

УДК 550.837.31 : 681.306

*Н. Г. Шкабарня, В. С. Москвичев, Б. Л. Столов***ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ПОИСКАХ РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ПРИМОРЬЕ**

Анализируются условия локализации месторождений олова, вольфрама, полиметаллов в Приморье и получаемые кривые электрических зондирований. Показано, что важнейшим фактором повышения эффективности электрических зондирований является создание методики интерпретации кривых ВЭЗ-ВП на основе ма-

В Приморье в комплексе геофизических работ широко используется метод ВЭЗ-ВП, который применяется при поисках месторождений олова касситерит-силикатной и касситерит-сульфидной формаций, вольфрамовых и полиметаллических месторождений скарнового, жильного и прожилково-вкрапленного типов. Поиски ведутся на глубинах от десятков — сотен метров до 1000 м.

Характерной особенностью локализации оловянных и вольфрамовых месторождений является их связь с гранитоидными массивами. Некоторыми исследователями отмечается определенная роль региональных метасоматитов (биотититов) в размещении оловянной минерализации: как правило, промышленное оруденение располагается над кровлей биотититов.

Промышленные полиметаллические и олово-полиметаллические месторождения разделяются на три группы, залегающие соответственно в карбонатных, терригенных и вулканогенных породах. Для всех месторождений характерна приуроченность к краевым частям вулканотектонических структур и пересечению разнонаправленных разломов. Некоторые из них залегают на границе вулканогенных (или терригенных) карбонатных пород.

Большинство промышленных оловянных месторождений, особенно в Кавалеровском рудном районе, локализуются в так называемых «рудных воронках», представляющих собой среду с пониженным сопротивлением и повышенной поляризуемостью. Подстилающие их биотититы, кровля которых соответствует нижней границе оруденения, характеризуются высокими сопротивлениями. Скарновые полиметаллические месторождения также залегают на границе сред с различными физическими свойствами: сопротивления карбонатных пород на 1—2 порядка выше, чем вулканических пород

тематического моделирования электрических полей в горизонтально-неоднородных средах. Приведен пример интерпретации данных ВЭЗ-ВП с использованием аппарата математического моделирования на участке полиметаллического рудопроявления.

кислого состава. Жильные полиметаллические месторождения, как правило, также приурочены к зонам проводимости и повышенной поляризуемости, обусловленным тектонически нарушенной средой с полисульфидной минерализацией.

Применение метода ВЭЗ-ВП в больших объемах объясняется принципиальной возможностью получения количественных характеристик объекта на основе комплексного анализа результатов наблюдений по параметрам кажущегося сопротивления и поляризуемости. Наиболее распространенная в практике симметричная установка не является оптимальной по разрешающей способности. Поэтому в условиях сложного геологического строения на перспективных площадях используются трудоемкие комбинированные либо трехэлектродные установки. Кроме того, в ряде случаев применяются установки Веннера и дипольные осевые установки ($AB = BM = MN$), комбинация которых позволяет выявлять сигналы от геоэлектрических неоднородностей определенного типа. Для изучения глубин порядка 300—400 м используются разносы АО до 2 км, а при изучении разреза в интервале 500—100 м — АО до 3—4 км. Измерения осуществляются станциями ВПС-63, ДИАПИР. В условиях интенсивных промышленных помех наблюдения ведутся аппаратурой переменного тока (ВПФ, ЭВП-203). Сеть расположения точек зондирования колеблется от 1000×500 м до 500×200 м.

Рудные зоны ряда месторождений и рудопроявлений, например, в Кавалеровском и Дальнегорском районах (Хрустальное, Арсеньевское, Садовое), уверенно выделяются аномальными областями кажущихся сопротивлений и поляризуемостей в поле измеренных значений. Продуктивные толщи с рудными тела-

ми характеризуются низкими сопротивлениями (от 200 до 25 Ом · м и ниже) и высокой поляризуемостью (7—15 % и более) при высоких сопротивлениях (300—1000 Ом · м) и низкой поляризуемости (1—3 %) вмещающей среды. Иногда рудные зоны непосредственно не выделяются, но аномальные области фиксируют ореолы сульфидной минерализации, сопровождающие рудные тела. Кроме того, по результатам интерпретации полевых материалов есть возможность выявления и других благоприятных для локализации оруденения признаков, а именно: границ известняков и вулканитов, известняков и терригенных осадочных пород, кровли интрузивов, биотитизированных пород, зон рудоконтролирующих тектонических нарушений.

Однако такая благоприятная структура и петрофизическая ситуация не всегда приводят к положительным геологическим результатам. Перспективы значительной части «рудных» аномалий бурением не подтверждаются. Проведенный анализ неподтверждений позволяет установить, что либо элементы залегания вскрытого объекта существенно отличаются от расчетных, либо не подтверждается даже наличие предполагаемого физического объекта.

Это объясняется как многозначностью геологической природы аномалий, так и отсутствием надежных способов количественной интерпретации полевых данных в сложно построенных районах при резко пересеченном рельефе местности. Не отрицая необходимости комплексирования различных геофизических и геохимических методов с бурением и разработки соответствующих комплексных поисковых критериев, мы считаем, что одним из важнейших факторов повышения эффективности геофизических работ является создание методики интерпретации кривых ВЭЗ-ВП на основе математического моделирования электрических полей в горизонтально-неоднородных средах и ее внедрение в практику геофизических работ.

Решение этой задачи можно представить в виде следующих этапов:

- создание физико-математических моделей (ФММ) горизонтально-неоднородных сред;
- разработка соответствующего программно-математического обеспечения прямых задач;
- анализ теоретических кривых зондирований и разработка различных способов интерпретации практических данных;
- объединение приемов и способов интерпретации в рамках единой методики.

В настоящее время в объединении Приморгеология ведутся исследования по каждому из этапов. В данной статье рассматриваются вопросы применения математического моделирования электрических полей при интерпретации полевых материалов.

Анализ геологического строения рудных районов Приморья и результатов работ методом ВЭЗ-ВП показывает, что типовые геоэлектрические разрезы и измеряемые электрические поля характеризуются следующими особенностями.

Разрезы имеют два ярко выраженных структурных горизонта, в пределах которых геологическая среда обладает различной степенью и характером дифференцированности пород по сопротивлению. Верхний горизонт имеет субвертикально-блоковое строение (дайки, субвулканические тела, зоны дробления); нижний представляет собой горизонтальную или наклонную опорную геоэлектрическую границу высокого сопротивления (биотитизированные или карбонатные породы, кровля интрузивов). Кривые электротондирования изрезанные, высокоградиентные, с изломами и аномальными расхождениями на перекрытиях приемных линий.

Для интерпретации данных ВЭЗ-ВП, полученных в этих условиях, необходимо сформировать такое множество физико-математических моделей геоэлектрических сред, которое позволяло бы при их минимальном количестве и размерности аппроксимировать реальные разрезы рудных районов с точностью, достаточной для решения геологических задач. На основании этого в ПГО Приморгеология созданы алгоритмы и программы решения прямых задач для следующих ФММ среды:

- с вертикальными границами раздела;
- с наклонными границами раздела;
- с клиновидными неоднородностями;
- с локальным сферическим объектом на глубине.

Следует отметить, что степень идеализации реальных разрезов при этом будет весьма велика, но необходимо понимать, что данные модели являются в некотором роде опорным начальным приближением и представляют собой шаг вперед по сравнению с существующей ситуацией, когда вся интерпретация ВЭЗ-ВП основана только на модели горизонтально-слоистой среды.

Математическое моделирование структуры поля предполагает определение разности потенциалов (ΔU) с последующим расчетом ρ_k и η_k при различном расположении источников и приемников на поверхности наблюдений относительно геологических объектов. Кажущиеся сопротивления и поляризуемости вычисляются по известным формулам:

$$\rho_k = k \frac{\Delta U}{J}, \quad \eta_k = \frac{\rho_k^* - \rho_k}{\rho_k^*},$$

где k — коэффициент установки, J — сила тока в источнике, ρ_k и ρ_k^* — кажущиеся сопротивления, соответствующие первичному и поляри-

зующему полям. Значения ρ_k^* рассчитываются по первой формуле путем замены удельных сопротивлений (ρ_i) объектов среды на эффективные удельные сопротивления:

$$\rho_i^* = \frac{\rho_i}{1 - \eta_i}$$

где η_i — поляризуемость объектов. При расчетах предполагается совпадение границ, на которых наблюдается скачок сопротивления и поляризуемости. Полученные таким образом значения кажущейся поляризуемости отвечают процессам вызванной поляризации, обусловленным объемно-поляризованными объектами, и соответствуют измеренным значениям η_k для временных задержек $\Delta t \rightarrow 0$. При условии получения в конкретном районе обоснованного закона спада не составляет труда вычислять η_k на любой временной задержке.

При разработке программного обеспечения [1] потребовалось конкретизировать расположение источников и приемников, ограничиться конкретным числом параметров модели с учетом возможностей современных ЭВМ и создать удобства для анализа результатов счета. Так, в созданном пакете программ вычисления параметров ρ_k и η_k производится для применяемых в производстве трех- и четырехэлектродных установок Шлюмберже с конкретными длинами питающих (АО) и приемных (МН) линий и перекрытиями с одной длины приемной линии на другую. Необходимость моделирования полей с непердельными установками обусловлена тем, что при переходе электродов через контакт двух сред кажущиеся сопротивление и поляризуемость резко изменяются. Моделирование полей для реальных установок позволяет приблизить теоретические кривые к экспериментальным в процессе их интерпретации методом подбора.

Кроме целей интерпретации, оперативный расчет и построение теоретических кривых зондирования используются при проектировании оптимальной методики полевых работ для выбора необходимого типа установки и ее размеров, шага наблюдения, определения разрешающей способности установки по отношению к поисковому объекту, для оценки влияния простых форм рельефа местности и поверхностных неоднородностей.

В настоящее время пока еще невозможно обобщить опыт использования математического моделирования по всем названным направлениям. Поэтому рассмотрим только пример интерпретации данных ВЭЗ-ВП с использованием аппарата математического моделирования на участке полиметаллического рудопроявления Августовского. Последнее расположено вблизи известного Смирновского оловянно-полиметаллического месторождения. Участок характери-

зуется сложным геоэлектрическим разрезом, составленным из блоков горизонтально-неоднородных сред, и резко пересеченным рельефом местности. Наиболее благоприятными для локализации оруденения в этом районе считаются зоны Дождевого и Арсенипиритового разломов, в пределах которых за рамками изучаемого участка размещены рудные тела Смирновского, Встречного, Южного и Верхне-Уссурского месторождений. Зоны фиксируются понижением удельного электрического сопротивления до 200—300 Ом·м на фоне 1000—3000 Ом·м. К ним приурочены аномальные значения поляризуемости и геохимические аномалии.

Визуальный анализ кривых ВЭЗ-ВП и качественных разрезов дает основание считать, что в изучаемой среде присутствуют крутопадающие границы или зоны, возможно также наличие локальных объектов. Учитывая сложное строение участка и пересеченный рельеф местности, качественные построения нельзя считать достаточными для геологических выводов. По-

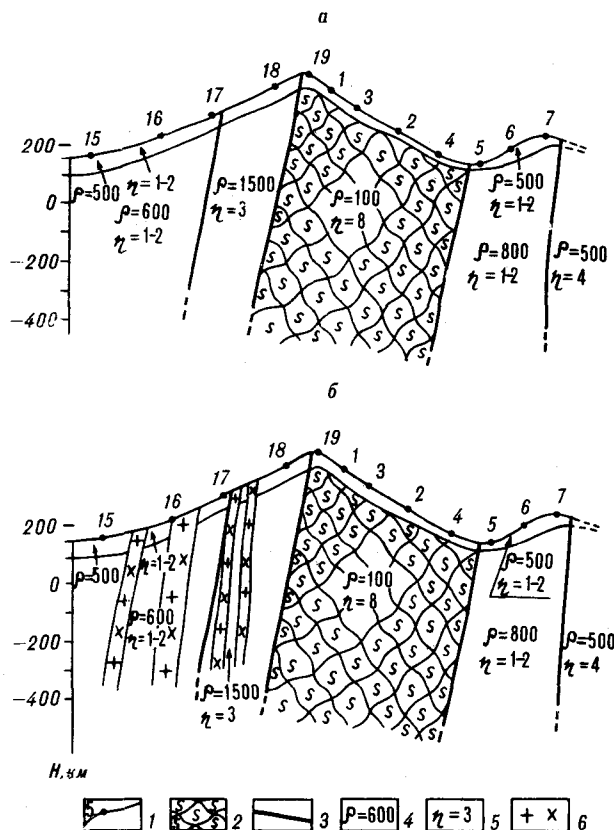


Рис. 1. Физико-математическая модель геоэлектрического разреза, полученная в результате моделирования полей ρ_k и η_k (а), и геолого-геофизический разрез (б) по интерпретационному профилю на участке Августовский.

1 — точки ВЭЗ-ВП; 2 — блок трещиноватых метасоматически измененных и сульфидизированных пород; 3 — границы блоков различного удельного сопротивления и поляризуемости; 4 — значения удельных сопротивлений, Ом·м; 5 — значения поляризуемости в процентах; 6 — интрузии гранодиоритов, дайки.

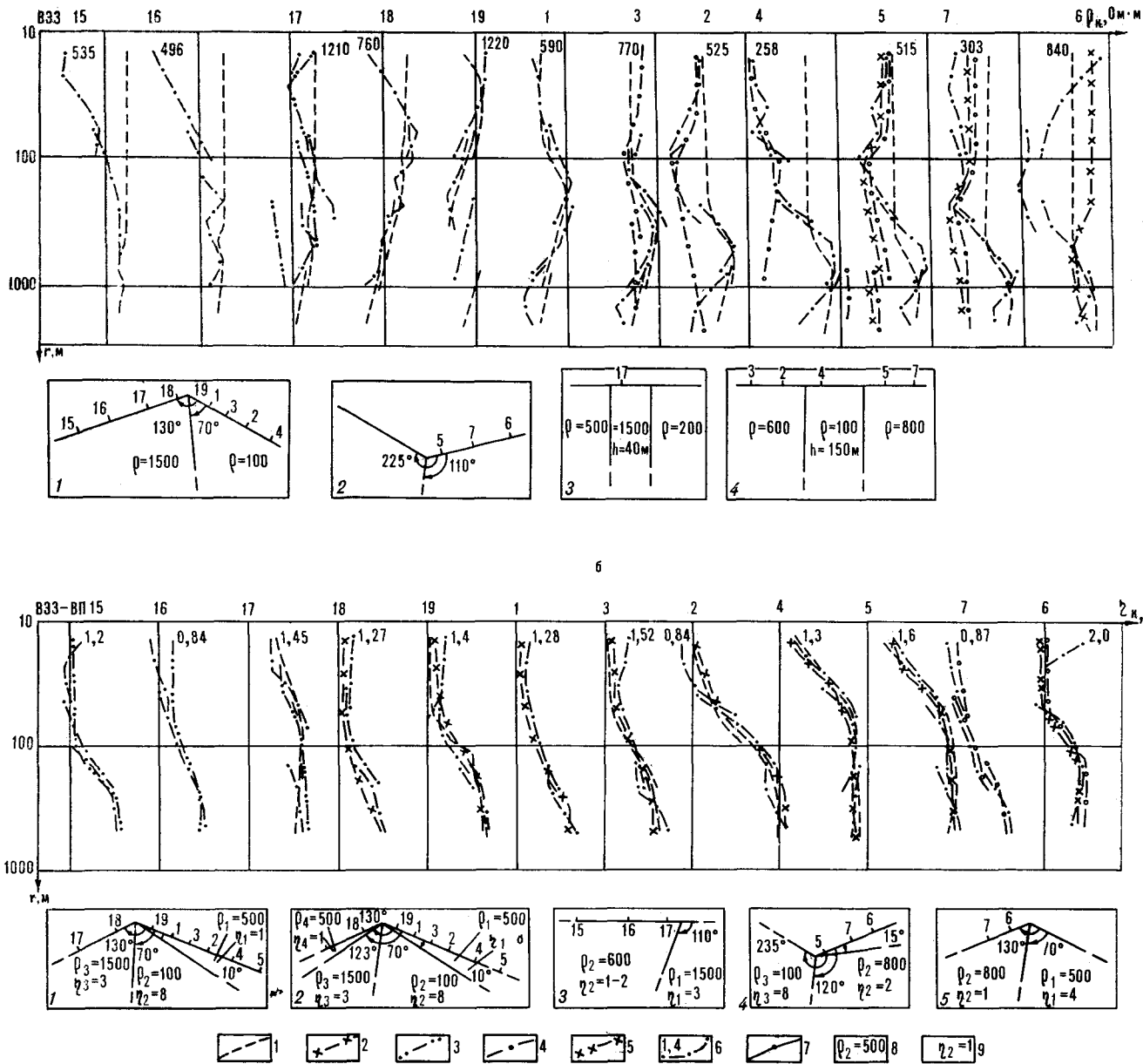


Рис. 2. Результаты интерпретации кривых ρ_a (а) и кривых η_a (б) на основе математического моделирования электрических полей для отдельных блоков горизонтально-неоднородных сред. 1—5 — кривые электрозондирования ρ_a и η_a соответственно для типов моделей 1—5 по порядку; 6 — полевые кривые ВЭЗ-ВП с начальными значениями ρ_a и η_a ; 7 — положение точек ВЭЗ-ВП на поверхности моделей горизонтально-неоднородных сред; 8 — значения удельных сопротивлений, Ом·м; 9 — значения поляризуемости, %.

этому сначала с помощью математического моделирования было оценено влияние рельефа местности. Рассчитанные теоретические кривые для модели хребта с бесконечными склонами [2] дали возможность определить искажающее действие рельефа в процентах и внести в исходные кривые соответствующие поправки. Так, например, для интерпретационного профиля (рис. 1) аномальные участки кривых 1—3, 17, 18, 19 во многом определяются рельефом; для отдельных точек искажения $\delta\rho_a$ достигают

40%. Кривые 4—7, 15, 16 после введения поправок существенно не изменились.

Предварительная интерпретация исправленных кривых ВЭЗ-ВП с оценкой параметров объектов показывает, что изучаемый разрез невозможно аппроксимировать одной из нескольких горизонтально-неоднородных моделей. В связи с этим его необходимо расчленять на отдельные фрагменты — блоки, в пределах которых электрическое поле формируется под доминирующим влиянием определенного типа геологических

трической среды. Для рассматриваемого профиля такими типами являются «хребет» и «долина» с бесконечными склонами и контактом, выходящим на поверхность по линии ребра (рис. 2, а, б).

Теоретические кривые ρ_k для модели 1 (см. рис. 2, а) удовлетворительно совпадают с практическими в точках ВЭЗ 18, 19, 1, 3. Кривые в точках ВЭЗ 2, 4, 5, 7, по-видимому, отражают совместное влияние моделей 1, 2 и дополнительно модели 4. Кривая ВЭЗ 17 сформирована под влиянием моделей 1 и 3. Мощность «наносов», перекрывающих нижележащие комплексы сложно построенных сред, определяется известными приемами, применяющимися в слоистых средах. Таким образом, геоэлектрический разрез профиля по параметру удельного сопротивления, если не считать маломощных «наносов», характеризуется наличием довольно протяженных на глубину (более 500 м) крутонадающих границ.

Полученный геоэлектрический разрез положен в основу интерпретации кривых η_k с целью определения поляризуемостей крутонадающих блоков. В качестве фрагментов физико-математической модели использовалась клиновидная среда с «наносами» и разломом (см. рис. 2, б, модели 1, 2, 4) и клиновидные среды с разломом (см. рис. 2, б, модели 3, 5). Поскольку поляризуемость является основным фактором наличия сульфидной минерализации, то поиск удовлетворительной модели среды в процессе подбора производился более тщательно. Это заметно по совпадению кривых ВЭЗ-ВП на рис. 2, б. Теоретические кривые η_k для моделей 1, 2 удовлетворительно совпадают с прак-

тическими в точках зондирования 1, 2 — 4, 19, 18. Модели 1 и 2 отличаются друг от друга только «наносами» на левом склоне «хребта» при идентичности других параметров среды, поэтому кривые отличаются друг от друга только на начальных разностях. Судя по совпадению практических кривых ВЭЗ-ВП 15—17 с теоретическими, модель 3, по всей вероятности, наилучшим образом аппроксимирует левую часть изучаемого разреза. Кривые ВЭЗ-ВП 5—7 удовлетворительно совпадают с теоретическими для моделей 4, 5.

В результате интерпретации в интерактивном режиме на основе совпадения практических кривых η_k с теоретическими уточнены детали строения разреза и физические свойства блоков, что отражено на физико-математической модели среды (см. рис. 1, а). После наполнения этой модели геологическим содержанием построен геолого-геофизический разрез (см. рис. 1, б).

Для детализации положения области аномальной поляризуемости в пространстве и особенно определения ее подошвы рекомендуется провести дополнительные работы методом ВЭЗ-ВП комбинированной установкой по профилям, расположенным вдоль простирания пород параллельно линии контактов в пределах блока трещиноватых метасоматически измененных сульфидизированных пород, вмещающих рудные зоны. Такая методика работ обоснована анализом результатов моделирования кривых ВЭЗ-ВП для сред с вертикальными границами и позволит с большей точностью определить количественные физические и геометрические параметры поисковых объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шкабарня Н. Г. Автоматизированная интерпретация кривых ВЭЗ и ВЭЗ-ВП в рудных районах // Разведка и охрана недр.— 1986.— № 11.— С. 40—45.
2. Шкабарня Н. Г., Севостьяненко В. П. Алгоритм расчета кажущихся сопротивлений и поляризуемо-

стей для среды с наклонными границами раздела (клиновидная среда) // Проблемы автоматизации геофизических исследований.— Владивосток, 1985.— С. 152—160.