

УДК 621.371:550.837.6

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_3_56_81

EDN: XIXGXE

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ЗАЛЕЖАМИ В РЕЖИМЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

В.Ф. Янушкевич¹, С.В. Калинин¹, И.В. Судько¹, В.А. Богущ²

¹Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

DETERMINATION OF THE PROPERTIES OF THE ANISOTROPIC MEDIUM OVER HYDROCARBON RESERVES IN THE MODE OF AMPLITUDE-MODULATED SIGNALS

V.F. Yanushkevich¹, S.V. Kalintsev¹, I.V. Sudzko¹, V.A. Bogush²

¹Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

Аннотация. Рассмотрен анализ воздействия амплитудно-модулированных сигналов на характеристики анизотропной среды над залежами нефти и газа на основе квазигидродинамического подхода. Исследованы компоненты поверхностного импеданса диэлектрической проницаемости среды, образующейся над углеводородными залежами. Проведено моделирование характеристик среды над скоплениями углеводородов для электромагнитных волн от частоты несущего колебания, коэффициента амплитудной модуляции, частоты модуляции и проводимости диэлектрического наполнителя. Рекомендованы режимы зондирования анизотропных сред над углеводородами на основе изменения абсолютной и фазовой составляющих компонент поверхностного импеданса подстилающей поверхности. Предложено внедрение различных методов и аппаратуры для повышения точности определения границ залежей углеводородов. Результаты исследований могут быть применены в поисковой геофизике.

Ключевые слова: углеводородная залежь, электромагнитная волна, амплитудно-модулированный сигнал.

Для цитирования: *Определение свойств анизотропной среды над углеводородными залежами в режиме амплитудно-модулированных сигналов* / В.Ф. Янушкевич, С.В. Калинин, И.В. Судько, В.А. Богущ // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 3 (56). – С. 81–87. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_3_56_81. – EDN: XIXGXE

Abstract. The analysis of the effect of amplitude-modulated signals on the characteristics of an anisotropic medium over oil and gas deposits based on a quasi-hydrodynamic approach is considered. The components of the surface impedance of the dielectric constant of the medium formed over the hydrocarbon deposits are investigated. The modeling of the characteristics of the medium above the accumulations of hydrocarbons for electromagnetic waves from the frequency of the carrier vibration, the amplitude modulation coefficient, the modulation frequency and the conductivity of the dielectric filler has been carried out. The modes of sounding of anisotropic media over hydrocarbons based on the changes in the absolute and phase components of the surface impedance of the underlying surface are recommended. The introduction of various methods and equipment is proposed to improve the accuracy of determining the boundaries of hydrocarbon deposits. The research results can be applied in exploration geophysics.

Keywords: hydrocarbon reservoir, electromagnetic wave, amplitude-modulated signal.

For citation: *Determination of the properties of the anisotropic medium over hydrocarbon reserves in the mode of amplitude-modulated signals* / V.F. Yanushkevich, S.V. Kalintsev, I.V. Sudzko, V.A. Bogush // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2023. – № 3 (56). – P. 81–87. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_3_56_81 (in Russian). – EDN: XIXGXE

Введение

Актуальность усовершенствования электромагнитных методов (ЭММ) георазведки основывается на повышении точности и производительности разрабатываемых методов выделения углеводородов за счет расширения функциональной зависимости компонентов диэлектрической проницаемости среды над залежами от режимов зондирования [1], [2]. Разработка и модификация современных методов поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа

вызвана требованиями улучшения выделения границ и уровня идентификации месторождений углеводородных залежей (УВЗ) [3], [4]. Современное состояние науки и техники позволяет производить оценку возможностей использования высокоэффективных технологий поиска полезных ископаемых при освоении площадей с наличием углеводородных ресурсов. Достижение высоких показателей точности и идентификации возможно при поиске, оконтуривании залежей нефти и газа с помощью радиокомплексирования

ЭММ георазведки, где применена аналогия исследуемой среды над залежью нефти и газа с плазмоподобным образованием с использованием для изучения взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ существующих решений при изучении плазмы и плазмоподобных сред. Установлено, что окружающее углеводороды пространство содержит твердый кристаллический скелет, пронизанный электролитом и проводящими включениями за счет минералов с электронной проводимостью, и находится в физическом и химическом равновесии с окружающей средой [5]. Направление тенденций развития поисковой геофизики акцентировано на решение задач внедрения эффективных методов георазведки с высоким уровнем точности и достоверности выделения месторождений УВЗ с использованием методов широкого спектра [6].

Дифференциация анизотропных сред может быть осуществлена на основе применения для обнаружения УВЗ методов 3D-электроразведки с становлением полей в исследуемой среде [7]. Выбор методов ЭММ и построение электродинамических моделей сред, образующихся над скоплениями нефти и газа, реализуется в различных модифицированных способах и средствах для реализации вертикального зондирования при поиске углеводородов [8]. Определение аномалий поля в анизотропной среде находит широкое использование для установления и дифференциации свойств геологического профиля местности [9].

Исследование влияния высокой температуры и пластовых давлений над УВЗ на электрохимические и электрофизические процессы и образование на границе с воздушным пространством промежуточной области с избытком свободных электронов, оказывающих воздействие на электродинамический отклик анизотропной среды, определяет методику проведения экспериментальных испытаний при радиоволновом зондировании [10]. Использование сложных амплитудно-частотно-модулированных сигналов и модификации способов поиска УВЗ на их базе построены на обнаружении месторождений углеводородов по регистрации амплитудных и фазовых компонент ЭМВ для исследуемого геологического участка местности [11]. Осуществление мониторинга коллекторов и геотермальных исследований среды на основе универсальных способов применяется в поисковой геофизике для решения поставленных задач электроразведки [12]. Высокие показатели и совместное применение морских магнитотеллурических и гравиметрических данных измерений с учетом сейсмических ограничений актуальны в современных системах поиска полезных ископаемых [13]. Активное внедрение различных методов и аппаратурных средств для обнаружения углеводородов основано на решении данных задач с достаточно

хорошими характеристиками и оценке возможностей использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на шельфах [14]. Применение квазигидродинамического подхода и исследование компонентов составляющих поверхностного импеданса анизотропной среды над УВЗ с учетом влияния на самый верхний слой от всех ниже расположенных слоев проведено в работе [15]. Активное внедрение методов исследования поверхностного импеданса и аппаратурных средств для обнаружения углеводородов основано на решении данных задач с высокой точностью обнаружения [16]. Внедряются различные методы и аппаратурные средства для обнаружения углеводородов на решении данных задач с достаточно хорошими характеристиками [17], [18].

1 Анализ взаимодействия амплитудно-модулированных сигналов с анизотропной средой над УВЗ

Взаимодействие амплитудно-модулированных (АМ) сигналов с анизотропным наполнителем над скоплением углеводородов рассмотрено в работе [4]. Для реализации новых методов электроразведки представляют интерес процессы взаимодействия АМ сигналов на основе получения дополнительных режимов взаимодействия.

Рассмотрим воздействие на анизотропную среду АМ радиосигнала следующего вида:

$$e(t) = E(1 + k_m \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (1.1)$$

где E – амплитуда несущего колебания; k_m – коэффициент амплитудной модуляции; $\Omega = 2\pi F$, $\omega = 2\pi f$ – соответственно модулирующая и несущая частоты. Компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды для такого режима имеют вид [4]:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r + \sum_{i=1}^2 \left\{ \omega_{mi}^2 \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} + \right. \\ &\quad \left. + j \left[\frac{\epsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega(1 + k_m \cos \Omega t)} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{\omega_{mi}^2 v_i}{\omega} \frac{\omega^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} \right] \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{mi}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{2j v_i \omega_{mi}^2 \omega_{\Gamma i}}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r + \sum_{i=1}^2 \left\{ \omega_{mi}^2 \frac{1}{v_i^2 + \omega^2} + \right. \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$+ j \left[\frac{\varepsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega(1+k_m \cos \Omega t)} - \frac{\sigma_r}{\omega \varepsilon_0} - \frac{\omega_m^2 v_i}{\omega} \frac{1}{\omega^2 + v_i^2} \right] \Bigg\}.$$

В выражениях (1.2) фигурируют компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ $\hat{\varepsilon}_1, \hat{\varepsilon}_2, \hat{\varepsilon}_3$; плазменная частота ω_m ; гиротропная частота ω_{gi} ; частота столкновения частиц v_i ; относительная диэлектрическая проницаемость среды ε_r ; проводимость среды σ_r ; диэлектрическая постоянная ε_0 .

Методика исследований заключается в определении компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ по формулам:

$$\dot{Z} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} \end{bmatrix}. \quad (1.3)$$

Составляющие матрицы (1.3) рассчитываются по формулам:

$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} = -\frac{1}{2j\sqrt{\hat{\varepsilon}_R \hat{\varepsilon}_L}} (\sqrt{\hat{\varepsilon}_R} - \sqrt{\hat{\varepsilon}_L}), \quad (1.4)$$

$$\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} = \frac{1}{2\sqrt{\hat{\varepsilon}_R \hat{\varepsilon}_L}} (\sqrt{\hat{\varepsilon}_R} + \sqrt{\hat{\varepsilon}_L}),$$

где

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}_R &= \hat{\varepsilon}_1 + \hat{\varepsilon}_2 = \text{Re} \varepsilon_R + j \text{Im} \varepsilon_R \\ \hat{\varepsilon}_L &= \hat{\varepsilon}_1 - \hat{\varepsilon}_2 = \text{Re} \varepsilon_L + j \text{Im} \varepsilon_L. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Проводился анализ составляющих поверхностного импеданса среды над УВЗ для параметров среды над залежами углеводородов [1]: значения диэлектрической проницаемости вмещающих пород $\hat{\varepsilon}_R = 1-30$ и электрической проводимости $\sigma_r = 10^{-5} - 1$ См/м; концентрации частиц $N_e = N_u = 10^{16} - 10^{18} \text{ м}^{-3}$, частота столкновения частиц $\nu = 2\pi \cdot 10^9$ рад/с.

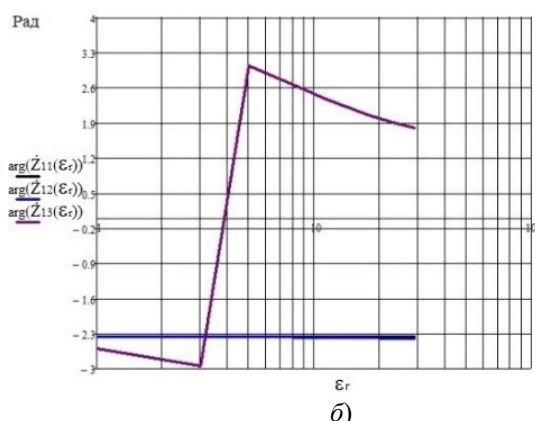
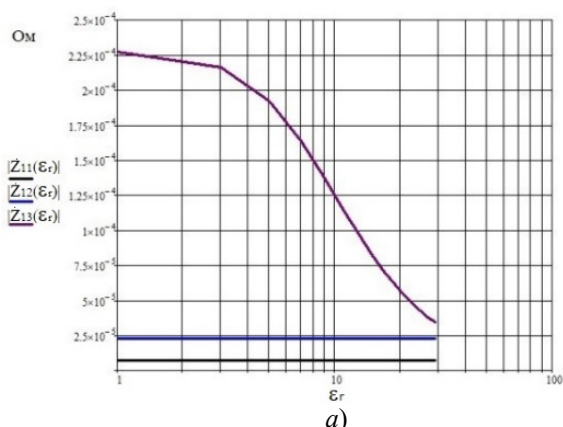


Рисунок 2.1 – Зависимости абсолютной и фазовой составляющей компонент поверхностного импеданса: а) абсолютная часть поверхностного импеданса, б) фазовая часть поверхностного импеданса

$$\begin{aligned} &|\dot{Z}_{11}(\varepsilon_r)|, \arg(\dot{Z}_{11}(\varepsilon_r)) - \text{для } K_m = 0,5, F = 10^4 \text{ Гц}, f = 10^5 \text{ Гц}; \\ &|\dot{Z}_{12}(\varepsilon_r)|, \arg(\dot{Z}_{12}(\varepsilon_r)) - \text{для } K_m = 0,5, F = 10^4 \text{ Гц}, f = 10^6 \text{ Гц}; \\ &|\dot{Z}_{13}(\varepsilon_r)|, \arg(\dot{Z}_{13}(\varepsilon_r)) - \text{для } K_m = 0,5, F = 10^4 \text{ Гц}, f = 10^8 \text{ Гц} \end{aligned}$$

2 Результаты исследований

Проведен анализ выражений (1.4) для компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ. Зависимости абсолютной и фазовой составляющей компонент поверхностного импеданса приведены на рисунке 2.1 (а – абсолютная часть поверхностного импеданса, б – фазовая часть поверхностного импеданса). Как видно из рисунка, абсолютная составляющая поверхностного импеданса не подвержена влиянию низких частот зондирования. На частоте несущего колебания $f = 10^8$ Гц с ростом диэлектрической проницаемости наполнителя происходит уменьшение рассматриваемой составляющей сопротивления анизотропной среды.

Как видно из рисунка, фазовая составляющая \dot{Z}_{11} не изменяется при низких частотах несущего колебания, а с ростом частоты несущего колебания возрастает от отрицательных значений и имеет точку перехода через нуль при диэлектрической проницаемости, равной 4.

Зависимости абсолютной и фазовой составляющей компонент поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} приведены на рисунке 2.2. Как видно из рисунка, абсолютная составляющая \dot{Z}_{21} поверхностного импеданса монотонна при низких частотах зондирования. На частоте несущего колебания $f = 10^8$ Гц с ростом диэлектрической проницаемости наполнителя происходит уменьшение рассматриваемой составляющей сопротивления анизотропной среды, аналогично, как и для предыдущего случая. Как видно из рисунка, фазовая составляющая \dot{Z}_{21} не изменяется при низких частотах несущего колебания, а с ростом частоты несущего колебания уменьшается с ростом диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ.

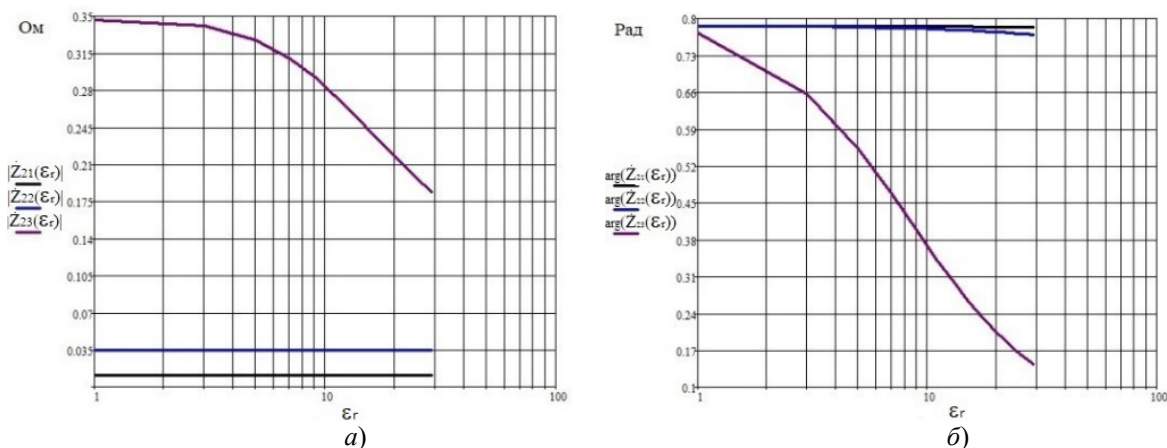


Рисунок 2.2 – Зависимости абсолютной и фазовой составляющей компонент поверхностного импеданса: а) абсолютная часть поверхностного импеданса, б) фазовая часть поверхностного импеданса

$$|\dot{Z}_{21}(\epsilon_r)|, \arg(\dot{Z}_{21}(\epsilon_r)) \text{ – для } K_m = 0,5, F = 10^4 \text{ Гц}, f = 10^5 \text{ Гц};$$

$$|\dot{Z}_{22}(\epsilon_r)|, \arg(\dot{Z}_{22}(\epsilon_r)) \text{ – для } K_m = 0,5, F = 10^4 \text{ Гц}, f = 10^6 \text{ Гц};$$

$$|\dot{Z}_{23}(\epsilon_r)|, \arg(\dot{Z}_{23}(\epsilon_r)) \text{ – для } K_m = 0,5, F = 10^4 \text{ Гц}, f = 10^8 \text{ Гц}$$

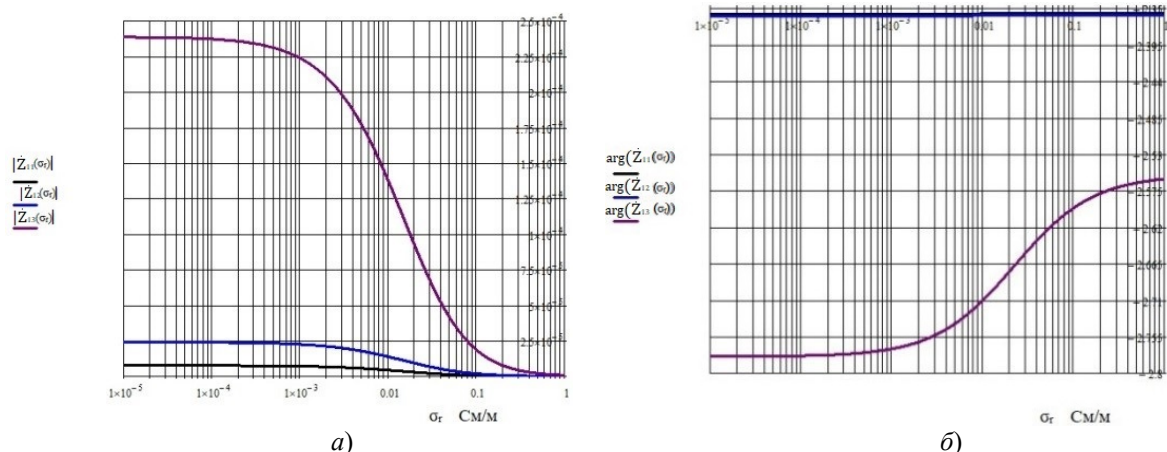


Рисунок 2.3 – Зависимости абсолютной и фазовой составляющей компонент поверхностного импеданса: а) абсолютная часть поверхностного импеданса, б) фазовая часть поверхностного импеданса

$$|\dot{Z}_{11}(\sigma_r)|, \arg(\dot{Z}_{11}(\sigma_r)) \text{ – для } K_m = 0,5, F = 10^4 \text{ Гц}, f = 10^5 \text{ Гц};$$

$$|\dot{Z}_{12}(\sigma_r)|, \arg(\dot{Z}_{12}(\sigma_r)) \text{ – для } K_m = 0,5, F = 10^4 \text{ Гц}, f = 10^6 \text{ Гц};$$

$$|\dot{Z}_{13}(\sigma_r)|, \arg(\dot{Z}_{13}(\sigma_r)) \text{ – для } K_m = 0,5, F = 10^4 \text{ Гц}, f = 10^8 \text{ Гц}$$

Проведено моделирование зависимостей абсолютной и фазовой составляющей компонент поверхностного импеданса (рисунок 2.3) от проводимости анизотропной среды над УВЗ. Установлено, что низкие значения частот несущего колебания не влияют ни на амплитудную, ни на фазовые компоненты рассматриваемой составляющей.

Применение частоты несущего колебания $f = 10^8$ Гц расширяет информативность результатов моделирования. Изменения происходят на отрезке (0,001 – 1) См/м, что и актуально для исследования характера проводимости окружающего углеводороды пространства.

Процедура диагностики среды над УВЗ осуществляется по методике решения обратной задачи за счет набора конкретных значений расстояний и конкретизации электродинамических моделей УВЗ с учетом влажности слоев, климатических факторов и особенностей измерений сезонного характера. Было установлено, что вариации частоты несущей АМ колебания не влияет ни на амплитудные, ни на фазовые составляющие поверхностного импеданса (согласно рисунков 2.5, 2.6).

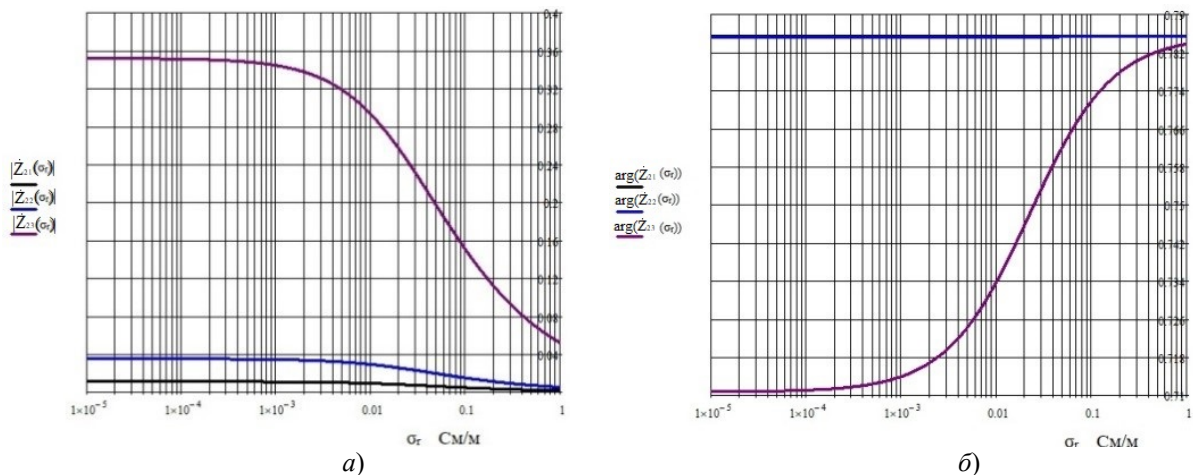


Рисунок 2.4 – Зависимости абсолютной и фазовой составляющей компонент поверхностного импеданса: а) абсолютная часть поверхностного импеданса, б) фазовая часть поверхностного импеданса

$$\begin{aligned} &|\dot{Z}_{21}(\sigma_r)|, \arg(\dot{Z}_{21}(\sigma_r)) - \text{для } K_m = 0,5, F = 10^4 \text{ Гц}, f = 10^5 \text{ Гц}; \\ &|\dot{Z}_{22}(\sigma_r)|, \arg(\dot{Z}_{22}(\sigma_r)) - \text{для } K_m = 0,5, F = 10^4 \text{ Гц}, f = 10^6 \text{ Гц}; \\ &|\dot{Z}_{23}(\sigma_r)|, \arg(\dot{Z}_{23}(\sigma_r)) - \text{для } K_m = 0,5, F = 10^4 \text{ Гц}, f = 10^8 \text{ Гц} \end{aligned}$$

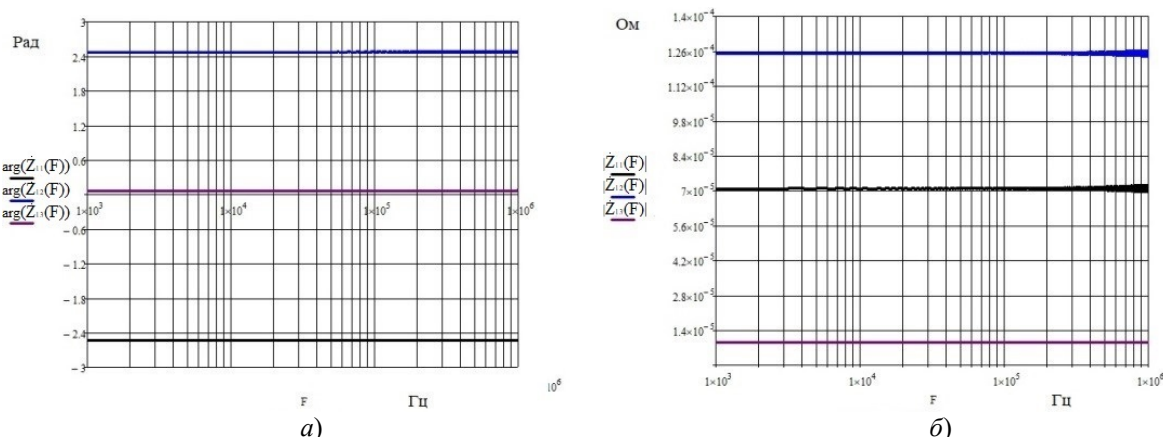


Рисунок 2.5 – Зависимости абсолютной и фазовой составляющей компонент поверхностного импеданса: а) абсолютная часть поверхностного импеданса, б) фазовая часть поверхностного импеданса

$$\begin{aligned} &|\dot{Z}_{11}(F)|, \arg(\dot{Z}_{11}(F)) - \text{для } K_m = 0,5, \epsilon_r = 10, f = 10^7 \text{ Гц}; \\ &|\dot{Z}_{12}(F)|, \arg(\dot{Z}_{12}(F)) - \text{для } K_m = 0,5, \epsilon_r = 10, f = 10^8 \text{ Гц}; \\ &|\dot{Z}_{13}(F)|, \arg(\dot{Z}_{13}(F)) - \text{для } K_m = 0,5, \epsilon_r = 10, f = 10^9 \text{ Гц} \end{aligned}$$

Поверхностный импеданс содержит различные структуры кристаллического скелета. Возможен учет влияния электролитов, пронизывающих скелет и проводящих включений за счет минералов с электронной проводимостью. Также было установлено, что коэффициент АМ не влияет на характеристики поверхностного импеданса, за исключением вариации несущего колебания, когда такое влияние имеется. Импедансные характеристики среды над УВЗ дают качественную и количественную оценку электродинамических параметров сред за счет выделения аномальных эффектов при распространении ЭМВ над данной средой. Анализ взаимодействия АМ

сигналов показал, что режимы модуляции вызывают в компонентах тензоров диэлектрической проницаемости дополнительные составляющие, которые зависят от параметров сигналов (только в режиме изменения несущего колебания). Все это приводит к расширению функциональных зависимостей компонентов тензоров от режимов модуляции, позволяя тем самым повысить информативность разрабатываемых методов поиска УВЗ.

На основе проведенных исследований взаимодействия ЭМВ и АС предложены новые методы электроразведки, позволяющие повысить уровень достоверности поиска и выделения УВЗ.

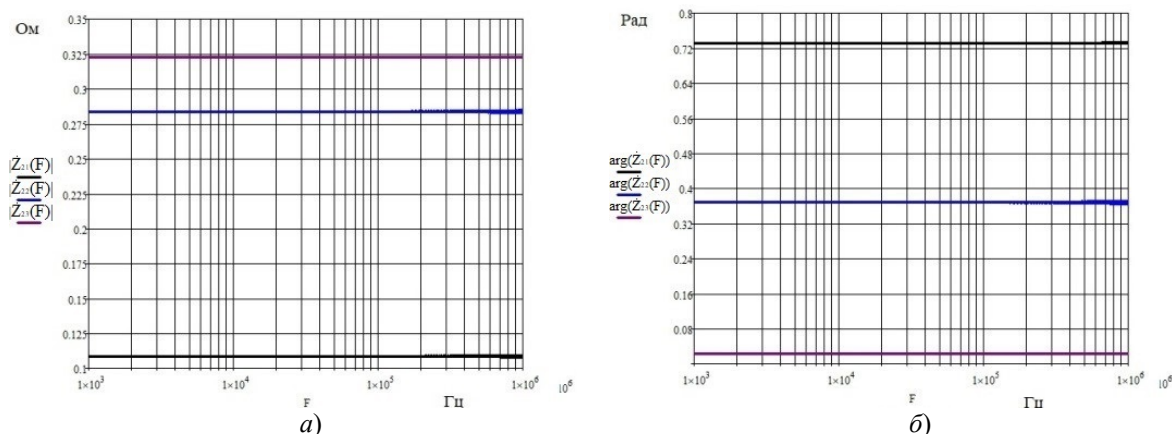


Рисунок 2.6 – Зависимости абсолютной и фазовой составляющей компонент поверхностного импеданса: а) абсолютная часть поверхностного импеданса, б) фазовая часть поверхностного импеданса

$$\begin{aligned} & \left| \dot{Z}_{21}(F) \right|, \arg(\dot{Z}_{21}(F)) \text{ – для } K_m = 0,5, \varepsilon_r = 10, f = 10^7 \text{ Гц}; \\ & \left| \dot{Z}_{22}(F) \right|, \arg(\dot{Z}_{22}(F)) \text{ – для } K_m = 0,5, \varepsilon_r = 10, f = 10^8 \text{ Гц}; \\ & \left| \dot{Z}_{23}(F) \right|, \arg(\dot{Z}_{23}(F)) \text{ – для } K_m = 0,5, \varepsilon_r = 10, f = 10^9 \text{ Гц} \end{aligned}$$

Заключение

Проведенный анализ распространения ЭМВ в среде над углеводородами в режиме АМ сигналов показал, что:

1. На частоте несущего колебания $f = 10^8$ Гц происходит изменение абсолютной и фазовой составляющих компонент поверхностного импеданса анизотропной среды над углеводородами.
2. Импедансные характеристики среды над УВЗ дают качественную и количественную оценку при значениях проводимости диэлектрического наполнителя на отрезке (0,001 – 1) См/м.
3. Вариации частоты модуляции, коэффициента АМ колебаний не влияет ни на амплитудные, ни на фазовые составляющие поверхностного импеданса, за исключением режима изменения несущей частоты колебания, когда такая зависимость имеется.

ЛИТЕРАТУРА

1. *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.
2. *Бурцев, М.И.* Поиски и разведка месторождений нефти и газа / М.И. Бурцев. – Москва: Издательство Российского университета дружбы народов, 2006. – 264 с.
3. *Гололобов, Д.В.* Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск: Бестпринт, 2009. – 185 с.
4. *Янушкевич, В.Ф.* Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В.Ф. Янушкевич. – Новополюцк: ПГУ, 2017. – 232с.

5. *Гололобов, Д.В.* Радиоконспектирование методов электромагнитной разведки при поиске залежей углеводородов / Д.В. Гололобов // Доклады БГУИР. – 2008. – № 8 (38). – С. 30–36.

6. *Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic)* / С.Н. Henke, М. Krieger, К. Strack, А. Zerilli // Interpretatio. – 2020. – Vol. 8, № 4. – P. 15–24.

7. *Anderson, C.* An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source / С. Anderson, J. Mattsson // First Break. – 2010. – First Break. – Vol. 28, iss.5. – P. 71–75.

8. *Helwig, S.L.* Vertical-vertical controlled-source electromagnetic instrumentation and acquisition / S.L. Helwig, W. Wood, B. Gloux // Geophysical Prospecting. – 2019. – Vol. 67, № 6. – P. 1582–1594.

9. *Fraseri, A.* Self-potential anomalies as possible indicators in search for oil and gas reservoirs / A. Frasherri // 57th EAGE Conf. and Tech. Exhib., Glasgow, 29 May – 2 June 1995. – Glasgow, UK. – P. 8.

10. *Гололобов, Д.В.* Поиски, разведка и мониторинг залежей нефти, газа и угля радиоволновым методом / Д.В. Гололобов, А.А. Кураев, Ю.Н. Стадник // Геологической службе России 300 лет: тез. докл. междунар. геофиз. конф.; гл. ред. А.А. Петров [и др.]. – Санкт-Петербург, 2005 г. – ВИРГ – Рудгеофизика, 2000. – С. 171.

11. *Степуленок, С.В.* Взаимодействие амплитудно-частотно-модулированных сигналов со средой над углеводородными залежами / С.В. Степуленок, В.Ф. Янушкевич // Вестник ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. – 2009. – № 9. – С. 103–108.

12. Geldmacher, I.A. Fit-for-purpose electromagnetic System for Reservoir Monitoring and Geothermal Exploration / I.A. Geldmacher, K. Strack // GRC Transactions. – 2017. – Vol. 41. – P. 1649–1658.

13. Совместная инверсия морских магнитотеллурических и гравиметрических данных с учетом сейсмических ограничений - предварительные результаты построения изображений суббазальтов у Фарерского шельфа / М. Джеген, Р.В. Хобс, П. Тариц, А. Чаве // Планета Земля Sci Lett. – 2009. – С. 47–55.

14. Оценка возможностей использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на шельфах. Оптика атмосферы и океана / Н.И. Ковалев, Т.А. Филимонова, В.А. Гох [и др.] // Материалы III Всерос. конф. «Добыча, подготовка, транспортировка нефти и газа». – Томск, 20–24 сент. 2004 г. – Томск: Ин-т оптики атмосферы СО РАН, 2004. – С. 67–70.

15. Adamovskiy, E. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits / E. Adamovskiy, V. Yanushkevich // 8 Junior researchers conference European and national dimen-

sion in research. In 3 Parts. – Part 3. Technology. – PSU, Novopolotsk, 2016. – P. 179–183.

16. Гололобов, Д.В. Импедансные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич, С.В. Калинин // Доклады БГУИР. – 2010. – № 6 (52). – С. 13–17.

17. Time lapse CSEM reservoir monitoring of the Norne field with vertical dipoles / T. Holten, X. Luo, G. Naevdal, S.L. Helwig // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2016. – Vol. 35. – P. 971–975.

18. Констебл, С. Десять лет морской CSEM для разведки углеводородов / С. Констебл // Геофизика. – 2010. – Т. 75. – № 5.

Поступила в редакцию 26.06.2023.

Информация об авторах

Янушкевич Виктор Францевич – к.т.н., доцент
Калинцев Сергей Викторович – ст. преподаватель
Судько Илья Вячеславович – студент
Богуш Вадим Анатольевич – д.ф.-м.н., профессор