

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ИМПЕДАНСА АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

*В.Ф. Янушкевич, канд. техн. наук, доц.,*

*К.И. Иванова, В.И. Раскин*

*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
Новополоцк, Беларусь*

*В статье проведен расчет характеристик анизотропной среды над углеводородами при воздействии частотно-модулированных сигналов, распространяющихся над геологическим профилем. Проведено моделирование вещественных составляющих поверхностного импеданса. Исследовано влияние индекса модуляции в режиме частотно-модулированных сигналов на характеристики среды над залежами. Методы поиска основываются на симметрии составляющих поверхностного импеданса. Предложены способы электроразведки при воздействии частотно-модулированных сигналов с использованием двухканальной схемы измерений.*

**Ключевые слова:** *частотно-модулированный сигнал, углеводородная залежь, поверхностный импеданс.*

**Введение.** Исследование поверхностного импеданса анизотропной среды, на основании которого возможна идентификация среды, является актуальным при разработке электромагнитных методов для поиска и оконтуривания месторождений углеводородов. Методы поиска углеводородных залежей (УВЗ) основаны на использовании различных моделей и применении анализа электрохимических и электрофизических процессов в радиоволновой геофизике [1]. Спектр зондирующих воздействий и методик исследований для таких целей включает применение сложных сигналов [2]. Разработан [3] алгоритм поиска углеводородов с использованием двухчастотных, модулированных и радиоимпульсных сигналов. Учитывается влияние ионизации частиц на взаимодействие гармонической электромагнитной волны с анизотропной средой [4]. Важнейшую роль играют сейсмические методы [5]. Эффект измерения собственного излучения залежей находит практическое применение для регистрации границ углеводородов [6].

**Методика исследований.** Выбор метода исследований на основе частотно-модулированных сигналов позволяет производить оценку проявления различных аномальных эффектов за счет расширения функциональных зависимостей компонентов диэлектрической проницаемости среды над залежами от воздействующих сигналов. Рассчитаны характеристики поверхностного импеданса среды над месторождениями нефти и газа по формулам

$$\dot{Z} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

При этом

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} &= -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L}} \left( \sqrt{\dot{\epsilon}_R} - \sqrt{\dot{\epsilon}_L} \right), \\ \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} &= \frac{1}{2\sqrt{\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L}} \left( \sqrt{\dot{\epsilon}_R} + \sqrt{\dot{\epsilon}_L} \right),\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\dot{\epsilon}_R, \dot{\epsilon}_L$  – диэлектрическая проницаемость для правой и левой поляризаций электромагнитных волн:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_R &= \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \dot{\epsilon}_R + j \text{Im} \dot{\epsilon}_R \\ \dot{\epsilon}_L &= \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \dot{\epsilon}_L + j \text{Im} \dot{\epsilon}_L.\end{aligned}\quad (3)$$

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости определяются выражениями [3]:

$$\left\{ \begin{aligned}\dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r (1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_3}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} - j \left[ \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{\tilde{\omega}_3^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} \right] \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} - \frac{2j\tilde{\omega}_3 v_i \omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{[(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2] \omega_2} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r (1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_3}{\omega_2} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_3^2} - j \left[ \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_3^2 + v_i^2} \right] \right\}.\end{aligned} \right. \quad (4)$$

Режим частотно-модулированных сигналов согласно (4) описывается составляющими  $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$ , частотной компонентой  $\tilde{\omega}_3$ , плазменной частотой  $\omega_{\Pi i}$ ; гиротропной частотой  $\omega_{\Gamma i}$ ; частотой столкновения частиц  $v_i$ ; относительной диэлектрической проницаемостью среды  $\epsilon_r$ ; проводимостью среды  $\sigma_r$ ; диэлектрической постоянной  $\epsilon_0$ ; модулирующей и несущей частотами  $\omega_1 = 2\pi f_1$ ,  $\omega_2 = 2\pi f_2$ ; индексом модуляции  $\beta$ , коэффициентом отношения частот  $k_\omega$ .

**Результаты исследований.** Проводилось моделирование компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ для параметров:

- значения диэлектрической проницаемости вмещающих пород  $\epsilon_r = 1 - 30$  и электрической проводимости  $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-5} - 1$  См/м;
- концентрация электронов  $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ;
- концентрация ионов  $N_{\text{и}} = 10^{18} \text{ м}^{-3}$ ;

- коэффициент отношения частот  $k_\omega = 0,5$ ;
- частота столкновения частиц  $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$  рад/с.

Были исследованы (рис. 1) характеристики вещественной составляющей поверхностного импеданса среды над УВЗ  $\dot{Z}_{11}$  при вариации индекса модуляции. Отмечается увеличение абсолютной составляющей поверхностного импеданса среды для меньших значений диэлектрической проницаемости вмещающих пород. С ростом индекса модуляции происходит уменьшение модуля  $\dot{Z}_{11}$ . Характеристики вещественной составляющей поверхностного импеданса среды над УВЗ  $\dot{Z}_{21}$  приведены на рисунке 2. Закономерности поведения данной компоненты аналогичны характеристикам  $\dot{Z}_{11}$ , за исключением численных значений.

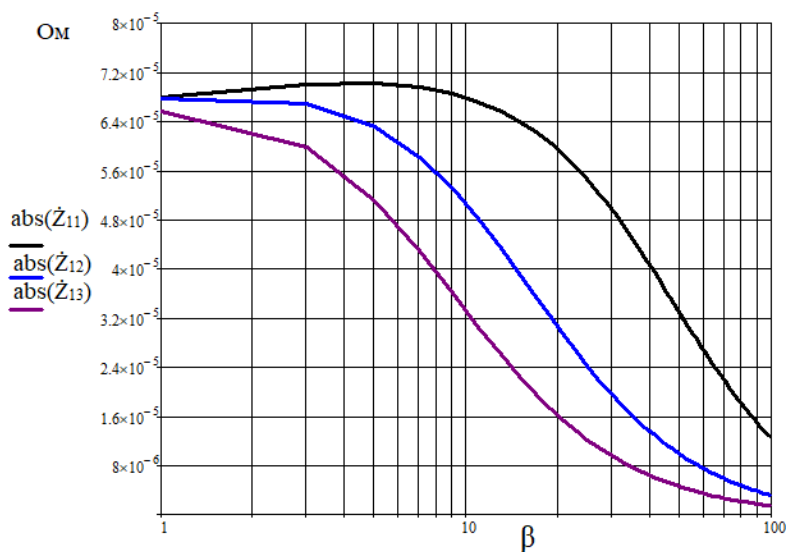


Рисунок 1. – Зависимости  $\dot{Z}_{11}$  от индекса модуляции ( $f_2 = 10^7$  Гц)  
 $|\dot{Z}_{11}(\beta)|$  – для  $\epsilon_r = 5$ ,  $|\dot{Z}_{12}(\beta)|$  – для  $\epsilon_r = 12$ ,  $|\dot{Z}_{13}(\beta)|$  – для  $\epsilon_r = 20$

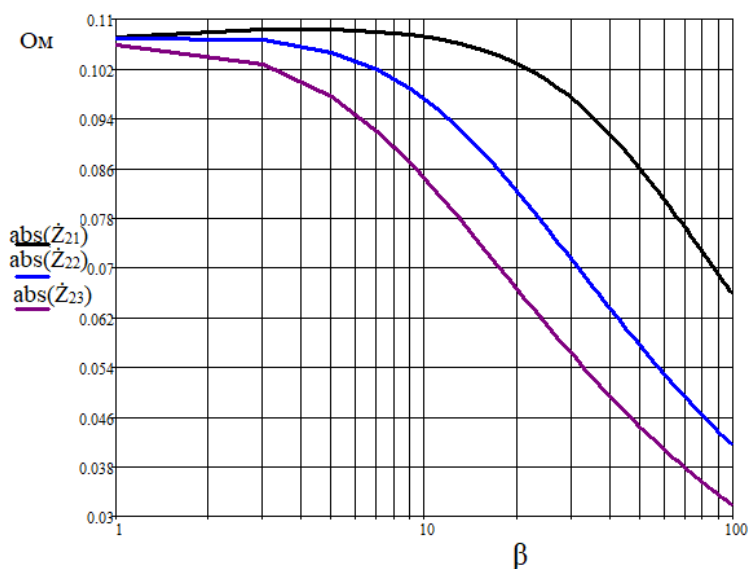


Рисунок 2. – Зависимости  $\dot{Z}_{21}$  от индекса модуляции ( $f_2 = 10^7$  Гц)  
 $|\dot{Z}_{21}(\beta)|$  – для  $\epsilon_r = 5$ ,  $|\dot{Z}_{22}(\beta)|$  – для  $\epsilon_r = 12$ ,  $|\dot{Z}_{23}(\beta)|$  – для  $\epsilon_r = 20$

Актуальность задач электроразведки возрастает, получение информации о величинах поверхностного импеданса среды может быть использовано для разработки высокоэффективных способов поиска углеводородов, решения задач поисковой геофизики по более точному оконтуриванию залежей. Исследование режимов частотно-модулированных сигналов, распространяющихся над геологическим профилем над УВЗ, способствует их активному внедрению для геологоразведочных работ.

**Заключение.** Расчеты характеристик поверхностного импеданса в режиме взаимодействия частотно-модулированных сигналов со средой над углеводородами показали:

– вариация индекса модуляции приводит к изменению составляющих поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{11}$  и  $\dot{Z}_{21}$ , что может быть использовано для оконтуривания границ углеводородов;

– для поиска углеводородов могут быть предложены способы геоэлектроразведки в режиме взаимодействия частотно-модулированных сигналов с использованием двухканальной схемы измерений, основанных на определении модулей  $\dot{Z}_{11}$  и  $\dot{Z}_{21}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стадник, Ю.Н. Модель Пирсона в радиоволновой геофизике / Ю.Н. Стадник [и др.] // Геологической службе России 300 лет : тез. докл. междунар. геофиз. конф., Санкт-Петербург, 2–6 октября 2000 г. ВИРГ – Рудгеофизика ; А.А. Петров [и др.]. – СПб., 2000. – С. 199–200.
2. Янушкевич В.Ф., Молодечкина Т.В., Калинин С.В., Кизина О.А., Богущ В.А. (2024). Закономерности изменения поверхностного импеданса среды над углеводородами при использовании сложных сигналов. Научно-практический журнал «Нефтяник Полесья», №1 (45) февраль 2024. – С. 128–135.
3. Янушкевич, В.Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В. Ф. Янушкевич. – Новополоцк, ПГУ, 2017. – 232с.
4. Гололобов, Д.В. Влияние ионизации частиц на взаимодействие гармонической ЭМВ с анизотропной средой / Д.В. Гололобов, П.М. Катлеров // – Доклады БГУИР. – Мн, 2003. – №4. – С.39–43.
5. Malehmir, A. "Seismic methods in mineral exploration and mine planning – Introduction" / A. Malehmir [et al.] // Geophysics. – 2012. – Vol. 77 (5). – P. WC1 – WC2.
6. Янушкевич В.Ф. [и др.]. Практическая апробация способа регистрации границ углеводородов на основе измерения собственного излучения залежей. Доклады БГУИР. 2024; Том 22, № 4 (2024): 30–37.