В.Ф. Янушкевич,
к.т.н., доц.,
С.В. Калинцев,
старший преподаватель,
В.И. Раскин,
студент,
ПГУ имени Е. Полоцкой,
г. Новополоцк, Беларусь

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДВУХЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Аннотация: в статье приводится анализ зондирования двухчастотными электромагнитными волнами с использованием мощного низкочастотного сигнала анизотропных сред над месторождениями нефти и газа для поиска и оконтуривания границ углеводородных залежей. Исследованы вещественные и фазовые составляющие тензора диэлектрической проницаемости для комбинированных элементов, абсолютные и фазовые характеристики составляющих поверхностного импеданса среды над углеводородами. Проведен анализ характеристик среды над углеводородами для электромагнитных волн с правой и левой круговыми поляризациями в зависимости от частоты, коэффициента отношения амплитуд сигналов и коэффициента отношения амплитуд.

Ключевые слова: углеводородная залежь, анизотропная среда, электромагнитная волна, низкочастотный сигнал.

Актуальность решаемых в настоящей работе задач заключается в совершенствовании и разработке новых методов поиска углеводородных залежей (УВЗ), которые являются стратегическим видом полезных ископаемых, важнейшим источником энергии любого государства и определяют широкий спектр экологических вопросов современного общества. Тенденции развития существующих электромагнитных методов электроразведки месторождений нефти и газа

(углеводородов) при постановке задач поиска и идентификации УВЗ требуют решения вопросов аналитического описания параметров среды над углеводородами в режиме двухчастотного взаимодействия, а также для случая использования модулированных сигналов и других видов источников формируемых электромагнитных полей [1]. В работе [2] были предложены новые решения по ближнепольной СВЧ диагностике подповерхностных неоднородностей с достижением субволновой разрешающей способности. Совершенствование и модификации способов поиска УВЗ с использованием амплитудно-модулированных сигналов связаны с обнаружением месторождений углеводородов по регистрации амплитудных и фазовых компонент поверхностного импеданса геологического профиля [3, 4]. На основании опыта применения различных вариантов электромагнитных зондирований при поисках углеводородов в транзитной зоне Каспийского моря наработаны различные методики поиска УВЗ [5].

Взаимодействие электромагнитных волн (ЭМВ) с анизотропными средами над УВЗ приводит к возникновению электродинамического отклика, вызванного физико-химическими процессами в породах залежи, в околозалежной среде. Формирование ЭМВ для зондирования анизотропных сред над УВЗ основывается на применении двухчастотного сигнала с амплитудами и частотами данных ЭМВ $E_1, E_2, \omega_1, \omega_2$ и коэффициентами соотношения амплитуд двух волн и их частот для мощного низкочастотного (НЧ) сигнала

$$k_E \ll 1, k_\omega \ll 1 \qquad (1)$$

В выражениях для тензора фигурируют $\dot{\varepsilon}_1$, $\dot{\varepsilon}_2$, $\dot{\varepsilon}_3$ – компоненты тензора среды; $\tilde{\omega}_1$ – частотная составляющая, определяемая сигналами зондирования, $\omega_{\Pi i}$ – плазменная частота; $\omega_{\Gamma i}$ – гиротропная частота; ν_i – частота столкновения частиц; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды; σ_r – проводимость среды; ε_0 – диэлектрическая постоянная; $\alpha = \omega_2 - \omega_1 = \omega_2(1 - k_\omega)$ – разность частот ЭМВ.

Расчет компонентов тензоров диэлектрической проницаемости производится на основании экспериментально полученных параметров среды над залежами углеводородов [4]:

– залегание УВЗ на глубинах h=2.0-3.5 км;

– значения диэлектрической проницаемости вмещающих пород $\varepsilon_r = 1-30$ и электрической проводимости $\sigma_r = 1\cdot 10^{-5} - 1$ См/м;

– концентрации частиц $N_e = N_и = (10^{16} - 10^{18})$ м$^{-3}$.

– частота столкновения частиц $\nu = 2\cdot\pi\cdot 10^9$ рад / с.

Методика исследования характеристик анизотропной среды основана на основе тензора диэлектрической проницаемости в режиме двухчастотных сигналов при НЧ воздействии [4].

$$
\begin{cases}
\dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_r \dfrac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \displaystyle\sum_{i=1}^{2} \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{\omega_{Пi}^2 \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \dfrac{\omega_{Гi}^2 - \tilde{\omega}_1^2 - \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{Г\,i}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 \nu_i^2} - \\ -j\left[\dfrac{-\varepsilon_r k_E (1-k_\omega)\sin\alpha t}{1+k_E\cos\alpha t} + \right. \\ \left. + \dfrac{\sigma_r}{\omega_2 \varepsilon_0} + \dfrac{\omega_{Пi}^2 \nu_i}{\omega_2} \dfrac{\tilde{\omega}_1^2 + \nu_i^2 + \omega_{Гi}^2}{(\nu_i^2 + \omega_{Гi}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 \nu_i^2} \right] \end{array} \right\}, \\
\dot{\varepsilon}_2 = \displaystyle\sum_{i=1}^{2} \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{\omega_{Пi}^2 \omega_{Гi}}{\omega_2} \dfrac{\omega_{Гi}^2 - \tilde{\omega}_1^2 + \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{Гi}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 \nu_i^2} - \\ -\dfrac{2j\tilde{\omega}_1 \nu_i \omega_{Пi}^2 \omega_{Гi}}{\left[(\nu_i^2 + \omega_{Гi}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 \nu_i^2\right]\omega_2} \end{array} \right\}, \\
\dot{\varepsilon}_3 = \varepsilon_r \dfrac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \displaystyle\sum_{i=1}^{2} \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{\omega_{Пi}^2 \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \dfrac{1}{\nu_i^2 + \tilde{\omega}_1^2} - j\left[\dfrac{-\varepsilon_r k_E (1-k_\omega)\sin\alpha t}{1+k_E\cos\alpha t} + \right. \\ \left. + \dfrac{\sigma_r}{\omega_2 \varepsilon_0} + \dfrac{\omega_{Пi}^2 \nu_i}{\omega_2} \dfrac{1}{\tilde{\omega}_1^2 + \nu_i^2} \right] \end{array} \right\}.
\end{cases}
\qquad (2)
$$

Для исследований свойств среды над УВЗ применен

анализ поверхностного импеданса среды над УВЗ по формулам

$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} = -\frac{1}{j2\sqrt{\dot{\varepsilon}_R \dot{\varepsilon}_L}}\left(\dot{\varepsilon}_R - \dot{\varepsilon}_L\right),$$
$$\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} = -\frac{1}{j2\sqrt{\dot{\varepsilon}_R \dot{\varepsilon}_L}}\left(\dot{\varepsilon}_R + \dot{\varepsilon}_L\right), \quad (3)$$

где $\dot{Z}_{11}$ и $\dot{Z}_{12}$ – компоненты поверхностного импеданса среды;

$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_R, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_L$ – суммарная и разностная компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой и левой круговой поляризациями соответственно. Зависимости характеристик среды показаны на рис.1 – 12. Как видно из рисунков, значения коэффициентов отношения амплитуд менее 0.01 не влияют на поведение компонентов ЭМВ. На отрезке (0.01 – 0.1) происходит увеличение как суммарной, так и разностной составляющих диэлектрической проницаемости. Применение низких значений частотной составляющей f_2 приводит к увеличению значений $\mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_R(k_E))$ и к уменьшению $\mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_L(k_E))$. Использование аппаратуры для поиска УВЗ, имеющей возможности по перестройке амплитудного диапазона и регистрации отраженных сигналов, расширяет информативность электроразведки. При $f_2 = 10^9$ Гц наблюдается резкое увеличение фазы с отрицательных значений на положительные при k_E = (0.01 – 0.1). Значения вещественных составляющих диэлектрической проницаемости анизотропной среды над углеводородами зависят от коэффициентов отношения частот в диапазоне (0.01 – 0,1). По-прежнему, влияние коэффициентов отношения частот проявляется в диапазоне (0.01 – 0,1). На частоте $f_2 = 10^9$ Гц наблюдается резкое уменьшение фазы при k_ω = (0.01 – 0.1). Низкие частоты зондирования не изменяют фазу данной компоненты. Установлено, что частота f_2 не влияет на фазовую компоненту составляющей поверхностного импеданса, за исключением $f_2 = 10^9$ Гц, когда наблюдается уменьшение фазы с положительных значений на отрицательные при значениях коэффициента

отношения амплитуд (0.01 – 0,1).

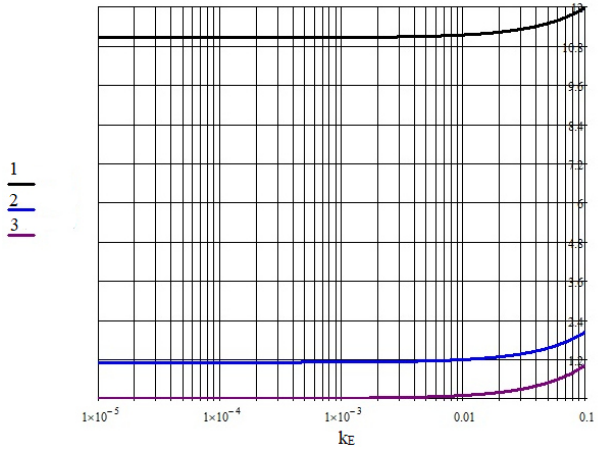


Рисунок 1 – Зависимости $\mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_R(k_E))$ – для $\varepsilon_r = 10$, $k_\omega = 10^{-6}$: 1 – $f_2 = 10^5$ Гц; 2 – $f_2 = 10^6$ Гц; 3 – $f_2 = 10^9$ Гц

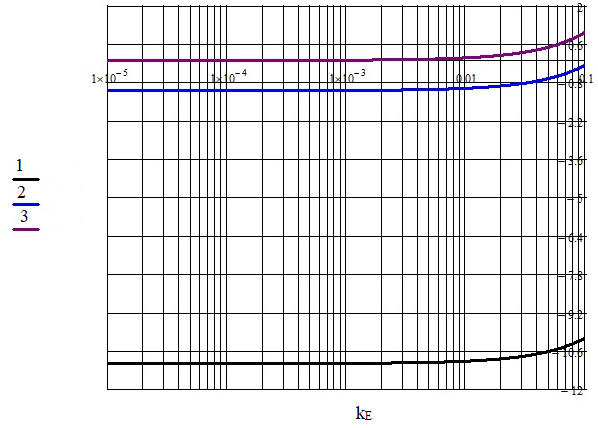


Рисунок 2 – Зависимости $\mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_L(k_E))$ – для $\varepsilon_r = 10$, $k_\omega = 10^{-6}$: 1 – $f_2 = 10^5$ Гц; 2 – $f_2 = 10^6$ Гц; 3 – $f_2 = 10^9$ Гц

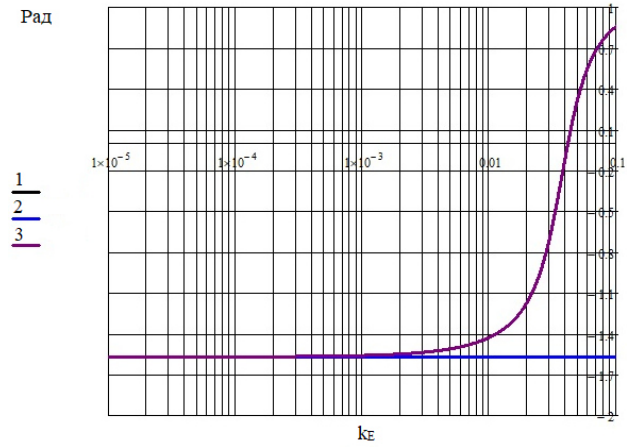


Рисунок 3 – Зависимости $\arg(\grave{\varepsilon}_R(k_E))$ – для $\varepsilon_r = 10$, $k_\omega = 10^{-6}$: 1 – $f_2 = 10^5$ Гц; 2 – $f_2 = 10^6$ Гц; 3 – $f_2 = 10^9$ Гц

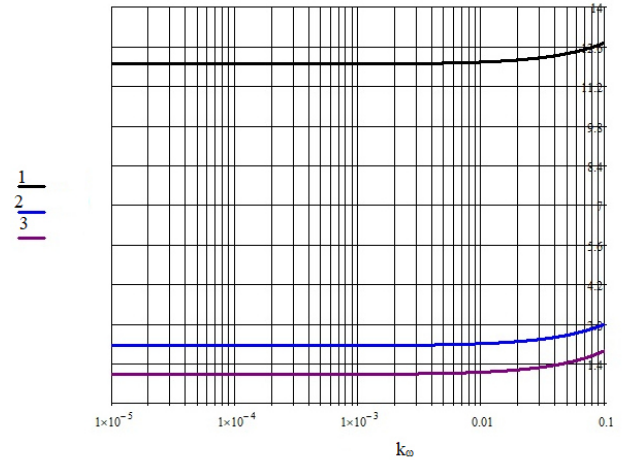


Рисунок 4 – Зависимости $\mathrm{Re}(\grave{\varepsilon}_R(k_\omega))$ – для $\varepsilon_r = 10$, $k_E = 10^{-1}$: 1 – $f_2 = 10^5$ Гц; 2 – $f_2 = 10^6$ Гц; 3 – $f_2 = 10^9$ Гц

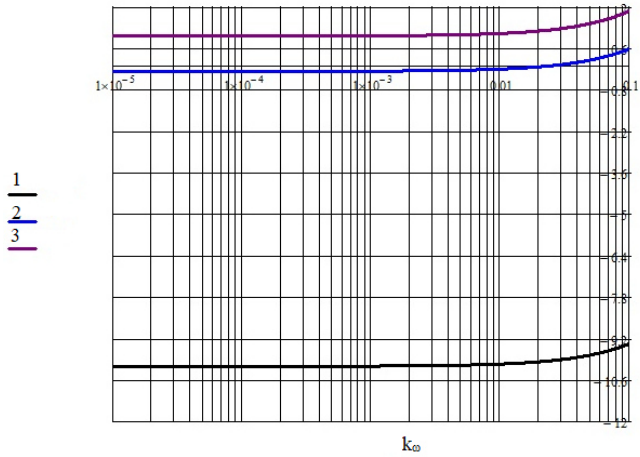


Рисунок 5 – Зависимости $\mathrm{Re}(\grave{\varepsilon}_L(k_\omega))$ – для $\varepsilon_r = 10$, $k_E = 10^{-1}$: 1 – $f_2 = 10^5$ Гц; 2 – $f_2 = 10^6$ Гц; 3 – $f_2 = 10^9$ Гц

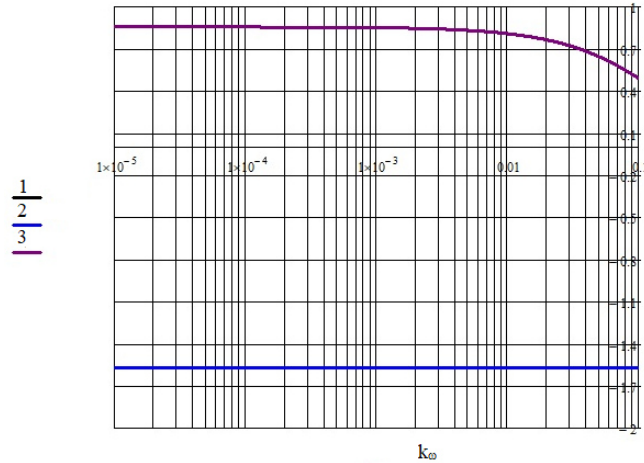


Рисунок 6 – Зависимости $\arg(\grave{\varepsilon}_R(k_\omega))$ – для $\varepsilon_r = 10$, $k_E = 10^{-1}$: 1 – $f_2 = 10^5$ Гц; 2 – $f_2 = 10^6$ Гц; 3 – $f_2 = 10^9$ Гц

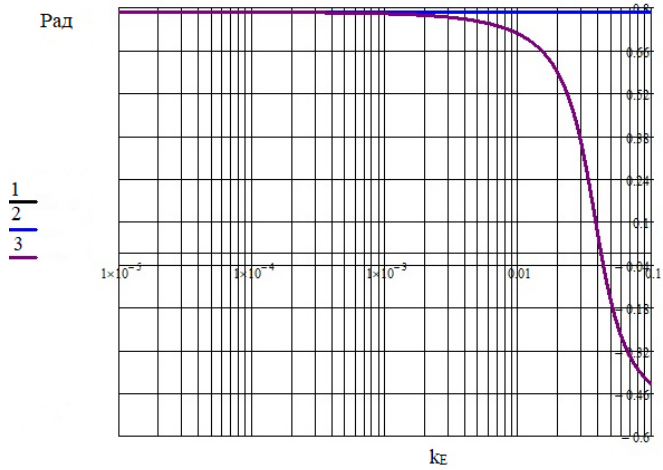


Рисунок 7 – Зависимости $\arg(\dot{Z}_{21}(k_E))$ – для $\varepsilon_r = 10$, $k_\omega = 10^{-6}$: 1 – $f_2 = 10^5$ Гц; 2 – $f_2 = 10^6$ Гц; 3 – $f_2 = 10^9$ Гц

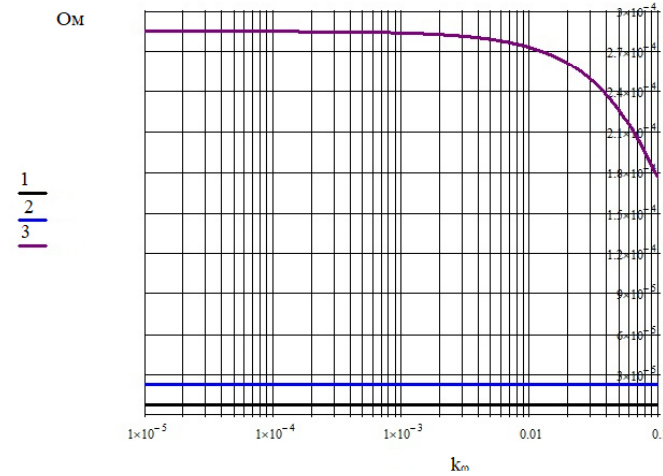


Рисунок 8 – Зависимости $|\dot{Z}_{11}(k_\omega)|$ – для $\varepsilon_r = 10$, $k_E = 10^{-1}$: 1 – $f_2 = 10^5$ Гц; 2 – $f_2 = 10^6$ Гц; 3 – $f_2 = 10^9$ Гц

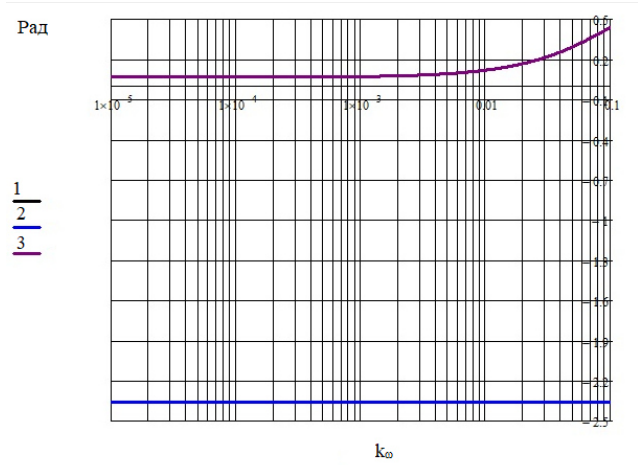


Рисунок 9 – Зависимости $\arg(\dot{Z}_{11}(k_\omega))$ – для $\varepsilon_r = 10$, $k_E = 10^{-1}$: 1 – $f_2 = 10^5$ Гц; 2 – $f_2 = 10^6$ Гц; 3 – $f_2 = 10^9$ Гц

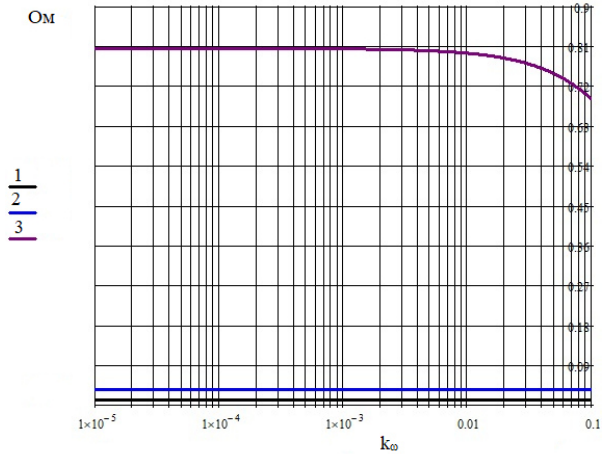


Рисунок 10 – Зависимости $|\dot{Z}_{21}(k_\omega)|$ – для $\varepsilon_r = 10$, $k_E = 10^{-1}$: 1 – $f_2 = 10^5$ Гц; 2 – $f_2 = 10^6$ Гц; 3 – $f_2 = 10^9$ Гц

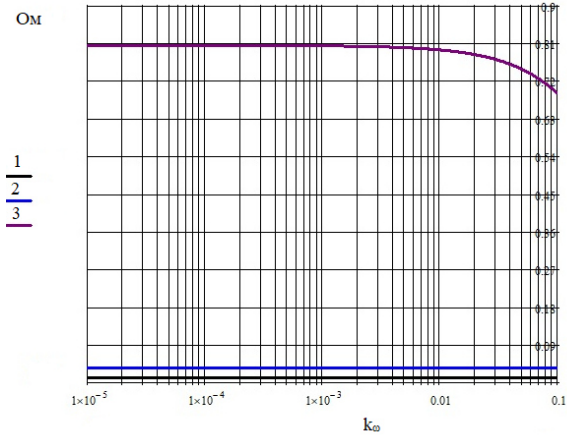


Рисунок 11 – Зависимости arg($\dot{Z}_{21}(k_\omega)$) – для $\varepsilon_r = 10$, $k_E = 10^{-1}$: 1 – $f_2 = 10^5$ Гц; 2 – $f_2 = 10^6$ Гц; 3 – $f_2 = 10^9$ Гц

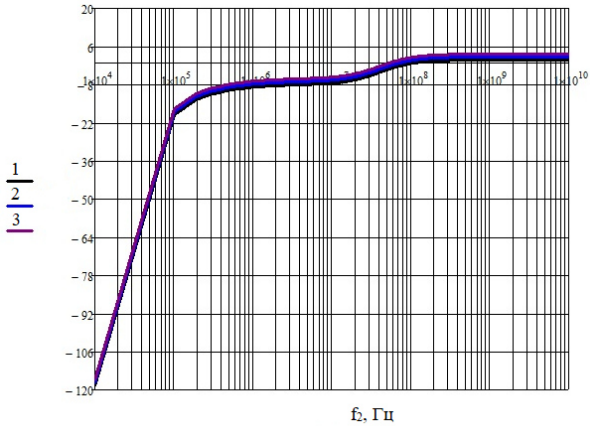


Рисунок 12 – Зависимости Re($\dot{\varepsilon}_L(f_2)$) – для $k_E = 10^{-1}$: 1 – $\varepsilon_r = 10$, $k_\omega = 10^{-6}$; 2 – $\varepsilon_r = 20$, $k_\omega = 10^{-3}$; 3 – $\varepsilon_r = 30$, $k_\omega = 10^{-1}$

Влияние k_ω сказывается на модуле $\dot{Z}_{11}$ составляющей поверхностного импеданса для участка (0.01 – 0,1). На частоте f_2

= 10^9 Гц происходит изменение данных характеристик при коэффициентах отношения частот (0.01 – 0,1). При значениях коэффициента амплитуд на отрезке (0.01 – 0,1) происходит увеличение фазовой компоненты. Разностная компонента ЭМВ увеличивается с ростом частоты от отрицательных значений до нуля в диапазоне (50 – 200) МГц и принимает положительные значения в сантиметровом диапазоне волн.

Заключение. Проведенный анализ показал, что:

– значения коэффициентов отношения амплитуд и частот в диапазоне (0.01 – 0.1) приводят к изменению амплитудных и фазовых характеристик суммарных и разностных компонент ЭМВ и поверхностного импеданса;

– разностная компонента ЭМВ в диапазоне (50 – 200) МГц и в сантиметровом диапазоне волн может служить для поиска и идентификации УВЗ.

Список использованных источников и литературы:

[1] Henke C. H. Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic) / C.H. Henke, M. Krieger, K. Strack, A. Zerilli // Interpretatio. 2020. Vol. 8. №4. P. 15 – 24.

[2] Gaikovich K.P., Gaikovich P.K. Inverse problem of near-field scattering in multilayer media // Inverse Problems, vol.26, no. 12, pp. 125013, 2010.

[3] Гололобов Д.В. Импедансные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала. // Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич, С.В. Калинцев / Доклады БГУИР. Мн, 2010. №6(52). С.13-17.

[4] Янушкевич В.Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В.Ф. Янушкевич. Новополоцк, ПГУ, 2017. 232с.

[5] Петров А.А. Опыт применения электромагнитных зондирований при поисках углеводородов в транзитной зоне Каспийского моря / А.А. Петров, М.С. Маловичко, А.Б. Кочеров, Е.Д. Лисицын // Геофизика. №2. 2010. С.60-64.

© В.Ф. Янушкевич, С.В. Калинцев, В.И. Раскин 2024