

УДК 550.837.75:553.98

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА МНОГОСЛОЙНУЮ СРЕДУ С ВКЛЮЧЕНИЕМ ПРОТЯЖЕННОЙ АНИЗОТРОПНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Д.В. ГОЛОЛОБОВ*, В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, С.И. МОРОЗ

**Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Полоцкий государственный университет
Блохина, 29, Новополоцк, 211440, Беларусь*

Поступила в редакцию 22 июня 2011

Представлены результаты теоретического анализа взаимодействия электромагнитной волны с двухслойной средой в виде ограниченного по продольной ширине анизотропного и полубесконечного однородного слоя, когда источник излучения находится в третьем слое с конечной комплексной диэлектрической проницаемостью. На основе анализа предложена косвенная методика определения границы нижнего однородного слоя.

Ключевые слова: электромагнитная волна, углеводороды, анизотропная среда, граница раздела, слой, входной импеданс среды.

Введение

Актуальность рассматриваемого вопроса связана с решением практических задач электромагнитной разведки залежей углеводородов, представляемых в виде анизотропной среды плазмаподобного типа с магнитодиэлектрическим наполнителем [1]. В настоящее время к прямым методам поисковой геофизики предъявляются повышенные требования, связанные с их эффективностью и уровнем достоверности при геометризации залежей полезных ископаемых. Для поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа (углеводородов) широко применяются различные методы электроразведки, основанные на связи электрических характеристик применяемой аппаратуры с электродинамическими параметрами исследуемой среды [1]. В настоящее время в электроразведке все чаще обращаются к применению радарных методов поиска углеводородных залежей (УВЗ). Важнейшей особенностью этих методов по сравнению с другими является возможность определения толщины высокозалегающих и маломощных слоев УВЗ. Особый интерес представляет определение глубины залегания полезных ископаемых. На данный момент эта задача наиболее полно решена для таких сред, как торф, грунтовые воды, мерзлые грунты [2].

Особенностью месторождения нефти и газа являются большие глубины залегания – более 2 км [1], что приводит к существенному затуханию ЭМВ и это требует перехода для зондирования сред в длинноволновую часть диапазона частот.

Целью настоящей работы является анализ характеристик электромагнитных волн (ЭМВ) при воздействии на многослойную среду с включением протяженной анизотропной неоднородности для обоснования выбора амплитудно-временных параметров сигналов, что должно способствовать повышению производительности геологоразведочных работ и точности определения глубины залегания УВЗ.

Теоретический анализ

Модель многослойной среды включает слой 2 толщиной h с плоскими границами раздела, имеющий относительную диэлектрическую проницаемость $\dot{\epsilon}_2$, расположенный между полубесконечными средами 1 и 3 с относительными диэлектрическими проницаемостями $\dot{\epsilon}_1 = 1$ и $\dot{\epsilon}_3$ (рис. 1).

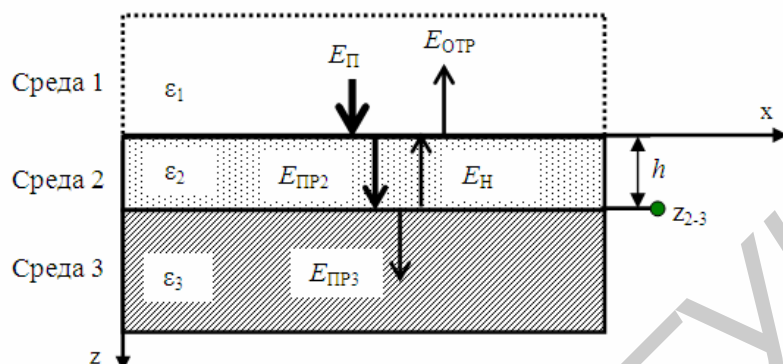


Рис.1. Фрагмент слоистой среды и отражения электромагнитной волны

Протяженный слой 2 обладает анизотропными свойствами, характеризуемыми тензором диэлектрической проницаемости с компонентами [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_r - j \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} + \sum_{i=1}^2 \omega_{\Pi i}^2 \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2 - \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \nu_i^2} \cdot \left[1 - j \frac{\omega_{\Gamma i}^2 + \omega^2 + \nu_i^2}{\omega_{\Gamma i}^2 - \nu_i^2 - \omega^2} \cdot \frac{\nu_i}{\omega} \right]; \\ \dot{\epsilon}_2 = \epsilon_{12} = \epsilon_{21} = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2}{(\nu_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \nu_i^2} \cdot \frac{\omega_{\Gamma i}}{\omega} \left[\omega^2 - \nu_i^2 - \omega_{\Gamma i}^2 - j2\omega \nu_i \right] \right\}; \\ \dot{\epsilon}_3 = \epsilon_{33} = \epsilon_r - j \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}}{\nu_i^2 + \omega^2} \left[1 + j \frac{\nu_i}{\omega} \right] \right\}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость наполнителя слоя 2 без учета анизотропных свойств, σ_r – удельная проводимость слоя 2; $\omega = 2\pi f$ – частота ЭМВ; ω_{Π} и ω_{Γ} – плазменная и гиротропная частоты; ν_i – частота столкновений частиц.

Примем амплитуду нормально падающей ЭМВ за условную единицу $E_{\Pi} = 1$. На практике же значение напряженности поля будет определяться реализуемой радиотехнической системой для поиска, к которой предъявляются требования при решении конкретной геоинформационной задачи.

С учетом принятого значения падающей ЭМВ комплексная амплитуда волны, отраженной от границы сред 1-2, определяется коэффициентом отражения от верхней границы \dot{R}_{1-2} как

$$\dot{E}_{1-2} = \dot{E}_{\Pi} \dot{R}_{1-2} = \dot{R}_{1-2}, \quad (2)$$

а волна, проникшая во второй слой, имеет амплитуду:

$$\dot{E}_{\Pi 2} = \dot{E}_{\Pi} \dot{T}_{1-2} = \dot{T}_{1-2}, \quad (3)$$

где \dot{T}_{1-2} – коэффициент прохождения.

Комплексная амплитуда отраженной волны от нижней границы слоя толщиной h будет равна

$$\dot{E}_{\text{отр}} = \dot{T}_{1-2} \dot{R}_{2-3} \dot{T}_{2-1} \exp(-2\gamma_2 h), \quad (4)$$

где \dot{R}_{2-3} – коэффициент отражения от границы раздела сред 2 и 3; \dot{T}_{2-1} – коэффициент прохождения волны через слой h в обратном направлении, γ_2 – коэффициент распространения волны в слое 2.

Учитывая связь между коэффициентами отражения и прохождения

$$\dot{R}_{1-2} = 1 + \dot{T}_{1-2}, \quad (5)$$

а также зависимость коэффициента отражения \dot{R}_{2-3} от импедансов сопряженных сред, общий коэффициент отражения волны от многослойной структуры определяется по формуле

$$\dot{R} = \frac{(\dot{Z}_3 + \dot{Z}_2)(1 - \dot{Z}_1) + (\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2)(1 + \dot{Z}_1) \exp(-2\gamma_2 h)}{(\dot{Z}_3 + \dot{Z}_2)(1 + \dot{Z}_1) + (\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2)(1 - \dot{Z}_1) \exp(-2\gamma_2 h)}, \quad (6)$$

где $\dot{Z}_1 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_1}} = Z_0 = 377 \text{ Ом}$ – волновое сопротивление воздуха (среды 1), и волновые сопротивления второго и третьего слоев:

$$\dot{Z}_2 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_2}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_2}}, \quad (7)$$

$$\dot{Z}_3 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_3}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_3}}. \quad (8)$$

Заметим, что в формуле (4) многократные отражения сигнала в слое h не учтены, что связано со значительным затуханием радиоволн в слое [2]. При поверхностном распространении ЭМВ в слое 2 может возникнуть несколько типов волн, характеризующихся различными коэффициентами распространения γ_2 . Определяется это дисперсионной характеристикой анизотропной среды. В работе [3] приведен анализ корней дисперсионного уравнения, позволяющий выделить частотные поддиапазоны, где возможно существование нескольких волн с различными коэффициентами затухания. При нормальном падении следует учитывать лишь одну волну, соответствующую продольному режиму распространения (относительно вектора подмагничивания), определяемому третьей компонентой тензора диэлектрической проницаемости $\dot{\epsilon}_3$. Поэтому в дальнейших оценках отражательных свойств многослойной среды учитываем только эту компоненту, а постоянную распространения аппроксимируем значением $\dot{\gamma}_2 = (3 - j6) \cdot 10^{-3}$ в диапазоне частот до 500 МГц.

После несложных преобразований (6) можно определить толщину слоя 2 (нижнюю границу этого слоя или границу раздела слоев 2–3), а значит глубину залегания h слоя 3.

Электромагнитные методы определения глубины залегания геологических объектов

До недавнего времени для определения глубины залегания объектов пользовались взаимосвязью поверхностной аномалии с интерференцией ЭМВ от объектов. Эти теоретические рассуждения справедливы для объектов, погруженных на небольшие глубины. Однако при значительном удалении залегающих объектов от границы раздела сред согласно существующим законам электродинамики решение задачи обнаружения и идентификации оказывает-

ся невозможным. Связано это с незначительным проникновением поля в среду. Глубина проникновения поля в однородную среду определяется выражением [4]:

$$z^* = \frac{1}{\operatorname{Re} \gamma} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu_a}}, \quad (9)$$

где f – частота сигнала; σ, μ_a – проводимость и абсолютная магнитная проницаемость среды.

В 1996 году Д. Джексоном был запатентован способ [5] для поиска и идентификации УВ. Основой способа являются прерывание естественного ЭМП и изменение напряженности, обусловленное пониженным потенциалом между залежью и дневной поверхностью за счет присутствия нефти и / или газа. При этом давление во вмещающих породах становится причиной искажения кристаллической решетки спрессованных кварцевых песков и других кристаллов, приводящего к изменению собственного потенциала пород. Это вызывает пьезоэлектрический эффект. Такие представления геологической среды над УВ позволили аппроксимировать зависимость глубины залегания пласта от частоты излучения объекта (0,5–2,5 кГц).

В патенте [6] обоснован вывод о том, что в пределах первичного магнитного поля Земли бессистемно проявляются энергетические импульсы в диапазоне звуковых волн. Вторичные магнитные поля за счет модели Пирсона взаимодействуют с полями этих импульсов. Использование специальных измерителей магнитного поля и фильтрации сигнала в пределах 100–8000 Гц позволяют с достаточной точностью определять глубины залегания УВЗ.

Способ [7] использует при поиске полезных ископаемых явление ядерного магнитного резонанса. Это явление основано на резонансном поглощении и рассеивании энергии вещества, связанного с наложением на него переменного магнитного поля, если последнее находится в постоянном магнитном поле. Частоту электромагнитного излучения выбирают равной ларморовской частоте, что позволяет обеспечить резонансное взаимодействие ЭМВ и УВЗ. Приемопередатчик перемещают вдоль заданного профиля под фиксированным углом к поверхности земли. Процесс регистрации УВЗ сводится к изменению направления излучения по отношению к исследуемой поверхности.

Модификация метода многократного радиоволнового профилирования (МРВП) [8], апробированная на рабочей частоте 1,25 МГц с измерением поляризационных характеристик электрических составляющих электромагнитного поля, предполагает измерения ЭМП в двух плоскостях поляризации антенн при фиксированном разnose приемопередатчика с последующими повторными измерениями и дискретным изменением разноса. Глубина «зондирования» определяется по упрощенной формуле:

$$z' = 2,83c \sqrt{\frac{r}{f \sqrt{|\varepsilon|}}}, \quad (10)$$

где r – расстояние между геометрическими центрами антенн передатчика и приемника, м; c – скорость света; $|\varepsilon|$ – модуль относительной комплексной диэлектрической проницаемости среды.

При построении геофизических разрезов используются эффективные значения коэффициентов поглощения, связанные со значениями проекций напряженностей электрического поля. При этом оценку электропроводности аномальных объектов производят по соотношению проекций напряженностей поля, а их анизотропность – по соотношению коэффициентов поглощения.

Результаты и их обсуждение

Численные исследования входного слоя [2] выбранной модели среды, определяющего общий коэффициент отражения R (6), показывает возможность ранжирования слоев при изменении частоты используемого для поиска УВЗ сигнала. На рис. 2: приведена частотная зависимость коэффициента отражения в среде 1 при изменении глубины погружения слоя 3 относительно границы раздела 1–2 для оговоренных начальных условий воздействия ЭМВ.

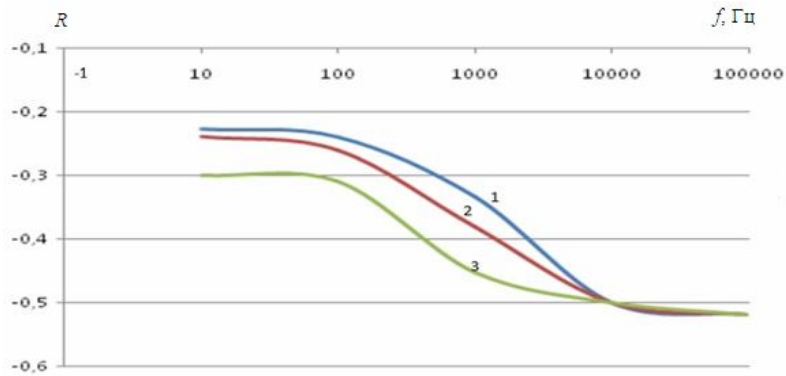


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения от верхней границы слоя 2 при глубине нижнего слоя 3 км (кривая 1), 5 км (кривая 2) и 10 км (кривая 3)

Коэффициент отражения принимает отрицательные значения, что соответствует инверсии фазы отраженного сигнала. С ростом частоты воздействующего сигнала коэффициент отражения возрастает и за пределами 10 кГц остается постоянным. Если при $f = 10$ Гц и $h = 3$ км значение коэффициента равно $-0,234$, то на частоте 1 кГц оно составляет $-0,338$, а на частоте 100 кГц $-0,519$.

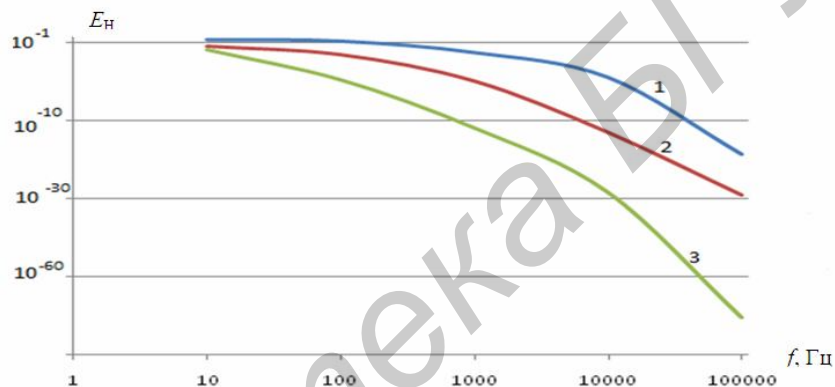


Рис. 3. Частотные зависимости амплитуды отраженной волны от нижней границы слоя 2 при глубине нижнего слоя 3 км (кривая 1), 5 км (кривая 2) и 10 км (кривая 3)

Напряженность электрического поля на границе слоев 2–3 линейно уменьшается и находится на уровне естественного излучения УВЗ (рис. 3). Таким образом, возникает проблема извлечения «информации» о залежи на уровне естественного электромагнитного излучения и помех в слое 1 принятой модели задачи. Тем не менее, использование формулы (6) позволяет определять глубину залегания однородного слоя 3 при известной информации об импедансах сред.

Заключение

Анализ воздействия ЭМВ на двухслойную модель среды, сложенной из протяженного анизотропного слоя и подстилающего однородного безграничного объема позволяет констатировать наличие больших затуханий волны при увеличении толщины слоя с анизотропными свойствами. Показано, что при росте этой толщины (глубины залегания нижнего слоя 3) уровень напряженности электрической напряженности поля воздействующей волны возрастает на порядки.

При регистрации проявлений анизотропного слоя на границе 1–2 следует увеличивать чувствительность приемных устройств, учитывать естественное излучение среды 3 и помехи в среде 1, где расположена аппаратура для регистрации аномалий поля.

С точки зрения критериев стоимость-сложность-точность можно рекомендовать для поиска и идентификации анизотропных неоднородностей использование частот воздействующей ЭМВ в диапазоне $0,1 \dots 1$ кГц, что подтверждает используемый в патентах Д. Джексона отрезок частот.

THE ANALYSIS OF INFLUENCE OF AN ELECTROMAGNETIC WAVE ON THE MULTILAYERED ENVIRONMENT ABOUT INCLUSION OF EXTENDED ANISOTROPIC HETEROGENEITY

D.V. GOLOLOBOV, V.F. YANUSHKEVICH, S.I. MOROZ

Abstract

Results of the theoretical analysis of interaction of an electromagnetic wave with the double-layer environment in the form of the anisotropic on longitudinal width anisotropic and semi-infinite homogeneous layer when the radiation source is in the third layer with final dielectric permeability are presented. On the basis of the analysis the indirect technique of definition of border of the bottom homogeneous layer is offered.

Литература

1. *Гололобов Д.В.* Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. Минск, 2009.
2. *Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П.* Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М., 1986.
3. *Гололобов Д.В.* // Докл. БГУИР. 2008. №4. С. 41–47.
4. *Баскаков С.И.* Электродинамика и распространение радиоволн. М., 1992.
5. Изобретения стран мира. М., 1999. Вып. 086, №07. С. 11.
6. Изобретения стран мира. М., 2006. Вып. 085, №16. С. 50.
7. Изобретения, полезные модели. М., 2006. № 8. (CD-ROM).
8. *Томилини В.К.* [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.briket.ru/index.shtml>.