

УДК 621.371: 550.837.6

DOI 10.52928/2070-1624-2024-43-2-47-54

МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ДЛЯ ПОИСКА УГЛЕВОДОРОДОВ

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

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Проведено исследование режимов зондирования на основе комплексного использования модулированных и радиоимпульсных сигналов для определения свойств анизотропной среды над углеводородами. Для режима частотной модуляции установлены закономерности изменения составляющих тензора диэлектрической проницаемости среды для правой поляризации электромагнитных волн при вариации параметров модуляции. Исследованы модуль и фаза компонент поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} и \dot{Z}_{21} . Выявленные проявления скачкообразного изменения вещественных составляющих компоненты тензора диэлектрической проницаемости ϵ_3 представляют практическую значимость для поисковой геофизики. Проведен расчет резонансных частот, мнимой составляющей для правой поляризации электромагнитных волн тензора диэлектрической проницаемости среды для модулированных, двухчастотных и радиоимпульсных сигналов. Результаты моделирования могут быть использованы в электроразведке для разработки методов и аппаратуры поиска и обнаружения углеводородов.

Ключевые слова: углеводородная залежь, модулированный сигнал, резонансная частота.

Введение. Актуальность выделения углеводородных залежей (УВЗ) на исследуемом геологическом профиле определяется развитием технологий и методик геологических работ: например, на основе метода трехмерного математического моделирования влияния трехмерной неоднородности на электромагнитное поле при морском зондировании. Источником электромагнитного поля является движущийся электрический кабель, буксируемый судном по поверхности моря. Измерения проводятся на морском дне с помощью всплывающих датчиков. Выявляется компонента поля, наиболее чувствительная к неоднородности. Задача решается методом интегральных уравнений [1]. Предлагаются алгоритмы трехмерной покадровой инверсии электрического поля для CSAMT, направленные на преодоление сложностей геофизического мониторинга [2]. Используются электродинамические отклики анизотропной среды над углеводородами на воздействие различных зондирующих сигналов, а также методы каротажа скважин и метод с контролируемым источником (CSEM) для картирования мелководного участка морского дна [3–5].

В Китае были достигнуты значительные успехи в применении электромагнитных методов в нефтяной промышленности, включая технологии сбора, обработки и интерпретации данных [6]. Численные методы одномерного прямого моделирования и инверсии морских электромагнитных данных CSEM используются для изучения разрешения, свойственного различным конфигурациям сбора данных для тонких резистивных слоев, имитирующих морские углеводородные резервуары [7]. Целью исследования [8] было собрать набор высококачественных данных по известным месторождениям углеводородов для их картирования на основе дальнейшего развития CSEM. Режимы частотно-модулированных (ЧМ) сигналов повышают информативность исследований при вариации характеристик зондирующих сигналов [9]. Используются многоуровневые итерационные подходы с применением трехмерных уравнений Максвелла и моделирования электромагнитных полей [10]. Аномальные эффекты для электромагнитных волн (ЭМВ) в режиме двухчастотных сигналов служат для усовершенствования электромагнитных методов выделения углеводородов [11]. Развиваются комплексные подходы для совершенствования разработки трудноизвлекаемых запасов на основе исследования сдвиговых дислокаций залежей¹. Для поиска углеводородов применяются различные модели анизотропной среды над УВЗ [12]. В настоящее время широко применяются методы космического зондирования нефтеносных структур [13]. Выявленные в [14] эффекты взаимодействия ЭМВ и залежей дополняют имеющиеся данные о характеристиках среды и представляют практический интерес для поисковой геофизики.

¹ Афонин, Д. Г. Совершенствование разработки трудноизвлекаемых запасов на основе комплексного анализа о сдвиговых дислокациях юрских залежей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.17 / Д. Г. Афонин. – Тюмень, 2009. – 25 с.

Методика исследований. Отклик среды при облучении радиосигналом с частотной модуляцией с амплитудой E_2 , частотой несущего колебания ω_2 , модулирующей частотой ω_1 , индексом модуляции β характеризуется тензором [3]

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

где $\omega_{\Pi i}$ – частота плазменных колебаний;
 $\omega_{\Gamma i}$ – гиротропная частота;
 v_i – частота столкновения частиц;
 ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость профиля;
 σ_r – проводимость профиля;
 k_ω – коэффициент отношения частот;
 ε_0 – диэлектрическая постоянная.

При воздействии ЧМ-сигнала важную роль играет частотная составляющая

$$\tilde{\omega}_3 = \omega_2 [1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t]. \quad (2)$$

Исследования основаны на определении компонент тензоров

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

и поверхностного импеданса

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} &= -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\varepsilon}_R \dot{\varepsilon}_L}} (\sqrt{\dot{\varepsilon}_R} - \sqrt{\dot{\varepsilon}_L}), \\ \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} &= \frac{1}{2\sqrt{\dot{\varepsilon}_R \dot{\varepsilon}_L}} (\sqrt{\dot{\varepsilon}_R} + \sqrt{\dot{\varepsilon}_L}). \end{aligned} \quad (4)$$

Проводилось моделирование характеристик поверхностного импеданса при следующих данных:

– диэлектрическая проницаемость профиля $\varepsilon_r = 1 - 30$, электрическая проводимость пород $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-5} - 1$ См/м;

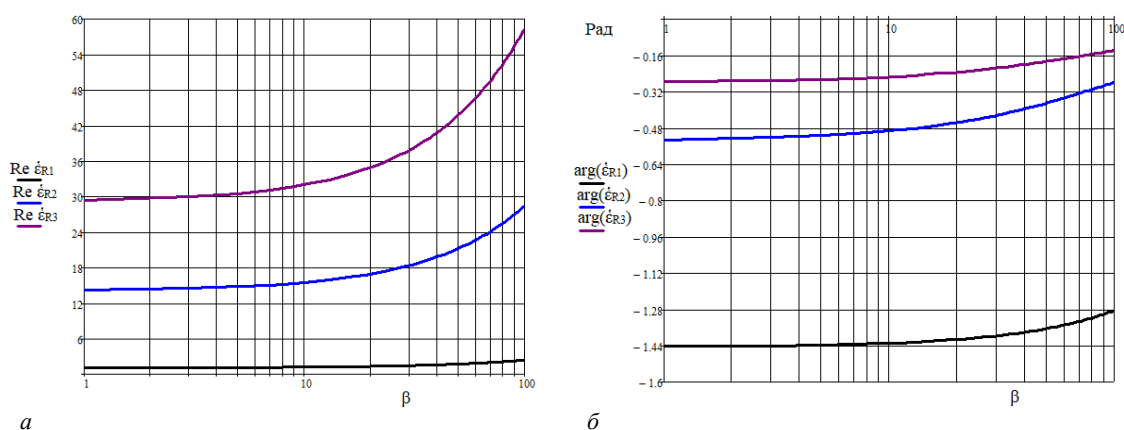
– концентрации частиц среды $N_e = (10^{15} - 10^{16}) \text{ м}^{-3}$, $N_n = (10^{17} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$;

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

Осуществлялось моделирование фазы тензоров среды для ЭМВ правой и левой поляризации, расчет резонансных частот, составляющих поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} и \dot{Z}_{21} , мнимой составляющей для суммарной компоненты тензора сигналов в режиме частотной, амплитудной, амплитудно-частотной модуляций, а также для двухчастотных и радиоимпульсных сигналов.

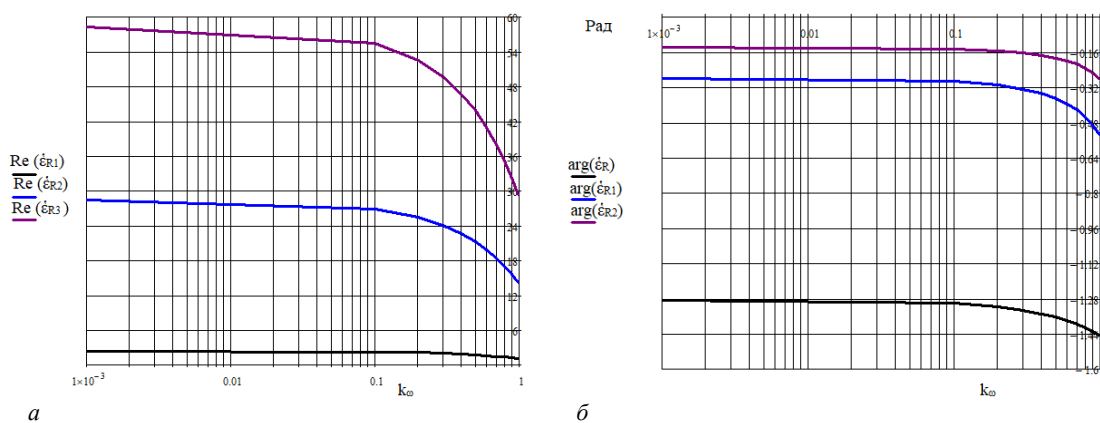
Результаты исследований. Для $k_\omega = 0,01$, $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $f_2 = 10^8$ Гц (рисунок 1) вещественная составляющая ЭМВ с правой поляризацией увеличивается при индексах модуляции $\beta = (10 - 100)$.

Увеличение диэлектрической проницаемости среды над УВЗ приводит к увеличению данной компоненты тензора. Аналогичный характер поведения фазовой составляющей ЭМВ с правой поляризацией проявляется при индексах модуляции $\beta = (10 - 100)$ и росте диэлектрической проницаемости вмещающих пород над УВЗ. В данном случае крутизна характеристик уменьшается. Для зависимостей компоненты тензора ЭМВ с правой поляризацией от коэффициента отношения частот для $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $f_2 = 10^8 \text{ Гц}$ (рисунок 2) наблюдается уменьшение вещественной составляющей, особенно при коэффициентах отношения частот $k_\omega = (0,1 - 1)$. Увеличение диэлектрической проницаемости наполнителя среды ведет к увеличению рассматриваемой компоненты тензора. Фаза компоненты тензора ЭМВ с правой поляризацией уменьшается при коэффициентах отношения частот $k_\omega = (0,1 - 1)$ с меньшей крутизной характеристик.



***a* – вещественная составляющая; *b* – фазовая составляющая;**
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R1}(\beta))$, $\text{arg}(\dot{\epsilon}_{R1}(\beta))$ для $\epsilon_r = 2$; $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R2}(\beta))$, $\text{arg}(\dot{\epsilon}_{R2}(\beta))$ для $\epsilon_r = 15$;
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R3}(\beta))$, $\text{arg}(\dot{\epsilon}_{R3}(\beta))$ для $\epsilon_r = 30$

Рисунок 1. – Зависимости суммарной компоненты тензора от индекса модуляции
для $k_\omega = 0,01$, $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $f_2 = 10^8 \text{ Гц}$

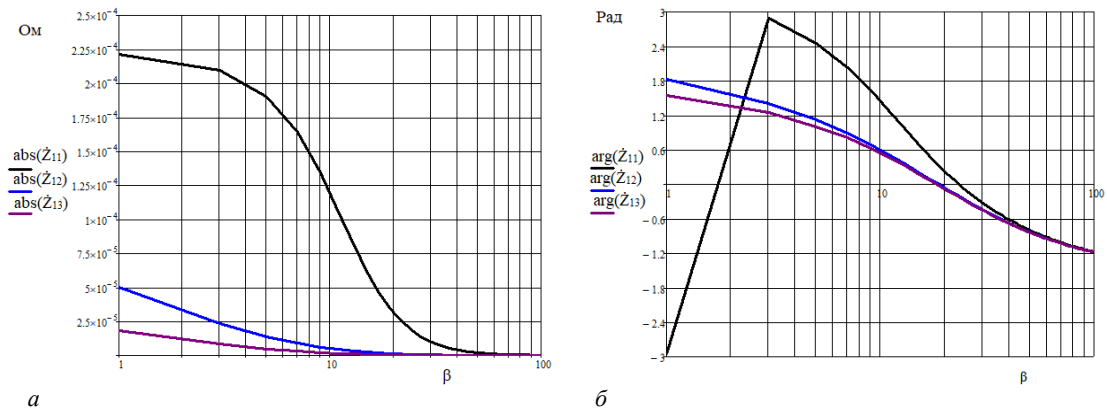


***a* – вещественная составляющая; *b* – фазовая составляющая;**
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R1}(k_\omega))$, $\text{arg}(\dot{\epsilon}_{R1}(k_\omega))$ для $\epsilon_r = 2$; $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R2}(k_\omega))$, $\text{arg}(\dot{\epsilon}_{R2}(k_\omega))$ для $\epsilon_r = 15$;
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R3}(k_\omega))$, $\text{arg}(\dot{\epsilon}_{R3}(k_\omega))$ для $\epsilon_r = 30$

Рисунок 2. – Зависимости суммарной компоненты тензора от коэффициента отношения частот
для $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $f_2 = 10^8 \text{ Гц}$

Проведено моделирование выражений (4) для вещественной и фазовой составляющих поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} геологического профиля над УВЗ в зависимости от вариации индекса модуляции для $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $f_2 = 10^8 \text{ Гц}$, $k_\omega = 0,5$ (рисунок 3). С ростом β модуль поверхностного

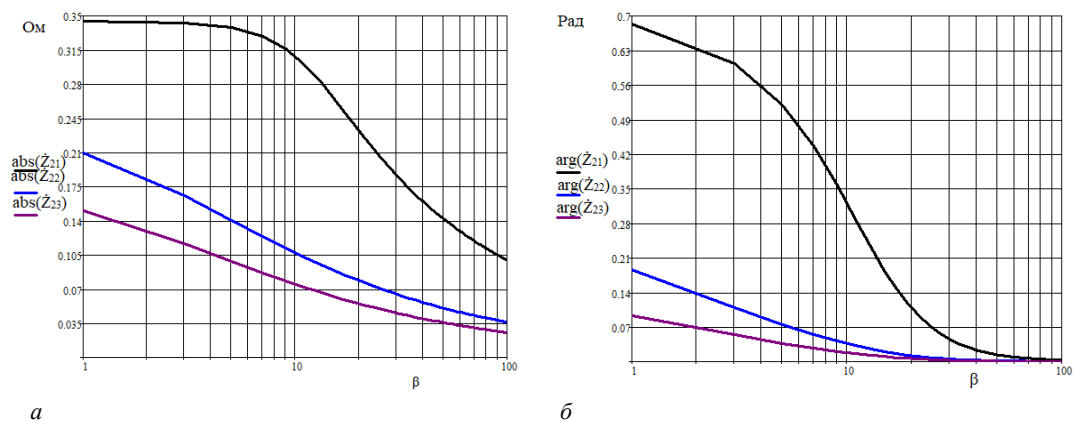
импеданса \dot{Z}_{11} уменьшается. Особенно контрастно происходит уменьшение модуля для низких значений диэлектрической проницаемости наполнителя среды над УВЗ. Фаза данной составляющей поверхностного импеданса уменьшается при росте индексов модуляции, за исключением $\varepsilon_r = 2$, когда наблюдается увеличение фазы с переходом через нуль на отрезке $\beta = (1 - 2)$. В дальнейшем фазовые характеристики переходят через нуль на отрезке $\beta = (17 - 25)$.



***a* – вещественная составляющая; *b* – фазовая составляющая;**
 $\text{abs}(\dot{Z}_{11}(\beta)), \text{arg}(\dot{Z}_{11}(\beta))$ для $\varepsilon_r = 2$; $\text{abs}(\dot{Z}_{12}(\beta)), \text{arg}(\dot{Z}_{12}(\beta))$ для $\varepsilon_r = 15$;
 $\text{abs}(\dot{Z}_{13}(\beta)), \text{arg}(\dot{Z}_{13}(\beta))$ для $\varepsilon_r = 30$

Рисунок 3. – Зависимости \dot{Z}_{11} от индекса модуляции
для $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $f_2 = 10^8 \text{ Гц}$, $k_\omega = 0,01$

Аналогичные компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} показаны на рисунке 4. Увеличение β приводит к уменьшению модуля поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} . Для низких значений диэлектрической проницаемости наполнителя среды над УВЗ происходит более контрастное изменение модуля. Фаза данной составляющей поверхностного импеданса уменьшается при росте индексов модуляции до нуля при $\varepsilon_r = (15 - 30)$ и $\beta = (30 - 40)$, при $\varepsilon_r = 2$ и $\beta \approx 80$.

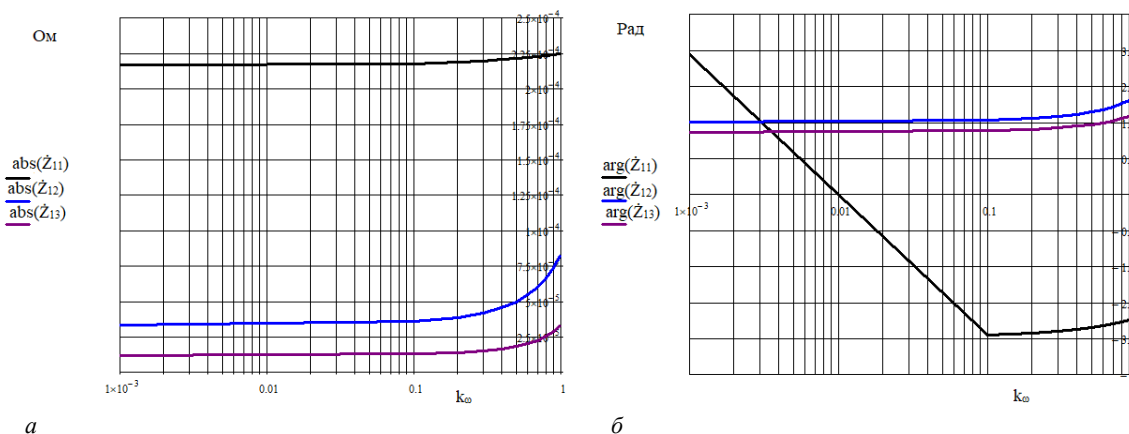


***a* – вещественная составляющая; *b* – фазовая составляющая;**
 $\text{abs}(\dot{Z}_{21}(\beta)), \text{arg}(\dot{Z}_{21}(\beta))$ для $\varepsilon_r = 2$; $\text{abs}(\dot{Z}_{22}(\beta)), \text{arg}(\dot{Z}_{22}(\beta))$ для $\varepsilon_r = 15$;
 $\text{abs}(\dot{Z}_{23}(\beta)), \text{arg}(\dot{Z}_{23}(\beta))$ для $\varepsilon_r = 30$

Рисунок 4. – Зависимости \dot{Z}_{21} от индекса модуляции
для $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $f_2 = 10^8 \text{ Гц}$, $k_\omega = 0,5$

Проведено моделирование выражений (4) для вещественной и фазовой составляющих поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} геологического профиля над УВЗ в зависимости от коэффициента отношения частот

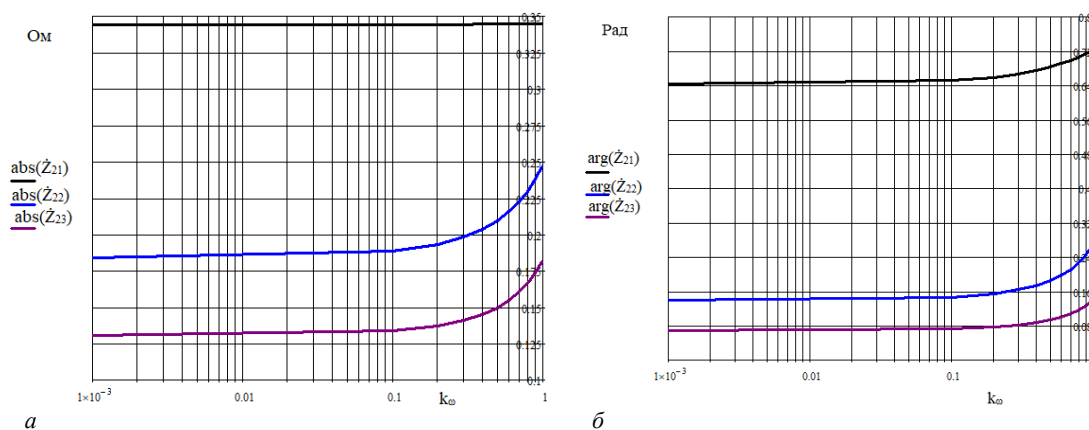
для $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $f_2 = 10^8 \text{ Гц}$ (рисунок 5). С ростом k_ω модуль поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} увеличивается. При увеличении диэлектрической проницаемости наполнителя среды над УВЗ модуль поверхностного импеданса уменьшается. Поведение фазы поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} среды происходит по аналогичному закону с меньшей крутизной характеристик. Следует отметить, что при $\epsilon_r = 2$ фаза уменьшается на отрезке $k_\omega = (10^{-3} - 0,1)$ с переходом через нуль при $k_\omega = 0,1$ и дальше происходит ее незначительный рост.



**a – вещественная составляющая; b – фазовая составляющая;
 $\text{abs}(\dot{Z}_{11}(k_\omega))$, $\text{arg}(\dot{Z}_{11}(k_\omega))$ для $\epsilon_r = 2$; $\text{abs}(\dot{Z}_{12}(k_\omega))$, $\text{arg}(\dot{Z}_{12}(k_\omega))$ для $\epsilon_r = 15$;
 $\text{abs}(\dot{Z}_{13}(k_\omega))$, $\text{arg}(\dot{Z}_{13}(k_\omega))$ для $\epsilon_r = 30$**

**Рисунок 5. – Зависимости \dot{Z}_{11} от коэффициента отношения частот
 для $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $f_2 = 10^8 \text{ Гц}$**

Проведено моделирование выражений (4) для вещественной и фазовой составляющих поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} геологического профиля над УВЗ в зависимости от коэффициента отношения частот (рисунок 6). Коэффициенты $k_\omega = (0,1 - 1)$ приводят к росту модуля поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} и его фазы с меньшей крутизной характеристик. С ростом диэлектрической проницаемости модуль и фаза поверхностного импеданса уменьшаются.

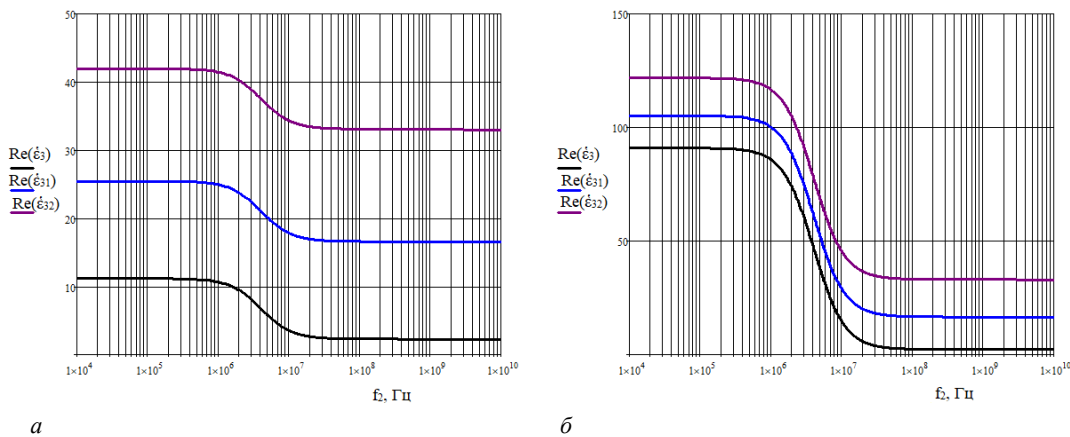


**a – вещественная составляющая; b – фазовая составляющая;
 $\text{abs}(\dot{Z}_{21}(k_\omega))$, $\text{arg}(\dot{Z}_{21}(k_\omega))$ – для $\epsilon_r = 2$; $\text{abs}(\dot{Z}_{22}(k_\omega))$, $\text{arg}(\dot{Z}_{22}(k_\omega))$ – для $\epsilon_r = 15$;
 $\text{abs}(\dot{Z}_{23}(k_\omega))$, $\text{arg}(\dot{Z}_{23}(k_\omega))$ – для $\epsilon_r = 30$**

**Рисунок 6. – Зависимости \dot{Z}_{21} от коэффициента отношения частот
 для $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $f_2 = 10^8 \text{ Гц}$**

Зависимости вещественной составляющей $\text{Re}(\dot{\epsilon}_3)$ от несущей частоты f_2 для $\beta = 1$, $k_\omega = 0,1$ приведены на рисунке 7 для $N_1 = 10^{15} \text{ м}^{-3}$, $N_2 = 10^{17} \text{ м}^{-3}$, $N_1 = 10^{15} \text{ м}^{-3}$, $N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Наблюдается скачкообразное уменьшение вещественной составляющей $\dot{\epsilon}_3$ при частотах $f_2 = (1 \cdot 10^6 - 10 \cdot 10^7) \text{ Гц}$. С ростом диэлектрической проницаемости вещественная составляющая $\dot{\epsilon}_3$ увеличивается. Для $N_1 = 10^{15} \text{ м}^{-3}$, $N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$ характеристики скачкообразно уменьшаются для $f_2 = (10^6 - 50 \cdot 10^7) \text{ Гц}$.

Определен диапазон изменения мнимой составляющей суммарной компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды в режиме АМ-сигналов при $\epsilon_r = 2$ для коэффициента АМ $k_m = 0,5$, модулирующей частоты $F = 10^4 \text{ Гц}$ и несущей частоты $f = 10^5 \text{ Гц}$.



$a - N_1 = 10^{15} \text{ м}^3$, $N_2 = 10^{17} \text{ м}^3$; $b - N_1 = 10^{15} \text{ м}^3$, $N_2 = 10^{18} \text{ м}^3$;
 $\text{Re}\dot{\epsilon}_3(f_2)$ – для $\epsilon_r = 2$; $\text{Re}\dot{\epsilon}_{31}(f_2)$ – для $\epsilon_r = 15$; $\text{Re}\dot{\epsilon}_{32}(f_2)$ – для $\epsilon_r = 30$

Рисунок 7. – Зависимости вещественной составляющей $\text{Re}(\dot{\epsilon}_3)$ от несущей частоты f_2 , $\beta = 1,0$, $k_\omega = 0,1$

Установлено, что частоты электронного циклотронного и электронного плазменного резонансов при диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_r = (10 - 30)$, электрической проводимости $\sigma_r = 10^{-3} \text{ См/м}$, частоте столкновения частиц $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9 \text{ рад/с}$, концентрациях частиц $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и $N_n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$ для режима НЧ-взаимодействия при коэффициентах соотношения частот и амплитуд $k_\omega = 10^{-6} - 10^{-1}$, $k_E = 10^{-1}$ соответствуют $(90 - 200) \text{ кГц}$ и $(29 - 115) \text{ МГц}$; для режима ВЧ-взаимодействия при $k_\omega = (10^{-6} - 10^{-1})$, $k_E = 10^1 - (15 - 40) \text{ кГц} - (5 - 35) \text{ МГц}$; при $\epsilon_r = (2 - 30)$ в режиме АМ-сигналов для коэффициента АМ $k_m = 0,5$, модулирующей частоты $F = 10^4 \text{ Гц} - (15 - 25) \text{ кГц} - (5 - 40) \text{ МГц}$; в режиме ЧМ-сигналов для $k_\omega = 0,1$, индекса модуляции $\beta = 1 - (12 - 20) \text{ кГц} - (5 - 35) \text{ МГц}$, в режиме АЧМ-сигналов для $\beta = 5$, модулирующей круговой частоты $\Omega = 10^5 \text{ рад/с}$, $k_m = 0,1 - (20 - 42) \text{ кГц} - (6 - 36) \text{ МГц}$, в режиме радиоимпульсных сигналов для $\epsilon_r = (5 - 25)$, длительности импульса $\tau = 10^{-4} \text{ с}$, периода $T = 2\tau$, количества гармоник $n = 5 - (65 - 90) \text{ кГц} - (800 \text{ кГц} - 2 \text{ МГц})$.

Определены фазовые составляющие тензоров диэлектрической проницаемости для электромагнитных волн с правой и левой поляризациями на частотах $(1 \text{ МГц} - 5 \text{ ГГц})$ в режиме АМ-сигналов для коэффициента АМ $k_m = 0,5$ и модулирующей частоты $F = 10^4 \text{ Гц}$.

Заключение. В результате проведенного анализа:

– Установлены увеличение составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} на участке $(1 \text{ МГц} - 1 \text{ ГГц})$ и максимумы модулей поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} при значениях диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_r = 1 - 30$, электрической проводимости $\sigma_r = 10^{-3} \text{ См/м}$, частоте столкновения частиц $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9 \text{ рад/с}$ при концентрациях частиц $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и $N_n = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ на частотах $(100 - 400) \text{ МГц}$ для режимов НЧ-

и ВЧ-взаимодействия, на частотах (20 – 400) МГц в режиме АМ-сигналов, на частотах (10 – 400) МГц в режимах ЧМ-, АЧМ- и радиоимпульсных сигналов. Данные закономерности поверхностного импеданса могут быть рекомендованы для комплексного использования модулированных и радиоимпульсных сигналов при определении свойств анизотропной среды над углеводородами. Определение импедансных характеристик в указанном частотном диапазоне, а также анализ контрастов поверхностного импеданса между анизотропными неоднородностями и однородными поверхностями будут способствовать повышению точности определения границ углеводородов.

– Установлены при значениях диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_r = (10 - 30)$, электрической проводимости $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, частоты столкновения частиц $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$ рад/с, концентраций частиц $N_e = N_n = 10^{16}$ м⁻³ для коэффициентов соотношения частот и амплитуд $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-1}$ максимумы модулей поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} на частотах (100 – 400) МГц и \dot{Z}_{21} на частотах (100 – 500) МГц для режима НЧ, на частотах (10 – 400) МГц и (1 МГц – 1 ГГц) при $k_\omega = (10^{-6} - 10^{-1})$, $k_E = 10^1$ для режима ВЧ-взаимодействия, для $\epsilon_r = (2 - 30)$ в режиме АМ-сигналов для коэффициента АМ $k_m = 0,5$, частоты модуляции $F = 10^4$ Гц, для индекса модуляции $\beta = 1$, $k_\omega = 10^{-3}$ в режиме ЧМ-сигналов, на частотах 1 ГГц и (1 – 200) МГц с уменьшением модуля \dot{Z}_{21} на частоте 1 ГГц для $\epsilon_r = (10 - 30)$, коэффициента АМ $k_m = 0,5$, $\beta = 5$, модулирующей круговой частоты $\Omega = 10^5$ рад/с в режиме АЧМ-сигналов, на частотах 100 кГц – 100 МГц и (4 – 30) МГц для длительности импульса $\tau = 10^{-4}$ с, периода $T = (2 - 5)\tau$, количества гармоник $n = 5$, $\epsilon_r = (5 - 30)$ для режима радиоимпульсных сигналов. Резонансный характер поведения модулей поверхностного импеданса позволит решать задачи поисковой геофизики, особенно в части идентификации (различения) слабоконтрастных сред. Разработка методов на основе определения импедансных характеристик направлена на снижение временных затрат при аттестации исследуемых геологических профилей и повышение производительности геологоразведочных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dmitriev V. I., Barashkov I. S. Mathematical modeling of marine electromagnetic sounding of a three-dimensional non-homogeneous medium // Computational Mathematics and Modelling. – 2012. – Vol. 23, iss. 3. – P. 168–174. – DOI: [10.1007/s10598-012-9134-1](https://doi.org/10.1007/s10598-012-9134-1).
2. Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method / Q. Sun, H. Tan, W. Wan et al. // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, iss. 14. – 1560. – DOI: [10.3390/app14041560](https://doi.org/10.3390/app14041560).
3. Янушкевич В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей. – Новополоцк, ПГУ, 2017. – 232 с.
4. Ellis D. V., Singer J. M. Well logging to earth scientists. – 2nd ed. – The Netherlands: Springer Science + Business Media B. V. – 2008. – 699 p.
5. Evans R. L. Using CSEM techniques to map the shallow section of seafloor: From the coastline to the edges of the continental slope // Geophysics. – 2007. – Vol. 72, iss. 2. – P. WA105–WA116. – DOI: [10.1190/1.2434798](https://doi.org/10.1190/1.2434798).
6. He Z., Hu W., Dong W. Petroleum electromagnetic prospecting advances and case studies in China // Surveys in Geophysics. – 2010. – Vol. 31. – P. 207–224. – DOI: [10.1007/s10712-009-9093-z](https://doi.org/10.1007/s10712-009-9093-z).
7. Key K. 1D inversion of multicomponent, multifrequency marine CSEM data: Methodology and synthetic studies for resolving thin resistive layers // Geophysics. – 2009. – Vol. 74, iss. 2. – P. F9–F20. – DOI: [10.1190/1.3058434](https://doi.org/10.1190/1.3058434).
8. Marine CSEM of the Scarborough gas field. Part 1: Experimental design and data uncertainty / D. Myer, S. Constable, K. Key et al. // Geophysics. – 2012. – Vol. 77, iss. 4. – P. E281–E299. – DOI: [10.1190/geo2011-0380.1](https://doi.org/10.1190/geo2011-0380.1).
9. Взаимодействие ЧМ-сигналов с анизотропной средой / Д. В. Гололобов [и др.] // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., 15–17 мая 2002 г. – Новополоцк, 2002. – С. 300–303.
10. Nechaev, O., Shurina E. P., Botchev M. A. Multilevel iterative solvers for the edge finite element solution of the 3D Maxwell equation // Computers & Mathematics with Applications. – 2008. – Vol. 55, iss. 10. – P. 2346–2362. – DOI: [10.1016/j.camwa.2007.11.003](https://doi.org/10.1016/j.camwa.2007.11.003).
11. Interaction of two-frequency electromagnetic waves with anisotropic media over hydrocarbon accumulation / V. F. Yanushkevich, D. A. Dauhiala, A. L. Adamovich et al. // Journal of Physics: Conf. Ser. – 2022. – Vol. 2373, iss. 5. – 052016. – DOI: [10.1088/1742-6596/2373/5/052016](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/5/052016).
12. Бабкин Ю. А. Электрохимические процессы в земной коре на примере залежей нефти и газа // Литасфера. – Минск: ИГН НАНБ, 1996. – № 9. – С. 121–124.
13. Губин В. Н. Космическое зондирование нефтеносных структур в Припятской нефтегазоносной области // Земля Беларуси. – 2013. – № 1. – С. 40–44.
14. Characteristics of anisotropic media over hydrocarbons in the mode of frequency-modulated signals / V. F. Yanushkevich, D. A. Dauhiala, T. V. Maladzechkina et al. // Journal of Physics: Conf. Ser. – 2022. – Vol. 2373, iss. 5. – 052026. – DOI: [10.1088/1742-6596/2373/5/052026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/5/052026).

REFERENCES

1. Dmitriev V. I., & Barashkov I. S. (2012). Mathematical modeling of marine electromagnetic sounding of a three-dimensional nonhomo-geneous medium. *Computational Mathematics and Modelling*, 23(3), 168–174. DOI: [10.1007/s10598-012-9134-1](https://doi.org/10.1007/s10598-012-9134-1).
2. Sun, Q., Tan, H., Wan, W., & Hu, Q. (2024). Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method. *Applied Sciences*, 14(4), 1560. DOI: [10.3390/app14041560](https://doi.org/10.3390/app14041560).
3. Yanushkevich, V. F. (2017). *Elektromagnitnye metody poiska i identifikatsii uglevodorodnykh zalezhei [Electromagnetic methods for searching and identifying hydrocarbon deposits]*. Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
4. Ellis, D. V., & Singer, J. M. (2008). *Well logging to earth scientists*. The Netherlands: Springer Science+Business Media B. V.
5. Evans, R. L. (2007). Using CSEM techniques to map the shallow section of seafloor: from the coastline to the edges of the continental slope. *Geophysics*, 72(2), WA105–WA116. DOI: [10.1190/1.2434798](https://doi.org/10.1190/1.2434798).
6. He Z., Hu W., Dong W. (2010). Petroleum electromagnetic prospecting advances and case studies in China. *Surveys in Geophysics*, 31, 207–224. DOI: [10.1007/s10712-009-9093-z](https://doi.org/10.1007/s10712-009-9093-z).
7. Key, K. (2009). 1D inversion of multicomponent, multifrequency marine CSEM data: Methodology and synthetic studies for resolving thin resistive layers. *Geophysics*, 74(2), F9–F20. DOI: [10.1190/1.3058434](https://doi.org/10.1190/1.3058434).
8. Myer, D., Constable, S., Key, K., Glinsky, M. E., & Liu, G. (2012). Marine CSEM of the Scarborough gas field. Part 1: Experimental design and data uncertainty. *Geophysics*, 77(4), E281 – E299. DOI: [10.1190/geo2011-0380.1](https://doi.org/10.1190/geo2011-0380.1).
9. Gololobov, D. V. et al. (2002). Vzaimodejstvie ChM-signalov s anizotropnoj sredoj. In *Problemy proektirovanija i proizvodstva radioelektronnyh sredstv* (300–303). Novopolock: PGU. (In Russ.).
10. Nechaev, O., Shurina, E. P., & Botchev, M. A. (2008). Multilevel iterative solvers for the edge finite element solution of the 3D Maxwell equation. *Computers & Mathematics with Applications*, 55(10), 2346–2362. [10.1016/j.camwa.2007.11.003](https://doi.org/10.1016/j.camwa.2007.11.003).
11. Yanushkevich, V. F., Dauhiala, D. A., Adamovich, A. L., Abramenska, S. N., & Kalintsau, S. V. (2022). Interaction of two-frequency electromagnetic waves with anisotropic media over hydrocarbon accumulation. *Journal of Physics: Conf. Ser.*, 2373(5), 052016. DOI: [10.1088/1742-6596/2373/5/052016](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/5/052016).
12. Babkin, Ju. A. (1996). Jelektrohimicheskie processy v zemnoj kore na primere zalezhej nefiti i gaza. *Litasfera*, (9), 121–124. Minsk: IGN NANB. (In Russ.).
13. Gubin V. N. (2013). Kosmicheskoe zondirovanie neftenosnyh struktur v Pripjatskoj neftegazonosnoj oblasti. [Remote Sensing Oil Structures of Pripyat's Oil and Gas Field]. *Zemlya Belarusi*, (1), 40–44. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Yanushkevich, V. F., Dauhiala, D. A., Maladzechkina, T. V., Kalintsau, S. V., & Bogush, V. A. (2022). Characteristics of anisotropic media over hydrocarbons in the mode of frequency-modulated signals. *Journal of Physics: Conf. Ser.*, 2373(5), 052026. DOI: [10.1088/1742-6596/2373/5/052026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/5/052026).

Послупила 03.09.2024

METHODS OF COMPLEX USE OF ELECTROMAGNETIC WAVES FOR SEARCHING FOR HYDROCARBONS

V. YANUSHKEVICH

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The study of sounding modes based on the complex use of modulated and radio pulse signals for determining the properties of anisotropic medium above hydrocarbons was carried out. For the frequency modulation mode, regularities in the change in the components of the permittivity tensor of the medium for the right-hand polarization of electromagnetic waves were established with varying modulation parameters. The modulus and phase of the surface impedance components \tilde{Z}_{11} and \tilde{Z}_{21} were investigated. The revealed manifestations of an abrupt change in the real components of the permittivity tensor component $\tilde{\epsilon}_3$ are of practical importance for exploration geophysics. The resonant frequencies and imaginary component for the right-hand polarization of electromagnetic waves of the permittivity tensor of the medium for modulated, dual-frequency and radio pulse signals were calculated. The modeling results can be used in electrical exploration for developing methods and equipment for searching and detecting hydrocarbons.

Keywords: hydrocarbon deposit, modulated signal, resonant frequency.