

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ТЕЛ

Геологические образования, в пределах которых формируются месторождения полезных ископаемых, имеют, как правило, сложное строение. Оно фиксируется по отдельным признакам (метрогенным, тектогенным, геохимическим, физическим и др.) и их совокупности. В простейшем случае можно говорить о двухкомпонентном составе таких тел. Масштабы их рассмотрения обычно таковы, что понятия структуры и текстуры образований становятся почти синонимами, так как в совокупности определяют особенности строения и пространственного взаимоотношения компонентов.

Для большого класса геологических тел характерны проникающие структуры с упорядоченной ориентировкой изометричных компонентов. Это могут быть прослои, макровключения, реликты неизмененных пород. Именно такие составные тела имеют слоистую, сланцеватую, полосчатую, линзовидную, сетчатую, струйную, жильную структуры. Примеры проявления подобных структур показаны на рис. 1, а на примере зоны околорудного изменения, сформировавшейся в результате инфильтрационно-диффузионного метасоматоза [5].

Определение строения геологических тел представляет интерес при оценке степени их преобразований или содержания полезного ископаемого, направлений векторов развития тех или иных геологических, в том числе и рудообразующих процессов, разведке месторождений минерального сырья. В процессе решения этих задач ценную информацию можно получить по данным изучения электрических свойств геологических тел. Имеются в виду прежде всего электропроводность γ или удельное сопротивление $\rho = 1/\gamma$, поляризуемость и характеристики анизотропии объектов по этим свойствам.

Для моделирования составных геологических тел можно ориентироваться на двухкомпонентную среду, в которой имеются однородно ориентированные включения, окруженные иным по свойствам связующим материалом. В общем случае включения соответствуют подобным по форме эллипсоидам с полуосями $a > b > c$, ориентированными соответственно по координатным осям X, Y, Z. Придавая эллипсоидам различную форму и задавая их насыщенностью, можно смоделировать разнотипные составные тела. Такая модель находится в близком соответствии с практическими данными электрокаротажа, скважинной и наземной электротомии и имеет геологическое обоснование.

Фундаментальное исследование, выполненное А.С.Семеновым [10] по изучению влияния структуры на удельное сопротивление агрегатов, все же не дает полного представления о многих аспектах рассматриваемой проблемы. Принятая в [10] модель наиболее адекватно соответствует случаю, когда имеется сухая горная порода, насыщенная изолированными друг от друга рудными включениями различной формы. Не исследована поляризуемость и анизотропия моделируемых агрегатов.

По этим причинам были предприняты попытки продолжить исследования, выполненные А.С.Семеновым. Однако отдельные результаты, полученные, например, П.Н.Коврижных с соавторами [1,6], недостаточно отражены в опубликованной научной литературе. По этой причине в настоящей статье авторы снова обращаются к теме об электрических свойствах двухкомпонентных геологических сред и приводят отчасти известные и новые результаты, дающие представление о влиянии на эти свойства ряда факторов.

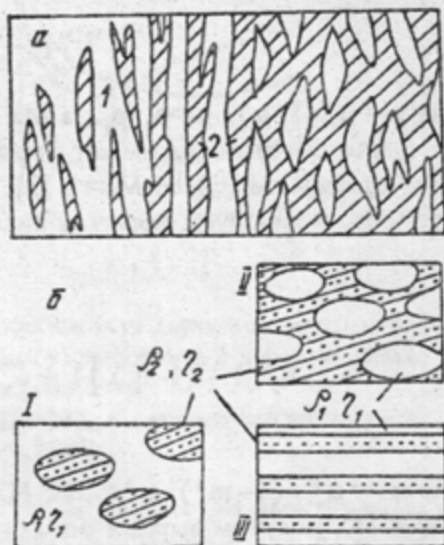


Рис.1 Примеры геологических структур (в пределах ореола околорудного изменения) (а) и геоэлектрические модели (б) двухкомпонентных геологических сред:
1 - слабоизмененные и неизмененные породы; 2 - метасоматиты

Выделим для анализа 3 типа моделей двухкомпонентной среды, соответствующих линзовидной, сетчатой и слоистой структуре геологических тел, хотя все эти модели в принципе являются частными случаями первой из них (см. рис. 1,б).

I. Первый компонент представляет исходную породу со свойствами ρ_1, η_1 , в которой имеются эллипсоидальные включения со свойствами ρ_2, η_2 . Доля включений - v , а доля связующего материала составляет $1-v$.

II. Первый компонент ($\rho_1, \eta_1, 1-v$) представлен в виде эллипсоидных реликтов исходной породы, которую пронизывает сетка или решетка эпигенетических образований, являющихся вторым компонентом (ρ_2, η_2, v).

III. Слоистая среда с двумя разновидностями слоев ($\rho_1, \eta_1, 1-v$ и ρ_2, η_2, v).

Для вычисления эффективных характеристик электрических свойств двухкомпонентных сред с включениями воспользуемся решением И.К.Овчинникова [4]. Например, для случая, когда субднородное поле направлено по оси X, то есть вдоль большой полуоси эллипсоидов, имеем:

$$\rho_x = \rho_1 \{1 + v / [(1-v)Ma + m]\}^{-1}, \quad (1)$$

где $m = \mu / (1-\mu)$, $\mu = \rho_2 / \rho_1$, а Ma - коэффициент деполяризации (размагничивания) [3].

Аналогичный вид имеют формулы для ρ_y и ρ_z , в которых используются коэффициенты Mb и Mc , причем $Ma + Mb + Mc = 1$ [3]. Для вычисления традиционным способом объемной поляризуемости используем формулы вида

$$\eta_x = 1 - (1-\eta_1) \left[1 + \frac{v}{(1-v)Ma + m^*} \right] / \left[1 + \frac{v}{(1-v)Ma + m} \right], \quad (2)$$

где $m^* = \mu^* / (1-m^*)$, $\mu^* = \mu H$, $H = (1-\eta_1) / (1-\eta_2)$. Подставляя в (2) вместо Ma коэффициенты Mb и Mc , получим выражения для η_y и η_z соответственно.

На основе формул (1) и (2) можно вычислить электрические свойства слоистой среды по главным для нее направлениям. Для этого достаточно положить $Ma = Mb = 0$, а $Mc = 1$. В двух предельных случаях, когда поле направлено вкост слоистости (n) и вдоль слоистости (t), имеем:

$$\rho_n = (1-v)\rho_1 + v\rho_2, \quad \rho_t^{-1} = (1-v)\rho_1^{-1} + v\rho_2^{-1},$$

$$\eta_n = \eta_1 \frac{(1-v) + \mu y v H}{(1-v) + \mu v H}, \quad \eta_t = \eta_1 \frac{\mu(1-v) + y v}{\mu(1-v) + v}, \quad (3)$$

где $y = \eta_2 / \eta_1$.

Характеристика электрических свойств среды в целом может быть дана с помощью среднеквадратичных параметров [2]:

$$\rho_m = \sqrt{\rho_n \rho_t}, \quad \eta_m = \sqrt{\eta_n \eta_t}. \quad (4)$$

Для среды с включениями следует учесть, что $\rho_n = \rho_z$ и $\rho_t = \rho_x$, $\eta_n = \eta_z$ и $\eta_t = \eta_x$. Степень анизотропии обычно оценивается по формулам [2]:

$$\lambda = \lambda_p = \sqrt{\rho_n / \rho_t}, \quad \lambda_m = \lambda_\eta = \sqrt{\eta_t / \eta_n}, \quad (5)$$

но в качестве показателя анизотропии по поляризуемости ряд авторов [1,2] предлагают использовать коэффициент Λ , равный

$$\Lambda = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{\lambda_m^2 - 1}{\lambda_m^2 + 1} \quad (6)$$

Поскольку между параметрами Λ и λ_m существует простая аналитическая связь, достаточно исследовать зависимость для λ_m , а о величине Λ можно судить, построив соответствующую шкалу для этой характеристики. Практический интерес представляют два варианта соотношений электрических свойств компонентов моделируемых сред. Примем, что в варианте А: $\rho_2 < \rho_1$ и $\eta_2 > \eta_1$, а в варианте В: $\rho_2 > \rho_1$ и $\eta_2 > \eta_1$. Другие возможные соотношения свойств обозначим вариантами С ($\rho_2 < \rho_1$ и $\eta_2 < \eta_1$) и D ($\rho_2 < \rho_1$ и $\eta_2 < \eta_1$). Однако эти варианты можно получить и из первых двух, выбирая соответствующий тип модели и компонент с долей v .

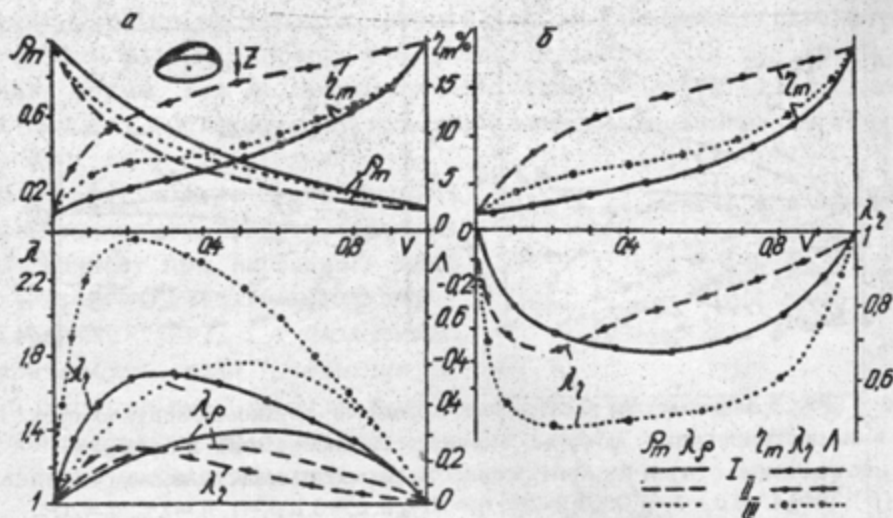


Рис.2 Зависимости электрических свойств двухкомпонентных сред для трех типов структур (I,II,III) от доли v компонента 2 в форме сжатого сфероида с отношением полуосей $a/c = b/c = 5$:
 а - вариант А: $\rho_1=1, \rho_2=0,1, \eta_1=2\%, \eta_2=20\%$; б - вариант В: $\rho_1=0,1, \rho_2=1, \eta_1=2\%, \eta_2=20\%$

На рис.2 - 4 демонстрируется влияние различных факторов на параметры электрических свойств составных геологических тел. Рисунки отражают данные, полученные для плоскости исследований, дающие представление о сечении эллипсоидального компонента. В этой же плоскости лежат и векторы двух ортогональных направлений однородного поля, для которого вычислены продольные и поперечные характеристики свойств и коэффициенты анизотропии.

Так, на рис.2 показано влияние изменения концентрации от 0 до 1 второго компонента для трех типов моделей. Для типов I и II один из компонентов представлен системой сжатых сфероидов с соотношением полуосей $a/c = b/c = 5$. Поскольку показаны данные и для модели типа III, то имеется возможность оценить и влияние размеров сфероидов, которые при слоистой модели имеют предельно большие размеры ($a = b \gg c$). Рассмотрены оба главных варианта соотношений электропроводности и поляризуемости, поскольку они существенно различаются по некоторым зависимостям.

При увеличении доли компонента эллипсоидной формы в случае $v = 0,52$ реализуется структура, в которой эллипсоиды касаются друг друга выпуклыми частями, при $v = 0,74$ возможна предельно плотная упаковка среды равноразмерными эллипсоидами. Дальнейшее насыщение среды этим компонентом допустимо за счет использования эллипсоидов подобной формы, но меньшего размера. Методика вычислений электрических свойств среды путем ее последовательного заполнения разноразмерными включениями предложена А.С.Семеновым [10].

Влияние вытянутости включений в исследуемой плоскости продемонстрировано на рис.3,а на примере структуры в виде системы включений в форме вытянутых сфероидов с различным отношением a/c . Зависимости электрических параметров показаны для всех вариантов соотношений свойств компонентов.

О влиянии протяженности l вытянутых включений в направлении, перпендикулярном плоскости исследований, дает представление рис.3,б. На нем приведены зависимости для структур с включениями, имеющих одинаковое сечение в плоскости исследований, но различную относительную длину l/c . Параметры анизотропии в этом случае определены для плоскости рисунка. И, наконец, влияние контрастности составного тела по электропроводности компонентов на примере слоистой структуры показано на зависимостях рис.4.

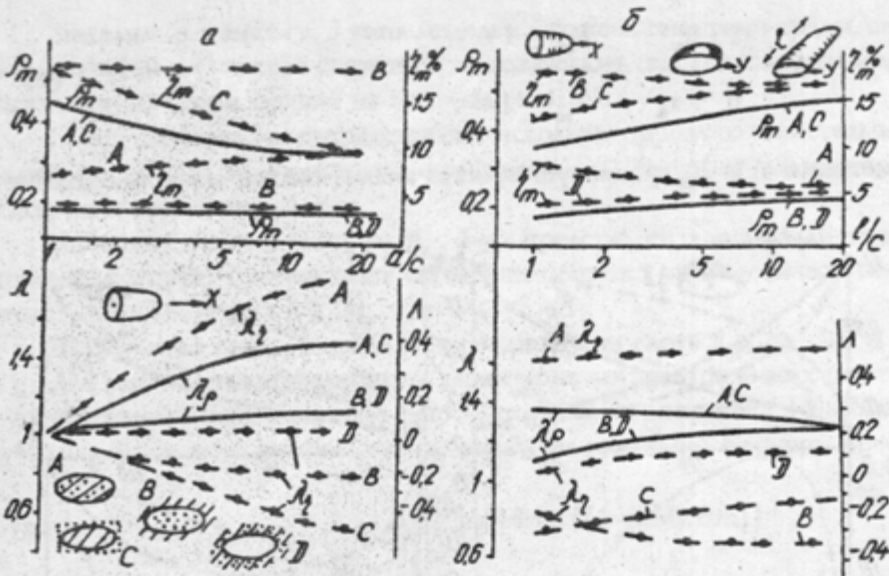


Рис.3 Зависимости электрических свойств двухкомпонентных сред, иллюстрирующие влияние вытянутости включений в плоскости исследований (а) и их протяженности вкrest плоскости исследований (б): $v=0,4$. А: $\rho_1=1, \rho_2=0,1, \eta_1=2\%, \eta_2=20\%$; В: $\rho_1=0,1, \rho_2=1, \eta_1=2\%, \eta_2=20\%$; С: $\rho_1=1, \rho_2=0,1, \eta_1=20\%, \eta_2=2\%$; D: $\rho_1=0,1, \rho_2=1, \eta_1=20\%, \eta_2=2\%$

верхнее положение. Зависимости этих параметров для модели III (слоистая структура) занимают промежуточное положение между кривыми для моделей I и II, но ближе к зависимостям для модели I (линзовидная структура), показанным на рис.2,а и 2,б.

Более резко различаются для разных типов структур зависимости характеристик анизотропии электрических свойств. Для варианта А наиболее высокая степень анизотропии характерна для слоистой структуры, в меньшей мере - для линзовидной структуры, и наиболее слабо проявляется анизотропия при сетчатой структуре.

Максимальные величины λ получаются при приблизительно равной концентрации компонентов. Зависимости же λ_m от v резко асимметричны со смещением максимумов в область, где v находится в пределах $0,15 - 0,35$. Это означает, что уже небольшая концентрация компонента 2 с повышенной поляризуемостью обуславливает заметную анизотропию среды по поляризуемости.

2. Так как электропроводность среды не зависит от поляризуемости, то изменение параметров ρ_m и λ от доли компонентов можно проследить на примере одного варианта соотношений электрических свойств, например для варианта А (рис.2,а). Эти зависимости полностью справедливы и для варианта С.

Для того, чтобы представить зависимости для вариантов В и D, можно снова обратиться к рис.2,а, но предположить, что по шкале абсцисс показаны доли не v , а $1 - v$.

3. При неизменных поляризационных свойствах компонентов соотношения их электропроводностей сказываются весьма слабо. Чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить зависимости η_m от v для двух вариантов соотношений свойств: А и В (см.рис.2,а и 2,б).

4. Наиболее заметное влияние соотношение электропроводности компонентов среды оказывает на величину характеристик анизотропии поляризуемости. Так, если для вариантов А ($\rho_2/\rho_1 < 1$) в интервале $0 < v < 1$ λ_m больше 1 и при изменении v график λ_m имеет максимум (см.рис.2,а), то для варианта В ($\rho_2/\rho_1 > 1$) наблюдается обратная картина: в интервале $0 < v < 1$ параметр λ_m меньше 1, и его график имеет минимум (см.рис.2,б). Напомним, что для обоих вариантов $\eta_2/\eta_1 > 1$.

5. Вытянутость включений в исследуемой плоскости почти не сказывается на рассматриваемые параметры для вариантов соотношений электрических свойств, обозначенных как В и D, общим для которых является низкая электропроводность включений (рис.3,а). Наиболее заметно, что для вариантов А и С с вытянутостью включений усиливается аномальность характеристик анизотропии, причем в отличие от других зависимостей для варианта С с ростом a/c параметр

Анализируя полученные результаты, приходим к следующим выводам:

1. С увеличением доли компонента 2 среднеквадратичные параметры среды ρ_m и η_m плавно изменяются от начальных значений ρ, η , характерных для случая $v=0$, до конечных значений ρ_2, η_2 , при $v=1$ (рис.2,а). Однако для моделей типа II (сетчатая структура) влияние компонента 2 проявляется сильнее и ощутимо уже при небольших его концентрациях. Это приводит к тому, что для модели II кривая ρ_m имеет нижнее, а кривая η_m -

$\lambda_{\text{ан}}$ уменьшается (см. рис. 3, а). Все зависимости выходят на асимптоту практически уже при отношениях $a/c = 20$.

6. При равных сечениях включений в плоскости исследований влияние их других размеров на характеристики электрических свойств среды практически не сказывается (см. рис. 3, б).

7. Контрастность компонентов по электропроводности влияет на все параметры электрических свойств среды, причем степень этого влияния существенно зависит как от соотношения доли компонентов, так и от структуры среды и проявляется сложным образом. Зависимости параметра $\lambda_{\text{ан}}$ от показателя контрастности $\mu = \rho_2/\rho_1$ хорошо исследованы в работе [10] для среды с включениями разнообразной формы. Как видно на примере слоистой структуры, прямая зависимость между этими параметрами проявляется тем отчетливее, чем больше доля второго компонента (рис. 4).

Влияние параметра μ на эффективную поляризуемость слоистой среды наиболее заметно при относительном равенстве доли компонентов и ослабевает при нарушении этого баланса. Как видно из рис. 4, при $v=0,5$ максимальные значения η_m наблюдаются для случая $\mu=1$, а с увеличением различия ρ_2 и ρ_1 поляризуемость среды уменьшается. Коэффициент анизотропии сопротивления среды, равный 1 при $\mu=1$ с увеличением контрастности компонентов по ρ резко возрастает, и это увеличение наиболее заметно для $v=0,5$ (см. рис. 4).

Аномальность характеристики $\lambda_{\text{ан}}$ находится в обратной зависимости от μ , принимая для слоистой структуры предельные значения $y^{1/2}$ ($\mu=0$) и $y^{-1/2}$ ($\mu=\infty$). Показательно, что аномальность $\lambda_{\text{ан}}$ наиболее высока при небольших долях компонента 2.

Углубление представлений о влиянии на электрические свойства двухкомпонентных геологических тел таких факторов, как структура, форма, соотношения свойств и доли компонентов, имеет значение не только для уточнения решений прямой и обратной задачи электротомии при изучении сред, включающих объекты поисков и разведки, но и демонстрации дополнительных возможностей геофизических методов. Например, можно ставить вопрос о целесообразности более широкого проведения картирования горных пород по таким параметрам, как коэффициенты анизотропии электропроводности и поляризуемости, по которым дифференциация геологических сред зачастую более высокая, чем по традиционно изучаемым свойствам. Как показано в работах [1, 7, 8, 10], существует возможность использовать параметр $\lambda_{\text{ан}}$ для классификации аномалий метода вызванной поляризации.

Приведенные данные еще раз убеждают в том, что имеются хорошие предпосылки получать по данным электротомии сведения о структуре и количественных соотношениях компонентов геологических тел и в первую очередь о полезных ископаемых. Например, как показано в [9], совместное применение потенциал- и градиент-зондов в совокупности с приведенными зависимостями обеспечивает возможность количественного решения этой задачи. По всей вероятности, положительные результаты могут быть получены и при изучении объектов, продуктивных на нефть и газ.

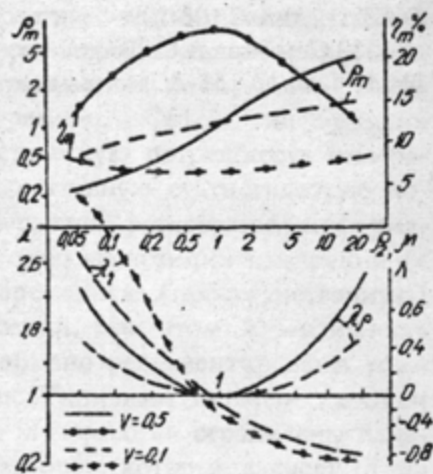


Рис. 4. Пример влияния контрастности компонентов по электропроводности на электрические свойства двухкомпонентной среды со слоистой структурой ($\rho_1 = 1$, $\eta_1 = 2\%$, $\eta_2 = 40\%$)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коврижных П.Н., Редозубов А.А., Сысков С.С. Использование анизотропии поляризуемости для классификации аномалий метода вызванной поляризации // Электротомические исследования на рудных месторождениях / Ин-т геофизики УрО АН СССР. - Свердловск, 1988. С. 18-29. - Рукопись деп. в ВИНТИ, N 387-В88.
2. Матвеев Б.К. Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых. - М.: Недра, 1982. - 375 с.
3. Муратов Р.З. Потенциалы эллипсоида. - М.: Атомиздат, 1978. - 144 с.

4. Овчинников И.К. Теория поля. - М.: Недра, 1979. - 352 с.
5. Омеляненко Б.И. Околорудные гидротермальные изменения пород. - М.: Недра, 1978. - 215 с.
6. Редозубов А.А., Сысков С.С. Методическое руководство по изучению анизотропии поляризуемости горных пород /СГИ. - Свердловск, 1991. - Рукопись деп. в ВИНТИ, N 309-В92.
7. Редозубов А.А. О влиянии анизотропии горных пород на результаты метода вызванной поляризации // Теория и практика индукционных и кондуктивных методов электроразведки. - Свердловск: УрО АН СССР, 1990. - С.53-58.
8. Редозубов А.А., Петряев В.Е. Использование эффективных параметров при анализе результатов петроэлектрических исследований // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа: Межвуз. сб. науч. тр./Перм. ун-т.- Пермь, 1995. - С. 17-22.
9. Сапожников В.М., Петряев В.Е. Предпосылки применения потенциал-зондов в рудных районах // Теория и практика индукционных и кондуктивных методов электроразведки. - Свердловск: УрО АН СССР, 1990. - С.103-109.
10. Семенов А.С. Влияние структуры на удельное сопротивление агрегатов // Геофизика: Материалы ВНИГИ, сб.12.- М.-Л: Госгеолиздат, 1948. - С.43 - 61.