

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

### Применение частотно-модулированных сигналов для георазведки углеводородных залежей

В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ<sup>1</sup>, К.И. КРЕМЕНЯ<sup>1</sup>, Е.Ю. ЗАЯЦ<sup>2</sup>

Проведено исследование взаимодействия анизотропной среды плазмоподобного типа с частотно-модулированными сигналами. Установлены закономерности изменения компонентов поверхностного импеданса анизотропной среды при вариации параметров частотно-модулированных сигналов.

**Ключевые слова:** частотно-модулированное воздействие, анизотропная среда, углеводородная залежь, поверхностный импеданс.

A study of the interaction of an anisotropic medium with plasma-type frequency-modulated signals was conducted. The regularities of changes in the surface impedance components of an anisotropic medium by varying the parameters of frequency-modulated signals are determined.

**Keywords:** frequency modulated stimulation, anisotropic medium, hydrocarbon deposits, surface impedance.

**Введение.** Для поиска и идентификации углеводородных залежей (УВЗ) требуется решение вопросов аналитического описания параметров среды над углеводородами (УВ). Информативность методов позволяет повысить использование различных режимов взаимодействия. Актуально применение частотно-модулированных (ЧМ) сигналов в связи с вариацией модулирующих характеристик в широких пределах. Исследование дисперсии тензоров диэлектрической проницаемости среды над УВЗ в режиме ЧМ-сигналов, решение задач взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) и УВЗ, находящейся на фоне гетерогенной и полифазной среды, разработка и экспериментальное исследование электромагнитных методов (ЭММ) и устройств для повышения уровня достоверности разведки, поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа рассмотрены в работах [1]–[3]. Вместе с тем представляет интерес в определении закономерностей изменения компонентов поверхностного импеданса анизотропной среды плазмоподобного типа (АСПТ), которая образуется над УВЗ, при вариации модулирующей частоты и индекса модуляции.

**Распространение ЧМ-сигналов в АСПТ.** Применение ЧМ-сигналов для поиска и оконтуривания УВЗ позволяет повысить точность и достоверность методов георазведки. Осуществлен анализ компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ для радиосигнала с тональной ЧМ вида

$$e(t) = E_2 \cos(\omega_2 t + \beta \sin \omega_1 t) \quad (1)$$

где  $E_2$  и  $\omega_2$  – соответственно амплитуда и частота несущего колебания;  $\omega_1$  – модулирующая частота;  $\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_1}$  – индекс модуляции;  $\Delta\omega$  – девиация частоты.

Анализ проведен в рамках квазигидродинамического приближения движения частиц в среде над УВЗ с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$  и удельной проводимостью  $\delta_r$  (относительную магнитную проницаемость принимаем равной 1).

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости АСПТ определяются [3]:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= \varepsilon_r(1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} &\frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_3}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} - j \left[ \frac{\sigma_r}{\omega_2 \varepsilon_0} + \right. \\ &\left. + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{\tilde{\omega}_3^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} \right] \end{aligned} \right\} \\ \dot{\varepsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} - \frac{2j \tilde{\omega}_3 v_i \omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{[(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2] \omega_2} \right\} \\ \dot{\varepsilon}_3 &= \varepsilon_r(1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_3}{\omega_2} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_3^2} - j \left[ \frac{\sigma_r}{\omega_2 \varepsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_3^2 + v_i^2} \right] \right\} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

В выражениях (2) фигурируют коэффициент отношения частот  $k_\omega$ , частоты: плазменная  $\omega_{\Pi i}$ , гиротропная  $\omega_{\Gamma i}$ , столкновений  $V$  и частота, характеризующая режим ЧМ-сигналов

$$\tilde{\omega}_3 = \omega_2 [1 + \beta \times k_\omega \cos \omega_1 t].$$

Процесс взаимодействия ЭМВ с локальным включением на трассе РРВ можно представить в виде режима наклонного падения плоской волны с вертикальной поляризацией в среде с параметрами  $\varepsilon_0, \mu_0, \delta_0$  на безграничную поверхность с анизотропным импедансом (рисунок 1).

Волновой вектор  $\vec{k}$  и орт внешней нормали  $\vec{n}$  направлены под углом  $\theta$ . Определение соотношений между составляющими напряженностей электрического и магнитного полей связано с расчетом компонентов поверхностного импеданса.

Результаты теоретических исследований и существующие модели УВЗ [4] показывают, что свойства среды над залежью нефти и газа отличаются от данных, полученных при исследовании образцов пород, отобранных непосредственно над УВЗ. При этом аномалии ЭМП на реальном месторождении могут достигать нескольких десятков процентов. Данные расхождения объясняются непосредственным влиянием углеводородов на электрические свойства вмещающих пород над УВЗ. Поэтому исследование отобранных образцов вмещающих пород над УВЗ в отрыве от естественных условий залегания не соответствует реальной физической картине, возникающей над реальным месторождением или скоплением нефти и газа.

Представим реальную залежь углеводородов (рисунок 1) в виде среды 4, погружённой в среду с потерями (среда 2), имеющей границу раздела ОХ с воздушным пространством (среда 1) [4]. Залежь находится на глубине  $\Delta Z$  от границы раздела сред 1–2 и имеет мощность  $Z_1$  и протяжённость  $X_1$ .

Окружающее углеводороды пространство (среда 2) находится в физическом и химическом равновесии со средой 1 и содержит твердый кристаллический скелет, пронизанный электролитом и проводящими включениями за счет минералов с электронной проводимостью. Под действием высоких температур и пластового давления над залежью углеводородов происходят электрохимические процессы, приводящие к образованию на границе с воздушным пространством промежуточной области (среда 3), характеризующейся избытком свободных электронов.

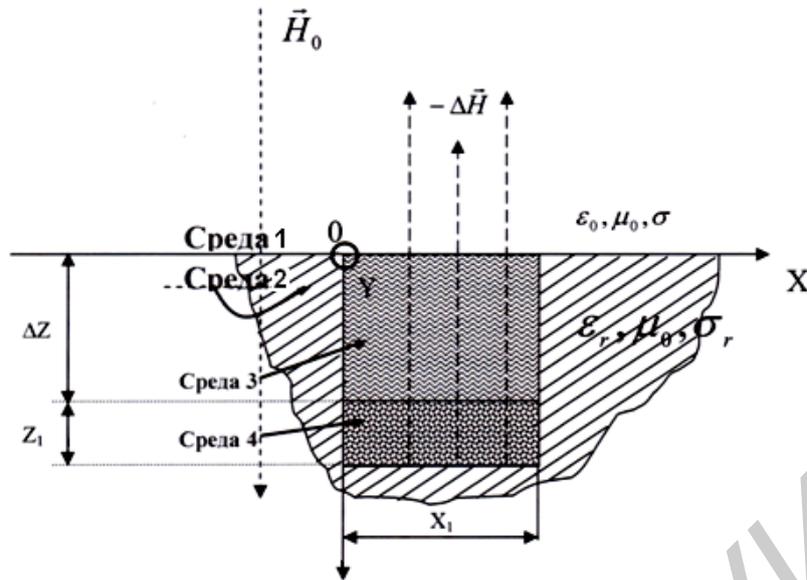


Рисунок 1 – Модель разреза геологического профиля над УВЗ

Исследования образцов пород над УВЗ свидетельствуют о хлоридно-натриевой среде в рассолах повышенной концентрации щелочных и щёлочноземельных металлов, а также изотопных элементов. Такие условия способствуют образованию в зоне над УВЗ сложных ионных соединений полупроводникового характера, обладающих повышенной термоэлектронной эмиссией (до 10.0 при температуре 20°C [5]).

Отличие физических свойств пород в области залежи от свойств пород-коллекторов, в которых она находится, выражается в уменьшении плотности залежи по сравнению с контурной областью, повышении суммарного электрического сопротивления, понижении скорости сейсмических продольных волн, увеличении их поглощения (ослабления) и т. д.

Количественные проявления этих эффектов определяются физико-геологическими свойствами пород-коллекторов: гранулометрическим и минералогическим составом пород, структурно-текстурными особенностями скелета, характером пористости и проницаемости, видом цементирующего вещества и механическими свойствами скелета, количеством пластовой воды в порах и ее минерализацией и т. д. Большое влияние на физические свойства пород оказывают термодинамические условия залегания (всестороннее давление и температура).

Перестройка физических и химических процессов в промежуточной области из-за обменных реакций и преобразований сопровождается перемещением свободных носителей заряда в направлении к границе раздела сред 1 и 3 над месторождением нефти и газа, появлением компенсирующих ионных токов. Поляризация УВЗ, вызванная окислительно-восстановительными процессами, способствует вертикальной миграции заряженных частиц, связанной с дрейфом флюидов и увеличением количества свободных электронов за счет тепловых колебаний кристаллических решеток [4].

Анализ физико-химической обстановки над УВЗ [4] показывает, что над залежью существует поток электронов, приводящий к появлению геомагнитной аномалии  $\Delta H$  из-за проявления диамагнитных свойств перемещающихся частиц в среде. Данное явление можно объяснить действием слабой лоренцевой силы, при которой появляется коррекция траектории движения электрона в постоянном магнитном поле.

Импедансные граничные условия определяются выражениями:

$$\begin{aligned}
 E_x &= -Z_0(Z_{11}H_x - Z_{12}H_y), \\
 E_y &= -Z_0(Z_{21}H_x - Z_{22}H_y), \\
 Z_{11} &= Z_{22} = -\frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_R\varepsilon_L}}(\sqrt{\varepsilon_R} - \sqrt{\varepsilon_L}), \\
 Z_{12} &= Z_{21} = \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_R\varepsilon_L}}(\sqrt{\varepsilon_R} + \sqrt{\varepsilon_L}),
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $E_{x,y}, H_{x,y}$  – проекции падающей и отраженной волны на соответствующие координатные оси;  $Z_0$  – характеристическое сопротивление среды, окружающей анизотропную неоднородность. Представим выражения (2) в виде:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_{22} = |Z_{11}| e^{j\varphi_{z_{11}}} = |Z_{22}| e^{j\varphi_{z_{22}}}, \\ Z_{21} &= Z_{21} = |Z_{12}| e^{j\varphi_{z_{12}}} = |Z_{21}| e^{j\varphi_{z_{21}}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $Z_{11}$  и  $Z_{12}$  – составляющие компонентов матрицы, подлежащие исследованию.

**Результаты исследований.** Был проведен анализ компонентов поверхностного импеданса от индекса частотной модуляции и модулирующей частоты.

Изменение частоты модуляции сигнала приводит к вариации компоненты поверхностного импеданса  $Z_{11}$ . При этом осуществляется влияние индекса частотной модуляции на величину сопротивления. При частотах больше  $80 \times 10^6$  Гц наблюдается два экстремума величины  $Z_{11}$ . Использование частоты модуляции  $80 \times 10^6$  Гц приводит к возникновению только одного пика, равного  $0,17 \times 377$  Ом при  $B = 4.7$ .

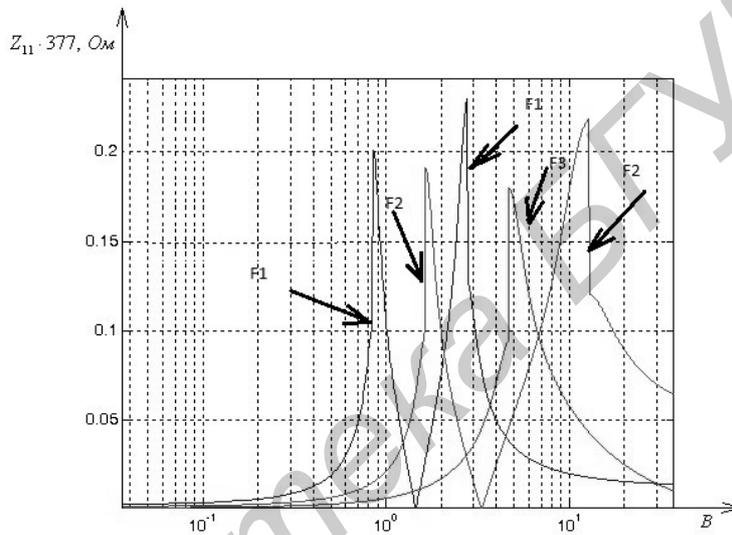


Рисунок 2 – Зависимости  $Z_{11} = \psi(B)$ :

1 – для  $F1 = 100 \times 10^6$  Гц; 2 – для  $F2 = 90 \times 10^6$  Гц; 3 – для  $F3 = 80 \times 10^6$  Гц.

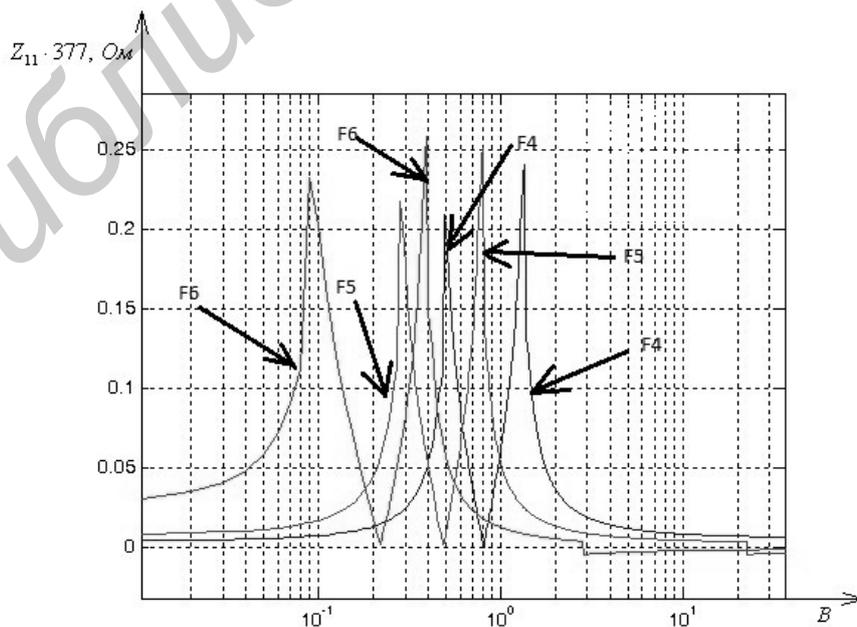
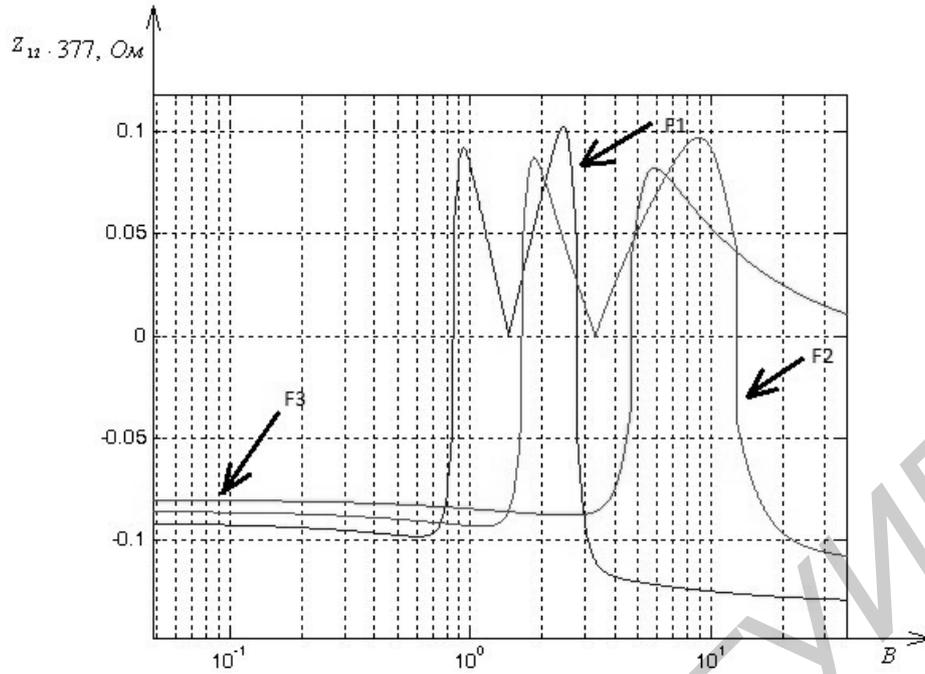


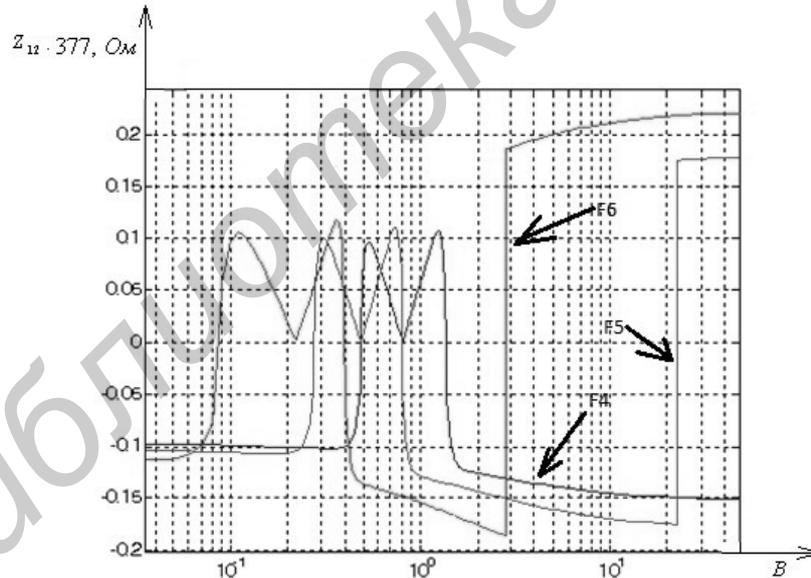
Рисунок 3 – Зависимости  $Z_{11} = \psi(B)$ :

1 – для  $F1 = 110 \times 10^6$  Гц; 2 – для  $F2 = 120 \times 10^6$  Гц; 3 – для  $F3 = 135 \times 10^6$  Гц.

Рисунок 4 – Зависимости  $Z_{12} = \psi(B)$ :

1 – для  $F1 = 100 \times 10^6$  Гц; 2 – для  $F2 = 90 \times 10^6$  Гц; 3 – для  $F3 = 80 \times 10^6$  Гц.

Изменение частоты модуляции сигнала приводит к вариации компоненты поверхностного импеданса  $Z_{12}$ . При этом осуществляется влияние индекса частотной модуляции на величину сопротивления. При частотах  $100 \times 10^6$  Гц и  $90 \times 10^6$  Гц наблюдается 2 экстремума величины  $Z_{12}$ .

Рисунок 5 – Зависимости  $Z_{12} = \psi(B)$ :

1 – для  $F4 = 110 \times 10^6$  Гц; 2 – для  $F5 = 120 \times 10^6$  Гц; 3 – для  $F6 = 135 \times 10^6$  Гц.

Использование частоты модуляции  $80 \times 10^6$  Гц приводит к возникновению только одного пика:  $0,066 \times 377$  Ом при  $B = 5.5$ . Увеличение частоты модуляции  $F$  больше  $100 \times 10^6$  Гц соответствует двум экстремумам величины поверхностного импеданса. При больших значениях модулирующей частоты точка скачкообразного увеличения  $Z_{12}$  от отрицательных значений до положительных смещается в левую сторону по оси  $B$ .

**Заключение.** Проведен анализ взаимодействия анизотропного слоя плазмopodobного типа с ЭМВ в режиме ЧМ воздействия. Вариация характеристик зондирующих сигналов позволяет повысить информативность методов оконтуривания и выделения УВЗ. Оптимизация

частотных, амплитудных параметров зондирующих сигналов возможна с учетом специфических характеристик УВЗ, позволяющих в совокупности повысить уровень идентификации углеводородов до требуемого уровня, определяющего порог принятия решения о наличии именно искомой среды, определяемой как УВЗ. Результаты исследования могут быть исследованы в поисковой геофизике.

### Литература

1. Гололобов, Д.В. Взаимодействие ЧМ-сигналов с анизотропной средой / Д.В. Гололобов, Н.В. Цывис, В.Ф. Янушкевич, С.В. Калинин, Д.Л. Хадыко // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: сб. материалов II междунаучной научно-техн. Конференции, 15–17 мая 2002 г. – Новополоцк, 2002. – Т. 1. – С. 263–267.
2. Калинин, С.В. Исследование взаимодействия сложных ЧМ-сигналов с анизотропной средой / С.В. Калинин, Н.В. Цывис, В.Ф. Янушкевич // III-ья НТК «Экологические проблемы Полесья». – Гомель: Гомельский гос. ун-т, 2003. – 2 с.
3. Гололобов, Д.В. Поверхностный импеданс среды над углеводородными залежами в режиме частотно-модулированных сигналов / Д.В. Гололобов, С.В. Калинин, В.Ф. Янушкевич // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. Навук. – 2010. – № 4. – С. 98–101.
4. Moskvichew, V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V.N. Moskvichew // 9-th Microw. Conf. NICON-91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
5. Huang, R.H. Low temperature ( $-80^{\circ}\text{C}$ ) thermionic electron emission from alkalis and electrides / R.H. Huang, I.Z. Dyl // Chem Phys Zett. – 1990. – Vol. 166, № 2. – P. 133–136.

<sup>1</sup>Полоцкий государственный университет

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

Поступила в редакцию 25.10.2015