

## УЧЕТ ФАКТОРА АНИЗОТРОПИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Рудоносные структуры, сформировавшиеся в областях интенсивного смятия с крутым залеганием горных пород, всегда рассматривались как анизотропные по электропроводности среды. Это связано с тем, что искажающее действие анизотропии проявляется достаточно ярко и фиксируется многими методами электроразведки.

Вместе с тем, обращаясь к вариантам геоэлектрических моделей рудных месторождений с относительно пологим или умеренно-крутым, а также разноменяющимся залеганием рудоносных толщ, приходится констатировать, что фактор электрической анизотропии для них учтен явно недостаточно [1, 6]. Объясняется это тем, что на подобных объектах действие анизотропии отчетливо обнаруживается лишь при интерпретации данных электрокаротажа или измерений электрических полей по скважинам, которая проводится на должном уровне редко.

### Анизотропия рудоносных сред, вычисленная для слоистой модели

Наиболее простой моделью рудовмещающей толщи является структура, состоящая из различных по электропроводности слоев. Применение такой модели оправдано из-за наличия следующих обстоятельств: гетерогенного состава смятых в пологие или крутые складки сочетаний вулканогенно-осадочных пород, ритмичной зональности рудовмещающих толщ, связанной с изменением геодинамических условий их формирования, согласной межслоевой и внутрислоевой трещиноватости, избирательного действия гидротермального метасоматоза, подчеркивающего неоднородность слоистого комплекса пород, и др. Имеется и многочисленный фактический материал, свидетельствующий о близости рудоносных массивов к слоистым структурам с чередованием геологических тел, отличающихся по электропроводности.

Автором составлена сводка данных по 46 рудным месторождениям, отражающая распределение удельного сопротивления (УС) рудоносных пород в пределах разбуренных разведочных блоков. В сводке представлены модальные значения и доли главных геоэлектрических групп пород, однородных в статистическом отношении, установленные при обработке диаграмм метода КС [5]. Например, по медноколчеданному месторождению Осеннее (Ю.Урал) данные об УС в тыс. Ом м (доля в %) выглядят следующим образом: 0,25(15), 0,58(7), 1,2(13), 3,2(28), 5(4), 10(33). Аналогичные сведения получены и по другим медноколчеданным, полиметаллическим, золото-сульфидным и железорудным месторождениям Урала и других рудных провинций (В.Казахстан, З.Узбекистан, В.Сибирь). Как показано в работе [5], разнообразный петрографический состав рудовмещающих горных пород мало сказывается на электрических свойствах, которые в основном зависят от характера и степени метаморфических преобразований.

Исходя из принятой слоистой структуры, для каждого из объектов сводки вычислены нормальное ( $\rho_n$ ), тангенциальное ( $\rho_t$ ) удельное сопротивление и коэффициент макроанизотропии ( $\lambda$ ) по формулам

$$\rho_n = \sum_{i=1}^n k_i \rho_i, \quad \rho_t^{-1} = \sum_{i=1}^n k_i \rho_i^{-1}, \quad \lambda = (\rho_n / \rho_t)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $k_i$  и  $\rho_i$  - доля и УС  $i$ -й разновидности слоев. Например, для месторождения Осеннее имеем:  $\rho_n = 4,6$ ,  $\rho_t = 1,04$  (в тыс. Ом м),  $\lambda = 2,1$ .

Соответствующие характеристики получены и для других объектов, вошедших в сводку, а в качестве результирующего документа обобщения данных вычислений построена вариационная

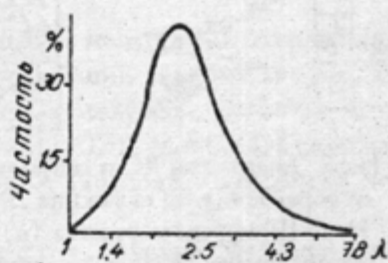


Рис.1. Вариационная кривая распределения коэффициента анизотропии удельного сопротивления горных пород, вмещающих рудные месторождения (объем выборки - 46 объектов)

кривая распределения  $\lambda$  в логарифмическом масштабе. Как видно из рис. 1, она достаточно близко соответствует логнормальному закону. Модальное значение равно 2,04, а 68% объектов выборки попадает в интервал 1,35-3,5, соответствующий двум логарифмическим стандартам.

Таким образом, подавляющее большинство рудоносных структур представляет собой макроианотропные среды, и это обстоятельство должно непременно учитываться при формировании геоэлектрических моделей рудных месторождений как при прогнозировании ожидаемых аномалий, так и при интерпретации измеренных полей. Например, из теории электроразведки известно, что на поверхности горизонтально-слоистого анизотропного полупространства эффект от горизонтального диполя (модель аномалиеобразующего локального объекта) проявляется тем слабее, чем больше  $\lambda$ , и действие анизотропии эквивалентно заглоблению объекта в однородной среде в  $\lambda$  раз.

Повышение внимания к фактору анизотропии очевидно требует и углубления представлений о том влиянии, которое оказывают типовые геологические структуры на характеристики анизотропии и какие физические модели следует использовать для учета этого влияния.

### Модель слоисто-неоднородной среды

Рассмотрим в качестве примера диаграмму КС по скважине 2036, пробуренной в пределах Шемурской колчеданосной структуры (рис. 2, а). По виду эта диаграмма достаточно типична для периферийных участков рудных месторождений и хорошо отражает существование некоторых особенностей геологической структуры.

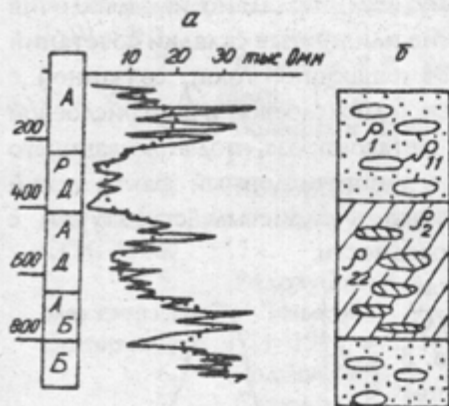


Рис. 2. Диаграмма КС и результаты ее осреднения по скважине 2036 Ново-Шемурского участка (а) и геоэлектрическая модель слоисто-неоднородной структуры (б). Горные породы: А - андезиты, РА - риодациты, АА - андезиты-дациты, АБ - андезиты-базальты, Б - базальты

Во-первых отмечается чередование слоев относительно высокого и низкого УС с мощностью в несколько десятков метров. Эта многослойность хорошо заметна на кривой сглаживания диаграммы, и связана она с обычным для вулканических построек чередованием лав различного состава и проникновением в их толщу тел субинтрузий. Кислые породы обычно более электропроводны, чем основные разности. Во-вторых, каждый из выделяемых мощных слоев неоднороден по электрическим свойствам, хотя считается относительно стабильным по петрографическому составу. Неоднородность слоев связана прежде всего с развитием трещин, по которым произошло преобразование пород, захватившее их значительный объем. Наиболее отчетливо заметно изменение физико-механических свойств, которое фиксируется по измерениям УС. В результате действия генетических и эпигенетических процессов и сформировалась слоисто-неоднородная среда.

Рассмотренный пример и весь опыт геофизической разведки рудных месторождений показывает, что более адекватной моделью рудовмещающей среды с локальными изменениями свойств слоев в результате диффузионного и инфильтрационного воздействия вулканических экзскалций является слоисто-струйчатая структура. Следы этого воздействия мож-

но отождествлять по форме с системой линзующихся жил, имеющих многократные раздувы и пережимы, а также ответвления. Именно по этим участкам преобразованных пород распространяются часто элементы-индикаторы геохимических аномалий, а при определенных условиях развиваются и руды. В результате формируются хорошо известные прожилково-вкрапленные или сетчатые текстуры рудных ореолов.

Поскольку модель слоисто-струйчатой структуры сложна для математического описания, обратимся к ее упрощенному варианту, в котором предполагается, что каждый слой насыщен макровключениями, однообразными по форме и ориентировке. При определенной степени насыщения можно получить систему включений, касающихся друг друга и образующих своеобразную сетку. Для формирования математической модели рудоносной структуры положим, что она состоит из двух разновидностей пластов 1 и 2 с соответствующими значениями УС. Кроме того, пусть в пределах каждого из слоев имеются включения эллипсоидальной формы с полуосями  $a, b, c$ , ориентированными по осям  $X, Y, Z$ , соответственно, причем все включения подобны по

форме. Обозначим УС включений двойными индексами, отражающими их принадлежность к разновидностям пластов. Один из вариантов слоисто-неоднородной структурной модели, сформированный таким образом, показан на рис.2,б.

Выражение УС вдоль оси X для двухкомпонентной среды приведено в совместной статье автора с В.Е. Петряевым, представленной в этом же выпуске. Для разновидности слоев 1 следует использовать параметр  $\mu = \rho_{11}/\rho_1$  и коэффициент  $M_{11}$ , а долю включений учитывать величиной  $V_1$ . По аналогии могут быть записаны формулы для всех составляющих УС принятой модели.

Для вычисления интегральных значений УС структуры в целом необходимо знать доли каждой разновидности слоев:  $C_1$  и  $C_2$ , причем  $C_1 + C_2 = 1$ . Тогда нормальное УС определяется формулой

$$\rho_n = \rho_z = C_1 \rho_{z1} + C_2 \rho_{z2}, \quad (2)$$

а составляющие по осям X и Y могут быть определены из уравнений

$$1/\rho_e = C_1/\rho_{e1} + C_2/\rho_{e2}, \quad (3)$$

где  $e = X, Y$ .

Коэффициенты анизотропии в общем случае учитывают трехосную неоднородность структуры и равны [3]:

$$\lambda = (\rho_z/\rho_x)^{1/2}, \lambda_y = (\rho_y/\rho_x)^{1/2}.$$

Таким образом, располагая данными об УС и геометрических параметров элементов структуры, можно вычислить интегральные характеристики УС и коэффициенты анизотропии сложной слоисто-неоднородной среды. Величины УС, а также доли V и C определяют по данным каротажа, а оценку формы включений, в соответствии с которой задаются коэффициентами M, делают исходя из типичной для изучаемого участка формы геологических тел.

В ряде случаев с целью упрощения модели структуры можно принять, что УС по осям X и Y равны и существует подобие всех включений. Для определения коэффициентов деполяризации M полуоси включений выражают в долях самой большой из них a, что дает возможность воспользоваться подробными таблицами Р.З.Муратова [2]. При определении величины  $\rho_1$  ( $\rho_2$ ) следует ориентироваться на значения того компонента, представительность которого в смеси больше. В простейшем случае полагают:  $C_1 = C_2 = V_1 = V_2 = 0,5$ , однако и в этом случае следует определиться с тем, какой из компонентов является цементом, а какой отождествляется с включениями.

Применим полученные формулы для оценки анизотропии пачки неоднородных пластов, пересеченных скважиной 2036 (см. рис.2,а), ориентируясь на простейший вариант модели. С учетом геологических данных примем для включений соотношения полуосей:  $a = b = 3c$ , что позволяет принять их коэффициенты деполяризации равными:  $M_x = M_y = 0,18$ ,  $M_z = 0,64$ . Согласно диаграмме КС имеем (в тыс Ом.м):  $\rho_1 = 12$ ,  $\rho_{11} = 2$ ,  $\rho_2 = 30$ ,  $\rho_{22} = 10$ . Проводя вычисления по формуле (2-4), в итоге получим:  $\rho_n = 12,4$ ,  $\rho_t = 6,9$ ,  $\lambda = 1,34$ .

Положим теперь, что в рассматриваемом примере в пластах с относительно повышенной электропроводностью (разновидность 1) включения представляют реликты неизменных пород, а преобразованные участки с низкими значениями УС образуют сетчатую структуру, т.е. являются связующим материалом. Тогда, принимая в тыс Ом.м  $\rho_1 = 2$ , а  $\rho_{11} = 12$ , получим несколько иные характеристики структуры:  $\rho_n = 11,6$ ,  $\rho_t = 2,24$  и  $\lambda = 2,27$ .

Как видим, изменение представления о роли элементов даже для одной разновидности пластов сильно повлияло на величины продольного УС и коэффициент анизотропии. В данном случае принятие второго варианта модели маловероятно, но на этом примере наглядно проявляется важность располагать точными сведениями о структуре пластов с включениями при оценке электрических свойств неоднородной среды. Необходимую информацию для этого может дать введение в комплекс исследований скважин измерений с потенциал-зондами большой длины (4-8 м).

Продолжим вычисления и будем теперь опираться на модель слоистой структуры, состоящей из четырех разновидностей однородных и равнопредставленных пластов. Применяя формулы (1), получим:  $\rho_n = 13,5$  и  $\rho_t = 5,7$ , а  $\lambda = 1,54$ . Данные характеристики занимают промежуточное положение между ранее вычисленными значениями электрических свойств структуры для двух вариантов неоднородно-слоистой среды. Очевидно, что к применению слоистой модели следует прибегать в тех случаях, когда представления о строении изучаемого блока пород ограничены, так как ошибки в оценке параметров среды в этом случае будут сравнительно небольшими. Однако

в этом случае есть смысл произвести вычисления для слоисто-неоднородных моделей, чтобы получить некоторые предельные величины.

Для рассматриваемой скважины имелась возможность определить интегральные характеристики электрических свойств среды путем обработки и интерпретации графиков относительного потенциала, измеренных для нескольких положений точечного источника на дневной поверхности. Полученная с применением способа деформации анизотропного полупространства величина  $\lambda = 1,42$  позволяет считать, что по структуре среда близка к слоистой, но анизотропия для нее несколько ниже, чем вытекает из представления о плоско-параллельном залегании слоев. Напомним, что для такой модели  $\lambda = 1,54$ . Вероятно, слои имеют сужения, а местами и пережимы, и пропластки с повышенной электропроводностью могут рассматриваться как частично сообщающиеся включения. Такая структура преобразования горных пород не характерна для ближних флангов месторождения, и поэтому можно заключить, что исследуемая скважина расположена достаточно далеко от мест интенсивного минералообразования руд. Действительно, расстояние от этой скважины до Ново-Шемурского месторождения более 1 км.

Обратимся к рис.3, на котором представлен геоэлектрический разрез Ново-Шемурского месторождения, построенный по данным электрокаротажа. На его примере хорошо видно, насколько неоднородной по электрическим свойствам является рудовмещающая структура. Для нее характерны и слоистость пород, и насыщенность ориентированными включениями практи-

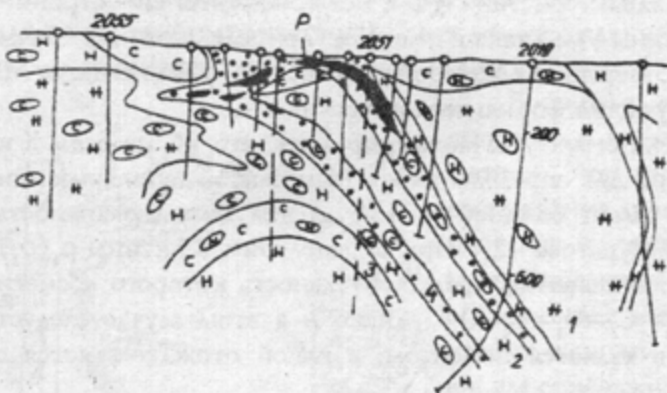


Рис.3. Геоэлектрический разрез по разведочному профилю 92 Ново-Шемурского медноколчеданного месторождения, построенный по данным электрокаротажа.

Геоэлектрические группы пород с удельным сопротивлением в тыс Ом.м: 1 - 90; 2 - 26; 3 - 8; 4 - 2,8

чески всего массива, поэтому неудивительно, что рудовмещающий комплекс пород отличается высокой степенью анизотропии. Например, для скважины 2035, непосредственно пересекающей рудоносную толщу ниже уровня рудных тел по падению (на рис.3 ей соответствует скважина 2019), по данным обработки диаграмм КС получены следующие значения  $\lambda$ . Для слоистой модели  $\lambda = 2,9$ , для модели слоисто-неоднородной среды с изолированными низкоомными включениями  $\lambda = 2,7$ , а в варианте с низкоомным связующим материалом  $\lambda = 3,2$ .

Подобные определения коэффициента анизотропии выполнены по серии скважин в окрестностях рассматриваемого месторождения. Наиболее отчетливо отмечено нарастание этого параметра с приближением к оруденению в пределах толщи, условно относимой к продуктивной (андезито-дацитовые вулканиты, включающие субинтрузии липарито-дацитов и ореолы минерализации). Очевидно, что определения параметра анизотропии по материалам каротажа могут дать ценную информацию об интенсивности процессов преобразования горных пород, в том числе и гидротермальными растворами, позволяющую более надежно локализовать центры рудообразования. Целесообразно также разрабатывать и применять методики оценки степени анизотропии с помощью скважинной электроразведки.

### Влияние анизотропии на данные электроразведки

Учет фактора анизотропии необходим при решениях прямой и обратной задачи для наземной электроразведки. Рассмотрим для примера результаты расчета аномалий в методе срединного градиента при решении прямой поисковой задачи, когда локальный объект типа рудной залежи расположен в анизотропной наклонно-слоистой среде. В вычислениях будем опираться на простое решение для шара, позволяющее достаточно точно учесть влияние дневной поверхности [4]. Исходные условия предполагают, что заданы параметры установки и вмещаю-

шей анизотропной среды, а также тело в форме сфероида. Применим способ деформации анизотропной среды, при реализации которого все элементы геологической структуры растягиваются вкост простирания в  $\lambda$  раз, и в преобразованном полупространстве эффект анизотропии пропадает. При этом изменяются размеры и форма установки и неоднородностей. Естественно, что исходный сфероид должен быть анизотропным и отношение его полуосей соответствует величине  $\lambda$ . После вычисления характеристик поля для изотропной структуры они переносятся в соответствующие точки исходной анизотропной среды. Полученные таким путем графики КС и кажущейся поляризуемости являются наглядным примером влияния анизотропии (рис.4).

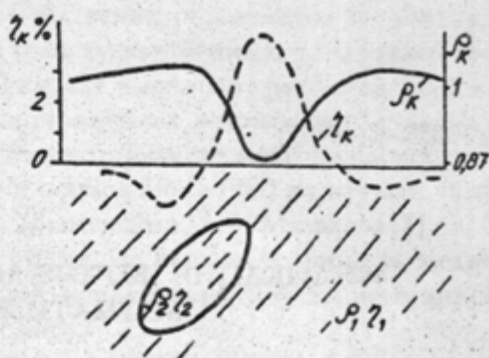


Рис.4. Графики кажущихся удельного сопротивления и поляризуемости метода срединного градиента, рассчитанные над сжатым сфероидом, погруженным в наклонно-слоистую анизотропную среду. Параметры среды и тела:  $\rho_1=1$ ,  $\eta_1=0$ ,  $\rho_2=0,1$ ,  $\eta_2=50\%$

Известно, что в изотропной среде экстремальные значения аномалий этих параметров соответствуют приподнятой части объекта и располагаются между проекциями на профиль наблюдений центра и верхней кромки тела. Кроме того, в сторону падения залежи аномалии затухают медленнее, чем в сторону восстания. В анизотропной же среде отмечается смещение экстремумов по восстанию пород, и может оказаться (как это и произошло для моделируемых условий), что наибольшей интенсивности аномалии достигают за пределами проекции тела. Графики исследуемых параметров принимают вид, по которому можно сделать ошибочный вывод о направлении падения объекта.

#### Выводы

Таким образом, анизотропия электропроводности характерна для всех рудовмещающих структур и для подавляющего числа изученных этих объектов коэффициент анизотропии находится в пределах 1,35-3,5. Высокая степень анизотропии горных пород, окружающих рудные залежи, является важным поисковым признаком, и поэтому требуется изучать распределение этого параметра в пространстве и использовать его наряду с другими характеристиками, отражающими интенсивность проявления рудообразующих процессов. При этом могут быть использованы как упрощенная модель слоистой структуры, так и предложенная в работе более приближенная к реальности модель слоисто-неоднородной среды, учитывающей наличие в каждом слое системы включений.

Приведенный и многие другие примеры решения прямой задачи электроразведки убедительно свидетельствуют о необходимости обстоятельного рассмотрения типовых аномалий в различных методах для условий анизотропной вмещающей среды и разработке на этой основе рекомендаций по интерпретации возмущающих полей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геофизические методы разведки рудных месторождений/В.В. Бродовой, В.Д. Борцов, А.Е. Подгорная и др.-М.: Недра, 1990. - 296 с.
2. Муратов Р.З. Потенциалы эллипсоида.-М.: Атомиздат, 1978. - 144 с.
3. Редозубов А.А. Об электрическом сопротивлении пород, вмещающих колчеданные месторождения Урала//Методика поисков и разведки глубокозалегающих рудных месторождений: Сб. ст. Вып. 128.-Свердловск: Изд.СГИ, 1975. - С.53-61.
4. Саложников В.М. Интерпретационные модели аномалий, создаваемых неглубокопогруженными телами простой формы, при квазиоднородном электрическом возбуждающем поле//Тезисы Российской конференции "Теория и практика интерпретации данных электромагнитных геофизических полей".-Екатеринбург: Изд. Ин-та геофизики УрО РАН, 1996. - С. 27-28.
5. Саложников В.М. Использование диаграмм каротажа для петрофизического картирования рудовмещающих горных пород//Методика поисков и разведки глубокозалегающих рудных месторождений: Межвуз. науч. темат. сб.-Свердловск: Изд. УПИ, 1977. - С. 11-19.

УДК.550.43(470.5)

А.В.Кузин

## ИНДИКАЦИЯ ВЕРХНЕ-ЛОБВИНСКОГО ЦЕНТРА АНДЕЗИТОВОГО МАГМАТИЗМА В ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

В преддверии геологического доизучения площадей рудных районов Среднего Урала в масштабе 1:200000 (ГДП-200) автор хотел бы привлечь внимание коллег-исследователей к

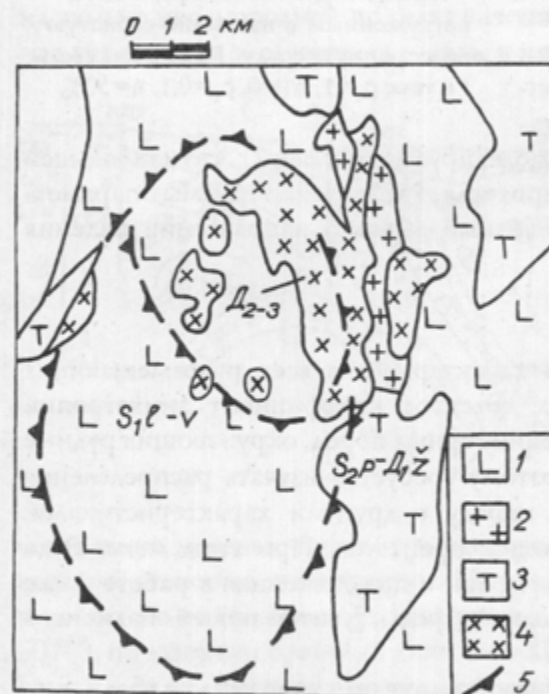


Рис. 1. Схема геологического строения Верхне-Лобвинского участка (по материалам Н.С.Лисова, 1978):

- 1- вулканы базальт-риолитовой формации, 2- В.Лобвинский плагиогранитовый массив, 3- вулканы трахиандезитовой формации, 4- диориты, 5- большой эллипс - контур положительной аномалии силы тяжести; малый эллипс - контур наиболее возвышенного и расчлененного рельефа дневной поверхности

Тагильской горно-складчатой системы. В ландовери-венлокское время, при функционировании вулканических аппаратов трещинного и центрального типов, сформировались толщи лаво-пирокластических пород базальт-риолитовой колчеданоносной формации [2]. Плутонические породы представлены Верхне-Лобвинским интрузивом плагиогранитов размером в плане 7 x 1 км (рис.1). В пржидолий-жединское время породы колчеданоносной формации были перекрыты вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями трахиандезитовой формации. В средне-позднедевонское время толщи базальт-риолитовой и трахиандезитовой формаций были прорваны мелкими интрузивами диоритов. Самый крупный из них носит название Верхне-

возможностям использования физических полей для выделения вулканоплутонических ассоциаций. Инструкция по проведению геологического картирования... [1] не включает составление палеовулканологических схем в разряд обязательной отчетной информации. Автору представляется, что на Урале, где подавляющее большинство рудных месторождений контролируется распространением вулканогенных формаций, выделение рудоконтролирующих вулканоплутонических центров (ВПЦ), вулканоплутонических ассоциаций (ВПА) должно выступить одним из главных методических приемов при составлении раздела отчета «Закономерности размещения полезных ископаемых и оценка перспектив района» [3]. Именно выяснение связи рудных месторождений с ВПА, ВПЦ позволит использовать такие мощные принципы исследований, как принцип аналогии и принцип актуализма. Они требуют и дают исследователю (и исследованию) столь необходимую широту и глубину взгляда на решаемую проблему.

На примере анализа геолого-геофизической информации на Верхне-Лобвинском участке рассмотрим существенное различие оценки перспектив участка в случае использования палеовулканологических критериев прогнозирования и без них.

Участок располагается на Северном Урале, в 35 км к югу от г. Краснотурьинска, занимает площадь топопланшета О-41-13-В. Кратко опишем геологическое строение участка. Геологические структуры и комплексы пород участка формировались в процессе эволюции базальтоидного магматизма северной части