Записки Санкт-Петербургского горного института имени Г.В.Плеханова.
Т.130. СПб, 1992

УДК 550.849.082.75:553.3

Ю.С.РЫСС

ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ МЕТАЛЛОВ В РУДНЫХ ОБЪЕКТАХ МЕТОДОМ БСПК

Активное возбуждение электрохимических реакций на поверхности рудных тел, обладающих электронной проводимостью, и регистрация протекающих процессов в форме поляризационных кривых позволяют установить состав сульфидных минералов в оруденении, его положение в пространстве, а также содержание и запасы полезных компонентов. Процедура наблюдений заключается в следующем. Через два питающих заземления в стоянный электрический ток от его источника пропускают в землю. Обычно заземлители располагают на земной поверхности, но их можно помещать в скважинах или горизонтальных выработках. Ток, поступающий в землю, частично протекает по вмещающим породам, а частично входит и выходит из оруденения. Поскольку последнее обладает электронной и повышенной проводимостью, постольку ток стремится попасть в рудный объект и неизбежно вызывает электродные электрохимические реакции в местах втекания и вытекания тока, где происходит смена носителей электричества с ионов на электроны.

Доля тока, попадающего в оруденение, зависит от его величины положения питающих электродов относительно рудного объекта и его сопротивления току, которое определяется удельным сопротивлением среды и руды, а также особенностями электродных реакций там, где ток входит и выходит из оруденения. Изучение этого вопроса [1] позволило установить для хорошо проводящих рудных тел при симметричном положении относительно них питающих электродов величину тока внутри оруденения:

$$I_{вн} = \frac{l a_{эф} I_{общ}}{r_0^2} - \frac{\delta\varphi \pi a_{эф}}{\rho}, \qquad (I)$$

где l – размеры тела по направлению тока; $a_{эф}$ – эффективный радиус реагирующей поверхности; $I_{общ}$ – общий ток, пропускаемый в землю; r_0 – расстояние от электродов до границ оруденения; ρ – удельное сопротивление вмещающих пород; $\delta\varphi$ – разность потенциалов реакций по обе стороны тела.

Из выражения (I) видно, что ток внутри оруденения тем больше, чем больше его длина по направлению заданного электрического поля, чем меньше расстояние от питающих электродов до границ рудного тела, чем больше удельное сопротивление вмещающей среды, чем меньше разность потенциалов анодных и катодных реакций по обе стороны тела и чем больше эффективный радиус реагирующих поверхностей. Последняя величина представляет собой некоторое

сложное понятие, которое отражает размеры областей распространения реакций. Если эти области и имеют форму в виде кругового диска, то его радиус и равен эффективному. В других случаях реальный образ эффективного радиуса выразить трудно и его можно воспринять как некоторое приближение к радиусу кажущегося реагирующего диска.

В соответствии с выражением (I) чтобы знать долю тока, попадающего в оруденение, надо знать перечисленные величины. Значения $I_{общ}$ непосредственно измеряются, а значение удельного сопротивления пород либо известно, либо его можно определить многими способами. Прочие же величины представляют поисковый интерес и подлежат определению.

Так как на границе оруденения с вмещающей средой всегда существует некоторое равновесие в обмене веществом, энергией и электрическими зарядами, то на этой границе имеется динамическое равновесие катодно-анодных окислительно-восстановительных процессов, характеризуемых величиной контактной разности потенциалов, или исходным стационарным электродным потенциалом. Во многих случаях исходный электродный потенциал на всей поверхности оруденения более или менее одинаков[x]. Если же он различен на отдельных участках, то это служит причиной возникновения естественного электрического поля. Под действием внешнего тока естественное поле уничтожается, а его начальное состояние легко учитывается. Сказанное позволяет не рассматривать те случаи, когда исходное естественное электрического поле существует.

Включение тока в землю нарушает исходное электрическое и за ним вещественное равновесие в местах втекания и вытекания тока, обусловливая там, где ток входит в оруденение, усиление катодной составляющей и подавление анодной со смещением исходного потенциала к потенциалу катодной реакции $\varphi_I^к$, а там, где ток выходит из оруденения, наоборот, усиление анодной составляющей и подавление катодной со смещением исходного потенциала к потенциалу первой анодной реакции $\varphi_I^а$. В результате по обе стороны рудного объекта возникает разность потенциалов $\varphi_I^а - \varphi_I^к = \delta\varphi$, которая является одним из факторов, определяющих долю тока, текущего через оруденение. По мере увеличения тока при начавшейся съемке поляризационных кривых эта доля сохраняет свое значение, пока не произойдет смена реакций с катодной или анодной сторон рудного тела.

Для регистрации процессов измеряют разность потенциалов с помощью приемных неполяризующихся электродов, один из которых располагают в удалении от исследуемого участка (в «бесконечности"), а другой на самом участке либо на поверхности земли, либо в скважине или горной выработке. Без тока измеряемая разность потенциалов, обусловленная неидентичностью используемых электродов или естественными электрическими полями, компенсируется и поляризационная кривая БСПК начинается из начала координат диаграммы I-φ.

При включении тока между приемными электродами возникает разность потенциалов, пропорциональная плотности тока в месте электрода, находящегося

---

[x] Реальная картина значительно сложнее, но ею часто можно пренебречь без ущерба возможностям БСПК.

участке (другой электрод настолько удален, чтобы его ток не достигал), еще одна разность, отражающая эффект от протекания электрохимических акций на реагирующих поверхностях рудного объекта. Этот эффект является искомой величиной и отличается тем, что он постоянен, пока идут катодные и анодные соответствующие реакции, и меняется тогда, когда происходит смена с катодной или анодной сторон тела. Чтобы измерить интересующую разность потенциалов с наименьшими помехами нужно исключить разность потенциалов, пропорциональную току. Это делается так же, как при наблюдениях КСПК путем компенсации наблюдаемой разности напряжением, также пропорциональным току, снимаемым с прецизионного омического сопротивления, включенного в питающую цепь.

При удовлетворительной компенсации начальная ветвь поляризационной кривой, отражающая первые катодную и анодную реакции, представляет собой прямую, идущую вдоль оси тока. Последующее присоединение реакций будет регистрироваться новыми прямолинейными отрезками кривой, смещенными вдоль оси потенциалов на величину кажущейся разности потенциалов реакций $\Delta\varphi_к$, представляющей собой разность потенциал в сменяемых реакций $\Delta\varphi$, уменьшенную за счет удаления от точки наблюдения реагирующей поверхности, где происходит смене реакций. С увеличением тока и при последовательной смене реакций наблюдается поляризационная кривая, состоящая из нескольких прямолинейных отрезков (по числу регистрируемых реакций) с положительными и отрицательными значениями $\Delta\varphi_к$ в зависимости от присоединения анодных или катодных реакций. Если наблюдения поляризационных кривых вести в нескольких точках, размещенных по неземному профилю или вдоль ствола скважины, то величины $\Delta\varphi_к$ закономерно меняются в зависимости от расстояния точки наблюдения до реагирующей поверхности. Это позволяет установить их положение по максимумам $\Delta\varphi_к$; знак $\Delta\varphi_к$ указывает на присоединение катодной или анодной реакции к предыдущим на каждой из реагирующих поверхностей.

Изменения $\Delta\varphi_к$ в зависимости от расстояния r между точкой наблюдения и реагирующей поверхностью приближенно описывается функцией [2]

$$\frac{\Delta\varphi_к}{\Delta\varphi} = 1 - \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + 1}}, \qquad (2)$$

где $\xi = r / a_{эф}$.

Выражением (2) удобно воспользоваться, чтобы по распределению $\Delta\varphi_к$ установить значения $\Delta\varphi$ и $a_{эф}$. Для этого нужно знать значения r каждой точки наблюдений. Зная положение реагирующей поверхности по максимумам $\Delta\varphi_к$ вдоль исследуемого профиля, величины r можно приближенно оценить, если известна глубина залегания объекта. Последнюю находят или способами, предложенными для характеристики глубин поляризованных объектов [3], или иными методами.

Функцию (2) строят в виде палетки в билогарифмическом масштабе, которую совмещают с реально наблюденными кривыми $\Delta\varphi_к - r$. После совмещения единичные линии палетки отсекают на бланке с кривыми $\Delta\varphi_к - r$ значения $\Delta\varphi$ и $a_{эф}$, используемые далее для последующих определений.

Величины $\Delta\varphi$ – разности потенциалов между первой и последующими реакциями – служат для характеристики минерального состава оруденения. Участвующие в реакции минералы можно установить, анализируя табличные разности потенциалов реакций и их соответствие фактически наблюденным. Более приемлем, однако, другой способ. Последовательности катодных и анодных реакций для основных типов руд известны. Для полиметаллических объектов катодные процессы протекают сначала на пирите, затем на халькопирите, галените и сфалерите, анодные процессы – сначала на сфалерите, далее на халькопирите, галените и пирите. Так как в полиметаллических рудах пирит всегда имеет место, то значения разности потенциалов катодных реакций всегда будут находиться между потенциалами какого-либо минерала и пирита. Алгебраически прибавляя к потенциалу реакции на пирите полученные значения $\Delta\varphi^{к}_{2\text{-}1}$ (индекс к означает – катодную реакцию, индекс 2-1 – номера сравниваемых реакций), можно получить потенциалы катодных реакций и с помощью таблиц потенциалов реакций установить минеральный состав оруденения. Сходным образом можно поступить с потенциалами анодных реакций, используя известный потенциал анодного растворения пирита. Данные по катодным и анодным реакциям служат для независимой контрольной проверки надежного определения минерального состава. Аналогично поступают, используя пирротин для медно-никелевых руд, пирит – для медно-молибденовых объектов и т.д. Можно добавить, что в каждом районе, где руды обычно одного типа и где вариации состава в основном связаны с количественными изменениями минералов в разных телах, диагностика состава по поляризационным кривым весьма упрощается. Это связано с устойчивостью значений $\Delta\varphi$ для смежных процессов, а также с сохранением постоянной последовательности реакций, сменяющих друг друга.

Высота ступеней вдоль оси силы тока при переходе поляризационной кривой от предыдущей реакции к последующей до аналогичного нового перехода получила название кажущейся предельной силы тока соответствующей реакции $I_{пр}$. Название „кажущаяся" обусловлено тем, что измеряется общая сила тока, поступающего в землю, а не того тока, который прошел через реагирующую поверхность и возбудил протекание соответствующей реакции. Кажущаяся предельная сила тока всегда больше действительной. Последнюю всегда можно рассчитать по уравнению (1).

Если воспользоваться ранее установленной связью предельной силы тока реакции с содержанием минералов и площадью реагирующей поверхности, то измеренные и найденные величины $I_{пр}$, $a_{эф}$, l (расстояние между максимумами $\Delta\varphi_к$ по обе стороны тела), φ' и $\delta\varphi$ позволяют оценить приближенное содержание каждого из минералов [2]:

$$c \approx \frac{K_{100}}{2\pi a_{эф}} \left(\frac{l I_{пр}}{r_0^2} - \frac{\delta\varphi\pi}{\rho} \right), \qquad (3)$$

а также их запасы, отнесенные к единице мощности рудного тела,

$$\frac{M}{h} = K_{100} d_р a_{эф} \left(\frac{l I_{общ\ пр}}{r_0^2} - \frac{\delta\varphi\pi}{\rho} \right), \qquad (4)$$

где K_{100} – коэффициент перехода, для катодных реакций K_{100} = 500 м²/А, для анодных в засушливых районах при pH > 5 K_{100} = 200 м²/А, в обводненных районах при pH < 5 K_{100} = 100 м²/А; d_p – объемный вес руды.

Формула (4) справедлива для линзообразных тел.

Таким образом, наблюдения БСПК, устроенные так, чтобы можно было наблюдать поляризационные кривые в разных точках вмещающих пород при прямом и обратном направлении тока для возбуждения на одних и тех же реагирующих поверхностях сначала катодных, а затем анодных реакций и наоборот, позволяют установить минеральный состав обнаруживаемых рудных объектов и оценить содержание входящих в них минералов и их запасы. Так как для каждого минерала известны доли входящих в них металлов и серы, то полученные количественные показатели для минералов можно пересчитать для названных химических элементов.

Кратко охарактеризованные основы теории метода БСПК лишь в общих чертах отражают его возможности. Особенности реальных рудных объектов и вмещающих пород вносят многочисленные дополнительные эффекты, которые оказывают влияние на результаты наблюдений и требуют специальных мер учета. Совокупность этих мер и есть практическая методика работ методом БСПК, которая в настоящее время активно разрабатывается. Сюда входит учет формы и неэквипотенциальности рудных тел, электрических неоднородностей вмещающей среды, мощности и электрического сопротивления перекрывающих рыхлых и коренных пород, наличия околорудной непромышленной вкрапленности сульфидов и ряда других факторов. Вместе с тем можно отметить, что и без строгого количественного учета воздействия перечисленных факторов, в более или менее простых случаях дистанционная оценка состава рудных объектов оказывается удовлетворительной, равно как и установление факта отсутствия оруденения.

Для полевых работ методом БСПК создана станция СПК, позволяющая одновременно вести наблюдения и методом КСПК. Наблюдения методом БСПК были проведены на одном из участков с развитыми медно-порфировыми рудами (Грузия) с содержанием меди в наиболее богатых местах до 1,2–1,6 %. Медь в форме халькопирита, сопровождаемого пиритом (примерно 3–8 %), приурочена к столбообразным участкам интенсивного окварцевания. Сульфидные минералы в прожилках и вкрапленниках сосредоточены в отмеченных столбах и рассеяны в виде вкрапленников в прилегающих к столбам участках. Удельное сопротивление руд несколько ниже сопротивления вмещающих пород за счет прожилков сульфидов, но остается достаточно высоким (единицы и десятки ом-метров). Породы имеют удельное сопротивление в несколько сотен ом-метров. Продуктивная толща и рудоносные столбы перекрыты аллювиально-делювиальными отложениями мощностью 100–140 м и более.

Наблюдения БСПК велись над одним из рудоносных столбов диаметром в плане около 150 м и уходящим на глубину более 300 м. Ориентировочные границы столба и прилегающей к нему области сульфидной вкрапленности показаны на рис.1. Результаты наблюдений поляризационных кривых при прямом и обратном направлениях поляризующего тока приведены на рис.2 и 3. В районе

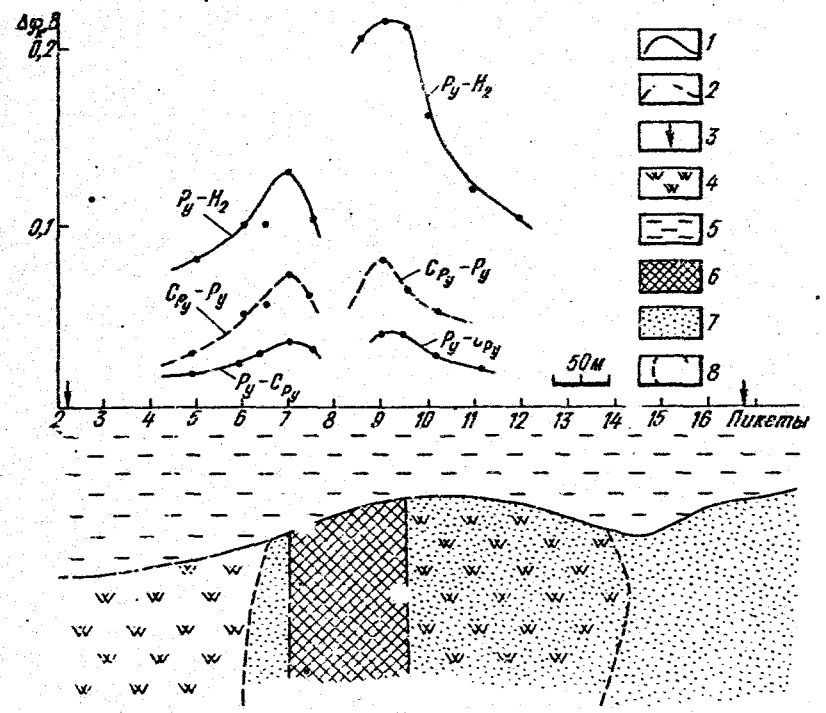


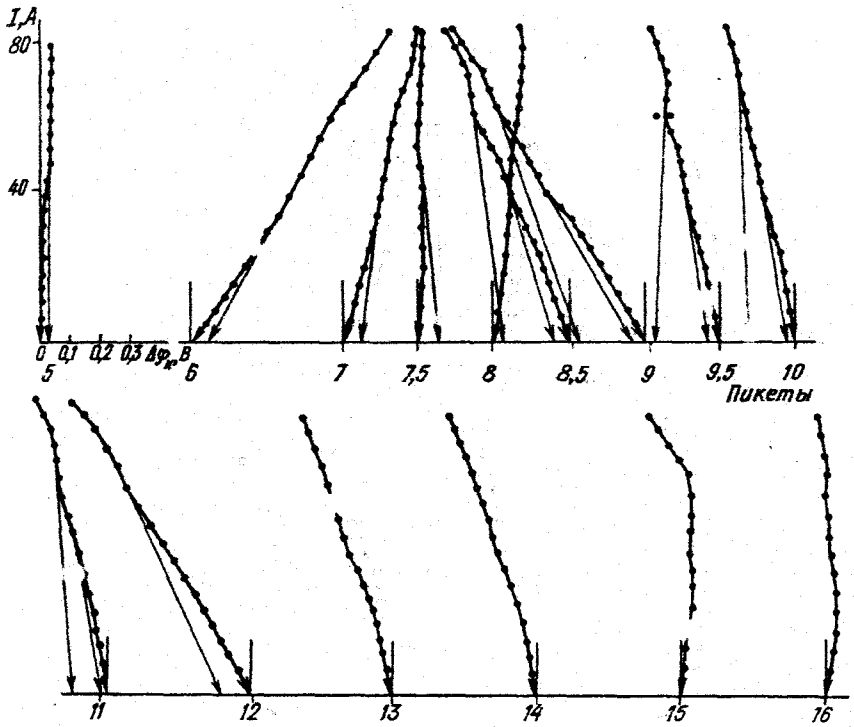
Рис.1. Распределение $\Delta\varphi_K$ по профилю над медно-порфировым оруденением (Грузия)

1 и 2 - $\Delta\varphi_K$ по катодным и анодным процессам; 3 - место питающих заземлителей; 4 - вторичные кварциты; 5 - рыхлые отложения; 6 - прожилково-вкрапленное медно-порфировое оруденение; 7 - вкрапленное оруденение; 8 - общий контур рудного тела с прожилково-вкрапленным и вкрапленным оруденением

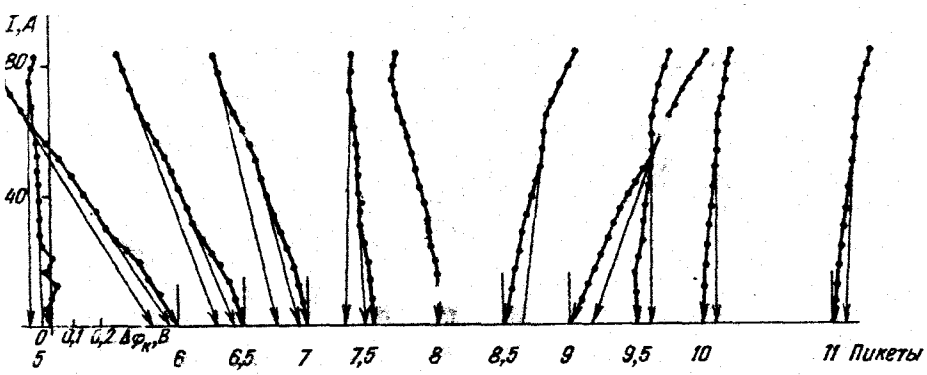
рудоносного столба вторичных кварцитов поляризационные кривые имеют многоступенчатый вид, отражающий отдельные электрохимические процессы (см. рис.2). К юго-востоку кривые приобретают "колесообразную" форму, характерную для вкрапленного оруденения и получающуюся в связи со слиянием многих мелких ступеней от отдельных вкрапленников и их скоплений.

Многоступенчатые поляризационные кривые не одинаковы по обе стороны рудного столба. Со стороны катодной области оруденения кривые имеют три прямолинейных отрезка, отражающих первую, вторую и третью катодные реакции. Со стороны анодной области регистрируются два прямолинейных отрезка, отвечающих двух анодным реакциям. При перемене направления тока отмеченные особенности поляризационных кривых сохраняются и смена котодной области на анодную приводит к регистрации вместо трех катодных двух анодных реакций и наоборот.

Важно заметить, что отсекаемые на оси потенциалов значения $\Delta\varphi_K$ соответствующих реакций различны на разном расстоянии от оруденения. Графики $\Delta\varphi_K$ для надлежащих катодных и анодных процессов удовлетворительно



ис.2. Поляризационные кривые БСПК при направлении поляризующего тока с юго-востока на северо-запад (справа налево чертежа)



ис.3. Поляризационные кривые БСПК при направлении поляризующего тока с северо-запада на юго-восток (слева направо чертежа)

оконтуривают (рис.1, границы рудного столба в плане и позволяют определить его протяжение вдоль профиля наблюдений ($\ell \simeq 125$ м).

В соответствии с описанной выше методикой были определены значения $\Delta\varphi$ сменяющих друг друга процессов и отвечающие им минералы. Оказалось, что первой катодной реакцией на той и другой сторонах рудного столба был процесс восстановления кислорода до OH^- [x], второй – катодное восстановление пирита и третьей – халькопирита. Первым анодным процессом оказалось анодное растворение халькопирита и вторым – пирита. Таким образом, проведенные наблюдения БСПК позволили установить наличие в обследуемом оруденении пирита и халькопирита.

Полученная количественная оценка содержания меди (1,38 %) и пирита (4,8 %) достаточно удовлетворительно соответствуют данным бурения.

К настоящему времени методом БСПК обследовано около 20 участков на Рудном Алтае и в Грузии. Полученные результаты указывают на возможность характеристики состава руд на глубине 100–150 м при содержании полезных компонентов от 1–2 % и выше. Вероятно, эти значения не являются предельными.

Нарождающийся метод БСПК находится в стадии становления. Он нуждается в широком опробовании в различных геологических условиях и в проверке его возможностей в производстве при разбраковке выявленных геофизических и геохимических аномалий, а также перспективных зон. Наряду с тем метод требует дальнейшей разработки применительно к разным типам полезных ископаемых и различным районам поисково-разведочных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рысс Ю.С. О величине силы тока внутри электронно-проводящих образований, находящихся во внешнем электрическом поле // Методика и техника разведки: Сб. статей / ВИТР. 19 . . № 117. С. 23–33.

2. Рысс Ю.С. Бесконтактный способ поляризационных кривых (БСПК) для разбраковки геофизических аномалий и выделения промышленных руд в перспективных рудоносных зонах // Методика и техника разведки: Сб. статей / ВИТР. 1979. № 127. С. 5–17.

3. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л.: Недра, 1974. 388 с.

[x] На рудных телах, выходящих на дневную поверхность или непосредственно под рыхлые отложения, нередко первой катодной реакцией является восстановление сорбированного кислорода, поступающего из атмосферы. Названный вопрос здесь не рассматривается.