

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

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

О.А. Кизина, В.И. Раскин

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

В статье проведено моделирование характеристик анизотропной среды над углеводородами при воздействии амплитудно-частотно-модулированных сигналов. Проведен расчет фазы двух составляющих поверхностного импеданса. Проведено исследование влияния режимов амплитудно-частотно-модулированных сигналов на характеристики среды над залежами. Методы поиска основываются на анализе электрохимических и электрофизических процессов над месторождениями углеводородных залежей. Даны рекомендации по разработке методов электроразведки при воздействии амплитудно-частотно-модулированных сигналов.

Ключевые слова: амплитудно-частотно-модулированный сигнал, углеводородная залежь, индекс модуляции.

Введение. Определение свойств анизотропной среды актуально при разработке электромагнитных методов для поиска и оконтуривания углеводородов. Магнитотеллурический метод с контролируемым источником аудиочастоты (CSAMT) выделяется своей экономической эффективностью и широким применением в геофизическом мониторинге алгоритма инверсии трехмерного покадрового электрического поля для CSAMT, решающий сложности геофизических исследований [1]. Методы поиска основываются на анализе электрохимических и электрофизических процессов над месторождениями углеводородных залежей (УВЗ) и применении зондирующих сигналов, которые позволяют выделять аномальные эффекты от взаимодействия с исследуемыми объектами [2, 3].

Используются [4] новые методики выявления наличия углеводородов, например в условиях Припятского прогиба. Применяется широкий спектр геофизических методов исследований [5]. Различные режимы зондирования анизотропной среды плазмоподобного типа, например амплитудно-модулированное воздействие и определение фазовых составляющих поверхностного импеданса, способствуют внедрению новых методов и аппаратуры для поиска и оконтуривания УВЗ [6].

Методика исследований. В данной работе проводилось исследование фазовых характеристик поверхностного импеданса среды над УВЗ

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

где $\dot{\epsilon}_R, \dot{\epsilon}_L$ – диэлектрическая проницаемость для правой и левой поляризаций электромагнитных волн, которые определяются суммой и разностью компонент тензора по формулам (2):

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_R &= \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = \text{Re}\dot{\epsilon}_R + j\text{Im}\dot{\epsilon}_R \\ \dot{\epsilon}_L &= \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2 = \text{Re}\dot{\epsilon}_L + j\text{Im}\dot{\epsilon}_L.\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь \dot{Z}_{11} и \dot{Z}_{12} – компоненты поверхностного импеданса среды.

Составляющие тензора диэлектрической проницаемости наполнителя над УВЗ определяются выражениями [7]:

$$\left\{ \begin{aligned}\dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r(1 - k_m^2 \sin^2 \Omega \cdot t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} &\frac{\omega_{Pi}^2 \tilde{\omega}_4}{\omega} \frac{\omega_{Gi}^2 - \tilde{\omega}_4^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{Gi}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} + j \left[\frac{\epsilon_r \beta \cdot k_m \sin \Omega \cdot t}{1 + \beta \cdot \cos \Omega \cdot t} - \right. \\ &\left. - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{Pi}^2 v_i}{\omega} \frac{\tilde{\omega}_4^2 + v_i^2 + \omega_{Gi}^2}{(v_i^2 + \omega_{Gi}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} \right] \end{aligned} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{Pi}^2 \omega_{Gi}}{\omega} \frac{\omega_{Gi}^2 - \tilde{\omega}_4^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{Gi}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} - \frac{2j\tilde{\omega}_4 v_i \omega_{Pi}^2 \omega_{Gi}}{\omega [(v_i^2 + \omega_{Gi}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2]} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r(1 - k_m^2 \sin^2 \Omega \cdot t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{Pi}^2 \tilde{\omega}_4}{\omega} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_4^2} + j \left[\frac{\epsilon_r \beta \cdot k_m \sin \Omega \cdot t}{1 + \beta \cdot \cos \Omega \cdot t} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{Pi}^2 v_i}{\omega} \frac{1}{\tilde{\omega}_4^2 + v_i^2} \right] \right\}.\end{aligned} \right. \quad (4)$$

Режим амплитудно-частотно-модулированных сигналов согласно (4) описывается составляющими $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$, частотной компонентой $\tilde{\omega}_4$, плазменной частотой ω_{Pi} ; гиротропной частотой ω_{Gi} ; частотой столкновения частиц v_i ; относительной диэлектрической проницаемостью среды ϵ_r ; проводимостью среды σ_r ; диэлектрической постоянной ϵ_0 , коэффициентом амплитудной модуляции k_m ; модулирующей и несущей частотами $\Omega = 2\pi F$, $\omega = 2\pi f$, индексом модуляции β .

Проведено моделирование влияния режимов амплитудно-частотно-модулированных сигналов на характеристики среды над залежами.

Результаты исследований. Проводилось исследование 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 $N_e = 10^{16}$ м⁻³;
- концентрация ионов $N_i = 10^{17}$ м⁻³;
- частота $f = 1,5 \cdot 10^9$ Гц;
- частота $F = 1,0 \cdot 10^6$ Гц;
- частота столкновения частиц $v = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$ рад/с.

Влияние индекса модуляции на фазовые характеристики составляющей поверхностного импеданса среды над УВЗ \dot{Z}_{11} приведено на рисунке 1. Для $\epsilon_r = 30, k_m = 0,1$ характерно незначительное влияние индекса модуляции. При $\epsilon_r = 15, k_m = 1,0$ наиболее информативны значения индексов модуляции $\beta = (1 - 95)$. Для $\epsilon_r = 3, k_m = 0,5$ наибольшее влияние на фазу оказывают значения индексов модуляции $\beta = (1 - 10)$.

Фазовые характеристики составляющей поверхностного импеданса среды над УВЗ \dot{Z}_{21} приведены на рисунке 2.

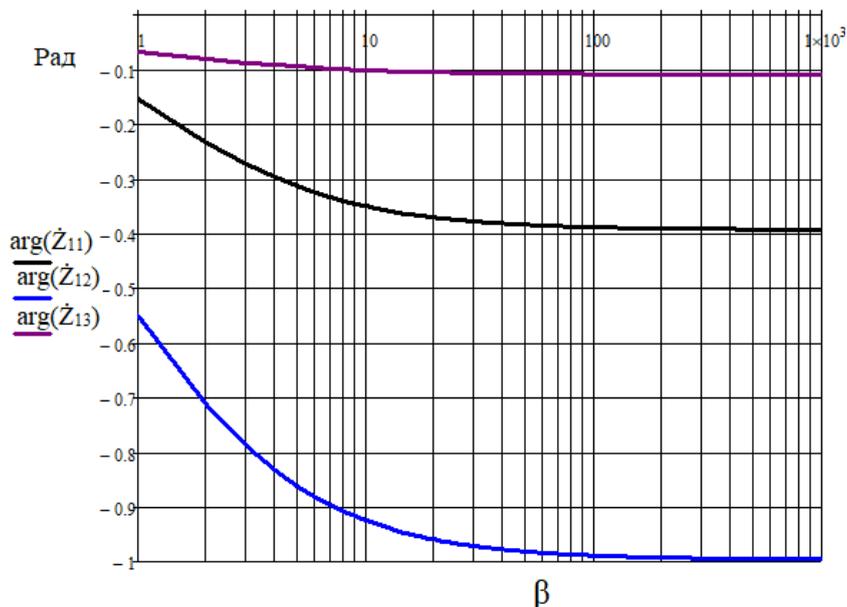


Рисунок 1. – Зависимости $\arg(\dot{Z}_{11}(\beta))$ – для $\epsilon_r = 3, k_m = 0,5$;
 $\arg(\dot{Z}_{12}(\beta))$ – для $\epsilon_r = 15, k_m = 1,0$; $\arg(\dot{Z}_{13}(\beta))$ – для $\epsilon_r = 30, k_m = 0,1$

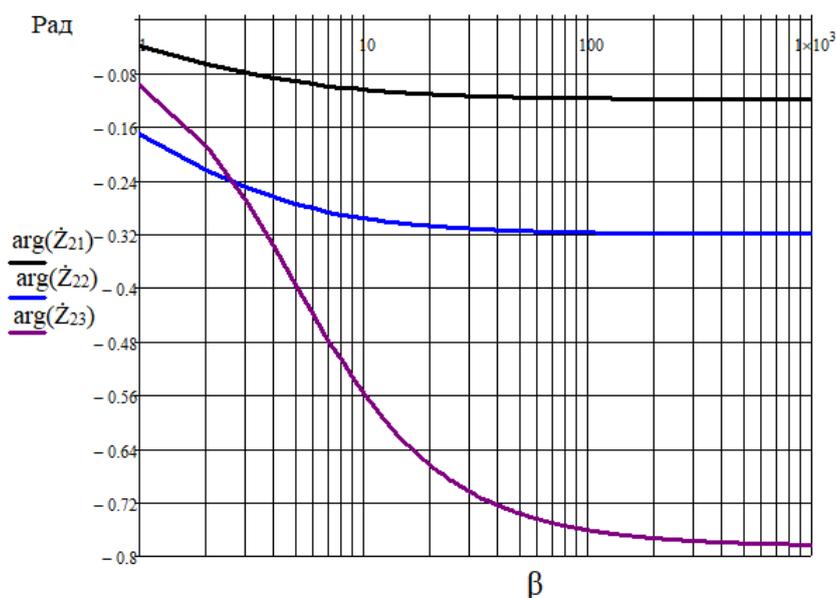


Рисунок 2. – Зависимости $\arg(\dot{Z}_{21}(\beta))$ – для $\epsilon_r = 3, k_m = 0,5$;
 $\arg(\dot{Z}_{22}(\beta))$ – для $\epsilon_r = 15, k_m = 1,0$; $\arg(\dot{Z}_{23}(\beta))$ – для $\epsilon_r = 30, k_m = 0,1$

Для $\epsilon_r = 3, k_m = 0,5$ характерно незначительное влияние индекса модуляции. При $\epsilon_r = 15, k_m = 1,0$ наиболее информативны значения индексов модуляции $\beta = (1-10)$. Для $\epsilon_r = 30, k_m = 0,1$ наибольшее влияние на фазу оказывают значения индексов модуляции $\beta = (1-95)$.

Заключение. Моделирование взаимодействия амплитудно-частотно-модулированных сигналов с наполнителем над углеводородами показал, что:

- информативность и точность оконтуривания границ углеводородов повышаются при зондировании такими сигналами;
- для поиска углеводородов могут быть предложены способы геоэлектроразведки, основанные на зондировании углеводородов амплитудно-частотно-модулированными сигналами, измерении фазовых характеристик среды над залежами и вариации несущих частот, частоты модуляции, коэффициента амплитудной модуляции, индекса частотной модуляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun, Q.; Tan, H.; Wan, W.; Hu, Q. Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method. Appl. Sci. 2024, 14, 1560. <https://doi.org/10.3390/app14041560>.
2. Янушкевич, В.Ф. Взаимодействие электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов / В.Ф. Янушкевич, К.И. Кременя, М. М. Иванов, Т. В. Молодечкина // Вестник ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. – Новополоцк, 2016. – №12. – С.45–50.
3. Гололобов, Д.В. Физические и электрохимические процессы в среде над залежью углеводородов / Д.В. Гололобов, И.Ю. Малевич // Доклады БГУИР. – Мн, 2005. – №1. – С.22–27.
4. Грибик, Я.Г. Признаки проявления современной аккумуляции углеводородов в условиях Припятского прогиба / Я.Г. Грибик // Потенциал добычи горючих ископаемых в Беларуси и прогноз его реализации в первой половине XXI века / материалы междунар. науч.-практ. конф., 25–27 мая 2011 г. ; гл. ред. В.Н. Бескопильный. – Гомель : Полеспечать, 2012. – С. 275–280.
5. Каратаев, Г.И. Геофизические методы исследований / Г.И. Каратаев. – Минск: БГУ, 2008. – 147 с.
6. Гололобов, Д.В. Влияние параметров амплитудно-модулированного воздействия на фазовые составляющие поверхностного импеданса анизотропной среды плазмopodobного типа / О.В. Орлова, В.Ф. Янушкевич // Вестник ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. – Новополоцк, 2010. – №9. – С.98–101.
7. Янушкевич, В.Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В. Ф. Янушкевич. – Новополоцк, ПГУ, 2017. – 232с.