

ОСОБЕННОСТИ АППРОКСИМАЦИОННЫХ ФИЗИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

В. В. Стогний, Т. В. Любимова

Кубанский государственный университет

Поступила в редакцию 13 января 2014 г.

Аннотация: в статье проведен анализ понятия «Аппроксимационная физико-геометрическая модель» (АФГМ). Описаны свойства АФГМ применительно к особенностям инженерно-геологических исследований Краснодарского края для методов вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и зондирования методом переходных процессов (ЗМПП), в том числе с точки зрения задаваемых электромагнитных параметров, алгоритмов решения прямых и обратных задач, эквивалентности получаемых решений.

Ключевые слова: модель, моделирование, аппроксимация, электроразведка, ВЭЗ, ЗМПП.

Abstract: in the article an analysis of «Approximate physical-geometrical model» (APGM) conception is carried out. There are described characteristics of APGM relating to the peculiarities of Krasnodar region's geological-engineering prospecting for vertical electrical (VEZ) and transient electromagnetic soundings' (TEM) methods, including these from point of view of prescribed electromagnetic parameters, of approaches to the forward-inverse algorithm's development, of possessed solution's equivalence.

Key words: model, modeling, approximation, electrical exploration, VEZ, TEM.

Введение

Геофизические методы широко применяются при решении различных инженерно-геологических задач [1, 2], в том числе изыскания для обоснования проектов строительства, выбора трасс и участков под строительство дорог и гидротехнических сооружений; оценки влияния антропогенной нагрузки на геологическую среду, устойчивости бортов карьеров и оползневых склонов. Одним из эффективных методов инженерной геофизики является электроразведка.

Среди методов электроразведки, применяемых для решения инженерно-геологических задач, наиболее широкое распространение получили методы постоянного тока (МПП), в том числе вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и электрическое профилирование (ЭП) в различных модификациях, а также внедряемые в последнее время в практику методы импульсной индуктивной электроразведки, прежде всего зондирования методом переходных процессов (ЗМПП).

Выбор метода и модификации электроразведки для решения той или иной инженерно-геологической задачи в конкретных физико-геологических условиях является важным, но не единственным фактором, определяющим эффективность исследований. Не менее важен выбор моделей как на стадии обоснования

проектов геофизических работ, так и на стадии интерпретации материалов полевых исследований. С этой целью рассмотрим методику выбора аппроксимационных физико-геометрических моделей, учитывающую особенности инженерно-геологических условий Краснодарского края.

Общая характеристика аппроксимационных физико-геометрических моделей

Понятия модели и моделирования широко используются в науке вообще и в прикладной геофизике в частности. Согласно [3], модель может быть физической – искусственно созданной из материалов с заданными свойствами и формой, либо математической, когда при решении дифференциальных уравнений, описывающих исследуемое поле, имеется возможность менять их коэффициенты. В прикладной геофизике применяются и физические, и математические модели, но последние применяются более широко вследствие возможности легко управлять их параметрами. Поэтому основным методом решения прямых и обратных задач прикладной геофизики является математическое моделирование, при этом базовым обычно является понятие «Физико-геологическая модель» (ФГМ).

Несмотря на важность понятия ФГМ, однозначного ее определения нет. В «Словаре терминов разведочной геофизики» [3] дано два ее определения: 1) максимально приближенное к реальным условиям

обобщенное и формализованное представление об основных геологических и геофизических характеристиках изучаемого объекта и вмещающей среды; 2) возмущающее тело, обобщенные размеры, форма и физические свойства которого с той или иной степенью приближения аппроксимируют реальные геологические образования, подлежащие обнаружению и изучению. Во втором определении содержится требование аппроксимации реальных геологических ситуаций, в первом оно также содержится, но в завуалированной форме.

В статье [4] предложено в качестве базовых использовать три типа иерархически соподчиненных моделей: 1) аппроксимационная физико-геометрическая модель (АФГМ); 2) физико-геологическая модель (ФГМ); 3) геолого-геофизическая модель (ГГМ).

Под ФГМ согласно [4, 5] понимается модель изучаемой геологической среды, отдельным частям которой поставлены в соответствие определенные геологические комплексы (рудные, породные, структурно-вещественные, литологические и т. д.) и их физические свойства. Она оптимизирована относительно решаемой геологической задачи и применяемого метода (комплекса методов) исследования, а ГГМ состоит из двух согласованных частей – ФГМ и соответствующих ей геофизических полей, рассчитанных и (или) измеренных. Связующим звеном между ФГМ и ГГМ является АФГМ, предназначенная для аппроксимации реальных геологических ситуаций.

Согласно [6, с. 77], «аппроксимация (от лат. *ap-proximito* – приближаюсь) – замена одних математических (*и физических*. – выделено нами) объектов другими, в том или ином смысле близкими к исходным». В прикладной геофизике, начиная с первых этапов ее развития, всегда существовали особые «теоретические» модели, которые фактически и использовались для аппроксимации, но своего статуса особого класса моделей они так и не получили. Между тем не только теория, но и практика применения методов разведочной геофизики при решении конкретных геологических задач значительно выиграла бы от «узаконивания» такого класса моделей.

В [4, 5] дано следующее определение АФГМ: аппроксимационная физико-геометрическая модель – это теоретическая модель среды (кусочно-однородной, анизотропной и др.), для которой разработаны способы (алгоритмы) решения прямых и обратных задач. Примером частных АФГМ могут служить широко применяемые модели типа «Горизонтально-слоистая среда», «Шар в однородной изотропной среде», «Вертикальный контакт двух сред» и др. Для электрических (электромагнитных) зондирований обычно используется АФГМ «Горизонтально-слоистая среда» (рис. 1). Рассмотрим ее свойства применительно к методам вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и зондирования становлением в ближней зоне (ЗСБ), которое в своей мало-глубинной модификации носит название зондирования методом переходных процессов (ЗМПП).

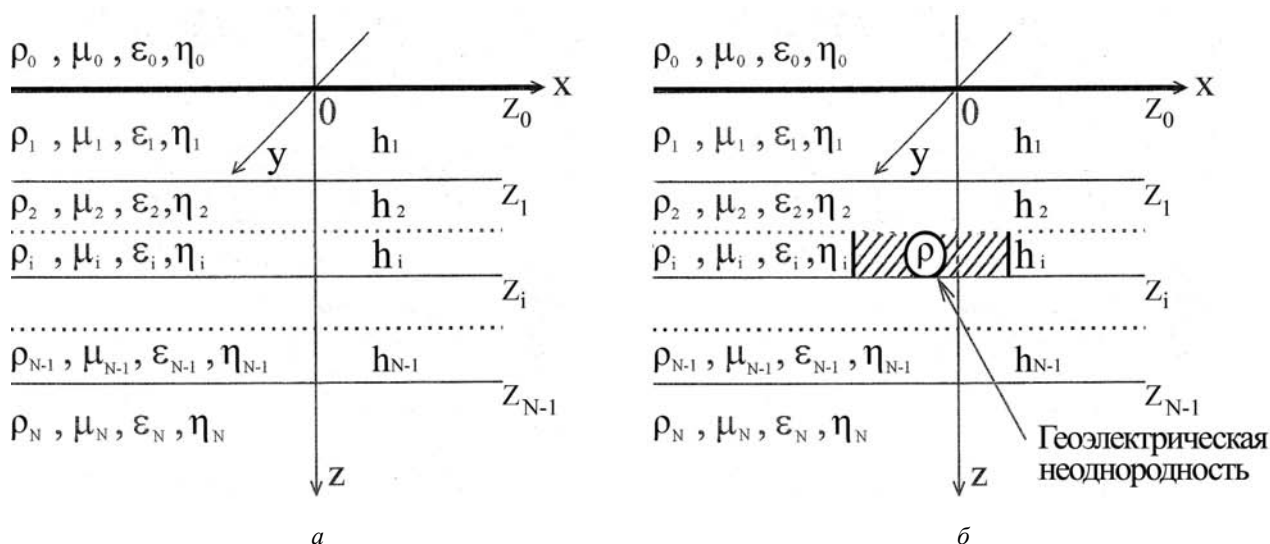


Рис. 1. Типы АФГМ: а – горизонтально-слоистая среда; б – горизонтально-слоистая среда с трехмерной геоэлектрической неоднородностью. Параметры моделей: $\rho_i, \mu_i, \epsilon_i, \eta_i$ – электромагнитные параметры слоев, соответственное удельное электрическое сопротивление (УЭС), магнитная проницаемость, диэлектрическая проницаемость, вызванная поляризуемостью (индекс i – номер слоя); h_i – мощности слоев; z_i – глубины залегания подошвы слоев. Для б: ρ – УЭС геоэлектрической неоднородности в i -м слое

Особенности аппроксимационных физико-геометрических моделей

Общей особенностью при решении инженерно-геологических задач является, как правило, небольшая глубинность исследований (обычно не превышает нескольких десятков метров) при повышенных требованиях к детальности и точности исследований. Региональные особенности, которые необходимо учитывать при обосновании моделей любого уровня, очень разнообразны. Так, например, для Черноморского побережья Краснодарского края характерны частая перемежаемость петрофизических комплексов, иногда высококонтрастных по физическим свойствам, верхней части разреза (ВЧР) и отчетливо выраженная анизотропия флишевых толщ, которые при инженерно-геофизических исследованиях обычно выступают как комплексы основания [7].

Первый вопрос, который возникает при выборе и обосновании АФГМ, заключается в выборе электромагнитных параметров геоэлектрического разреза.

Токопроводящие свойства геологической среды на постоянном электрическом токе, на котором обычно выполняются исследования ВЭЗ, как известно [2], определяются удельным электрическим сопротивлением ρ исходя из закона Ома в дифференциальной форме:

$$\bar{j}_{np} = \frac{1}{\rho} \bar{E}, \quad (1)$$

где \bar{j}_{np} – плотность тока проводимости в исследуемой точке геологической среды; ρ – удельное электрическое сопротивление в данной точке среды; \bar{E} – напряженность электрического поля в данной точке среды.

Для инженерно-геофизических исследований Краснодарского края характерны геоэлектрические разрезы осадочных отложений со слабой и средней поляризуемостью η , образующейся в средах с ионной проводимостью, при этом для довольно широко распространенных глинистых разностей пород данный параметр может достигать 6–10 %, что дает основание рассматривать его как один из информативных. Плотность тока в каждой точке среды будет определяться разностью токов проводимости \bar{j}_{np} и токов вызванной поляризации \bar{j}_{en} (ВП):

$$\bar{j} = \bar{j}_{np} - \bar{j}_{en} = \frac{1}{\rho} (\bar{E} - \eta \bar{E}) = \frac{1}{\rho^*}, \quad (2)$$

где ρ^* определяется через параметры УЭС ρ и поляризуемости η :

$$\rho^* = \frac{\rho}{1 - \eta}. \quad (3)$$

В каждом конкретном случае необходим анализ параметров ρ_i и η_i типичной физико-геологической модели участка (объекта) исследований, на основе

которого можно делать заключение о возможности и необходимости применения метода (модификации), позволяющего учитывать наряду с удельным электрическим сопротивлением ρ и параметр поляризуемости η , в частности метода вызванной поляризации в модификации ВЭЗ (ВП-ВЭЗ).

В классической электродинамической модели ЗСБ (ЗМПП) параметром, определяющим электродинамический процесс (при его возбуждении электрическим либо магнитным диполем, расположенным на поверхности проводящей среды), является УЭС ρ слоев горизонтально-слоистого разреза (при магнитной проницаемости, равной магнитной проницаемости вакуума $\mu = \mu_0$). Вместе с тем на результаты исследований ЗСБ (ЗМПП) влияет и параметр поляризуемости η , вызывающий процессы индукционноразванной поляризации (ВПИ) [8]. Эффекты индукции и ВПИ имеют разный знак, при их суперпозиции часто наблюдаются осложненные переходные процессы, иногда с двойной сменой знака. При использовании «классических» способов обработки и интерпретации материалов ЗСБ (ЗМПП) стараются уменьшить влияние ВПИ на переходный процесс путем изменения размеров генераторного и измерительного контуров, а также использованием разнесенных установок [8]. Если данные методические приемы оказываются неэффективными, используют алгоритмы обработки и интерпретации материалов ЗСБ (ЗМПП), учитывающих влияние ВПИ. При этом для математического описания процессов ВП наиболее часто используется формула Cole-Cole, определяющая электродинамическую модель среды с комплексной частотно-зависимой электропроводностью $\sigma(\omega)$:

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \left[1 + \frac{\eta(i\omega\tau)^C}{1 + (i\omega\tau)^C (1 - \eta)} \right], \quad (4)$$

где $i = \sqrt{-1}$; ω – круговая частота; σ_0 – удельная электропроводность в отсутствие поляризации ($\sigma_0 = 1/\rho$); η – поляризуемость среды ($0 < \eta < 1$); τ – постоянная времени поляризационного процесса; C – показатель степени, определяющий ширину экспоненциального спектра переходной характеристики ВП.

При учете эффекта ВП на основе формулы Cole-Cole к параметрам отдельных слоев (ρ_i и h_i) АФГМ «Горизонтально-слоистая среда» добавляются поляризуемость η_i , постоянная времени поляризации τ_i и показатель степени C_i , определяющий ширину экспоненциального спектра переходной характеристики ВП. Данная методика реализована в программах «Выбор-ЗС» и «Inv_QQ_IP» [8]. Однако необходимо иметь в виду, что инверсия переходных процессов с учетом ВПИ при множестве параметров, характеризующих геоэлектрические процессы, может

приводить к широкой эквивалентности, в связи с этим при отсутствии априорной информации на основании только одной переходной характеристики не удается однозначно восстановить параметры даже такой простой АФГМ, как «Однородное изотропное полупространство» (с учетом его проводимости и поляризуемости). Кроме того, на форму кривой переходной характеристики могут влиять также магнитные параметры разреза, в их числе магнитная проницаемость μ_i отдельных слоев разреза (при их аномальных значениях, определяемых наличием ферромагнитных минералов), а также магнитная вязкость, обусловленная релаксацией намагниченности ультрадисперсионных частиц магнитных минералов (магнетита, титаномагнетита, пирротина и др.) в начальные стадии включения (выключения) тока. Магнитные моменты этих частиц, ориентированные в возбуждающем поле, после его выключения релаксируют во времени к хаотическому состоянию по логарифмическому закону. Свойство магнитной вязкости обнаружено у туфов, обожженных глин и некоторых типов почв в Австралии. Хотя метод ЗСБ (ЗМПП) относится к низкочастотным, при определенных условиях может проявляться и диэлектрическая проницаемость ϵ , например для высококонтрастных по УЭС слоистых сред, характерных для некоторых типов разрезов криолитозоны.

Таким образом, выбор информационных параметров, определяющих АФГМ «Горизонтально-слоистая среда», осуществляется с учетом особенностей типичных ФГМ исследуемого участка (объекта).

Рассмотрим особенности алгоритмов, положенных в основу решения прямых и обратных задач на основе применения АФГМ «Горизонтально-слоистая среда» для методов ВЭЗ и ЗСБ (при их использовании в «классических» вариантах).

Большинство современных алгоритмов расчета кривых $\rho_k(r)$ ВЭЗ на ЭВМ основано на вычислении интегралов вида [2]

$$\rho_k(r) = \rho_1 \left[1 + r^2 \int_0^\infty (R_1(m) - 1) m J_1(mr) dm \right], \quad (5)$$

где $r = AB/2$ – разнос установки зондирования; $J_1(mr)$ – функция Бесселя от действительного аргумента; m – переменная интегрирования, имеющая смысл пространственной частоты; $R_1(m)$ – пространственная характеристика горизонтально-слоистой среды, имеющая смысл приведенного импеданса и включающая в себя сведения об удельных электрических сопротивлениях ρ_i и мощностях h_i слоев геоэлектрического разреза:

$$R_1(m) = th \left\{ mh_1 + arcth \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) th \left[mh_2 + arcth \left(\frac{\rho_3}{\rho_2} \right) R_3(m) \right] \right\}. \quad (6)$$

Функция $R_1(m)$ содержит сведения о свойствах разреза (УЭС ρ_i и мощности h_i отдельных слоев) и

не зависит от разноса, а функция $J_1(mr)$ зависит от разноса и не зависит от свойств среды. Построение алгоритмов расчета $\rho_k(r)$ осуществляется с вычислением постоянной части, зависящей от фиксированных разносов, и переменной части, зависящей от параметров геоэлектрического разреза, при реализации трех подходов: интерполяционного, аппроксимационного и линейной фильтрации. Очевидно, что эффективность того или иного алгоритма зависит и от геоэлектрических особенностей АФГМ, что необходимо учитывать при выборе алгоритма и его применении.

Построение алгоритмов решения прямой и обратной задач ЗСБ (ЗМПП) осуществляется с учетом особенностей АФГМ «Горизонтально-слоистая среда». Так, например, в программе Подбор [9] осуществлен синтез двух подходов: первого, известного как «решение в частотной области», и второго, известного как «решение во временной области», разработанного А. Н. Тихоновым [10], реализуемого при условии непроводящего (изолирующего) основания. Каждый из этих подходов лучше работает при соответствующих ограничениях (в низкочастотной или высокочастотной части или, соответственно, на больших и малых временах), а синтез решений позволяет расширить область устойчивого решения. Вместе с тем необходимо иметь в виду, что при недостаточном диапазоне регистрации вид кривой становления может привести к неверным заключениям о нижней части разреза (проводящее или непроводящее основание).

АФГМ «Горизонтально-слоистая среда», представляющая собой одномерную (1D) кусочно-однородную среду $\sigma_0(z)$, является основной интерпретационной моделью в геоэлектромагнитных исследованиях, в особенности в методах становления электромагнитного поля с контролируемым источником (ЗСБ и ЗМПП). Так как исследуемые разрезы, как правило, сложены немагнитными породами, магнитная проницаемость обычно принимается равной проницаемости вакуума. При реализации частотного подхода формально можно записать решение с учетом диэлектрической проницаемости каждого слоя, однако численная реализация такого представления в режиме становления поля не освоена.

Реальная геологическая среда, как правило, является трехмерной, что накладывает определенные ограничения на применение АФГМ «Горизонтально-слоистая среда» (см. рис. 1а) и требует в каждом конкретном случае специального анализа. В задачах неустановившегося электромагнитного поля разработан подход, позволяющий рассчитывать поле трехмерных геоэлектрических неоднородностей (см. рис. 1б), что достигается введением в первое уравнение Максвелла дополнительного стороннего тока,

обусловленного неоднородностью. При этом эффект одномерной $\sigma_0(z)$ (или двумерной) кусочно-однородной среды рассчитывается, например, алгоритмом во временной области (по [10]) исходной референц-модели АФГМ «Горизонтально-слоистая среда» и вычитается из суммарного поля, что позволяет получить эффект трехмерной неоднородности. Такой подход реализован в методе площадных зондирований становлением с закрепленным источником (ПЗС-ЗИ) и показал свою высокую эффективность при решении задач инженерной, рудной и нефтяной геологии [11]. Пример аномалий ЭДС неустановившегося электромагнитного поля трехмерной геоэлектрической неоднородности на разных временах регистрации приведен на рис. 2.

Одной из проблем, стоящих перед электроразведкой, является проблема изучения анизотропных сред. Примером таких сред могут быть широко рас-

пространенные на Черноморском побережье Краснодарского края флишевые толщи. Электрическая анизотропия заключается в том, что электрическое сопротивление в разных направлениях различно. При трехосной анизотропии УЭС различается по трем осям (x, y, z) и может записываться как тензор. Обычно рассматривают случай двуслойной анизотропии, когда УЭС имеет различные значения по слоистости (ρ_l) и поперек слоистости (ρ_n), при этом коэффициент анизотропии λ ($\lambda > 1, \rho_n > \rho_l$) определяется по формуле

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_n}} \quad (7)$$

Электрический потенциал U в точке M , создаваемый точечным источником A на поверхности одно-родного анизотропного полупространства (рис. 3а), определяется формулой [2]

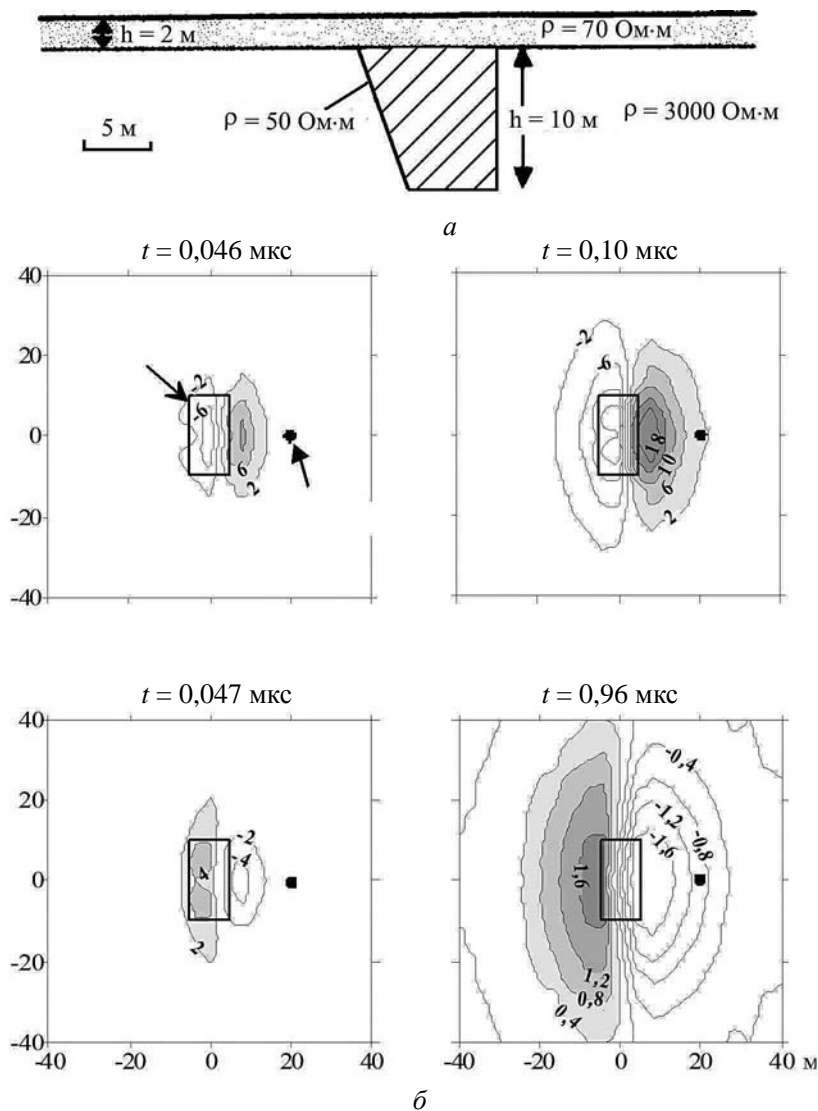


Рис. 2. Физико-геологическая модель (ФГМ) объекта исследования (а) и соответствующее ей распределение аномальной составляющей ЭДС ПЗС-ЗИ на поверхности модели при различных временах наблюдения (б) по [10]. Параметры установки: генераторный контур 3×3 м; измерительный контур 1×1 м; ток $I = 1$ А

$$U_{AM} = \frac{I\rho_l\sqrt{\rho_n}}{2\pi \cdot r_{AM}\sqrt{\rho_l(\cos^2\beta + \cos^2\alpha \cdot \sin^2\beta) + \rho_n \cdot \sin^2\alpha \cdot \sin^2\beta}}, \quad (8)$$

где I – ток, стекающий с точечного электрода, расположенного в точке A ; r_{AM} – расстояние между точками A и M ; β – угол между прямой, соединяющей точки A и M , и направлением простирания пород слоистой толщи; ρ_n , ρ_l – УЭС однородного изотропного полупространства соответственно вкрест и вдоль слоистости; α – угол падения слоистой толщи.

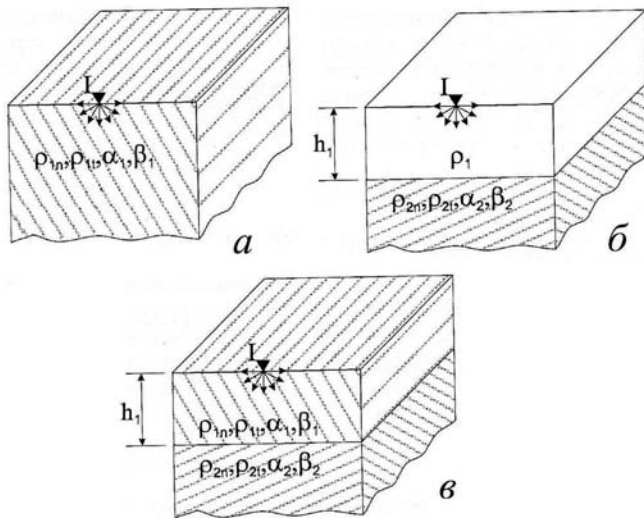


Рис. 3. Типы АФГМ анизотропных сред: *а* – однородное анизотропное полупространство; *б* – двухслойная среда с однородным анизотропным основанием; *в* – двухслойная среда с однородными анизотропными слоями

АФГМ «Однородное изотропное полупространство» (рис. 3а) исследуется на основе применения круговых электрических профилирований (КрЭП), а слоистые модели – на основе применения круговых ВЭЗ (КрВЭЗ).

Для АФГМ «Двухслойная среда с однородным анизотропным основанием» (рис. 3б) (в более общем случае – АФГМ «Горизонтально-слоистая среда с однородным анизотропным основанием»), АФГМ «Двухслойная однородная анизотропная среда» (рис. 3в) (в более общем случае – АФГМ «Горизонтально-слоистая среда с однородными анизотропными слоями») решение прямой задачи на поверхности слоистой среды обычно строится на основе использования 2D-трансформации Фурье (2DFT) в плоскости границ с произвольной ориентацией осей анизотропии в каждом слое. Сведение расчетных формул к виду интегралов Ханкеля позволяет применить для их расчета метод линейной фильтрации. В современной электроразведке разработаны алгоритмы решения прямых и обратных задач для широкого класса АФГМ «Горизонтально-слоистая среда» с возможной одно-

родной анизотропией в каждом из слоев для установок различных типов, а также модели анизотропных сред на фоне неоднородности в виде наклонного контакта, реализованные в различных программах (Anis_1L, Anis_2L, AnisCont, AnisDrow, AnisHarm и др.) [13], что расширяет методические возможности ее применения.

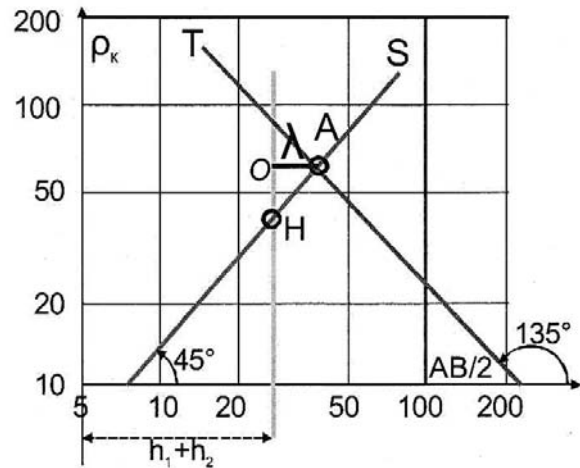


Рис. 4. Треугольник анизотропии АФГМ «Горизонтально-слоистая среда»

На стадии интерпретации материалов ВЭЗ на основе АФГМ «Горизонтально-слоистая среда» главная трудность заключается в учете возможных пределов эквивалентности решений и получении решения, наиболее приемлемого с точки зрения практики. При этом недоучет реальных свойств АФГМ «Горизонтально-слоистая среда», особенно при больших параметрах макроанизотропии λ (для горизонтально-слоистой среды с непроводящим основанием $\lambda = \sqrt{T \cdot S/H}$, где T и S – соответственно поперечное сопротивление и продольная проводимость горизонтально-слоистой среды, H – ее мощность), может приводить к большим ошибкам в интерпретации (вычисленные параметры разрезов могут отличаться от истинных в несколько раз). Известный в теории электроразведки треугольник анизотропии АФГМ «Горизонтально-слоистая среда» приведен на рис. 4. Задача обычно решается на основе привлечения дополнительной априорной информации об особенностях исследуемых разрезов, известных, например, по данным бурения и электрического каротажа скважин.

Заключение

АФГМ представляет собой важный класс моделей, являющихся связующим звеном между ФГМ и

ГГМ, предназначенным для аппроксимации реальных геологических ситуаций. По своей сути АФГМ является рабочим инструментом моделирования, а потому должна быть ориентирована на решение определенных задач в конкретных физико-геологических условиях. Класс АФГМ постоянно пополняется новыми моделями, в том числе анизотропных и кусочно-анизотропных сред, горизонтально-слоистых сред с трехмерными геоэлектрическими неоднородностями и др., что расширяет методические возможности их применения.

При выборе АФГМ для решения инженерно-геологических задач тем или иным методом (модификацией) электроразведки в условиях Краснодарского края учитываются особенности модели, в их числе ее геометрические характеристики, задаваемые электромагнитные параметры, влияющие на результаты исследований, особенности используемых алгоритмов решения прямых и обратных задач, включая анизотропные и кусочно-анизотропные среды, которые должны быть адаптированы под изучаемые геоэлектрические разрезы, эквивалентности получаемых решений.

Совершенствование методологии моделирования является одним из перспективных направлений повышения эффективности инженерно-геофизических исследований как по отношению к традиционным методам, например ВЭЗ, так и внедряемым в практику исследований новым методам, например методам неустановившихся электромагнитных полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Огильви А. А.* Основы инженерной геофизики : учеб. для вузов / А. А. Огильви ; под ред. В. А. Богословского. – М. : Недра, 1990.

Кубанский государственный университет

Стогний В. В., доктор геолого-минералогических наук, профессор

E-mail: stogny@newmail.ru

Тел.: (861) 233-52-24

Любимова Т. В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент

E-mail: TV-Luy@yandex.ru

Тел.: 8-918-415-63-44

2. *Электроразведка : справочник геофизика : в 2 кн. / под ред. В. К. Хмелевского и В. М. Бондаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Книга первая. – М. : Недра, 1989 ; Книга вторая. – М. : Недра, 1989.*

3. *Словарь терминов разведочной геофизики / под ред. А. И. Богданова. – М. : Недра, 1989.*

4. *Стогний В. В.* Типы моделей в разведочной геофизике : теория и практика / В. В. Стогний, Вас. В. Стогний // *Философский и науковедческий аспекты развития естествознания : материалы Респ. науч. конф. – Якутск : ЯФ изд-ва СО РАН, 2002. – С. 176–182.*

5. *Стогний В. В.* К понятию модели в разведочной геофизике / В. В. Стогний, Вас. В. Стогний // *Геофизический вестник. – 2010. – № 5. – С. 11–13.*

6. *Математический энциклопедический словарь / гл. ред. Ю. В. Прохоров. – М. : Советская энциклопедия, 1988.*

7. *Любимова Т. В.* Инженерно-геологические условия Черноморского побережья Северо-Западного Кавказа / Т. В. Любимова, Н. А. Бондаренко, Т. Н. Куропаткина. – Краснодар : Просвещение-Юг, 2009.

8. *Стогний В. В.* Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов / В. В. Стогний, Ю. В. Коротков. – Новосибирск : Малотиражная типография 2D, 2010.

9. *Могилатов В. С.* Математическое обеспечение электроразведки ЗСБ. Система «Подбор» / В. С. Могилатов, А. К. Захаркин, А. В. Злобинский. – Новосибирск : Наука, 2006.

10. *Тихонов А. Н.* О становлении электрического тока в неоднородной слоистой среде / А. Н. Тихонов // *Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1950. – Т. XIV, № 3. – С. 199–222.*

11. *Стогний В. В.* Рудная электроразведка. Электрические зондирования : учеб. пособие / В. В. Стогний, Вас. В. Стогний. – Якутск : Изд-во ЯГУ, 2004.

12. *Стогний Вас. В.* Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны Центральной Якутии / Вас. В. Стогний. – Якутск : ЯФ изд-ва СО РАН, 2003.

13. *Бобачев А. А.* Изучение анизотропии в методе сопротивлений : учеб. пособие / А. А. Бобачев, Д. К. Большаков, И. Н. Модин [и др.]. М. : Изд-во МГУ, 2012.

Kuban State University

Stogny V. V., Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor

E-mail: stogny@newmail.ru

Тел.: (861) 233-52-24

Lyubimova T. V., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor

E-mail: TV-Luy@yandex.ru

Тел.: 8-918-415-63-44