

УДК 550.837.2:621.396.6

В.К. Хмелевской¹, Б.П. Петрухин²

ВОЗМОЖНОСТИ РАДИОВОЛНОВОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД

Идея и приближенная теория радиоволнового интерференционного зондирования (РВИЗ) слоистых геологических сред давно известны и базировались на упрощенной лучевой кинематической теории. В статье рассмотрены результаты математического моделирования двухслойных геоэлектрических разрезов на основе более строгих классических динамических подходов для плоских радиоволн. Выявлены особенности радиоотражений от границ сред с разными значениями диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления слоев, даны перспективы развития РВИЗ при малоглубинных исследованиях геологической среды для решения ряда практических задач.

Ключевые слова: радиоволновое зондирование, интерференция, математическое моделирование, малоглубинные исследования.

The idea and simplified theory of radio-wave interferometric sounding (RWIS) method of geophysical prospecting are well known and are based on geometrical optics and kinematic analysis. In our paper we consider results of mathematical modeling of plane radio-waves on the surface of two-layered medium, based on more strict classical dynamic approach. Peculiarities of radio-wave reflections on the boundary of mediums with different dielectric permittivities and resistivities are considered and perspectives of RWIS method in near-surface prospecting are discussed.

Key words: radio-wavy interference sounding, interference mathematical modeling, near-surface studies.

Введение. Даже в кризисные для науки годы малоглубинная геофизика (глубина изучения геологической среды, которая составляет десятки, реже сотни метров) развивалась. Это объясняется невысокой стоимостью работ и возможностью решать многие задачи инженерно-геологического, гидрогеологического, почвенно-мелиоративного, мерзлотно-гляциологического, экологического, археологического, технического и других направлений. Вследствие некорректности решения обратных задач (интерпретации) каждый метод геофизики дает неоднозначные ответы, особенно в неблагоприятных для этого метода геолого-геофизических условиях. Это вынуждает геофизиков непрерывно улучшать или создавать новые методы, причем часто на базе давно известных идей. К последнему направлению исследований относится и работа авторов статьи, направленная на воссоздание перспективного метода малоглубинной геофизики — радиоволнового интерференционного зондирования (РВИЗ).

Суть радиоволновых интерференционных зондирований. Свыше 80 лет назад немецкие ученые Л. Лови и Г. Леймбах предложили ондометрический метод электроразведки, называемый сейчас радиоволновым интерференционным зондированием. Суть его сводится к изучению сложения (интерференции) прямых гармонических радиоволн в диапазоне частоты (f) примерно от 0,1 до 50 МГц со ступенчато увеличивающейся частотой и отраженных радиоволн от границ геологических слоев или толщ с разными

значениями относительной диэлектрической проницаемости (ϵ) по отношению к диэлектрической проницаемости воздуха (ϵ_0) и удельного электрического сопротивления (ρ). Поглощение радиоволн, которым определяется глубинность разведки (h), скорость распространения (v) и длина радиоволн ($\lambda=v/f$) зависят от ϵ_1 и ρ_1 верхнего слоя и частоты. В результате РВИЗ в линейном масштабе строят интерференционные кривые (графики зависимости суммарного сигнала от частоты). На них могут наблюдаться максимумы, когда прямой и отраженный сигналы придут в фазе, и минимумы, когда они противофазны. Расстояние между соседними максимумами или минимумами на шкале частот будет определяться параметрами ϵ_1 , ρ_1 , h_1 (глубина залегания отражающей границы), разном d (расстояние между передатчиками и приемником), значениями коэффициента отражения радиоволн (K_{om}) от границ верхнего и подстилающего слоев, сложным образом зависящего от электромагнитных свойств (ϵ_1 , ρ_1 , ϵ_2 , ρ_2). Если отраженные сигналы отсутствуют или много меньше, чем первичные, то получаются кривые без экстремума — высокочастотные характеристики геоэлектрического разреза, также обусловленные перечисленными выше электромагнитными свойствами разреза. В результате интерпретации кривых РВИЗ в рамках двухмерной горизонтально-слоистой модели, т.е. когда сверху залегают почвы, грунты и верхняя часть коренных пород, которую можно принять за верхний слой с параметрами (ϵ_1 , ρ_1 , h_1), а под ними — коренные

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, проф., докт. геол.-минер. н., e-mail: decalo@geol.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, ст. науч. сотр., канд. геол.-минер. н., e-mail: petrchin@geol.msu.ru

породы (слой с ϵ_2 , ρ_2), можно получить перечисленные параметры геологического разреза. Они несут информацию о геолого-гидрогеологических, мерзлотно-гляциологических, геолого-экологических, геотехнических свойствах этой части геологического разреза (несколько десятков метров) [Булгаков, Рысаков, 1962; Новиков, 1962; Заборовский, 1963; Крылов, 1953; Хмелевской, 1980].

Метод РВИЗ считается фазовым вариантом радиолокации, к которой относится также амплитудная радиолокация, включая геофизический метод разведки, называемый подповерхностной радиолокацией, георадиолокационным методом, или георадаром. Георадар с глубиной около 10 м широко применяется при работах на рыхлых (немерзлых) наносах, с глубиной до нескольких десятков метров — на мерзлых породах, с глубиной в несколько сотен метров — при изучении горных областей, а в несколько тысяч метров — при изучении покровных ледников (например, Антарктиды). В принципе георадар и РВИЗ дают сходную информацию. Однако глубинность разведки у них разная, так как она уменьшается с увеличением используемых частот электромагнитного поля вследствие так называемого скин-эффекта и повышения поглощения радиоволн по мере увеличения частоты [Заборовский, 1963; Справочник..., 1980]. Так, в георадаре с импульсным возбуждением радиополя на частотах свыше 100 МГц глубинность в несколько раз меньше, чем в РВИЗ с непрерывным излучением радиополя на частотах от 0,1 до 50 МГц. Эти методы отличаются и по точности расчетов электромагнитных параметров геосреды (ϵ и ρ). В РВИЗ сложнее теория и организация полевых работ, так как следует иметь разрешение инспекции электросвязи, чтобы работать на нескольких частотах. Во многих районах получить такое разрешение нельзя из-за загруженности частотного радиодиапазона широкоэшелонными радиостанциями. Все это привело к тому, что метод РВИЗ давно не применяется, а его теория и приемы интерпретации слабо разработаны по сравнению с методом георадара [Крылов, 1953; Старовойтов, 2008].

Кинематическая (лучевая) теория, хорошо изученная в сейсморазведке, используется как основная в георадаре и как приближенная в методе РВИЗ. Суть кинематической теории сводится к представлению источника электромагнитных (радиоволновых) или сейсмических (упругих) волн в среде в качестве генератора импульсных колебаний, распространяющихся во все стороны по лучам. При длине волны меньше проектируемой глубины разведки можно применить хорошо разработанную в физике (оптике) лучевую теорию распространения волн, в том числе законы их отражения, преломления, дифракции и другие от объектов с разными упругими и электромагнитными свойствами по сравнению с вмещающей средой. Изучая время прихода (кинематику) разных волн от границ объектов с разными физическими свойствами

и геометрией (глубина залегания, размеры), можно вести их геофизическую разведку. Кинематическая сейсморазведка — основной геофизический метод глубинной, структурной и нефтегазовой геофизики — хорошо разработана. Она дает ценные результаты при изучении геометрии (положения) неоднородных объектов в недрах Земли. Поэтому теория георадара и принципы интерпретации основаны на кинематической теории сейсморазведки [Заборовский, 1963; Петрухин, 2001; Хмелевской, 1980].

Применение этой теории для РВИЗ, где используются радиоволны с большей длиной волны, чем в георадаре, сравнимой с глубиной разведки, приближенное. Однако она позволяет сравнительно легко решать прямые задачи для простых моделей геологических сред, например, для двух- и трехслойных горизонтально-слоистых сред, у которых на границах отмечается резкая контрастность электромагнитных свойств (ϵ и ρ). Опытное опробование ее дало положительные результаты [Булгаков, Рысаков, 1969; Крылов, 1953]. Вместе с тем только строгая динамическая (классическая) теория метода РВИЗ может дать ответ на вопрос о условиях применимости кинематических приемов интерпретации данных, полученных этим методом. Успехи современной сейсморазведки, особенно с точки зрения изучения литологического состава, неоднородностей, связаны в значительной мере с динамической теорией сейсморазведки. Для георадара она неприемлема из-за разной природы электромагнитных и упругих полей. Поэтому проблемой развития теории метода РВИЗ становится разработка динамической теории.

Создание динамической теории РВИЗ, основанной на классической электродинамике Максвелла, для сред с учетом ϵ и ρ значительно сложнее, чем для хорошо разработанной теории низкочастотных электромагнитных полей, базирующихся на изучении сред, у которых учитывается только ρ [Заборовский, 1963; Справочник..., 1980]. Наличие двух электромагнитных параметров среды (ϵ и ρ) потребовало решения уравнений Максвелла с учетом не только токов проводимости, но и токов смещения, что задержало математическое моделирование задач РВИЗ на много лет.

Особенно громоздкие выражения для разных электрических (E) и магнитных (H) компонент радиополя с использованием ϵ - и ρ -полей получаются для дипольных источников. Дипольный вариант РВИЗ-Д удобен в полевых работах, однако на него не всегда можно получить разрешение инспекции электросвязи. Вариант РВИЗ-Д с изменением расстояния (d) между передающей и приемной антеннами на одной-двух частотах, скорее всего, тоже не может быть разрешен. Кроме того, в этом варианте невозможно получать интерференционные кривые РВИЗ-Д.

Теория и технология работ резко упрощаются в методе плоских волн (РВИЗ-П), в котором можно

использовать существующие радиополя широко-вещательных или специальных радиостанций. В этом случае не нужен собственный передатчик радиоволн. Изучив прослушиваемые в районе работ радиостанции, их частотный спектр, стабильность работы в разное время суток, можно выбрать ряд радиостанций для геофизической разведки практически в любом районе мира и использовать создаваемые ими в Земле электромагнитные поля для целей геологоразведки. Рабочие частоты выбранных радиостанций должны быть в диапазоне от 0,1 до 50 МГц и дискретно изменяться в 1,5–3 раза в пределах этого диапазона. При удалении радиостанций на расстояние свыше 10 км от района работ (дальняя зона для радиостанций метрового диапазона частот) их электромагнитные поля можно приближенно считать за плоские, т.е. обладающие плоским фронтом.

В первичном плоском поле имеются горизонтальные (вдоль земной поверхности) составляющие: электрические (E_x, E_y) и магнитные (H_x, H_y), направленные перпендикулярно направлению распространения радиоволн, т.е. внутрь Земли. В теории электроразведки имеются математические формулы для этих компонент поля над горизонтально-слоистой средой с ϵ и ρ в каждом слое. Поскольку поля радиостанций имеют разную мощность и удаленность до участка работ, то для нормировки напряженностей можно использовать принятые в низкочастотной электроразведке выражения для так называемых составляющих импеданса: $R_{xy} = E_x/H_y$ и $R_{yx} = -E_y/H_x$, которые над горизонтально-слоистой средой одинаковы [Петрухин, 2001; Хмелевской, 1980]. Импеданс, или входное комплексное электромагнитное сопротивление среды, имеет понятный физический смысл, поэтому для дальнейшей разработки метода РВИЗ его расчет, а значит, полевые измерения, предпочтительнее.

Результаты расчета импеданса для двухслойных разрезов с разными значениями ϵ и ρ . Для расчета мы использовали известное в теории электроразведки выражение для импеданса плоской электромагнитной волны с учетом токов проводимости и смещения над двухслойным разрезом [Справочник..., 1980]. Модуль импеданса имеет вид:

$$R_2 = \left| (-i\omega\mu/k_1) \left[\text{cth}(k_1 h_1 + \text{arcth} k_1/k_2) \right] \right|, \quad (1)$$

где $k_0 = \sqrt{-\omega^2 \epsilon_0 \mu_0}$, $k_1 = \sqrt{-i\omega\mu_0/\rho_1 - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_1 \mu_0}$, $k_2 = \sqrt{-i\omega\mu_0/\rho_2 - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_2 \mu_0}$ — волновые числа; $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ [Ф/м]; $\epsilon_{a1} = \epsilon_1 \cdot \epsilon_0$, $\epsilon_{a2} = \epsilon_2 \cdot \epsilon_0$ — значения абсолютной (ϵ_a) и относительной (ϵ) диэлектрической проницаемости; $\rho_0 = \infty$, ρ_1, ρ_2 — значения удельного электрического сопротивления [Ом·м] для воздуха (0), первого от поверхности (1) и подстилающего (2) слоев соответственно; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота [Гц]; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [Гн/м] — магнитная проницаемость

воздуха. Для немагнитных сред известны равенства относительной ($\mu_1 = \mu_2 = 1$) и абсолютной ($\mu_{a1} = \mu_{a2} = \mu_0$) магнитной проницаемости.

Б.П. Петрухиным разработаны программы расчета импеданса по формуле (1) и выполнено математическое моделирование для расчета модуля импеданса $|R_2|$ для ряда двухслойных моделей сред с изменяющимися параметрами (прямая задача РВИЗ-П). Для каждой модели в линейном масштабе построены теоретические интерференционные кривые РВИЗ. Типичные из них показаны на рис. 1–3.

На рис. 1 приведен достаточно благоприятный для РВИЗ-П пример разреза с «сильной отражающей границей» благодаря высокому значению ρ_1 (2400 Ом·м) и контрастности ($\rho_1 \gg \rho_2$). В результате получается четкая интерференционная кривая (осцилляции импеданса). Подобная кривая может соответствовать, например, следующим геоэлектрическим разрезам: 1) сверху (ϵ_1, ρ_1) залегает толща сухих песчано-гравийных пород, снизу (ϵ_2, ρ_2) — те же породы, но сильно обводненные, уровень подземных вод в них (h_1) расположен на глубине 30 м; 2) под толщей мерзлых рыхлых пород (ϵ_1, ρ_1) находятся талые породы (ϵ_2, ρ_2), а подошва мерзлоты расположена на глубине 30 м. Подобные типы кривых, когда $\rho_1 \gg \rho_2$, можно назвать полученными по ρ -отражениям.

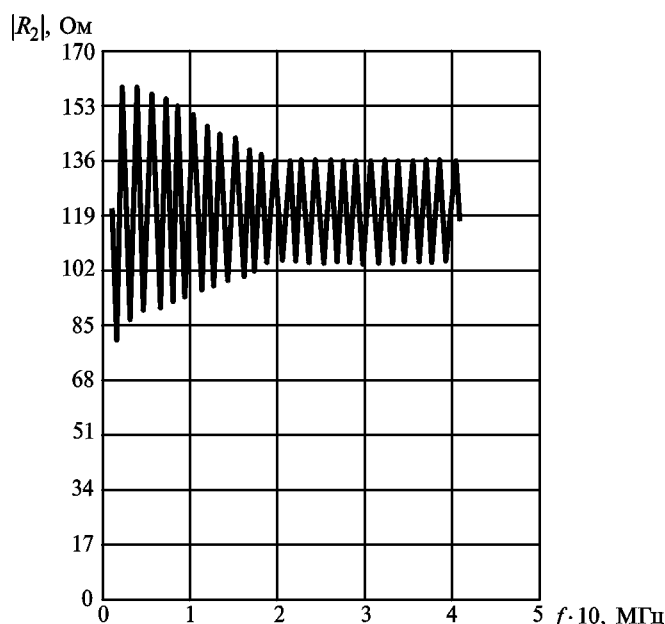


Рис. 1. Зависимость модуля импеданса от частоты для двухслойного разреза со следующими параметрами: $\epsilon_1=10$, $\rho_1=2400$ Ом·м, $h_1=30$ м, $\epsilon_2=20$, $\rho_2=30$ Ом·м

На рис. 2 приведен пример с достаточно четким ϵ -отражением, поскольку при одинаковых значениях ρ_1 и ρ_2 , $\epsilon_1 > 30\epsilon_2$. Подобный разрез можно получить над обводненными песчано-глинистыми отложениями, залегающими на сильнольдистых породах или льдах.

На рис. 3 приведен случай отсутствия интерференционной кривой при $\rho_1 = \rho_2$ и $\epsilon_1 > \epsilon_2$, так как отражен-

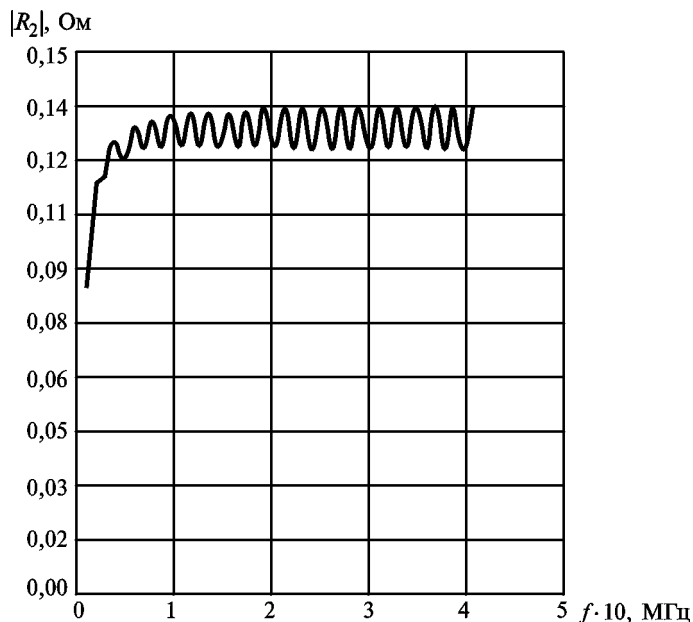


Рис. 2. Зависимость модуля импеданса от частоты для двухслойного разреза со следующими параметрами: $\epsilon_1=60$, $\rho_1=150$ Ом·м, $h_1=10$ м, $\epsilon_2=2$, $\rho_2=150$ Ом·м

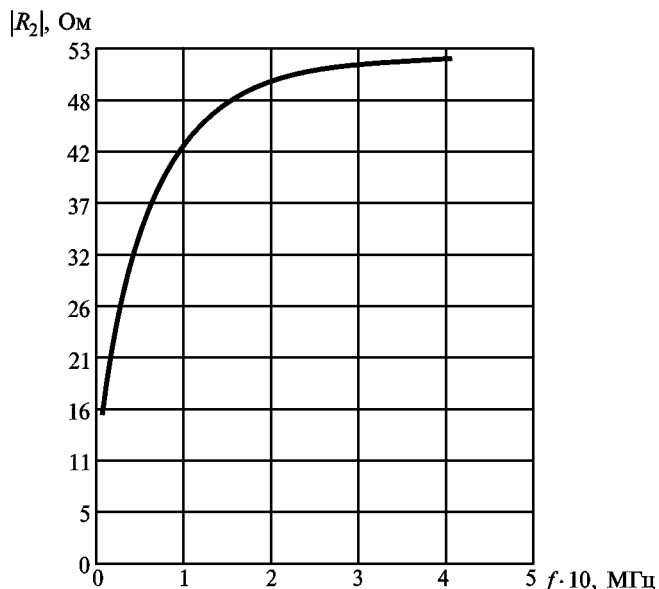


Рис. 3. Зависимость модуля импеданса от частоты для двухслойного разреза со следующими параметрами: $\epsilon_1=50$, $\rho_1=30$ Ом·м, $h_1=10$ м, $\epsilon_2=10$, $\rho_2=30$ Ом·м

ных сигналов нет или они очень малы по сравнению с первичным полем. В результате получается поднимающаяся кривая РВИЗ-П, вырождающаяся в асимптоту. Эту кривую можно назвать высокочастотной характеристикой разреза (или кривой высокочастотного зондирования). Она определяется заданными электрическими характеристиками разреза. Очевидно, что сочетания ρ - и ϵ -отражений, а также их отсутствие приводят к большому числу различных комбинаций, которые дают разную форму кривых РВИЗ-П.

Из-за того что модельных материалов пока мало, можно отметить лишь, что одно из условий возник-

новения видимых отражений на кривой РВИЗ-П — высокие значения сопротивления и диэлектрической проницаемости первого слоя, т.е. выполняется неравенство $\rho_1\epsilon_1 \gg \rho_2\epsilon_2$.

Несмотря на небольшое число расчетных материалов, можно сделать предварительные выводы о возможностях РВИЗ-П при малоглубинных исследованиях верхней части геологической среды.

Выводы. 1. При высоком уровне современного радиовещания и наличия радиостанций для радиосвязи в диапазоне частот от 0,1 до 50 МГц их радиополя в Земле существуют практически повсеместно, их можно использовать для геофизической разведки малых глубин.

2. Горизонтально-слоистые геоэлектрические разрезы с изменяющимися по глубине значениями ϵ и ρ можно изучать с помощью метода РВИЗ-П, если считать существующие в районе разведки радиополя плоскими. Для этого необходимо создание радиоприемников с указанным диапазоном частоты, которые будут способны измерять горизонтальные электрические и перпендикулярные к ним магнитные составляющие радиополя или их отношения (импеданс).

3. Необходимо массовое математическое моделирование РВИЗ-П для двух- и трехслойных разрезов, чтобы выявить условия отражений, дающих интерференционные или восходящие кривые РВИЗ-П, и создать теорию компьютерной интерпретации.

4. Компьютерные способы решения обратных задач РВИЗ-П (т.е. интерпретации) на основе динамической теории крайне необходимы для интерпретации восходящих кривых РВИЗ-П и весьма желательны для интерференционных кривых, хотя интерпретация последних, видимо, возможна и с использованием кинематических подходов.

5. Возможности РВИЗ-П в пешеходном и автомобильном вариантах весьма перспективны для изучения малых глубин (до 100 м), особенно при высокоомных поверхностных отложениях (пустыни, районы выхода мерзлых и скальных пород).

6. Круг задач, решаемых методом РВИЗ-П, может быть достаточно широк: картирование разрушенных отложений под скальными породами, в разной степени обводненных и трещиноватых, поиски пресных и минерализованных вод в пустынях, решение почвенно-гидрогеологических, мерзлотно-гляциологических и экологических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Заборовский А.И. Электроразведка. М.: Гостехиздат, 1963. 420 с.

Крылов М.К. Геофизическая разведка полями высокой частоты (интерференционное зондирование) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1953. № 3. С. 46–52.

Новиков В.А. Распространение радиоволн над слоистой трассой // Проблемы дифракции и распространения волн. Л.: Изд-во ЛГУ, 1962. Вып. 1. С. 116–132.

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

Справочник геофизика. Электроразведка. М.: Недра, 1980. 509 с.

Старовойтов А.В. Интерпретация георадарных данных: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 192 с.

Хмелевской В.К. Основной курс электроразведки. Ч. 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 267 с.

Поступила в редакцию
12.05.2009