельную группу составляют образцы магнетитовых руд скарнового и гидросиликатного парагенезиса с видимыми включениями пирротина, а также образцы «оспенных» руд. Внутри этой группы руды также разделяются в зависимости от парагенезиса на: гранат-магнетитовые (скарновый парагенезис); эпидот-хлорит-магнетитовые (гидросиликатный парагенезис); пироксен-магнетитовые, ортоклаз-магнетитовые («оспенные» руды).

Бессульфидные руды эпидот-хлорит-магнетитовые, гранат-магнетитовые и пироксен-ортоклаз-магнетитовые пятнистой текстуры по своим электрическим параметрам укладываются на одну прямую $\lg R_o = a - bE_o$, как бы формируя ее разные участки. Это руды скарнового и гидросиликатного парагенезиса. Сюда же попадает единственный имевшийся у нас образец с сульфидами (пирит+халькопирит) гнездовой текстуры.

Цель настоящей работы – исследовать высокотемпературную электропроводность образцов сульфидно-магнетитовой руды с учетом особенностей сульфидной минерализации из Гороблагодатского скарново-магнетитового месторождения и оценить характер поведения, диапазон изменения электрических параметров при высоких температурах и возможность использования их при изучении особенностей развития скарново-рудного процесса.

Сульфидная минерализация в рудах Гороблагодатского месторождения

По геологии скарновых месторождений имеется обширная литература, например (Овчинников, 1960; Жариков, 1968; Коржинский, 1993 и др.). В скарново-магнетитовых месторождениях Урала всегда присутствуют сульфиды (Карасик, 1957; Баклаев, 1973; Нечкин, Полтавец З., Полтавец Ю., 2000; Кузнецов, 2003а, б и др.). Тем не менее, позиция руд с сульфидной минерализацией различна, так как каждое месторождение имеет свои специфические черты развития скарново-рудного процесса.

Для Гороблагодатского рудного поля отмечены следующие «общие особенности размещения сульфидно-магнетитовых руд: удаленность от контакта активной интрузии, предпочтительное расположение в меньших по мощности рудных телах, фланговая позиция в отстоящих от интрузии рудных телах. Во всех трех позициях эти руды имеют два типа границ: условно резкие внешние, которые представляют естественное выклинивание рудных тел, и расплывчатые внутренние, отделяющие их от бессульфидных магнетитовых руд» (Нечкин, Полтавец З., Полтавец Ю., 2000, с. 260). Указанные особенности размещения сульфидно-магнетитовых руд отчетливо выражены на Гороблагодатском месторождении, где хорошо проявлена зональность, выражающаяся в увеличении доли сульфидной составляющей в скарново-магнетитовых рудах в направлении с удалением от Кушвинского диорит-сиенитового массива. Распределение сульфидов исключительно неравномерно, существуют места с преобладанием их над магнетитом или участки, с единичными зернами фиксируемые только под микроскопом (Карасик, 1957). Представлена сульфидная минерализация преимущественно пиритом с примесью значительно уступающих по количеству других минералов, содержащих серу, прежде всего халькопирита, сфалерита, пирротина (Нечкин, Полтавец З., Полтавец Ю., 2000; Кузнецов, 2003б). Руды с сульфидами подразделяются на пирит-магнетитовую и халькопирит-пирит-магнетитовую ассоциации.

Установлено, что по латерали в удалении от Кушвинской сиенитовой интрузии происходит увеличение содержаний в рудах серы, при этом содержание железа остается относительно постоянным (Кузнецов, 2003а). Выявлено, что рудные тела, расположенные в контактовой зоне интрузии, отличаются резко неравномерным распределением железа и серы. Рудные тела в удалении от интрузии характеризуются относительно равномерным распределением этих элементов. «Пирротин в сравнительно редких случаях является высокотемпературным минералом. Образование его так же, как и пирита (FeS_2), зависит не столько от температуры, сколько от концентрации ионов серы в растворах: при высокой концентрации S^{2-} железо выделяется в виде дисульфида (FeS_2), при пониженной концентрации – в виде моносульфида (FeS)» (Бетехтин, 1956, с. 163). Поэтому вероятность образования пирротина возрастает с приближением к интрузии.

Методика и образцы

Методика определения электропроводности образцов горных пород и электрических параметров при высоких температурах описана ранее (Бахтерев, 2000; 2008). Образцы для исследований вырезали в форме кубика с ребром 0,02 м. Измерения выполнены в открытой системе при атмосферном давлении. Электрическое сопротивление измеряли двухэлектродной установкой через каждые 10 градусов в интервале температур 20–800 °С. Скорость нагревания 0,066 град/с. Температуру в системе определяли платино-платинородиевой термопарой в 0,01 м от образца. Измерения электропроводности осуществляли на постоянном токе. Измерительный прибор – тераомметр Е6-13 с динамическим диапазоном от 10 до 10^{14} Ом и относительной приведенной погрешностью от ±2,5 до 4 % в конце диапазона. Для определения электрических параметров температурные кривые электропроводности были построены в координатах lg$R$, 1/T. Энергия активации E_o 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 (в области точки Кюри). Коэффициент электрического сопротивления lgR_o определен как величина отрезка, отсекаемого касательной к кривой lg$R=f(1/T)$ на оси ординат.

Образцы магнетитовой руды разного минерального состава, различной текстуры, разного генезиса отобраны из карьера «Центральный». Всего отобран 21 образец, из них 16 образцов с видимыми вкраплениями сульфидов (пирит, халькопирит, пирротин). Из каждого образца вырезано и исследовано по два кубика (всего исследовано 42 кубика-образца).

Результаты и их обсуждение

В качестве примера на рис. 1 приведены кривые lg$R=f(T)$ некоторых образцов магнетитовых руд: бессульфидных, с вкрапленностью пирротина и пирита с халькопиритом. Образцы различаются по величине электрического сопротивления при нор-

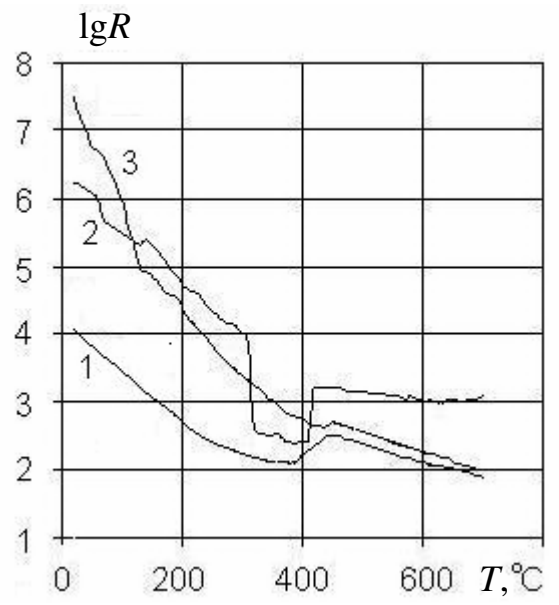

Рис. 1. Температурные кривые электрического сопротивления образцов пирит-халькопирит-магнетитовой руды (1), пирротин-магнетитовой (2), бессульфидной (3)

мальной температуре и характеру температурной кривой. Особенностью температурных кривых образцов магнетитовой руды с вкраплениями пирротина является резкое (на полтора-два порядка) изменение электрического сопротивления в интервале 200–400 °С. Образцы пирит-халькопирит-магнетитовой руды при нормальной температуре имеют электрическое сопротивление на 2–5 порядков ниже, чем образцы бессульфидной руды. С повышением температуры до 300–400 °С – сопротивление этих образцов плавно уменьшаеся, выше этих температур – увеличивается, достигая максимума при 400–450 °С. Такое поведение температурных кривых связано с электропроводностью сульфидов, которые весьма чутко реагирует на фазовую и структурную перестройку минералов (Овчинников, Кривошеин, 1973; Селиванов, Гуляева, Вершинин, 2008).

На рис. 2 и 3 показаны кривые электрического сопротивления образцов сульфидных минералов: пирита и халькопирита в разных соотношениях и пирротина.

В области температуры Кюри на кривых всех исследованных образцов сульфидно-магнетитовых руд наблюдается

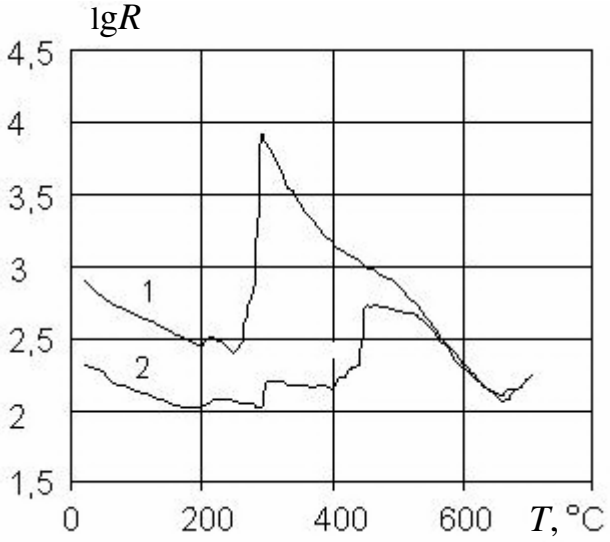

Рис. 2. Температурные кривые образцов пирита (FeS_2) и халькопирита ($CuFeS_2$) в разных соотношениях: 1 – $CuFeS_2$>FeS_2, 2 – $CuFeS_2$<FeS_2

прямолинейный участок, прямые испытывают заметный излом, который приходится на точку Кюри. Положение и протяженность прямолинейного участка на температурной кривой для отдельных образцов имеет разное значение, что, вероятно, связано с их минеральным составом.

На рис. 4 (цветная вкладка) показаны фотографии образцов магнетитовой руды с различной вкрапленностью сульфидов (пирит+халькопирит). Для области 450–650 °С были определены параметры высо-

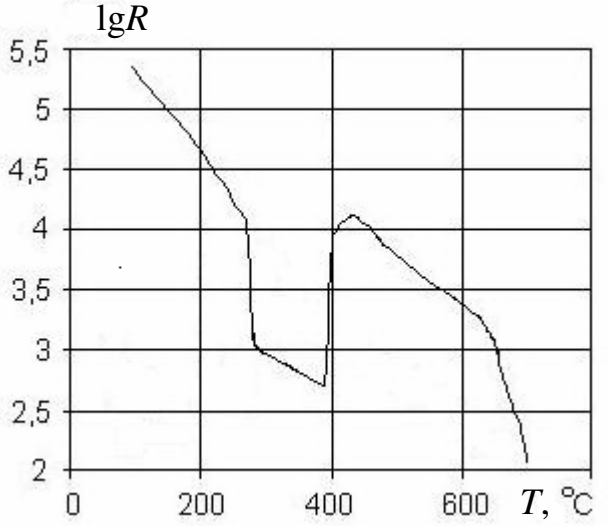

Рис. 3. Температурная кривая электрического сопротивления пирротина

котемпературной электропроводности E_o и $\lg R_o$ всех исследованных образцов. Результаты приведены на рис. 5 (цветная вкладка), где показана связь между E_o и $\lg R_o$ исследованных образцов сульфидно-магнетитовых руд. Чтобы не загромождать рисунок, на нем показана только часть результатов. Для некоторых образцов при исследовании двух кубиков были получены одинаковые или очень близкие значения параметров. В этом случае на рисунок вынесено только одно значение E_o, $\lg R_o$ (одного кубика). Образцы пироксен-ортоклаз-магнетитовых, гранат-магнетитовых, эпидот-хлорит-магнетитовых руд с вкраплениями пирита и халькопирита укладываются на одну прямую $\lg R_o = 2{,}00 - 6{,}65E_o$. Образцы с пирротином $\lg R_o = 2{,}95 - 6{,}65E_o$.

На рис. 6 (цветная вкладка) для сравнения приведены значения E_o и $\lg R_o$ образцов бессульфидных магнетитовых руд, в том числе исследованных ранее (Бахтерев, 2010; Бахтерев, Кузнецов, 2011). Здесь также пироксен-ортоклаз-магнетитовые, гранат-магнетитовые, эпидот-хлорит-магнетитовые руды по своим электрическим параметрам укладываются на одну прямую, как бы формируя ее разные участки. Корреляционная связь между параметрами E_o и $\lg R_o$ образцов этих руд имеет вид $\lg R_o = 2{,}20 - 6{,}65E_o$.

Пироксен-магнетитовые руды – высокотемпературные образования, хорошо раскристаллизованы, имеют максимальные размеры зерен. Эти руды пространственно ближе всего находятся к интрузиву. Образцы этих руд имеют самые большие значения коэффициента электрического сопротивления $\lg R_o$ и самые малые значения энергии активации E_o из всех исследованных образцов. Дальше от интрузива расположены среднетемпературные руды – гранат-магнетитовые. Еще дальше – низкотемпературные эпидот-хлорит-магнетитовые, слабо раскристаллизованные, мелкозернистые.

По мере удаления от интрузива электрические параметры образцов руд, как пирит-халькопирит-магнетитовых, так и бессульфидных, изменяются: увеличивает-

ся E_o, уменьшается $\lg R_o$. При этом кривые корреляции $\lg R_o = f(E_o)$ различаются незначительно. Отличаются образцы пирит-халькопирит-магнетитовых руд от бессульфидных, главным образом, по величине электрического сопротивления в области температур 20–400 °С. В этой температурной области электрическое сопротивление образцов пирит-халькопирит-магнетитовой руды на 1–4 порядка ниже образцов бессульфидной руды.

Заключение

Бессульфидные руды пироксен-ортоклаз-магнетитовые, гранат-магнетитовые, эпидот-хлорит-магнетитовые по своим электрическим параметрам в координатах E_o, $\lg R_o$ укладываются на одну прямую, как бы формируя ее разные участки. Это руды скарнового и гидросиликатного парагенезиса. Эти же типы руд, содержащие пирит и халькопирит, составляют другую группу. Характер формирования этой группы тот же, что и группы бессульфидных руд. Отдельную группу составляют руды с пирротином.

Одной из задач исследований скарново-магнетитовых месторождений является более детальное прослеживание изменений состава руд по удалению от интрузива, в том числе сульфидов. Полученные эмпирические зависимости $\lg R_o = f(E_o)$ могут дать дополнительную информацию при изучении типоморфных признаков магнетитового оруденения, а также позволят судить о пространственном положении относительно сиенитового массива исследуемых образцов.

Литература

Баклаев Я.П. Контактово-метасоматические месторождения железа и меди на Урале (закономерности их размещения и локализации). М.: Наука, 1973. 231 с.

Бахтерев В.В. Генетические и вещественные факторы высокотемпературной электропроводности серпентинитов // ДАН. 2000. Т. 375. № 1. С. 72–74.

Бахтерев В.В. Высокотемпературные исследования гипербазитов Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 152 с.

Бахтерев В.В. Экспериментальные исследования высокотемпературной электропроводности магнетитовой руды (магнетита) в связи с генетическими особенностями месторождения // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. (Материалы международной конференции) / Отв. ред. В.А. Коротеев. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2009. С. 80–83.

Бахтерев В.В. Высокотемпературная электропроводность магнетитовой руды (магнетита) в связи с генетическими особенностями месторождения. ДАН. 2010. Т. 433. № 4. С. 496–498.

Бахтерев В.В., Кузнецов А.Ж. Высокотемпературная электропроводность магнетитовых руд в связи с их генезисом и минеральным составом (*на примере Гороблагодатского скарново-магнетитового месторождения)* // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. Статья принята в печать.

Бетехтин А.Г. Курс минералогии. М.: Госнаучтехиздат, 1956. 558 с.

Гзогян С.Р., Чантурия Е.Л. Влияние термических воздействий на сульфиды и окислы железа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 5. С. 30–33.

Жариков В.А. Скарновые месторождения // Генезис эндогенных рудных месторождений / Ред. акад. В.М. Смирнов. М.: Недра, 1968. С. 220–302.

Карасик М.А. Промышленные типы контактово-метасоматических магнетитовых месторождений в Тагило-Кушвинского районе и особенности распределения элементов-примесей в рудах этих месторождений // Железорудная база Тагило-Кушвинского промышленного района. Свердловск: УФ АН СССР, 1957. С. 64–98.

Коржинский Д.С. Основы метасоматизма и метамагматизма: избранные труды / Отв. ред. В.А. Жариков. М.: Наука, 1993. 235 с.

Кузнецов А.Ж. Распределение железа, серы, фосфора в магнетитовых рудах Гороблагодатского месторождения на Среднем Урале // Известия УГГА. Серия: Геология и геофизика. Екатеринбург, 2003а. Вып. 89. С. 142–147.

Кузнецов А.Ж. Пиритовая минерализация в рудах Гороблагодатского железорудного месторождения на Среднем Урале // Металлогения лревних и современных океанов – 2003. Формирование и освоение месторождений в островодужных системах: Материалы девятой научной студенческой школы. Миасс: ИМин УрО РАН, 2003б. С. 136–139.

Нечкин Г.С., Полтавец З.И., Полтавец Ю.А. Особенности размещения сульфидной минерализации на Гороблагодатском и Лебяжинском скарново-магнетитовых месторождениях // Ежегодник – 1999 / Институт геологии и геохимии им. Акад. А.Н. Заварицкого: Информационный сборник научных трудов. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 260–267.

Овчинников И.К., Кривошеин А.А. Температурные зависимости коэффициента Холла и электропроводности пиритов в интервале температур (-150+500) °С // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1973. № 11. С. 86–90.

Овчинников Л.Н. Контактово-метасоматические месторождения Северного и Среднего Урала / Труды Горно-геологического института УФ АН СССР. Свердловск, 1960. Вып. 89. 495 с.

Селиванов Е.Н., Гуляева Р.И., Вершинин А.Д. Температурное расширение и фазовые превращения природного пирротина // Неорганические материалы. 2008. Т. 44. № 4. С. 506–511.

К статье Бахтерева В.В. – «Особенности высокотемпературной электропроводности сульфидно-магнетитовых руд Гороблагодатского месторождения»

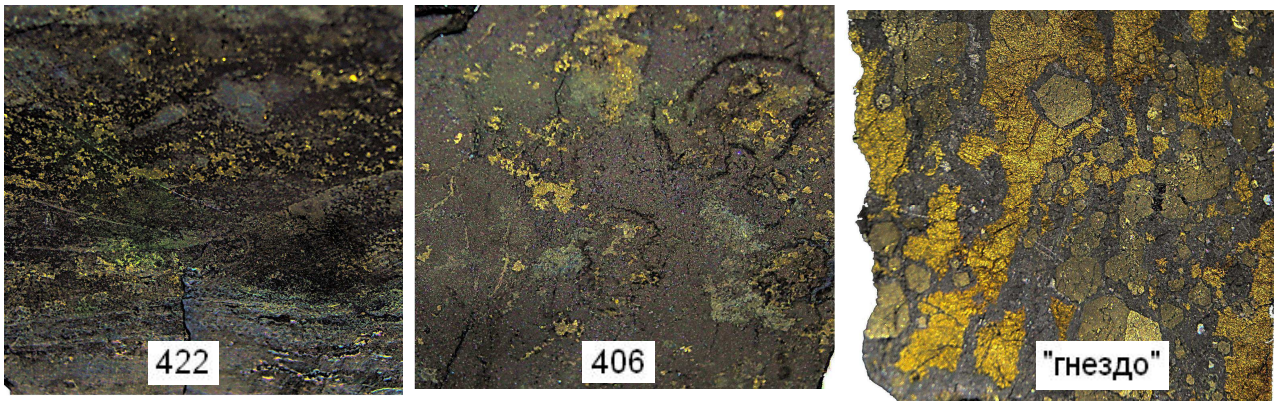

Рис. 4. Фотографии образцов сульфидно-магнетитовой руды (пирит+халькопирит): 406; 422; «гнездо» – образцы с различной вкрапленностью сульфидов

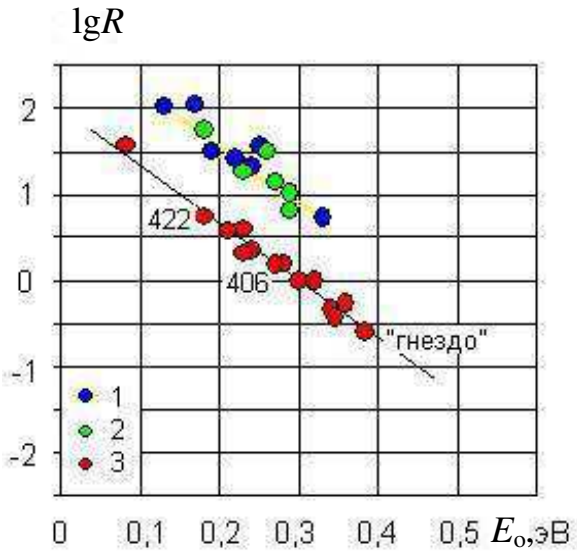

Рис. 5. Связь между E_o, $\lg R_o$ исследованных образцов сульфидно-магнетитовых руд: 1 – гранат-магнетитовая с пирротином (скарновый парагенезис); 2 – эпидот-хлорит-магнетитовая с пирротином (гидросиликатный парагенезис); 3 – пироксен-ортоклаз-магнетитовая пятнистой текстуры, гранат-магнетитовая, эпидот-хлорит-магнетитовая руды, содержащие пирит+халькопирит; прямая линия – прямая корреляции $\lg R_o = a - bE_o$ руд, содержащих пирит+халькопирит; около некоторых точек выписаны номера образцов, фотографии которых приведены на рис. 4

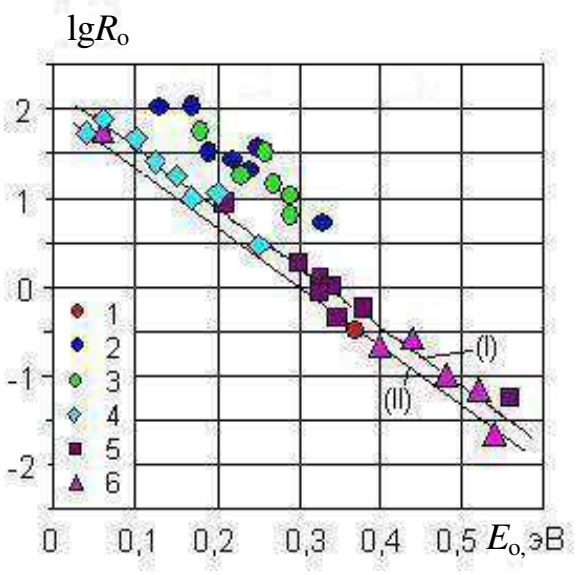

Рис. 6. Связь между E_o, $\lg R_o$ исследованных образцов магнетитовых руд: сульфидсодержащие руды: 1 – магнетитовая с сульфидами (пирит+халькопирит) гнездовой текстуры; 2 – гранат-магнетитовая с пирротином (скарновый парагенезис); 3 – эпидот-хлорит-магнетитовая с пирротином (гидросиликатный парагенезис); бессульфидные руды: 4 – пироксен-ортоклаз-магнетитовая руда пятнистой текстуры; 5 – гранат-магнетитовая; 6 – эпидот-хлорит-магнетитовая; прямые линии – прямые корреляции $\lg R_o = a - bE_o$ бессульфидных руд (I) и руд, содержащих пирит+халькопирит (II)