

## ИМПУЛЬСНАЯ И ФАЗОВАЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ

В.К. Хмелевской, Б.П. Петрухин, П.Ю. Пушкарев

*Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова*

### Введение

Метод импульсной георадиолокации (георадар) основан на использовании искусственных источников радиополя с несущей частотой, как правило, свыше 100 МГц. Этот метод является наименее глубинным в электроразведке, обеспечивая информацию о верхних нескольких метрах геологической среды. Объясняется это сильным влиянием скин-эффекта и поглощением высокочастотных радиоимпульсов. Аномалии радиополя связаны с контрастами диэлектрических проницаемостей (ДП) горных пород, а удельное электрическое сопротивление (УЭС) сказывается на глубинности разведки (Владов и Старовойтов, 2005).

В диапазоне частот радиоволн от 100 кГц до 100 МГц эти два параметра, УЭС и ДП, влияют более сложным образом. На более низких частотах структура поля вновь упрощается, и становится применима более простая теория низкочастотной электроразведки, в которой учитывается только УЭС горных пород. Таким образом, в указанном диапазоне частот необходим учет как связанных с УЭС токов проводимости, так и зависящих от ДП токов смещения. Дополнительной трудностью при использовании искусственного источника является загруженность радиоэфира в диапазоне от 100 кГц до 100 МГц полями вещательных и служебных радиостанций, а также различными естественными полями. По этим и другим причинам этот диапазон оказался сравнительно слабо освоенным в электроразведке (Электроразведка..., 1989).

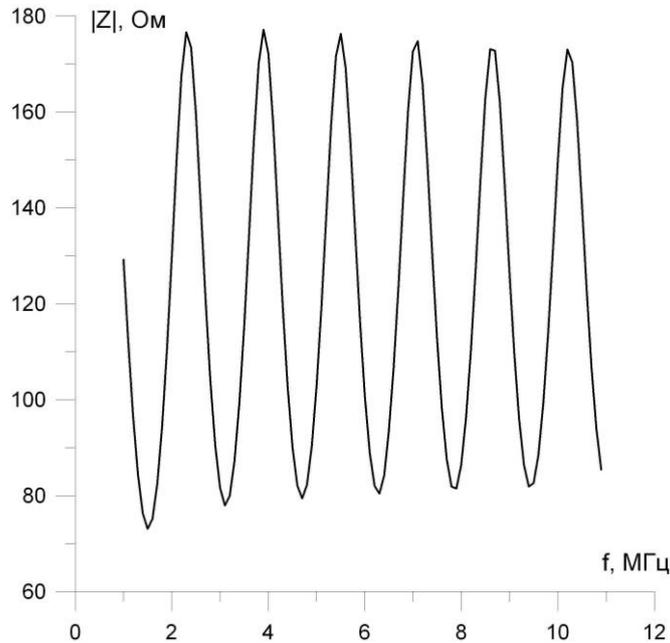
### Радиоволновое интерференционное зондирование

В 1950-х годах доцентом МГУ М.К. Крыловым была создана аппаратура, разработана и опробована методика наблюдений и интерпретации данных радиоволнового интерференционного зондирования в дипольном варианте (РВИЗ-Д) (Крылов, 1953). В этом методе осуществляется фазовая георадиолокация, и в сравнении с георадаром (методом импульсной георадиолокации) он обладает большей глубинностью, что связано с использованием более низких частот, а значит и меньшим поглощением радиоволн. Применялась упрощенная кинематическая теория интерпретации РВИЗ-Д, основанная на сложении сигналов прямой волны и, например, волны, отраженной от зеркала грунтовых вод. В результате по интерференционным кривым (графикам зависимости суммарного сигнала от частоты в линейном масштабе) удавалось определять наличие и глубину залегания соленых и слабосоленых вод в песках пустыни Кара-Кум (Хмелевской, 1980). К сожалению, оказалось невозможным получить разрешение радиоинспекции на работы в рассматриваемом диапазоне частот, вследствие его загруженности радиовещанием и служебной связью, и работы пришлось прекратить.

В 2000-е годы на кафедре геофизики МГУ проводились теоретические исследования по радиоволновому интерференционному зондированию в полях плоских электромагнитных волн (РВИЗ-П). Плоские радиоволны частотой от 100 кГц до 100 МГц техногенного и природного происхождения существуют повсеместно на земной поверхности, особенно в промышленно развитых регионах. Амплитуды колебаний горизонтальных компонент электрического ( $E_x$ ,  $E_y$ ) и магнитного ( $H_x$ ,  $H_y$ ) полей могут меняться во времени из-за изменения интенсивности источника. Они также падают при удалении от источника. Однако их отношение  $Z = E_x/H_y = -E_y/H_x$ , называемое импедансом, над горизонтально-слоистой средой зависит только от ее параметров (мощностей слоев, их УЭС и ДП). Отметим, что модель горизонтально-слоистой среды с той или иной степенью точности применима в большинстве случаев.

## Математическое моделирование РВИЗ-П

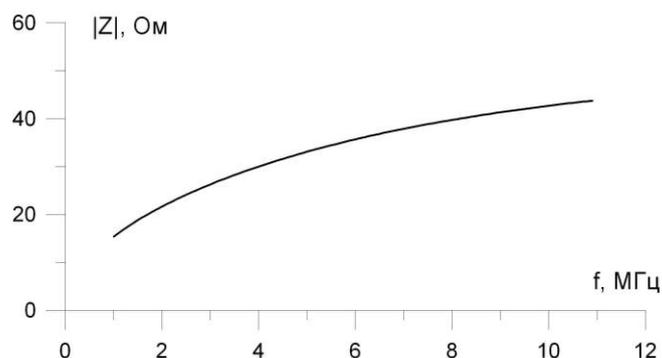
Расчеты проводились по рекуррентной формуле Липской-Ваньяна, позволяющей определить импеданс на поверхности слоистой среды (Бердичевский и Дмитриев, 1992). При этом использовалось полное выражение для волнового числа каждого слоя, то есть учитывались как УЭС, так и ДП слоев. Далее в линейном масштабе строились интерференционные кривые РВИЗ-П, представляющие собой графики модуля импеданса  $|Z|$  в зависимости от частоты  $f$  (Петрухин, 2001).



**Рисунок 1.** Зависимость модуля импеданса от частоты для двухслойной модели с параметрами:  $\rho_1 = 2400 \text{ Ом*м}$ ,  $\rho_2 = 30 \text{ Ом*м}$ ,  $\varepsilon_1 = 10$ ,  $\varepsilon_2 = 20$ ,  $h_1 = 30 \text{ м}$ .

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  $\rho_2$  и  $\varepsilon_2$  отличаются от параметров первого слоя  $\rho_1$  и  $\varepsilon_1$ . На рисунке 1 приведена кривая  $|Z|$ , отвечающая благоприятному для РВИЗ-П разрезу с «сильной отражающей границей» благодаря высокому значению  $\rho_1$  ( $2400 \text{ Ом*м}$ ) и контрасту УЭС ( $\rho_1 \gg \rho_2$ ). В результате получается интерференционная кривая с яркими осцилляциями импеданса. Подобные кривые отвечают следующим типам разрезов:

- 1) сверху ( $\rho_1$ ,  $\varepsilon_1$ ) залегает толща сухих песчано-гравийных пород, снизу ( $\rho_2$ ,  $\varepsilon_2$ ) – те же породы, но находящиеся ниже уровня подземных вод  $h_1 = 30 \text{ м}$ ;
- 2) под толщей мерзлых пород ( $\rho_1$ ,  $\varepsilon_1$ ) располагаются талые породы ( $\rho_2$ ,  $\varepsilon_2$ ), подошва мерзлоты залегает на глубине  $h_1 = 30 \text{ м}$ .



**Рисунок 2.** Зависимость модуля импеданса от частоты для двухслойной модели с параметрами:  $\rho_1 = 30 \text{ Ом*м}$ ,  $\rho_2 = 30 \text{ Ом*м}$ ,  $\varepsilon_1 = 50$ ,  $\varepsilon_2 = 20$ ,  $h_1 = 30 \text{ м}$ .

На рисунке 2 приведен случай отсутствия осцилляций при  $\rho_1 = \rho_2$  и  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ . В этом случае наблюдается восходящая ветвь кривой РВИЗ-П, переходящая в горизонтальную асимптоту. Эту кривую можно назвать кривой высокочастотного зондирования.

## Выводы

1. При большом количестве современных радиостанций для радиовещания и служебной связи в диапазоне частот от 100 кГц до 100 МГц радиополя покрывают поверхность Земли практически повсеместно и их можно использовать для геофизической разведки малых глубин.
2. Горизонтально-слоистые геоэлектрические разрезы с изменяющимися по глубине значениями УЭС и ДП можно изучать с помощью метода РВИЗ-П, считая существующие в районе разведки радиополя плоскими. Для этого необходимо создание радиоприемников с указанным диапазоном частот, способных измерять горизонтальные электрические и магнитные составляющие радиополя.
3. Для изучения закономерностей кривых РВИЗ-П и развития методов их интерпретации необходим большой объем математического моделирования радиоволнового поля для слоистых разрезов.
4. Простая кинематическая интерпретация кривых РВИЗ-П позволяет в благоприятных ситуациях достаточно точно оценить параметры модели, что было проверено путем математического моделирования и кинематической интерпретации модельных кривых.
5. Для оценки параметров многослойных сред необходимо решать обратную задачу методом подбора, используя при расчете производных функционала невязки по параметрам модели точные решения прямой задачи (формула Липской-Ваньяна).
6. Возможности РВИЗ-П в пешеходном и автомобильном вариантах весьма перспективны для изучения малых глубин (до 100 м), особенно при высоком УЭС приповерхностных отложений (пустыни, скальные и мерзлые породы).
7. Круг задач, которые может решать метод РВИЗ-П, достаточно широк, и включает картировочные, инженерно-геологические, гидрогеологические, мерзлотно-гляциологические.

## Ссылки

Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва, Научный мир, 2009, 680 с.

Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Москва, Изд-во МГУ, 2005, 153 с.

Крылов М.К. Геофизическая разведка полями высокой частоты (интерференционное зондирование). Вестник МГУ, Серия Геология, 1953, № 3, с. 46-52.

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

Хмелевской В.К. Основной курс электроразведки. Часть 2. Москва, Изд-во МГУ, 1980, 267 с.

Электроразведка: Справочник геофизика (ред. Хмелевской В.К. и Бондаренко В.М). Книга вторая. Москва, Недра, 1989, 378 с.