

УДК 550.837

## МАГНИТОТЕЛЛУРИКА И РАДИОВОЛНОВЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2010 г. В. К. Хмелевской, Б. П. Петрухин, П. Ю. Пушкарев

*Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова*

*E-mail: pavel-pushkarev@list.ru*

Поступила в редакцию 26.02.2010 г.

Плоские гармонические электромагнитные поля рассматриваются в теории магнитотеллурических методов в диапазоне частот от 0.0001 Гц до 20 кГц. Эти поля имеют естественную природу и несут информацию о глубинах от десятков метров до 100 км и более. Магнитотеллурические зондирования, использующие поля радиостанций, расширяют диапазон частот почти до 1 МГц и позволяют изучать глубины от первых метров. Методом, дополняющим электроразведку на плоских волнах в области еще более высоких частот (до 100 МГц), является радиоволновое интерференционное зондирование (РВИЗ). При этом токи проводимости и смещения становятся сопоставимы, что позволяет различать объекты как по электропроводности, так и по диэлектрической проницаемости. Для двухслойной модели среды существуют простые кинематические способы интерпретации данных РВИЗ. В рамках многослойных, и тем более горизонтально-неоднородных сред, не обойтись без методов решения уравнений электродинамики и обратных задач геофизики. В статье обсуждаются основы теории РВИЗ, методика, роль в электроразведке и возможности при решении геологических задач.

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитотеллурика основана на изучении естественного переменного электромагнитного поля Земли. Вариации частотой ниже 1 Гц в основном связаны с взаимодействием солнечного ветра с магнитосферой и ионосферой Земли, а на более высоких частотах, вплоть до 20 кГц (аудио-диапазон), они в наибольшей степени обусловлены грозовой активностью. Столь большой спектр частот позволяет решать множество задач, связанных с изучением глубоких горизонтов земной коры и верхней мантии Земли, поиском и разведкой месторождений полезных ископаемых, а также инженерно-геологических, гидрогеологических и других задач.

На частотах выше 0.0001 Гц с некоторыми оговорками источник поля можно считать достаточно удаленным от земной поверхности, а также пренебречь сферичностью Земли [Хмелевский, Петрухин, 2010]. Это позволяет использовать модель плоской волны, фронт которой параллелен земной поверхности. Строго говоря, в упомянутом диапазоне частот электромагнитной волны, как объекта, существующего независимо от источника за счет внутренних энергетических преобразований, в Земле не существует. Распространение поля имеет диффузионный характер, и колебательный процесс существует за счет смены изменений тока в источнике. Однако, плосковолновая модель допустима и удобна с точки зрения единообразия теории электроразведки.

В диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц работает метод радио-магнитотеллурического зондирования

(РМТ) [Bastani, Pedersen, 2001; Tezkan, Saraev, 2008]. Метод использует поля удаленных радиостанций, которые можно считать плосковолновыми. Интерпретация данных метода РМТ основывается на принципах, разработанных в магнитотеллурике [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

На частотах, зависящих от электропроводности Земли, но чаще всего свыше 1 МГц, плотность токов смещения в Земле становится сопоставима с плотностью токов проводимости. Структура электромагнитного поля существенно усложняется, однако она теперь зависит не только от удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород, но и от их диэлектрической проницаемости (ДП). Это повышает информативность электроразведки, однако вследствие сильного скин-эффекта ее глубинность ограничивается несколькими десятками метров.

### МЕТОД РАДИОВОЛНОВОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Метод радиоволнового интерференционного зондирования (РВИЗ) основан на возбуждении и регистрации поля радиоволн в диапазоне от 100 кГц до 100 МГц для получения информации о УЭС и ДП горных пород [Крылов, 1953; Хмелевской, 1980]. Можно сказать, что он происходит от ондометрического метода, который предложили еще в 1910-е годы немецкие ученые Ловри (Lowry) и Леймбах (Leimbach), а в нашей стране в 1920-е годы начал разрабатывать А.А. Петровский. Метод

можно рассматривать как фазовый вариант георадиолокации.

Другой вариант радиолокации, амплитудный или импульсный (более известный как георадар) использует частоты свыше 100 МГц для выделения в верхней части разреза границ, на которых изменяется ДП горных пород [Владов, Старовойтов, 2005]. Глубинность исследования в георадаре существенно зависит от УЭС: при изучении рыхлых водонасыщенных пород она не превышает первых метров, в мерзлых или скальных породах может превышать 10 м, а в ледниках — 100 м.

В методе РВИЗ регистрируется сигнал, получающийся в результате интерференции прямой и отраженных гармонических радиоволн. Отражения наблюдаются на границах геологических слоев или тел с разными значениями УЭС и ДП. В результате РВИЗ в линейном масштабе строятся интерференционные кривые (графики зависимости сигнала от частоты).

Для наиболее простой двухслойной модели среды на интерференционной кривой могут наблюдаться максимумы, обусловленные синфазностью прямого и отраженного сигналов, и минимумы, отвечающие частотам, на которых они колеблются в противофазе. Существует простой кинематический способ интерпретации таких кривых. При этом по разности частот между соседними максимумами или минимумами можно оценить параметры модели [Булгаков, Рысаков, 1962].

Отметим, что кинематическая интерпретация, основанная на лучевой теории распространения волн, применяется в георадаре и сейсморазведке. Возможность использования этого подхода связана с относительно короткими длинами волн, используемых в этих методах. В РВИЗ, где длины волн сопоставимы с глубиной разведки, лучевую теорию следует применять с осторожностью.

Для интерпретации данных РВИЗ, отвечающих многослойным и горизонтально-неоднородным моделям, необходимо использовать более сложную методику интерпретации, подобную применяемой в магнитотеллурике. Она основана на решении уравнений электродинамики Максвелла и Тихоновской теории решения обратных задач. При этом, однако, необходим учет токов смещения в Земле и в воздухе, то есть становится невозможно использовать квазистационарное приближение [Петрухин, 2001]. Кроме того, возрастает количество параметров геоэлектрической модели (поле зависит как от УЭС, так и от ДП).

### РВИЗ В ПОЛЕ ПЛОСКИХ ВОЛН

Традиционно метод РВИЗ применялся в дипольном варианте (РВИЗ-Д), то есть измерения проводились вблизи передатчика (питающего диполя), поле которого имеет довольно сложную

структуру. Теория и методика полевых работ существенно упрощаются, если перейти к изучению полей удаленных широкополосных или специальных радиостанций, поле которых можно считать плоским (РВИЗ-П). Методика полевых работ становится похожей на используемые при профилировании методом радиокип [Тархов, 1961] и зондирования методом РМТ [Симаков и др., 2007].

В настоящее время радиоэфир в диапазоне 100 кГц–100 МГц заполнен довольно плотно, и в будущем количество используемых частот, по-видимому, будет только увеличиваться. Конечно, наличие радиосигналов существенно зависит от района работ, и в этом вопросе необходимы дополнительные исследования. Мы же пока ограничимся теоретическим анализом возможностей метода РВИЗ-П.

По результатам измерения двух горизонтальных взаимно ортогональных компонент электрического поля  $E_x$  и магнитного поля  $H_y$  возможен расчет импеданса  $Z = E_x/H_y$ . В горизонтально-слоистых средах его величина определяется устойчиво и не зависит от ориентации осей  $x$  и  $y$  (хотя на практике, в зависимости от поляризации поля, величины компонент поля зависят от азимутов измерения).

В горизонтально-неоднородных средах компоненты плосковолнового электромагнитного поля связаны линейными соотношениями:

$$E_x = Z_{xx} H_x + Z_{xy} H_y,$$

$$E_y = Z_{yx} H_x + Z_{yy} H_y,$$

$$H_z = W_{zx} H_x + W_{zy} H_y,$$

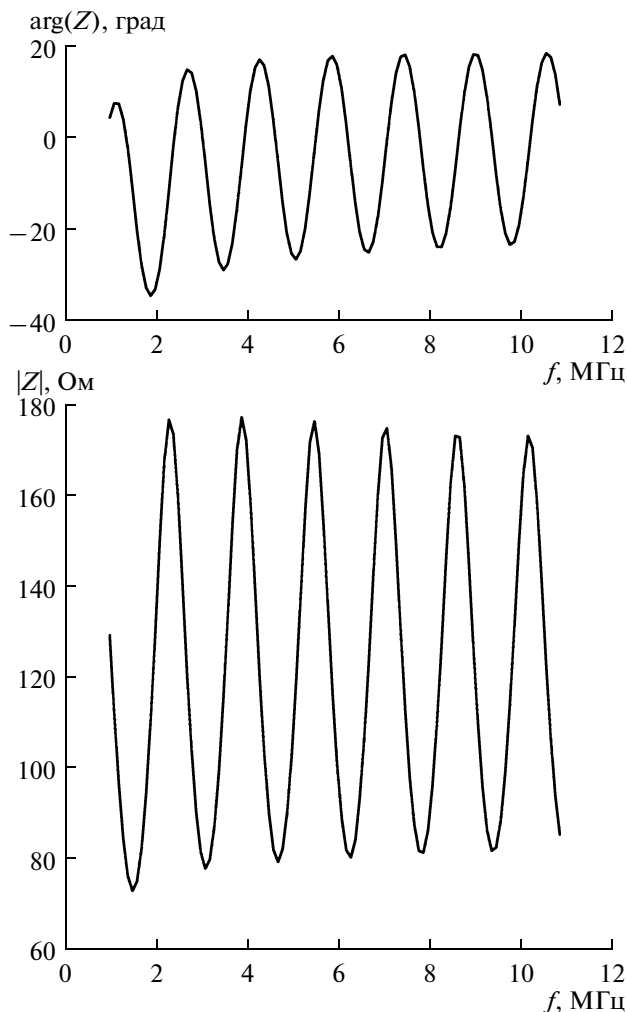
где  $Z_{xx}$ ,  $Z_{xy}$ ,  $Z_{yx}$  и  $Z_{yy}$  — компоненты тензора импеданса, а  $W_{zx}$  и  $W_{zy}$  — компоненты матрицы Визе–Паркинсона [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Для их определения необходимо использовать минимум две поляризации поля. При этом, как в методе РМТ, можно использовать поля двух радиостанций, расположенных на удалении друг от друга, и вещающих на двух близких частотах.

### ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ КРИВЫЕ ДЛЯ ДВУХСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ

В наиболее простой двухслойной модели плоская волна, падая на земную поверхность, проникает в верхний слой и отражается на глубине  $h_1$  от кровли второго слоя, УЭС и/или ДП которого отличаются от параметров первого слоя. Расчет интерференционных кривых РВИЗ для двухслойной модели осуществляется по формуле:

$$Z(\omega) = -\frac{\omega \mu_0}{k_1} \operatorname{cth} \left( ik_1 h_1 + \operatorname{arcth} \frac{k_1}{k_2} \right),$$

где  $Z$  — импеданс на поверхности среды,  $\omega$  — круговая частота колебаний поля,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума (породы считаются не-



**Рис. 1.** Зависимость фазы и модуля импеданса от частоты для двухслойной модели с параметрами:  $\rho_1 = 2400$  Ом м,  $\rho_2 = 30$  Ом м,  $\epsilon_1 = 10$ ,  $\epsilon_2 = 20$ ,  $h_1 = 30$  м.

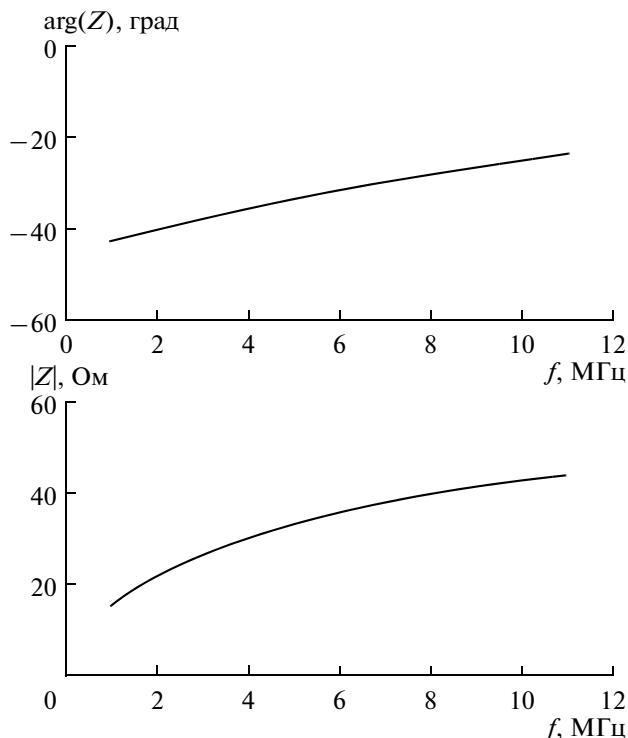
магнитными),  $k_1$  и  $k_2$  – волновые числа 1-го и 2-го слоев. Волновое число слоя с номером  $j$  вычисляется по формуле:

$$k_j = \sqrt{i\omega\mu_0/\rho_j + \omega^2\mu_0\epsilon_0\epsilon_j},$$

где  $\rho_j$  и  $\epsilon_j$  – УЭС и ДП (относительная) слоя,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Интерференционная кривая РВИЗ представляет собой зависимость модуля импеданса  $|Z|$  от частоты в линейном масштабе. Мы дополним эту кривую частотной зависимостью фазы импеданса  $\arg(Z)$ . Напомним, что если модуль импеданса отражает отношение амплитуд электрической и магнитной компонент, то фаза импеданса – это разность фаз колебаний этих компонент.

На рис. 1 приведены кривые, отвечающая благоприятному для РВИЗ разрезу с “сильной отражающей границей” благодаря высокому значению  $\rho_1$



**Рис. 2.** Зависимость фазы и модуля импеданса от частоты для двухслойной модели с параметрами:  $\rho_1 = 30$  Ом м,  $\rho_2 = 30$  Ом м,  $\epsilon_1 = 50$ ,  $\epsilon_2 = 20$ ,  $h_1 = 30$  м.

(2400 Ом м) и контрасту УЭС ( $\rho_1 \gg \rho_2$ ). В результате получаются интерференционные кривые с яркими осцилляциями. Подобные кривые отвечают следующим типам разрезов:

- 1) сверху ( $\rho_1, \epsilon_1$ ) залегает толщина сухих песчано-гравийных пород, снизу ( $\rho_2, \epsilon_2$ ) – те же породы, но находящиеся ниже уровня подземных вод  $h_1 = 30$  м;
- 2) под толщей мерзлых пород ( $\rho_1, \epsilon_1$ ) располагаются талые породы ( $\rho_2, \epsilon_2$ ), подошва мерзлоты залегает на глубине  $h_1 = 30$  м.

Осцилляции на кривых РВИЗ могут и отсутствовать, такой пример приведен на рис. 2. Здесь, хотя ДП слоев различны, импеданс плавно меняется с частотой. Кинематическая интерпретация (по разности частот между экстремумами) такой кривой невозможна, но возможна ее динамическая интерпретация, как любой другой кривой электромагнитного зондирования.

### ВЫВОДЫ

1. Плоские волны используются как в теории магнитотеллурики (в том числе аудио-частотной и радио-частотной), так и в теории РВИЗ-П.

2. Ценность метода РВИЗ-П заключается в том, что он дает информацию как о сопротивлении, так и о диэлектрической проницаемости пород. При

решении прямой задачи учитываются как токи смещения, так и токи проводимости.

3. Некоторые параметры модели можно оценить по особенностям кривых РВИЗ-П. Более полную информацию обеспечит классическое решение обратной задачи электромагнитного зондирования.

4. Для практической реализации метода РВИЗ-П, использующего поля широкополосных и специальных радиостанций, необходимо исследовать интенсивность сигнала в диапазоне 100 кГц–100 МГц, а также адаптировать датчики и измерители компонент поля.

5. Метод РВИЗ-П в пешеходном и автомобильном вариантах перспективен при изучении глубин до нескольких десятков метров, особенно при высоком сопротивлении верхней части разреза (сухие, скальные, мерзлые горные породы).

6. Круг решаемых методом задач включает поиск и разведку месторождений твердых полезных ископаемых, оценку мощности покровных отложений, поиск обводненных зон и тектонических нарушений в скальном массиве, прослеживание уровня грунтовых вод, картирование мерзлых и талых пород, изучение химических загрязнений грунтов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Интерпретационные модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 680 с.

*Булгаков А.К., Рысаков В.М.* О возможности применения электромагнитных колебаний высокой частоты в разведочной геофизике. Проблемы дифракции и распространения волн. Вып. 1. Л.: изд-во ЛГУ. 1962. С. 143–150.

*Владов М.Л., Старовойтов А.В.* Введение в георадиолокацию. М: изд-во МГУ. 2005. 153 с.

*Крылов М.К.* Геофизическая разведка полями высокой частоты (интерференционное зондирование // Вестник МГУ. Сер. 4 (Геология). 1953. № 3. С. 46–52.

*Петрухин Б.П.* Особенности расчета кривых высокочастотных электромагнитных зондирований. Деп. в Винити № 1490В-01. 2001. 7 с.

*Тархов А.Г.* Основы геофизической разведки методом радиокип. М: Госгеолтехиздат. 1961. 216 с.

*Симаков А.Е., Пертель М.И., Сараев А.К., Хименес Х.М., Торре К., Мартин П.* Возможности радиоманнителлурического метода при решении экологических задач // Вопросы геофизики. Вып. 40. СПб: изд-во СПбГУ. 2007. С. 101–109.

*Хмелевской В.К.* Основной курс электроразведки. Часть 2. М: изд-во МГУ. 1980. 267 с.

*Хмелевской В.К., Петрухин Б.П.* Возможности радиоволновых интерференционных зондирований по данным динамического моделирования двухслойных геоэлектрических сред // Вестник МГУ. Сер. 4 (Геология). 2010. № 1. С. 47–51.

*Bastani M., Pedersen L.* Estimation of magnetotelluric transfer functions from radio transmitters // Geophysics. 2001. V. 66. № 4. P. 1038–1051.

*Tezkan B., Saraev A.* A new broadband radiomagnetotelluric instrument: applications to near surface investigations // Near Surface Geophysics. 2008. P. 245–252.