

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ДЛЯ ГРАДИЕНТНО-СЛОИСТЫХ СРЕД*

Л. Х. Ангархаева, Ю. Б. Башкуев, В. К. Балханов, В. Б. Хаптанов, М. Г. Дембелов

Институт физического материаловедения СО РАН
Россия, Улан-Удэ, ул. М. Сахьяновой, 6
E-mail: ludang@rambler.ru

Представлено описание программного обеспечения решения прямых и обратных задач радиоимпедансного зондирования. Приведены примеры интерпретации радиоимпедансных зондирований для различных моделей среды Байкальского региона.

Ключевые слова: радиоимпедансное зондирование, численные методы, интерпретация.

DIRECT AND INVERSE PROBLEMS OF GEOPHYSIC ELECTRODYNAMICS FOR GRADIENT-LAYERED MEDIA

L. Kh. Angarkhaeva, Yu. B. Bashkuev, V. K. Balkhanov, V. B. Khaptanov, M. G. Dembelov

Institute of Physical Materials Science of the SB RAS
Sakh'yanova str., 6, Ulan-Ude, Russia
E-mail: ludang@rambler.ru

The description of program software for decision of direct and inverse problems of radioimpedance sounding is presented. Results of interpretation of radioimpedance soundings for different models of medium of Baikal region are given.

Keywords: radioimpedance sounding, numeric methods, interpretation.

Введение

Верхняя часть земной коры в Байкальском регионе характеризуется сложным геоэлектрическим строением. Для получения информации о ее строении и физических свойствах используется метод радиоимпедансного зондирования и профилирования [1]. При интерпретации данных возникла необходимость разработки численных методов, алгоритмов и программ решения прямых и обратных задач радиоинтроскопии горного массива на вертикально-неоднородных (дискретно-слоистых и градиентных) средах. Программное обеспечение, разработанное для этих целей, включает: пакет программ «Импеданс» [2] для решения прямой и обратной задач распространения электромагнитной волны в слоистой среде, средства интерпретации данных радиоимпедансного профилирования, графические инструменты двух-, трехслойной интерпретации [3], программы расчета импеданса с учетом частотной дисперсии электрических параметров среды, статистических расчетов импеданса в заданном диапазоне частот, программы для моделирования электромагнитных полей в градиентных средах [4,5].

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №12-02-98002, №12-01-98010 №12-02-98006 и интеграционного проекта СО РАН № 11.

Программы решения задач радиоимпедансного зондирования

Пакет прикладных программ «Импеданс» [2] предназначен для расчета поверхностного импеданса по известному геоэлектрическому разрезу (прямая задача) и восстановления параметров геоэлектрического разреза слоистой среды (диэлектрических проницаемостей ε_i , удельных проводимостей σ_i или сопротивлений ρ_i , толщин h_i) по измерениям ее импеданса (обратная задача). Методика расчетов прямой задачи основана на понятии приведенного поверхностного импеданса плоской волны на поверхности горизонтально-слоистой структуры, с помощью которого можно учесть влияние подстилающей среды на распространение радиоволн [1]: $\delta = E_\tau / (H_\tau Z_0)$, где E_τ , H_τ – горизонтальные взаимно перпендикулярные компоненты электрического и магнитного полей на границе раздела «воздух-земля»; $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} = 377$ Ом – характеристический импеданс свободного пространства. Приведенные в [1] рекуррентные соотношения позволяют проводить расчеты частотных зависимостей поверхностного импеданса многослойных сред.

В основе численного алгоритма решения обратной задачи лежит метод регуляризации, состоящий в минимизации сглаживающего функционала А.Н. Тихонова:

$$M_\alpha[g] = I[g] + \alpha \Omega[g], \quad \text{где} \quad I[g] = \sum_{l=1}^L |\delta_l - \delta_l^0|^2 - \text{функционал невязки};$$

$$\Omega[g] = \sum_{n=1}^N p_n |\varepsilon_n - \varepsilon_n^0|^2 + \sum_{n=1}^N q_n |\sigma_n - \sigma_n^0|^2 + \sum_{n=1}^{N-1} r_n |h_n - h_n^0|^2 - \text{стабилизирующий функционал}; \quad g = (\varepsilon, \sigma, h)$$

– параметры многослойной полупроводящей среды; α – параметр регуляризации; $(\varepsilon^0, \sigma^0, h^0)$ – гипотетическое распределение параметров разреза; p_n, q_n, r_n – веса соответствующих параметров; δ_l^0 – экспериментальные значения импеданса на l -ой частоте. Минимизация рассматриваемого функционала производилась с помощью метода Ньютона-Канторовича (метода линеаризации). Критерием выбора геоэлектрического разреза служит минимум среднеквадратического отклонения экспериментальных значений импеданса от рассчитанных для модели среды.

В качестве примера на рис. 1 представлены результаты интерпретации радиоимпедансных зондирований в диапазоне 22,2-279 кГц на профиле № 2 «Хошун-Узур», пересекающем разломную зону. Сплошные линии – зависимости для восстановленного разреза, точки – экспериментальные значения импеданса. Получены существенно различные геоэлектрические разрезы для гранитоидов ПК7 (рис. 1а) и зоны перехода от вулканитов к гранитам ПК3 (рис. 1б).

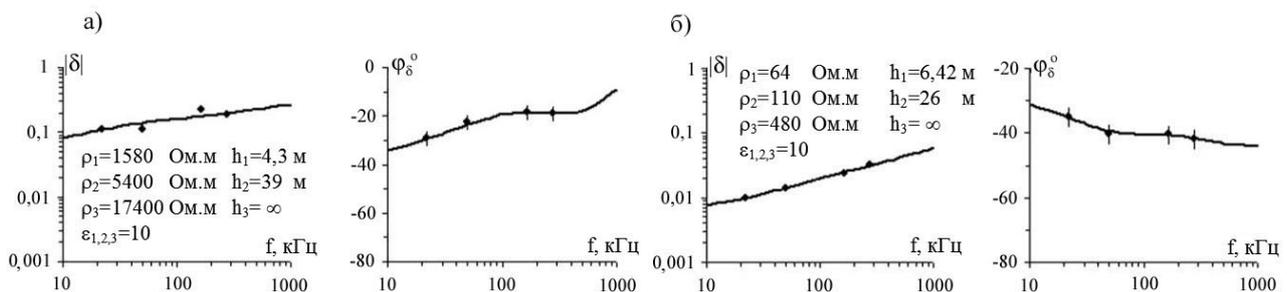


Рис. 1. Геоэлектрический разрез гранитоидов (а) и зоны перехода от вулканитов к гранитам (б) на профиле «Хошун-Узур» № 2, пикет 7 (а), пикет 3 (б). Измерения импеданса 09.06.2012.

Определены геоэлектрические разрезы соленых озер и высокопроводящих солончаков: соленое озеро «Гуджирное» - в Заиграевском районе Республики Бурятия, озеро с уникальными лечебными глинами «Киран» - в Кяхтинском районе (рис. 2) и оз. «Белое» - в

Джидинском районе. Установлена высокая разрешающая способность метода РЭМЗ в СДВ-ДВ диапазонах при определении параметров верхних слоев высокопроводящего геоэлектрического разреза. Показано, что тонкий слой высохшего солончака толщиной до 0.5 м смещает фазу импеданса в сильно индуктивную область. Это свойство может быть использовано при объяснении быстрых вариаций ДВ-СВ поля над солончаковыми равнинами. Использование метода радиоимпедансного зондирования и профилирования позволяет оценить запасы лечебных грязей оз. Киран.

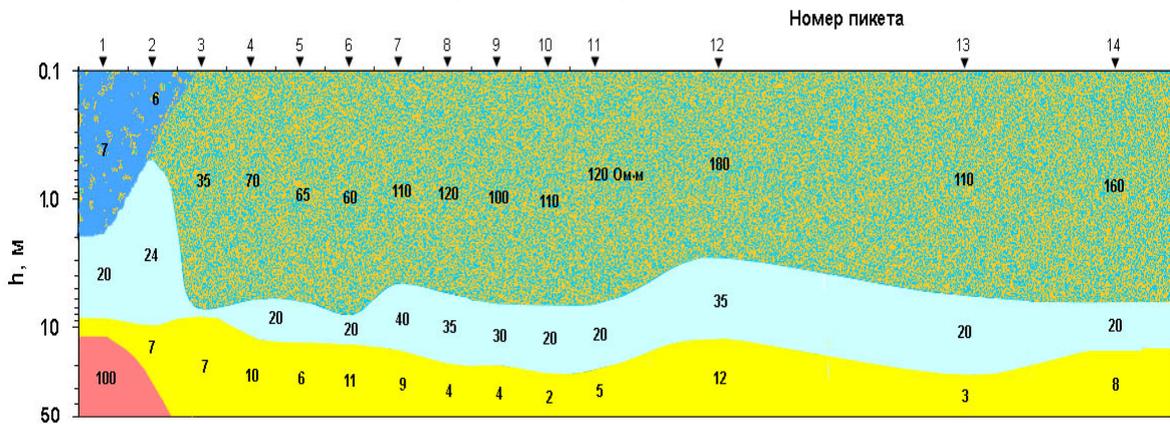


Рис. 2. Геоэлектрический разрез северного побережья озера Киран. Пикет 1 находится на расстоянии 15 м от уреза воды на северном берегу озера, пикет 14 - на расстоянии 410 м от 1-го.

Программа графической интерпретации радиоимпедансных зондирований [3] реализует графический вариант метода подбора, сущность которого заключается в том, что подбором параметров минимизируется разность между экспериментальной и теоретической кривыми. Программа позволяет более точно определиться с моделью среды, выявить эквивалентные разрезы, получить начальные параметры разреза, которые затем можно уточнить методом регуляризации (пакет «Импеданс»). Программа обладает рядом преимуществ: интерактивный режим, наглядность, быстрота обработки, легко учитывается априорная информация о строении разреза. Эта программа может быть полезна в учебном процессе для обучения специалистов в области радиофизики и геофизики. При ее применении интерпретатор наглядно видит физическую сущность электромагнитных процессов, происходящих в дискретно-слоистых средах, получает навыки не только количественной, но и качественной интерпретации.

Для решения прямой задачи распространения электромагнитной волны в неоднородной градиентной полупроводящей среде разработан численный метод, алгоритм и создана программа расчета импеданса градиентных полупроводящих сред с учетом зависимости от вертикальной координаты z проводимости σ и диэлектрической проницаемости ε [4]. При расчете приведенного поверхностного импеданса использовалось, вытекающее из уравнений Максвелла, уравнение для магнитной индукции B_z :

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} - \frac{1}{\varepsilon + \frac{i\sigma}{\varepsilon_0 \omega}} \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon + \frac{i\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \right) \frac{\partial B_z}{\partial z} + \frac{\omega^2}{c^2} \left(\varepsilon + \frac{i\sigma}{\varepsilon_0 \omega} - \frac{c^2 \beta^2}{\omega^2} \right) B_z = 0;$$

где σ и ε зависят от z ; ε_0 - диэлектрическая постоянная, c - скорость света в вакууме, ω - круговая частота, β - параметр, определяемый из граничных условий. Применение уравнения для магнитной индукции по сравнению с аналогичным уравнением для электрического поля связано с рядом удобств: используется одно уравнение, содержащее только первые производные от σ и ε . В результате дальнейших преобразований приходим к решению самосогласованной задачи, в которой определяемая в конце расчетов величина входит в виде

начальных условий в само решаемое уравнение. Программа реализована для следующих градиентных сред: а) линейной с зависимостью удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости $f(z) = f_0(1 + \alpha z)$; б) параболической $f(z) = f_0(1 + \alpha z)^2$; в) экспоненциальной $f(z) = f_0 \exp(\alpha z)$; г) периодической $f(z) = f_0(1 + \alpha \sin kz)$. Также создана программа расчета поверхностного импеданса градиентной среды с учетом магнитной проницаемости [5].

Заключение

Разработаны численные методы, алгоритмы и программы решения прямых и обратных задач радиоимпедансного зондирования. Созданное программное обеспечение позволяет выполнять обработку, анализ и интерпретацию экспериментальных данных, проводить модельные расчеты. Представлены результаты интерпретации реальных зондирований неоднородных сред Байкальского региона в широком частотном диапазоне.

Библиографические ссылки

1. Башкуев Ю. Б. Электрические свойства природных слоистых сред. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. 207 с.
2. Ангархаева Л. Х. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610893. Пакет программ «Импеданс» для решения задач радиоимпедансного зондирования. М.: РОСПАТЕНТ, 06.06.2002.
3. Ангархаева Л.Х. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610089. Графическая интерпретация радиоимпедансных зондирований. М.: РОСПАТЕНТ, 10.01.2006.
4. Ангархаева Л.Х., Балханов В.К. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2008610235. Импеданс градиентных полупроводящих сред. М.: РОСПАТЕНТ, 09.01.2008.
5. Ангархаева Л. Х., Балханов В. К. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012612509. Расчет поверхностного импеданса градиентной среды с учетом магнитной проницаемости. М.: РОСПАТЕНТ. 07.03.2012.

References

1. Bashkuev Yu. B. *Elektricheskie svoystva prirodnykh sloistykh sred*, Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 1996, 207 p.
2. Angarkhaeva L. Kh. *Paket programm "Impedans" dlya resheniya zadach radioimpedansnogo zondirovaniya*, Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programmy dlya EVM № 2002610893, Moscow, Rospatent, 06.06.2002.
3. Angarkhaeva L. Kh. *Graficheskaya interpretatsiya radioimpedansnykh zondirovaniy*, Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programmy dlya EVM № 2006610089, Moscow, Rospatent, 10.01.2006.
4. Angarkhaeva L. Kh., Balkhanov V. K. *Impedans gradientnykh poluprovodyashchikh sred*, Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programmy dlya EVM № 2008610235, Moscow, Rospatent, 09.01.2008.
5. Angarkhaeva L. Kh., Balkhanov V. K. *Raschet poverkhnostnogo impedansa gradientnoy sredy s uchetom magnitnoy pronitsaemosti*, Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programmy dlya EVM № 2012612509, Moscow, Rospatent, 07.03.2012.