

очередь позволило придать более конкретный смысл введенным ранее акад. Д.С. Коржинским понятиям “активные” и “инертные” компоненты.

Изменившаяся экономическая ситуация в стране, к сожалению, резко сократила возможность дальнейших исследований, которые велись в тесном содружестве с производственными организациями. Многие теоретические достижения пока не востребованы практикой. Это касается, прежде всего, кварцевой промышленности. Сегодня Россия, например, закупает в год несколько тысяч тонн особо чистого кварца у фирмы “Юниленд” (США), что обходится стране в сумму около 200 млн дол. Подобный вид первичного сырья для последующего обогащения, по нашим данным, можно получать на Урале из гранитоидных образований в гнейсово-мигматитовых комплексах, где полицикличность метаморфических процессов обусловила многократную сегрегацию минеральных образований.

Метаморфогенное пороодо- и рудообразование, наряду с магматогенным петрогенезом и литогенезом, получило, таким образом, достойное освещение в науке. На наших глазах менялись представления об этом эндогенном процессе, заложенные в начале XX века его основателем П.Эсколя. Общими усилиями Московской, Санкт-Петербургской, Сибирской и Уральской школ это учение в СССР и России во второй половине XX века занимало передовые позиции в мировой науке. В сборнике “Геология метаморфических комплексов” отражены достижения всех упомянутых школ, а также ученых из нынешних стран СНГ.

В заключение следует упомянуть, что Уральская школа метаморфизма, основанная в 1968 году Г.А. Кейльманом, достойно представлена учеными Уральской государственной горно-геологической академии, где и создавалась “энциклопедия метаморфизма”.

## РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДИКИ

### ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД

*Профессор РЕДОЗУБОВ А.А.*

Многие горные породы обладают анизотропией электрических свойств. Характер и степень анизотропии отражают структуру породы, результаты воздействия на нее процессов метаморфизма, наличие и распределение рудных включений, трещиноватость и другие особенности. Поэтому изучение анизотропии горных пород может дать информацию, существенно дополняющую данные других исследований. В УГГГА исследования по этой проблеме были начаты в 50-е годы по инициативе и под руководством Г.П. Саковцева. Затем руководство этой тематикой перешло к автору настоящей статьи. За почти полвека коллективом, работавшим над этой проблемой, выполнен большой объем исследований, значительная часть которых не имеет аналогов. Однако результаты их разбросаны по многочисленным статьям, опубликованным

подчас в не очень известных и доступных изданиях. Желание помочь будущим исследователям, заинтересующимся проблемой, и побудило автора подготовить данную статью, описав в ней полученные результаты и приведя библиографию источников, в которых опубликованы основные материалы по теме.

Работы проводились по трем основным направлениям: картирование анизотропных образований, объемное изучение анизотропии пород, изучение анизотропии поляризуемости. По этим разделам и будут рассмотрены результаты исследований.

### Картирование анизотропных пород

На возможность картирования анизотропных пород способом прослеживания линии равного потенциала вокруг точечного источника тока указывал еще К. Шлюмберже [23]. Он приводит пример определения положения контакта между изотропными песчаниками и анизотропной слоистой пачкой по изолиниям потенциала, прослеженным вокруг точечного заземления при трех положениях последнего. С.М. Шейнманн в своей фундаментальной работе по основам электроразведки анизотропных сред [22] рассматривает другой способ, в котором вместо прослеживания изолинии потенциала выполняется круговое профилирование, т.е. в каждой точке наблюдений производятся измерения кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ) при нескольких ориентировках установки. Построенная по этим данным полярная диаграмма  $\rho_k$  имеет, как и изолиния потенциала, форму эллипса, большая ось которого ориентирована по направлению простиранья анизотропных пород, а отношение осей характеризует величину коэффициента анизотропии  $\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_t}$ , где  $\rho_n$  и  $\rho_t$  - поперечное и продольное сопротивления среды. Полученная величина  $\lambda$  равна истинному коэффициенту анизотропии только при вертикальном падении анизотропных пород и отсутствии влияния слоя наносов. Если падение наклонное, даже при отсутствии наносов полученная величина меньше  $\lambda$ . В дальнейшем будем называть ее кажущимся коэффициентом анизотропии  $\lambda_k$ .

В УГГГА исследования по разработке методики картирования анизотропных пород были начаты в 1953 г. В этом году были организованы опытные работы по изучению анизотропии горных пород с целью картирования зон расщелачивания, к которым на Среднем Урале приурочены колчеданные месторождения. Наблюдения проводились способом прослеживания линии равного потенциала вокруг точечного заземления по профилю, проходившему по широтной просеке примерно в 2 км южнее Юрьевского месторождения (Кировградский район). Шаг наблюдений, т.е. расстояние между соседними положениями питающего заземления, был принят равным 100 м со сгущением на интересных участках до 50 м. Исходная точка изолинии задавалась на профиле в 100 м от заземления.

На графике  $\lambda_k$  (отношения больших и малых осей изолиний) повышением этого параметра до 2 - 2,5 на фоне не выше 1,2 - 1,3 отчетливо выявилась вмещающая известные колчеданные

месторождения полоса кварцево-хлорито-серицитовых сланцев, залегающая среди порфиритовой толщи. Несколько восточнее выявилась только что установленная геологами восточная сланцевая полоса. Ориентировки больших осей изолиний потенциала хорошо согласовывались с простиранием пород по геологическим данным.

Таким образом, проведенные работы показали высокую эффективность изучения анизотропии горных пород с целью выявления и картирования зон рассланцевания. Однако такая методика едва ли могла быть в сколько-нибудь значительных масштабах применена в производственных целях из-за ее низкой производительности (3 - 4 точки в день). Поэтому в следующем году была предпринята попытка с этой же целью использовать более производительную методику кругового профилирования с симметричной установкой. Были выполнены работы на площади около четверти квадратного километра на участке сланцевой полосы, вмещающей месторождение Восточное (Красноуральский район). Результаты работ оказались отрицательными. Значения  $\lambda_k$  вели себя незакономерно, во многих точках наблюдений полярные диаграммы  $\rho_k$  были повернуты на  $90^\circ$  относительно простирания пород. В то время это объяснили недостаточной точностью измерений (работа выполнялась студентами без регулярного контроля). Ошибочность такой оценки качества этих работ стала очевидной через несколько лет, когда была показана принципиальная неприменимость методики изучения анизотропии пород круговым профилированием в сложных геоэлектрических условиях.

В 1959 г. для картирования анизотропных пород автором была предложена крестообразная установка [8]. При этой методике питающее заземление, как и при прослеживании изолинии потенциала, располагается в точке наблюдений. Четыре приемных заземления относятся на одинаковое расстояние  $r$  по четырем направлениям: два по профилю и два вкрест профиля. При этом полагается, что профиль ориентирован вкрест простирания пород. Измерения разности потенциалов  $\Delta U$  производятся между всеми соседними приемными электродами, т. е. во всех четырех плечах установки. Затем вычисляется среднее значение  $\Delta U$ . В случае отсутствия анизотропии в однородной среде все разности потенциалов равны нулю. Чем выше коэффициент анизотропии, тем больше измеряемые разности потенциалов. В случае однородной анизотропной среды все  $\Delta U$  одинаковы и достаточно было бы измерять одну из них между двумя электродами. Четырехкратные измерения выполняются с целью уменьшить влияние неоднородности среды по сопротивлению. Вызываемые неоднородностями искажения в разных плечах установки имеют разные знаки и ослабляются при вычислении среднего. Чтобы вычислить значения  $\lambda_k$ , надо знать еще эффективное сопротивление среды вдоль или вкрест простирания пород. Для этого используются три заземления, которые расположены по профилю. Поочередно одно из крайних заземлений делается питающим, а на двух других измеряется разность потенциалов. Таким образом получают два значения  $\rho_k$  для двух встречных трехэлектродных установок размером  $1,5 r$ , т. е. для установки комбинированного

профилирования. Для вычисления  $\lambda_k$  используется среднее из этих двух значений, соответствующее  $\rho_k$  для симметричной установки с  $AB = 3r$ ,  $MN = r$ .

Оценка влияния неоднородности среды по сопротивлению, выполненная путем математического и физического моделирования, показала, что это влияние невелико. Так, максимальное искажение  $\lambda_k$  вертикальным контактом при разнице удельных сопротивлений в 9 раз составило 0,2. Выходящая на поверхность земли проводящая полусферическая неоднородность при той же разнице сопротивлений вызывала искажение  $\lambda_k$ , не превышающее 0,25, а металлическая пластинка ( $\rho \rightarrow 0$ ) - до 0,35. При круговом профилировании в последнем случае искажение  $\lambda_k$  достигало 5.

Для оценки относительной чувствительности различных способов изучения анизотропии к неоднородности среды по сопротивлению были выполнены расчеты для четырех основных типов мешающего влияния: приповерхностного проводящего изотропного слоя, такого же слоя, сохраняющего анизотропию подстилающей среды, вертикального контакта и полусферической неоднородности, выходящей на поверхность земли. Оказалось, что наименьшую чувствительность ко всем типам неоднородностей имеет способ прослеживания изолиний потенциала. Второе место занимает крестообразная установка, затем следует круговое профилирование с потенциальной (двухэлектродной) установкой. Четвертое и пятое места делят квадратная установка [25] и установка с ортогональными приемными линиями [6]. Наиболее чувствительным к трем из четырех типов неоднородностей является круговое профилирование с градиент-установкой. Не рассматривавшийся метод срединного градиента с круговыми измерениями [7], по-видимому, имеет чувствительность к неоднородностям, аналогичную установке с ортогональными приемными линиями.

Оценки, полученные при моделировании, полностью подтвердились при проведении полевого эксперимента. На профиле, проходящем по широтной просеке в 2 км южнее Крылатовского рудника (Полевской район), были выполнены наблюдения способами прослеживания изолиний потенциала, крестообразной установки и кругового профилирования с симметричной установкой. Первыми двумя способами были получены идентичные по форме графики  $\lambda_k$ , только для крестообразной установки на участках с большей мощностью рыхлых отложений значения  $\lambda_k$  несколько ниже. Повышенными значениями  $\lambda_k$  отмечается участок Кунгурковского колчеданного рудопроявления, приуроченного к зоне интенсивного рассланцевания, и широкая зона умеренно рассланцованных пород в восточной части профиля. График  $\lambda_k$  для кругового профилирования имеет пилообразный характер, особенно на участках изменения  $\rho_k$ . В значительной части пунктов полярные диаграммы  $\lambda_k$  ориентированы вкрест простирания пород.

Так как при работе с крестообразной установкой попутно получают графики  $\rho_k$  комбинированного профилирования, это дает возможность установить положение контактов пород различного сопротивления. Эта информация может быть использована для целей геологического картирования, а также для учета влияния контактов на результаты измерений  $\lambda_k$ . Методика такого учета и соответствующая номограмма приведены в [15] и [17]. Если имеется информация о мощности изотропного приповерхностного слоя рыхлых отложений, за его влияние также можно ввести поправку с помощью номограммы [17].

При площадных съемках простирание анизотропных пород не всегда известно, в разных частях участка оно может меняться. В этом случае ориентировка установки часто не будет соответствовать простиранию пород и значения  $\lambda_k$  будут определяться с погрешностью. Чтобы избежать этих погрешностей и иметь возможность определять простирание пород в каждой точке наблюдений, было предложено выполнять измерения со скрещенными установками, т.е. с двумя установками, повернутыми одна относительно другой на  $45^\circ$  [15]. По этим измерениям можно определить значение  $\lambda_k$  и азимут простирания путем вычисления по соответствующим формулам или по номограмме. В.Е. Петряевым позднее для таких вычислений была составлена программа. Заметим, что принцип скрещенных установок применим и для других способов определения анизотропии. Так, Г.М. Хабберьям применил его для работы с квадратной установкой [26].

При площадной съемке результаты изучения анизотропии было предложено изображать в виде планов осей кажущейся электропроводности. Для этого на плане в каждой точке наблюдений строится отрезок, ориентированный по направлению простирания и имеющий длину, пропорциональную избыточной кажущейся анизотропии  $(\lambda_k - 1)$ . Таким образом, на этих планах наглядно отображается степень анизотропии и структурные особенности анизотропных пород.

Если мощность анизотропной зоны меньше  $2r$ , измеренные значения  $\lambda_k$  занижаются. Поэтому при интерпретации целесообразно вводить поправку за мощность анизотропного пласта и вычислять исправленное значение:

$$\lambda_{k \text{ исп}} = (1/2r) \sum_{i=1}^n \lambda_{ki} \cdot \Delta x_i,$$

где  $\lambda_{ki}$  - значения  $\lambda_k$  в интервалах профиля  $\Delta x_i$  в пределах установки;  $n$  - количество интервалов с разным уровнем  $\lambda_k$ . Затем производится увязка анизотропных пластов между профилями, выделяется 2 - 3 градации значений  $\lambda_k$  и на плане отрисовываются полосы анизотропных пород, соответствующие этим градациям. Эти зоны обозначаются различными штрихами, направление которых отражает направление простирания в соответствующих точках. В результате получается наглядная картина, отражающая положение и структуру анизотропных зон.

Изучение анизотропии пород в меднорудных районах Среднего Урала показало, что вмещающие месторождения полосы кварцево-хлорито-серицитовых сланцев имеют сложную внутреннюю структуру. Особенности строения сланцевых зон с такой детальностью, по-видимому, другими способами изучать практически невозможно. Наличие в каждой точке наблюдений определения направления простираения пород позволяет уверенно увязывать пласты между профилями даже при относительно большом расстоянии между последними, тогда как по другим данным даже при расстоянии между профилями, в 2 - 3 раза меньшем, такая увязка часто допускает несколько вариантов. Поэтому результаты изучения анизотропии дают ценную информацию для уточнения и детализации геологической карты.

В 70-х и 80-х годах в меднорудных районах Среднего Урала площадными съемками с крестообразной установкой было изучено несколько сотен квадратных километров. Частично эти работы велись в содружестве с производственными организациями научно-исследовательской партией кафедры рудной геофизики под общим руководством автора. Непосредственными руководителями работ были С.С. Сысков, П.Н. Коврижных, В.В. Миронов. Такие же работы проводились самостоятельно подразделениями геологической службы - Средне-уральской геологоразведочной экспедицией (С.А. Костромкин), Тагильской геологоразведочной экспедицией (В.Е. Каплан, Б.Н. Курушин), геофизической экспедицией треста "Уралцветметразведка" (В.В. Миронов). Аналогичные работы при методическом руководстве С.С. Сыскова проводились ПО "Уралкварцсамоцветы" на месторождениях кварцевого сырья. Партией Башкирской геофизической экспедиции под руководством А.П. Калташова при консультации автора были выполнены работы в пределах Миндякского золоторудного поля, получившие высокую оценку геологов. Позднее такие работы были проведены и в других золоторудных районах Башкирии и на участках некоторых колчеданных месторождений.

Трудоемкость работ с крестообразной установкой существенно повышается из-за необходимости ее поворота, особенно в залесенной местности. С.С. Сысковым была высказана идея модифицированной методики, в которой вместо измерений с установкой, повернутой на  $45^\circ$ , выполняется несколько дополнительных измерений при основной ориентировке установки [1]. При такой методике производительность труда повышается примерно на 30 %. В содружестве с геофизиками Тагильской экспедиции работы по этой методике проведены на площади более 10 кв. км. Сопоставление их с результатами работ по стандартной методике показало удовлетворительное совпадение, за исключением участков с контактами, секущими профили под острым углом.

Наиболее полно вопросы картирования анизотропных пород электроразведкой изложены в депонированном в ВИНТИ Методическом руководстве [17] и в докторской диссертации автора\*.

\* Редозубов А.А. Теория и практика электрической разведки рудоносных зон (на примере поисков медноколчеданных месторождений Урала): Дис. ... д-ра геол.- мин. наук. Свердловск, 1978.

Применение описанной методики может быть полезно не только при картировании зон расланцевания, но и при изучении трещиноватости массивных горных пород. Применительно к этому случаю было получено приближенное решение задачи об анизотропии среды с двумя произвольно ориентированными системами трещин [13]. Оно позволяет, если простирание трещин известно и достаточно выдержано, по результатам измерения анизотропии определить в каждой точке, какая из систем трещин преобладает, и оценить соотношение удельных сопротивлений по направлениям систем трещин и таким образом получить информацию о соотношении интенсивностей трещиноватости для этих систем. Например, на Вересовоборском гипербазитовом массиве было установлено, что на участке проявления хромита наблюдается повышенная анизотропия, причем оси наибольшей кажущейся электропроводности образуют сложную кольцевую структуру. Дальнейшая обработка этих результатов с использованием данных о простирании трещин, полученных по измерениям на обнажениях, показала, что блок, содержащий хромитовую минерализацию, оконтуривается зонами интенсивной трещиноватости двух направлений, а внутри блока интенсивность систем трещин примерно одинаковая и, по данным измерений в карьере, более высокая.

### **Объемное изучение анизотропии горных пород**

В своей основополагающей работе С.М. Шейнманн считал, что реальные анизотропные горные породы являются одноосными анизотропными средами, поэтому случай трехосной анизотропной среды, по его мнению, не представляет практического интереса [22]. Такая его точка зрения, по-видимому, объясняется тем, что он работал в районе, сложенном слоистыми осадочными горными породами, в которых действительно трудно ожидать появления заметной анизотропии в плоскости параллельной напластованию. По всей вероятности, это утверждение С.М. Шейнманна и привело к тому, что и последующие исследователи рассматривали лишь одноосные анизотропные среды.

Между тем модель одноосной анизотропной среды далеко не всегда удовлетворительно отражает свойства реальных горных пород. Особенно это касается горных пород, претерпевших метаморфические изменения. Например, в кварцево-хлорито-серицитовых сланцах, вмещающих колчеданные месторождения Среднего Урала, удельное сопротивление в плоскости расланцевания заметно различается по разным направлениям. Влияние этого наиболее ярко проявляется в результатах метода заряда в безрудные скважины. Даже на участках, где заведомо нет оруденения, эпицентры зарядов часто смещаются относительно проекции заряда на поверхность земли не только вкост простирания, но и по простиранию горных пород. Это явление, не получавшее ранее ясного геологического объяснения, стало понятным с позиций трехосного характера анизотропии пород. Именно часто встречающиеся трудно объяснимые

смещения эпицентров зарядов по простиранию пород и послужили толчком к выдвигению этой концепции [9].

В трехосной среде тензор удельного сопротивления имеет три главных значения:  $\rho_n > \rho_m > \rho_l$ . В рассланцованной породе поперечное удельное сопротивление  $\rho_n$  наблюдается по нормали к слоистости, продольное  $\rho_l$  и промежуточное  $\rho_m$  значения наблюдаются в плоскости слоистости. Кроме коэффициента анизотропии  $\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_l}$  для характеристики такой среды потребовалось ввести еще коэффициент анизотропии в плоскости рассланцевания  $\lambda_l = \sqrt{\rho_m / \rho_l}$ . Как будет показано ниже, трехосная анизотропия может наблюдаться и при отсутствии рассланцевания. В этом случае будем сохранять ту же терминологию, понимая под  $\lambda_l$  коэффициент анизотропии в плоскости, нормальной к направлению оси  $\rho_n$ . Для определения элементов залегания трехосной среды кроме направления простирания и угла падения необходимо указывать ориентировку оси  $\rho_l$ . Для этого можно использовать угол между горизонтальной линией и направлением  $\rho_l$  в плоскости рассланцевания или угол наклона оси  $\rho_n$  и азимут ее простирания.

Наличие анизотропии в плоскости рассланцевания было подтверждено непосредственными измерениями. На штуфах кварцево-хлорито-серицитовых сланцев с Пильненского рудопоявления (Первоуральский район) значения  $\lambda_l$  достигали 1,22 при среднем значении – 1,10. По измерениям, выполненным С.С. Сысковым в шахте Левихинского рудника, значения  $\lambda_l$  колебались от 1,05 до 1,41, составляя в среднем 1,25.

Наличие анизотропии в плоскости рассланцевания сланцев естественно объяснить их линейностью (способностью раскалываться перпендикулярно сланцеватости по определенному направлению). В этом случае в качестве простейшей модели породы можно принять среду с тремя взаимно ортогональными системами трещин. Расчеты по оценке параметров такой среды показывают, что данной причиной можно объяснить значения  $\lambda_l$  до 1,2, в крайнем случае до 1,3, т.е. того же порядка, что получены при измерениях на штуфах [9]. В реальных условиях при определении параметров анизотропии среды по результатам метода заряда в ряде случаев получаются значения  $\lambda_l$  до 1,5 - 2, которые трещиноватостью объяснить невозможно.

Высокие значения  $\lambda_l$  легко объясняются, если предположить, что среда содержит однообразно ориентированные включения неизометричной формы, отличающиеся по удельному сопротивлению от вмещающего материала. Такое представление хорошо согласуется с данными геологии. В.А. Заварицкий на примере месторождения им. III Интернационала показывает, что вмещающие породы имеют линзовидное строение на всех уровнях от образца до месторождения в целом [3]. Общеизвестен также факт, что в окрестностях рудных залежей, особенно на продолжении их выклинок, всегда наблюдаются скопления вкрапленников линзовидной, "струйчатой" и неправильной форм. Если предположить наличие в породе 20 - 30 % эллипсоидальных (т.е. линзовидных) включений, имеющих сопротивление, на порядок меньшее,



чем вмещающая среда, можно получить значения  $\lambda_r$  до 1,2 – 1,25, что вместе с первоначальной анизотропией за счет трещиноватости может привести к увеличению  $\lambda_r$  до 1,4 – 1,45. В геологическом отношении такими включениями могут быть компоненты породы преимущественно хлорито-серицитового состава, а вмещающей средой – более плотные разности. Если ввести в такие включения 5-10 % еще более проводящих компонент эллипсоидальной формы, имитирующих включения вкрапленников, можно получить значения  $\lambda_r$  до 1,6 – 1,7 и выше.

Такая трактовка природы трехосного характера анизотропии рудовмещающих метасоматитов согласуется с результатами наблюдений в реальных условиях. На участках, где нет заметной минерализации, значения  $\lambda_r$  обычно не превышают 1,2 – 1,3. Вблизи колчеданного оруденения, особенно вблизи выклинок рудных тел, наблюдаются высокие значения коэффициента анизотропии в плоскости рассланцевания, достигающие 1,5 – 1,7 и более. Очевидно, здесь действуют все перечисленные выше факторы. На большем удалении от рудных тел наблюдаются промежуточные значения  $\lambda_r$  порядка 1,3 – 1,5, которые можно объяснить линзовидными включениями с различной степенью и типом гидротермальной проработки и, возможно, с незначительным количеством включений вкрапленников.

Трещиноватость (рассланцевание – по существу это тоже трещиноватость) создает микроанизотропию, которая может быть измерена на образце или на обнажении с миниатюрной установкой. Включения имеют значительные размеры и создают макроанизотропию, которую этими способами обнаружить нельзя. Для ее изучения необходимо получать эффективную характеристику крупных блоков породы, имеющих объем в миллионы кубометров. Для этой цели можно использовать результаты метода заряда, на которых не наблюдается сильного влияния оруденения, или надо выполнять специальные измерения в поле заземления, погруженного на достаточную глубину в скважину или горную выработку.

Для характеристики трехосной анизотропии необходимо определить два коэффициента анизотропии, направление и угол падения плоскости рассланцевания и наклон оси наибольшей электропроводности (оси  $\lambda_r$  в этой плоскости, т.е. четыре независимые величины, для нахождения которых необходимы четыре уравнения. Принцип решения этой задачи вытекает из особенностей электрического поля в трехосной анизотропной среде, рассмотренных в [9]. Проследив в поле погруженного заземления изолинию потенциала, можно определить отношение ее осей и смещение вдоль этих осей центра изолинии относительно проекции заземления на поверхность земли. Эти исходные параметры дают возможность составить три уравнения. Для составления четвертого уравнения можно использовать расстояние между экстремумами градиента потенциала, измеренного по большой оси изолинии. После нахождения перечисленных выше четырех параметров среды определяется простирание сланцеватости (в трехосной среде

большая ось изолинии потенциала образует с направлением простирания некоторый угол, в предельном случае достигающий  $90^\circ$ ).

Разработано несколько способов определения параметров трехосной анизотропной среды. Для углов падения более  $50^\circ$  рассчитан комплект номограмм. Применение этого способа ограничивается большим количеством номограмм и неприменимостью его при пологом падении сланцеватости. Более удобным и универсальным является предложенный С.С. Сысковым аналитический способ [2]. П.Н. Коврижных и С.С. Сысковым разработан также итерационный способ, основанный на решении прямой задачи. В.Е. Петряевым для компьютерной реализации способа составлена программа.

Из анализа причин, приводящих к возникновению трехосной анизотропии рудовмещающих пород, вытекают геологические задачи, которые можно решать при ее изучении. Так как высокие значения коэффициента анизотропии в плоскости рассланцевания наблюдаются на участках, где появляются скопления рудной вкрапленности, это может быть использовано при оценке перспективности изучаемых площадей на рудоносность. Ориентировка линзовидных тел, отличающихся по степени и характеру гидротермальной проработки, и скоплений вкрапленников отражает, по-видимому, ориентировку путей движения флюидов. Поэтому результаты определения ориентировки осей тензора удельного сопротивления в пространстве могут быть использованы для изучения структурных особенностей рудных полей и реставрации гидротермальных систем [9, 11, 16, 19].

В качестве примера можно рассмотреть результаты объемного изучения анизотропии рудовмещающих пород в пределах Чусовского рудного поля (Полевской район). Оруденение Чусовского месторождения представлено залегающими среди кварцево-хлорито-серицитовых сланцев небольшими линзами колчеданных руд, круто падающими на восток и скатывающимися к югу. По результатам измерений в поле заземлений, располагавшихся над южной, круто погружающейся частью рудного тела, были получены высокие значения коэффициента анизотропии в плоскости рассланцевания, достигающие 1,8. При этом скатывание осей наибольшей электропроводности оказалось северным, т.е. противоположным скатыванию рудного тела. Южнее значения  $\lambda_r$  уменьшаются, а затем, примерно через 1 км, снова резко возрастают, после чего окончательно выходят на нормальный уровень. Аналогия второго участка повышения  $\lambda_r$  с Чусовским месторождением позволила высказать предположение о наличии здесь, несмотря на густую сеть пробуренных скважин, нескрытого оруденения. После проведения детальных геофизических исследований была дана рекомендация о проверке этого участка бурением. Пробуренные скважины встретили колчеданное оруденение, получившее название Южно-Чусовского [11, 16, 19].

Полученное при всех измерениях северное скатывание осей наибольшей электропроводности позволило сделать вывод о расположении корневой части месторождения к северу от него, что противоречило представлениям геологов. Этот вывод, сделанный по

результатам изучения анизотропии пород, впоследствии был подтвержден бурением и признан геологами.

В 6 км севернее Чусовского месторождения в той же сланцевой полосе располагается Поварненское рудопоявление. Здесь также наблюдаются высокие значения  $\lambda_1$ , но при южном скатывании осей наибольшей электропроводности. Противоположное, навстречу друг другу, скатывание осей наибольшей электропроводности в северной и южной частях участка позволяет трактовать Чусовское месторождение и Поварненское рудопоявление как ветви единого рудного поля, корневая часть которого располагается примерно посередине между этими объектами. Картирование показывает, что породы с высокой анизотропией в этой части полосы развиты фрагментарно, а у поверхности земли развиты в основном порфириды. Вполне возможно, что этот блок имеет менее глубокий эрозионный срез и может представлять интерес с точки зрения возможного оруденения на более значительной глубине [19].

Трехосная анизотропия наблюдается и на колчеданных месторождениях Южного Урала, где выраженное рассланцевание пород часто отсутствует. Например, на Маканско-Октябрьском рудном поле по имеющимся немногочисленным измерениям оси наибольшей электропроводности направлены к некоторому центру, расположенному в средней части рудного поля несколько восточнее Маканского разлома [11]. В таких условиях причиной трехосной анизотропии может быть наличие двух систем трещин. На участках кальдер это могут быть, например, кольцевые и радиальные трещины. В этом случае оси наибольшей электропроводности должны ориентироваться по направлению линий пересечения трещин [13]. По этим направлениям как наиболее проницаемым должны ориентироваться и тела в различной степени гидротермально измененных пород, и скопления рудных вкрапленников. Поэтому все положения, сформулированные выше для районов, где оруденение приурочено к интенсивно рассланцованным породам, приложимы и к рассматриваемому случаю.

### Изучение анизотропии поляризуемости

Анизотропия поляризуемости слоистой среды впервые рассмотрена, по-видимому, В.А. Комаровым [5]. Им показано, что в зависимости от соотношения удельных сопротивлений прослоек, обладающих различной поляризуемостью, наибольшая поляризуемость слоистого агрегата наблюдается или вдоль, или поперек слоистости. Если большей поляризуемостью обладают более проводящие прослойки, продольная поляризуемость породы  $\eta_l$  больше, чем поперечная поляризуемость  $\eta_n$ . Когда поляризующийся материал сосредоточен в плохо проводящих прослойках, поперечная поляризуемость больше продольной. Таким образом, в отличие от анизотропии удельного сопротивления, при которой всегда  $\rho_n > \rho_l$ , анизотропия поляризуемости может быть двух типов:  $\eta_n > \eta_l$  и  $\eta_n < \eta_l$ . Слоистая среда не единственная

модель анизотропной породы. Аналогичными свойствами обладает среда, содержащая включения, отличающиеся по поляризуемости и удельному сопротивлению от вмещающего материала. Следовательно, и к рассматриваемому случаю применима описанная в предыдущем разделе модель рудовмещающих пород, если ввести в нее данные о поляризуемости.

Существование двух типов анизотропии поляризуемости создает предпосылки для использования результатов ее изучения при решении некоторых геологических задач. Как указывалось ранее, на колчеданных месторождениях на участках, где проявились процессы концентрации рудного вещества, вкрапленники сульфидов образуют неизометричные скопления, ориентированные по направлению наибольшей электропроводности, соответствующему, по видимому, направлению движения флюидов. Эти скопления вкрапленников обладают обычно пониженным сопротивлением. Поэтому на таких участках преобладает тип анизотропии поляризуемости  $\eta_t > \eta_n$ , который можно условно назвать "рудным". На удалении от оруденения рассеянная вкрапленность чаще всего тяготеет к более окварцованным компонентам породы, имеющим повышенное сопротивление. Поэтому для таких участков характерен тип анизотропии поляризуемости  $\eta_t < \eta_n$  [4, 19].

Описанные особенности поляризуемости анизотропных пород являются одной из причин того, что при проведении работ методом вызванной поляризации в модификации срединного градиента наиболее интенсивные аномалии редко наблюдаются непосредственно над месторождениями. В этой установке измеряемая кажущаяся поляризуемость  $\eta_k$  определяется поперечной поляризуемостью горных пород. Поэтому самые высокие значения  $\eta_k$  более вероятны на участках с анизотропией поляризуемости типа  $\eta_n > \eta_t$ . Вблизи же рудных тел, где преобладает анизотропия поляризуемости типа  $\eta_t > \eta_n$ , даже при высокой средней поляризуемости поперечная поляризуемость, а следовательно, и наблюдаемая  $\eta_k$  имеют умеренные значения [12]. Для классификации аномалий метода вызванной поляризации и локализации участков с проявлениями концентрации рудного вещества, перспективных на оруденение, важную информацию может дать изучение анизотропии поляризуемости в пределах выявленных при площадной съемке аномальных зон [4, 19].

Для изучения анизотропии поляризуемости наиболее удобной оказалась квадратная установка, предложенная ее авторами для работы по методу сопротивлений в анизотропных породах [24]. В этой установке четыре заземления располагаются в углах квадрата, две стороны которого ориентированы по простиранию пород и две вкрест простирания (для правильной ориентировки установки желательно предварительно провести на участке картирование анизотропных пород по описанной в первом разделе методике). Пары заземлений, расположенные на противоположных сторонах квадрата, являются соответственно питающими и приемными. При ориентировке питающей и приемной линий по простиранию пород измеряется продольная кажущаяся поляризуемость  $\eta_k$ . При ориентировке линий вкрест простирания измеряется

поперечная кажущаяся поляризуемость  $\eta_{kl}$ . Высокая чувствительность квадратной установки к неоднородности среды по сопротивлению в данном случае не имеет значения, так как эта неоднородность на результаты измерений  $\eta_k$  большого влияния не оказывает. Кроме того, если ранее на участке было выполнено картирование анизотропных пород, можно выбрать такое положение квадратной установки, чтобы в ее пределах среда была более или менее однородной. Во избежание случайных результатов для более уверенной интерпретации целесообразно выполнять работы в варианте зондирования, производя измерения на точке при нескольких размерах установки при неизменном положении ее центра [18]. В тех случаях, когда предварительное картирование на участке не производилось и простирание точно не известно, следует работать со окрещенными квадратными установками. По результатам измерений с произвольно ориентированными скрещенными квадратными установками могут быть вычислены продольная и поперечная кажущиеся поляризуемости и определено направление простирания пород [14].

При анализе результатов можно рассматривать измеренные значения  $\eta_{kl}$  и  $\eta_{kn}$ , но удобнее ввести в рассмотрение параметр, характеризующий анизотропию среды по поляризуемости. В качестве такого параметра выбрана величина  $\Lambda_{\text{вп}} = (\eta_l - \eta_n) / (\eta_l + \eta_n)$ , представляющая собой разность между продольной и поперечной поляризуемостями, нормированную по средней поляризуемости [4, 19]. При его вычислении в качестве  $\eta_n$  можно использовать значения  $\eta_{kn}$ , а  $\eta_l$  полагать равной среднему значению из  $\eta_{kl}$  и  $\eta_{kn}$ . Для более точного определения  $\eta_l$  и  $\eta_n$  по кажущимся поляризуемостям можно воспользоваться специальными номограммами [18]. Предлагаемый параметр удобен тем, что он имеет разные знаки при разных типах анизотропии поляризуемости: при  $\eta_l > \eta_n$   $\Lambda_{\text{вп}}$  положителен, при  $\eta_l < \eta_n$  - отрицателен. Результаты изучения анизотропии поляризуемости можно изображать в виде кривых зондирования - зависимостей  $\eta_{kl}$ ,  $\eta_{kn}$  и  $\Lambda_{\text{вп}}$  от размеров установки или в виде графиков этих величин по профилям. По профилям могут быть также построены вертикальные карты  $\Lambda_{\text{вп}}$ , а при площадных исследованиях - планы изолиний  $\Lambda_{\text{вп}}$ .

Проведенные в содружестве с Тагильской и Среднеуральской геологоразведочными экспедициями полевые работы подтвердили возможность использования результатов изучения анизотропии поляризуемости для локализации перспективных на оруденение участков. Так, на Ново-Шайтанском месторождении (Кировградский район) на вертикальной карте, построенной по продольному профилю, положительными значениями  $\Lambda_{\text{вп}}$  четко выделяется рудная зона, разведанная бурением [4]. Аналогичная картина наблюдается и на поперечных профилях. По отношению к аномалии метода вызванной поляризации в модификации срединного градиента рудная зона располагается в краевой части области высоких значений  $\eta_k$ . Наиболее высокие значения  $\eta_k$  наблюдаются западнее и южнее оруденения.

Подобная же картина наблюдается на участке Северо-Ольховского месторождения (Пригородный район). Здесь полоса, к которой приурочено месторождение, при съемке с установкой срединного градиента отмечается повышением  $\eta_k$  до 1,5 % на фоне 0,5 %. Длина аномалии во много раз превышает размеры месторождения, а в полукilометре севернее рудных залежей значения  $\eta_k$  повышаются до 3 %. По результатам изучения анизотропии поляризуемости оруденение отмечается положительными значениями  $\Lambda_{\text{вп}}$ . К северу и к югу от него  $\Lambda_{\text{вп}}$  меняет знак на отрицательный.

Отчетливо локализовалось положение оруденения положительными значениями  $\Lambda_{\text{вп}}$  и на Чусовском рудном поле. Кроме известного оруденения положительным значением  $\Lambda_{\text{вп}}$  отметился участок между Чусовским месторождением и Поварненским рудопроявлением, где по результатам изучения трехосной анизотропии электропроводности также можно предполагать наличие неизвестного оруденения [19].

Таким образом, во всех имеющихся примерах по типу анизотропии поляризуемости уверенно выделяются участки развития оруденения в пределах обширных аномалий  $\eta_k$ , выявленных при площадной съемке методом вызванной поляризации.

Можно ожидать, что изучение анизотропии поляризуемости окажется полезным и при поисках других типов месторождений полезных ископаемых. Например, на золоторудных месторождениях, где золото связано с кварцем, по-видимому, перспективные участки будут отмечаться анизотропией поляризуемости типа  $\eta_n > \eta_t$ .

В настоящей статье не затронут достаточно важный аспект электроразведки анизотропных сред - влияние анизотропии пород на результаты различных электроразведочных методов и его учет. Применительно к методам скважинной электроразведки этот вопрос рассматривается в работах [10, 19, 20]. Более полно вопросы влияния анизотропии пород на результаты электроразведки и его учет рассмотрены в упоминавшейся докторской диссертации автора.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.С. N 930189. Способ картирования горных пород / А.А. Редозубов, С.С. Сысков, А.И. Минцев, В.В. Миронов, П.Н. Коврижных. - 1982.
2. А.С. № 1619214. Способ поисков гидротермальных рудных месторождений / А.А. Редозубов, С.С. Сысков, В.М. Сапожников, П.Н. Коврижных, И.Г. Сковородников. - 1990.
3. Заварицкий В.А. Метаморфизм зеленокаменных пород, вмещающих колчеданное месторождение им. III Интернационала (бывшее Сан-Донато) на Среднем Урале // Колчеданные месторождения Урала. - М.: Изд. АН СССР, 1950. - С.19-116.

4. Коврижных П.Н., Редозубов А.А., Сысков С.С. О возможности использования анизотропии поляризуемости в рудной электроразведке (на примере колчеданных месторождений Среднего Урала) // Поляризационные электроразведочные методы. - Ереван: Изд. АН Армянской ССР, 1989. - С.78 - 84.
5. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. - Л.: Недра, 1980. - 392 с.
6. Лобанов Е.М., Варламов Н.М. Способ измерения анизотропии электрического сопротивления и его практическое применение // Разведочная геофизика, вып. 63. - М.: Недра, 1974. - С.76 - 82.
7. Петров П.А. Метод срединных градиентов с круговыми измерениями напряженности поля и его применение для целей геологического картирования // Информационный бюллетень ОНТИ ВИЭМС: Сер.: Региональная, разведочная и промысловая геофизика, вып. 39 (1). - М.: Изд. ВИЭМС, 1964. - 22 с.
8. Редозубов А. А. Метод картирования анизотропных пластов // Разведочная геофизика: Тр. Свердловского горного института, вып. 41. - Свердловск: Свердл. кн. изд-во, 1962. - С.57-61.
9. Редозубов А.А. К вопросу применения электроразведки в анизотропных породах // Вопросы рудной геофизики: Тр. Свердл. горного ин-та, вып. 105. - Свердловск: Изд. СГИ, 1973. - С.18 - 32.
10. Редозубов А.А. Об учете влияния анизотропии пород на результаты метода заряда // Известия вузов. Сер.: Геология и разведка. - 1973. - №12. - С.137 - 142.
11. Редозубов А.А. Некоторые черты геоэлектрического строения колчеданных рудных полей Урала и их использование в электроразведке // Известия вузов. Сер.: Геология и разведка. - 1978. - № 5. - С.134 - 139.
12. Редозубов А.А. О влиянии анизотропии горных пород на результаты метода вызванной поляризации // Теория и практика индукционных и кондуктивных методов электроразведки: Сб. науч. тр. - Свердловск: Изд. УрО АН СССР, 1990. - С. 53 - 58.
13. Редозубов А.А. Электрическая анизотропия среды с двумя системами трещин // Первые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Ядерная геофизика. Геофизические исследования литосферы. Геотермия. - Екатеринбург: Изд. ИГ УрО РАН, 2001. - С.70 - 71.
14. Редозубов А.А., Матвеев Е.Е. Определение эффективной поляризуемости анизотропной среды скрещенными квадратными установками // Теория и практика интерпретации данных электромагнитных геофизических методов: Доклады Российской конференции. - Екатеринбург: Изд. УрО РАН, 1996. - С.130-134.
15. Редозубов А.А., Сысков С.С. Картирование зон расланцевания электроразведкой // Вопросы рудной геофизики: Тр. Свердл. горного института, вып.105. - Свердловск: Изд. СГИ, 1973. - С.33 - 55.
16. Редозубов А.А., Сысков С.С. Использование анизотропии электропроводности при изучении рудных полей колчеданных месторождений // Геология метаморфических комплексов Урала. Вып. 127. - Свердловск: Изд. УПИ, 1976. - 106 - 111.
17. Редозубов А.А., Сысков С.С. Методическое руководство по картированию анизотропных пород электроразведкой / Свердловский горный институт. - Свердловск, 1989. - 101 с. - Деп. в ВИНТИ, №272 В89.
18. Редозубов А.А., Сысков С.С. Методическое руководство по изучению анизотропии поляризуемости горных пород / Свердловский горный институт. - Свердловск, 1991. - 84 с. - Деп. в ВИНТИ, № 309 В92.

19. Редозубов А.А., Сысков С.С. Изучение анизотропии пород в рудной электроразведке // Известия Уральского горного института. Сер.: Геология и геофизика, вып. 2. - 1993. - С.163 - 171.
20. Саковцев Г.П., Редозубов А.А. Методы скважинной электроразведки при поисках и разведке рудных месторождений. - М.: Недра, 1968. - 128 с.
21. Саковцев Г.П., Козырин А.К., Редозубов А.А. и др. Разработка и применение методов скважинной и шахтно-рудничной электроразведки на медноколчеданных месторождениях Урала // Скважинные и шахтно-рудничные геофизические методы изучения минерального сырья: Мат-лы VIII Всесоюз. геоф. конф. в г. Тюмени 23 - 25 ноября 1976 г. - М.: Недра, 1979. - С.91 - 96.
22. Шейнмани С.М. Элементы теории электроразведки анизотропных сред // Материалы Всесоюзного научно - исследовательского геологического института. Геофизика, сб. 9-10. - М.-Л.: Гос. изд-во геол. лит., 1941. - С.105 - 144.
23. Шлюмберже К. Подземная электрическая разведка. - М.-Л.: Гос. науч.-техн. горное изд-во, 1932. - 83 с.
24. Habberjam G.M., Watkins G.E. The use of a square configuration in resistivity prospecting // Geophysical prospecting, 1967, № 2.
25. Habberjam G.M. The effects of anisotropy on square array resistivity measurements // Geophysical prospecting, 1972, № 2.
26. Habberjam G.M. Apparent resistivity, anisotropy and strike measurements // Geophysical prospecting, 1975, № 2.