



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-25-32>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.371:550.837.6

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ИМПЕДАНСА СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ЗАЛЕЖАМИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ¹, О. А. КИЗИНА¹, В. А. БОГУШ²

¹Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой
(г. Новополоцк, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 07.07.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Исследовано взаимодействие радиоимпульсных сигналов в анизотропной среде над залежами углеводородов. При проведении экспериментов выполняли компьютерное моделирование характеристик анизотропных сред. Получены зависимости вещественных, мнимых и фазовых компонент характеристик поверхностного импеданса анизотропной среды над углеводородами от ее диэлектрической проницаемости, частоты взаимодействующих с ней радиоимпульсных сигналов и количества гармоник спектра последних. На основе результатов исследований даны рекомендации по повышению точности определения границ залежей углеводородов с применением методов электроразведки, основанных на использовании радиоимпульсных сигналов. Результаты исследований могут быть применены в поисковой геофизике для обнаружения залежей нефти и газа.

Ключевые слова: углеводородная залежь, породы-коллекторы, подземный резервуар, геологоразведочные работы, электроразведка, вертикальное зондирование, сейсмические ограничения, электронный плазменный резонанс.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Янушкевич, В. Ф. Закономерности изменения поверхностного импеданса среды над углеводородными залежами при воздействии радиоимпульсных сигналов / В. Ф. Янушкевич, О. А. Кизина, В. А. Богуш // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 5. С. 25–32. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-25-32>.

REGULARITIES OF CHANGES IN THE SURFACE IMPEDANCE OF THE MEDIUM OVER HYDROCARBON DEPOSITS UNDER THE INFLUENCE OF RADIO PULSED SIGNALS

VIKTOR F. YANUSHKEVICH¹, OKSANA A. KIZINA¹, VADIM A. BOGUSH²

¹Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (Novopolotsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 07.07.2023

Abstract. The interaction of radio pulse signals in an anisotropic medium over hydrocarbon deposits has been studied. During the experiments, computer simulation of the characteristics of anisotropic media was performed. The dependences of the real, imaginary, and phase components of the characteristics of the surface impedance of an anisotropic medium over hydrocarbons on its dielectric constant, the frequency of radio pulse signals interacting with it, and the number of spectrum harmonics of the latter are obtained. Based on the research results,

recommendations are given to improve the accuracy of determining the boundaries of hydrocarbon deposits using electrical exploration methods based on the use of radio pulse signals. The research results can be applied in prospecting geophysics for the discovery of oil and gas deposits.

Keywords: hydrocarbon deposit, reservoir rocks, underground reservoir, geological exploration, electrical exploration, vertical sounding, seismic restrictions, electron plasma resonance.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Yanushkevich V. F., Kizina O. A., Bogush V. A. (2023) Regularities of Changes in the Surface Impedance of the Medium Over Hydrocarbon Deposits Under the Influence of Radio Pulsed Signals. *Doklady BGUIR*. 21 (5), 25–32. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-25-32> (in Russian).

Введение

Актуальность рассматриваемых в статье задач заключается в необходимости повышения производительности геологоразведочных работ (в том числе в условиях сложной геологической обстановки), точности определения границ углеводородных залежей (УВЗ) нефти и газа, чувствительности и информативности методов поиска и выделения таких УВЗ [1–3]. Повышение производительности геологоразведочных работ основано на модернизации существующих электромагнитных методов (ЭММ) георазведки УВЗ [4–8]. По результатам проведения геологоразведочных работ установлено, что УВЗ по своим физическим свойствам отличаются от пород-коллекторов, в которых они располагаются [9]. Наблюдаются различия в изменении компонент тензоров диэлектрической проницаемости и поверхностного импеданса среды над УВЗ и над породами-коллекторами при зондировании в широком диапазоне амплитуд и частот.

Данные исследований образцов пород над УВЗ свидетельствуют о повышенном содержании в них щелочных и щелочноземельных металлов, а также изотопных элементов [10]. Дифференциация исследуемых сред при освоении площадей с наличием УВЗ может осуществляться на основе исследования подземных резервуаров [11]. Реализация вертикального зондирования при поиске УВЗ на основе ЭММ связана с построением соответствующих электродинамических моделей сред, образующихся над УВЗ (в частности, зависимостей параметров диэлектрической проницаемости среды над УВЗ от характеристик воздействующих на нее электромагнитных волн) [12, 13]. Идентификация УВЗ выполняется путем анализа этих моделей [13].

С использованием ЭММ можно выявить различия не только между сопротивлением сред над УВЗ и сопротивлением сред не над УВЗ, но и между такими характеристиками электромагнитных волн, как амплитуды их спектральных составляющих, фаза, поляризация и т. п. [14]. Поисковая геофизика на современном этапе развития может использовать результаты исследований на базе совместного применения морских магнитотеллурических и гравиметрических данных измерений с учетом сейсмических ограничений [15].

Методология исследований

Исследование влияния параметров радиоимпульсных сигналов на характеристики анизотропных сред над УВЗ проводили с помощью математического и компьютерного моделирования. Первоначально на основании данных литературных источников выводили аналитические соотношения. Далее полученные соотношения вводили в пакет математического моделирования MathCAD версии 14. Результаты исследований оформляли в виде соответствующих графиков.

Рассматривали процесс взаимодействия электромагнитных волн с УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов с частотой $\omega = 2\pi F_2$, частотой несущего сигнала ω_p , длительностью импульса τ . Моделирование проводили для таких параметров среды над УВЗ [6], как: диэлектрическая проницаемость вмещающих пород $\epsilon_r = 1-30$, электрическая проводимость $\sigma_r = (1 \cdot 10^{-5}-1)$ См/м, концентрация частиц $N_e = N_i = (10^{16}-10^{18})$ м⁻³, частота столкновения частиц $\nu = (0,6\pi \cdot 10^9-3\pi \cdot 10^9)$ рад/с. Компоненты тензора диэлектрической проницаемости при этом имели такой же вид, который был показан в [7].

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

$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} = -\frac{1}{2j\sqrt{\epsilon_R\epsilon_L}}(\sqrt{\epsilon_R} - \sqrt{\epsilon_L}); \quad (1)$$

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

где $\dot{\epsilon}_R, \dot{\epsilon}_L$ – компоненты комбинационных составляющих тензоров диэлектрической проницаемости среды над УВЗ.

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе исследований проводили моделирование зависимостей компонентов поверхностного импеданса от частоты радиоимпульсных сигналов для абсолютной и мнимой составляющих поверхностного импеданса (рис. 1). При построении зависимостей использовали следующие данные: количество гармоник радиоимпульсных сигналов $n = 5$ и электрическую проводимость $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м для различных значений диэлектрической проницаемости ϵ_r :

- для кривых $|\dot{Z}_{11}(F_2)|$, $\text{Im}(\dot{Z}_{11}(F_2)) - \epsilon_r = 10$;
- для кривых $|\dot{Z}_{12}(F_2)|$, $\text{Im}(\dot{Z}_{12}(F_2)) - \epsilon_r = 15$;
- для кривых $|\dot{Z}_{13}(F_2)|$, $\text{Im}(\dot{Z}_{13}(F_2)) - \epsilon_r = 20$.

Согласно рис. 1, на частотах радиоимпульсных сигналов $1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^8$ Гц происходит увеличение абсолютной компоненты поверхностного импеданса. Данный факт хорошо коррелируется со значениями частоты электронного плазменного резонанса [6]. С уменьшением диэлектрической проницаемости наполнителя вмещающих пород значение данной компоненты поверхностного импеданса уменьшается. Значения составляющих тензора анизотропной среды над УВЗ зависят от физико-химических процессов в самой УВЗ и условий залегания (давления и температуры), влияющих на электрические свойства вмещающих пород и сред над УВЗ, поэтому значение поверхностного импеданса для точки резонанса может изменяться.

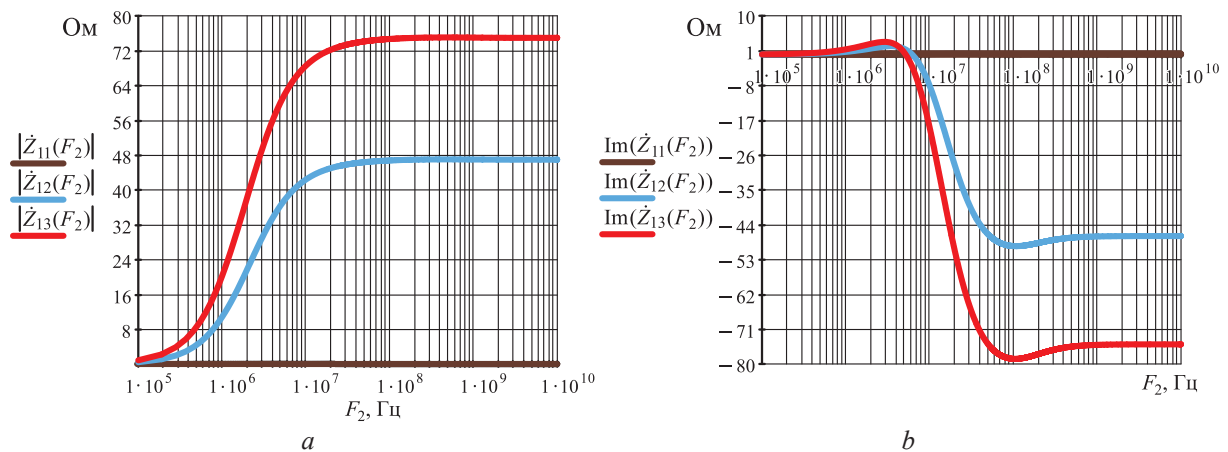


Рис. 1. Зависимость компонентов поверхностного импеданса от частоты радиоимпульсных сигналов для составляющей поверхностного импеданса: *a* – абсолютной $|\dot{Z}_{11}|$; *b* – мнимой $\text{Im}(\dot{Z}_{11})$

Fig. 1. Dependences of the components of the surface impedance on the frequency of the radio pulse signals for component of the surface impedance: *a* – absolute $|\dot{Z}_{11}|$; *b* – imaginary $\text{Im}(\dot{Z}_{11})$

Мнимые составляющие компоненты поверхностного импеданса практически постоянны в диапазоне частот $1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^7$ Гц (100 кГц–10 МГц). На отрезке $1 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^7$ Гц (10–50 МГц) происходит их уменьшение, и на оставшемся диапазоне частот мнимые составляющие компоненты поверхностного импеданса постоянны. Причем на частотах порядка $2 \cdot 10^8$ Гц (200 МГц) происходит незначительное увеличение обеих компонент поверхностного импеданса. С ростом диэлектрической проницаемости частота перехода кривых $\text{Im}(\dot{Z}_{11})$ через ось частот (переход через нуль) смещается влево (рис. 1, *b*).

На рис. 2 приведены графики моделирования зависимостей компонентов поверхностного импеданса от частоты радиоимпульсного сигнала для фазовой и вещественной составляющих поверхностного импеданса. При построении зависимостей использовали следующие данные: количество гармоник радиоимпульсных сигналов $n = 5$ и электрическую проводимость $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м для различных значений диэлектрической проницаемости ϵ_r :

- для кривых $\arg(\dot{Z}_{11}(F_2))$, $\text{Re}(\dot{Z}_{21}(F_2)) - \epsilon_r = 10$;

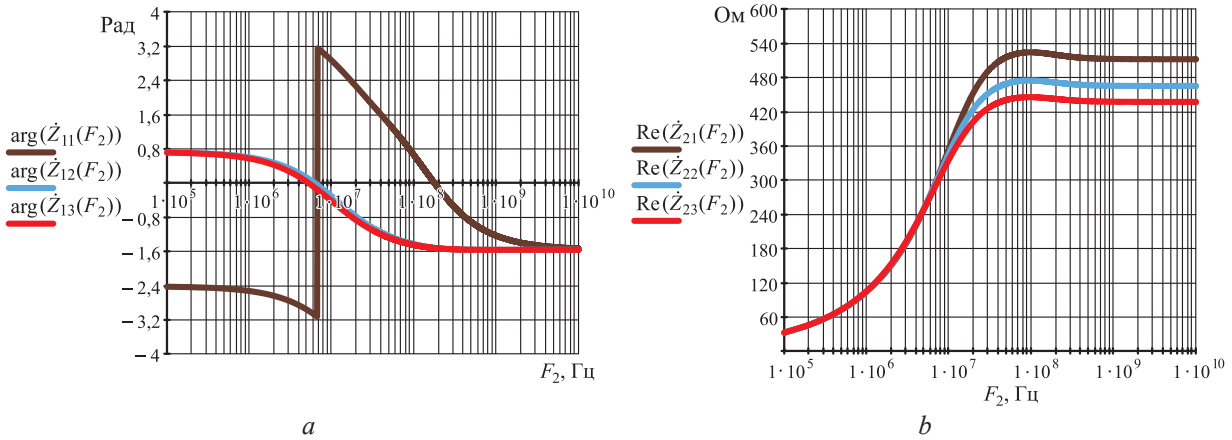


Рис. 2. Зависимость компонентов поверхностного импеданса от частоты радиоимпульсных сигналов для составляющей поверхностного импеданса: *a* – фазовой $\arg(\dot{Z}_{11})$; *b* – вещественной $\text{Re}(\dot{Z}_{21})$
Fig. 2. Dependences of the components of the surface impedance on the frequency of the radio pulse signals for component of the surface impedance: *a* – phase $\arg(\dot{Z}_{11})$; *b* – real $\text{Re}(\dot{Z}_{21})$

- для кривых $\arg(\dot{Z}_{12}(F_2)), \text{Re}(\dot{Z}_{22}(F_2)) - \epsilon_r = 15$;
- для кривых $\arg(\dot{Z}_{13}(F_2)), \text{Re}(\dot{Z}_{23}(F_2)) - \epsilon_r = 20$.

Фазовые характеристики компоненты поверхностного импеданса $\arg(\dot{Z}_{11})$ практически постоянны в диапазоне частот $1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^7$ Гц (100 кГц–10 МГц). На отрезке $5 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^7$ Гц (5–10 МГц) происходит скачкообразное увеличение фазы и на оставшемся диапазоне частот фаза постепенно уменьшается вплоть до отрицательных значений в диапазоне частот свыше 10^9 Гц. С ростом диэлектрической проницаемости частота перехода фазовой компоненты (рис. 2, *a*) через ось частот (переход через нуль) смещается влево. На частотах $1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^8$ Гц происходит увеличение вещественной составляющей поверхностного импеданса $\text{Re}(\dot{Z}_{21})$. Данный факт хорошо коррелирует со значениями частоты электронного плазменного резонанса [6]. С уменьшением диэлектрической проницаемости наполнителя вмещающих пород значение $\text{Re}(\dot{Z}_{21})$ увеличивается.

Исследование зависимостей компонентов поверхностного импеданса от частоты радиоимпульсных сигналов для мнимой и фазовой составляющих поверхностного импеданса представлено на рис. 3. При построении зависимостей использовали следующие данные: количество гармоник радиоимпульсных сигналов $n = 5$ и электрическую проводимость $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м для различных значений диэлектрической проницаемости ϵ_r :

- для кривых $\text{Im}(\dot{Z}_{21}(F_2)), \arg(\dot{Z}_{21}(F_2)) - \epsilon_r = 10$;

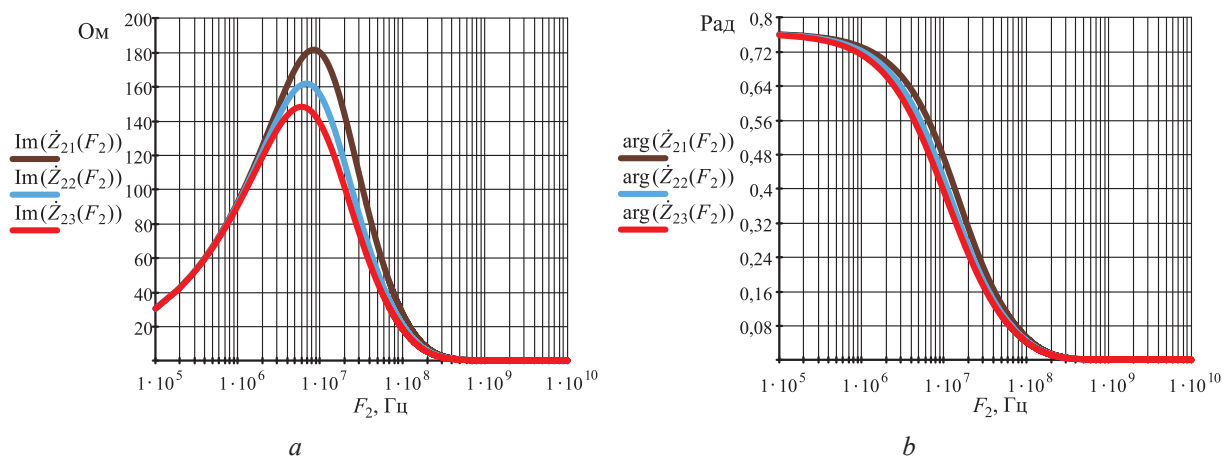


Рис. 3. Зависимость компонентов поверхностного импеданса от частоты радиоимпульсных сигналов для составляющей поверхностного импеданса: *a* – мнимой $\text{Im}(\dot{Z}_{21})$; *b* – фазовой $\arg(\dot{Z}_{21})$
Fig. 3. Dependences of the components of the surface impedance on the frequency of the radio pulse signals for component of the surface impedance: *a* – imaginary $\text{Im}(\dot{Z}_{21})$; *b* – phase $\arg(\dot{Z}_{21})$

- для кривых $\text{Im}(\dot{Z}_{22}(F_2)), \text{arg}(\dot{Z}_{22}(F_2)) - \epsilon_r=15$;
- для кривых $\text{Im}(\dot{Z}_{23}(F_2)), \text{arg}(\dot{Z}_{23}(F_2)) - \epsilon_r=20$.

Как видно из рис. 3, а, существуют частоты резонансов мнимой компоненты $\text{Im}(\dot{Z}_{21})$. Они находятся на отрезке $5 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^7$ Гц (5–10 МГц) и с ростом диэлектрической проницаемости вмещающих пород над УВЗ смещаются влево по оси частот. Фазовая характеристика $\text{arg}(\dot{Z}_{21})$ (рис. 3, б) составляющей поверхностного импеданса скачкообразно уменьшается в диапазоне $1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^8$ Гц (1–100 МГц) и с ростом диэлектрической проницаемости вмещающих пород над УВЗ смещается влево по оси частот. В диапазоне частот $1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6$ Гц (100 кГц–1 МГц) фаза стабильна. После $1 \cdot 10^8$ Гц (100 МГц) $\text{arg}(\dot{Z}_{21})$ постепенно уменьшается до нуля. Частота резонанса $\text{Im}(\dot{Z}_{21})$ (рис. 3, а) может смещаться в область более $1 \cdot 10^7$ Гц (10 МГц), так как значения составляющих тензора анизотропной среды над УВЗ зависят от концентрации частиц, которая, в свою очередь, определяется физико-химическими процессами в самой УВЗ и условиями залегания (давление, температура), влияющими на электрические свойства вмещающих пород и сред над УВЗ.

Моделирование зависимостей компонентов поверхностного импеданса от количества гармоник радиоимпульсных сигналов для вещественной и мнимой составляющих поверхностного импеданса представлено на рис. 4, а для фазовой и вещественной – на рис. 5.

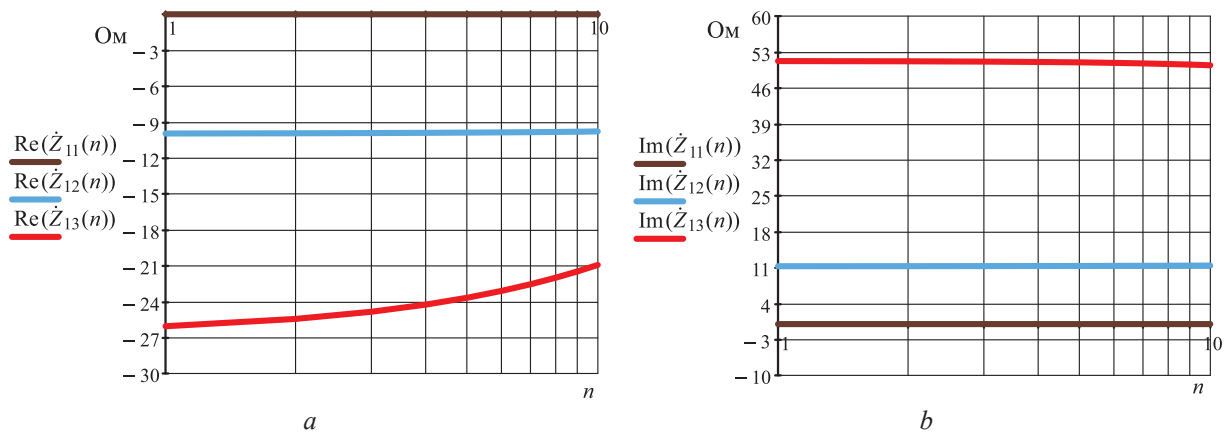


Рис. 4. Зависимость компонентов поверхностного импеданса от количества гармоник радиоимпульсных сигналов для составляющей поверхностного импеданса:

а – вещественной $\text{Re}(\dot{Z}_{11})$; б – мнимой $\text{Im}(\dot{Z}_{11})$

Fig. 4. Dependences of the surface impedance components on the number of radio pulse signals harmonics for component of the surface impedance: а – real $\text{Re}(\dot{Z}_{11})$; б – imaginary $\text{Im}(\dot{Z}_{11})$

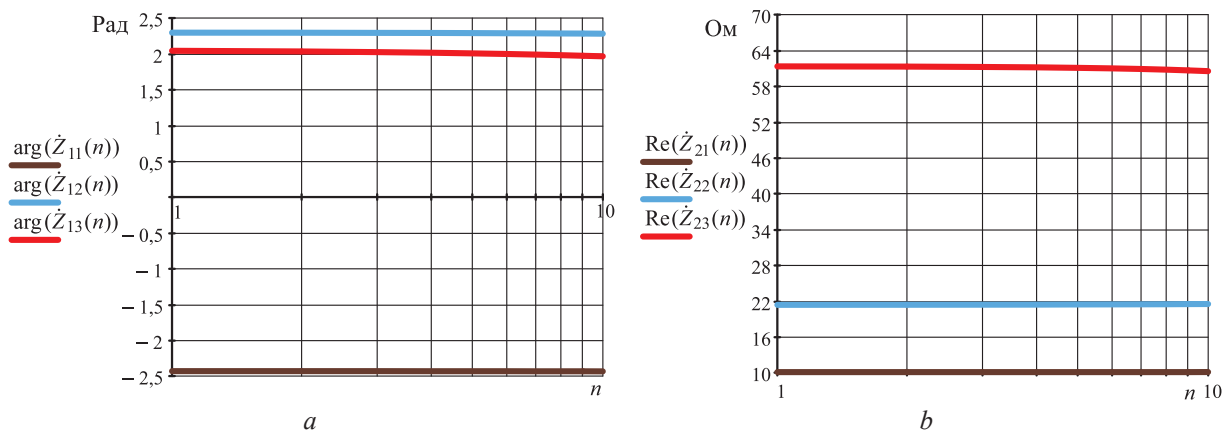


Рис. 5. Зависимость компонентов поверхностного импеданса от количества гармоник радиоимпульсных сигналов для составляющей поверхностного импеданса:

а – фазовой $\text{arg}(\dot{Z}_{11})$; б – вещественной $\text{Re}(\dot{Z}_{21})$

Fig. 5. Dependences of the surface impedance components on the number of radio pulse signals harmonics for component of the surface impedance: а – phase $\text{arg}(\dot{Z}_{11})$; б – real $\text{Re}(\dot{Z}_{21})$

При построении зависимостей на рис. 4 использовали следующие данные: частоту радиоимпульсных сигналов $F_2 = 10^5$ Гц, электрическую проводимость $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\varepsilon_r = 10$ для кривых $\text{Re}(\dot{Z}_{11}(n))$, $\text{Im}(\dot{Z}_{11}(n))$; $F_2 = 10^6$ Гц, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\varepsilon_r = 15$ для кривых $\text{Re}(\dot{Z}_{12}(n))$, $\text{Im}(\dot{Z}_{12}(n))$; $F_2 = 10^7$ Гц, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\varepsilon_r = 20$ для кривых $\text{Re}(\dot{Z}_{13}(n))$, $\text{Im}(\dot{Z}_{13}(n))$. При построении зависимостей на рис. 5 использовали следующие данные: $F_2 = 10^5$ Гц, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\varepsilon_r = 10$ для кривых $\text{arg}(\dot{Z}_{11}(n))$, $\text{Re}(\dot{Z}_{21}(n))$; $F_2 = 10^6$ Гц, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\varepsilon_r = 15$ для кривых $\text{arg}(\dot{Z}_{12}(n))$, $\text{Re}(\dot{Z}_{22}(n))$; $F_2 = 10^7$ Гц, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\varepsilon_r = 20$ для кривых $\text{arg}(\dot{Z}_{13}(n))$, $\text{Re}(\dot{Z}_{23}(n))$.

Следует отметить, что зависимости на рис. 4, 5 для указанных компонент практически неизменны. Влияние количества гармоник радиоимпульсных сигналов проявляется особенно на частоте $F_2 = 10^7$ Гц и с ростом диэлектрической проницаемости и только для вещественной составляющей поверхностного импеданса $\text{Re}(\dot{Z}_{21})$. Установлено, что вещественные составляющие $\text{Re}(\dot{Z}_{21})$ практически неизменны при вариации диэлектрической проницаемости и частоты радиоимпульсных сигналов, причем с увеличением частоты радиоимпульсных сигналов наблюдается увеличение данной компоненты.

На рис. 6 представлены зависимости компонентов поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} от количества гармоник радиоимпульсных сигналов для мнимой и фазовой составляющих поверхностного импеданса. При построении зависимостей использовали следующие данные: $F_2 = 10^5$ Гц, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\varepsilon_r = 10$ для кривых $\text{Im}(\dot{Z}_{21}(n))$, $\text{arg}(\dot{Z}_{21}(n))$; $F_2 = 10^6$ Гц, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\varepsilon_r = 15$ для кривых $\text{Im}(\dot{Z}_{22}(n))$, $\text{arg}(\dot{Z}_{22}(n))$; $F_2 = 10^7$ Гц, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\varepsilon_r = 20$ для кривых $\text{Im}(\dot{Z}_{23}(n))$, $\text{arg}(\dot{Z}_{23}(n))$.

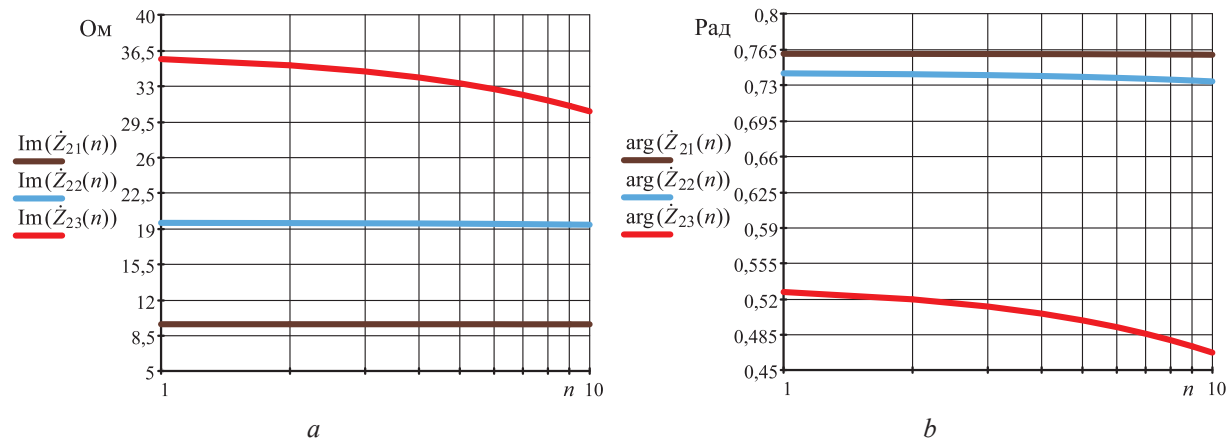


Рис. 6. Зависимость компонентов поверхностного импеданса от количества гармоник радиоимпульсных сигналов для составляющей поверхностного импеданса: a – мнимой $\text{Im}(\dot{Z}_{21})$; b – фазовой $\text{arg}(\dot{Z}_{21})$

Fig. 6. Dependences of the surface impedance components on the number of radio pulse signals harmonics for component of the surface impedance: a – imaginary $\text{Im}(\dot{Z}_{21})$; b – phase $\text{arg}(\dot{Z}_{21})$

Следует отметить, что мнимые составляющие поверхностного импеданса $\text{Im}(\dot{Z}_{21})$ (рис. 6, a) практически неизменны. Влияние количества гармоник радиоимпульсных сигналов проявляется особенно на частоте $F_2 = 10^7$ Гц и с ростом диэлектрической проницаемости. Фазовые составляющие поверхностного импеданса $\text{arg}(\dot{Z}_{21})$ практически неизменны при вариации диэлектрической проницаемости и частоты радиоимпульсных сигналов, за исключением частоты $F_2 = 10^7$ Гц и значения диэлектрической проницаемости $\varepsilon_r = 20$. Установлено, что информативность электромагнитных методов поиска УВЗ может быть повышена за счет получения дополнительных данных по исследуемому геологическому профилю местности в зависимости от расстояния между приемником и передатчиком.

Заключение

1. Проведенный анализ параметров процесса взаимодействия радиоимпульсных сигналов со средой над углеводородными залежами показал, что:

– существуют частоты резонансов мнимой составляющей поверхностного импеданса $\text{Im}(\dot{Z}_{21})$, находящиеся на отрезке 5–10 МГц и смещающиеся влево по оси частот с ростом диэлектрической проницаемости вмещающих пород над углеводородными залежами;

– фазовая характеристика составляющей поверхностного импеданса $\arg(\dot{Z}_{21})$ скачкообразно уменьшается в диапазоне 1–100 МГц;

– на частотах $1 \cdot 10^5$ – $1 \cdot 10^8$ Гц происходит увеличение абсолютной составляющей поверхностного импеданса $|\dot{Z}_{11}|$, а на отрезке 10–50 МГц – уменьшение мнимой $\text{Im}(\dot{Z}_{11})$;

– для выделения границ и идентификации углеводородных залежей можно рекомендовать частоту радиоимпульсных сигналов $F_2 = 10^7$ Гц, на которой проявляется влияние количества гармоник радиоимпульсных сигналов.

2. Полученные результаты исследований могут быть применены в поисковой геофизике для обнаружения углеводородных залежей нефти и газа.

Список литературы

1. Subsalt Imaging in Northern Germany Using Multi-Physics (Magnetotellurics, Gravity, and Seismic) / С. Н. Henke [et al.] // *Interpretatio*. 2020. Vol. 8, No 4. P. 15–24. DOI: 10.1190/int-2020-0026.1.
2. Geldmacher, I. A Fit-for-Purpose Electromagnetic System for Reservoir Monitoring and Geothermal Exploration / I. Geldmacher, K. Strack // *GRC Transactions*. 2017. Vol. 41. P. 1649–1658. DOI: 10.3997/2214-4609.201702593.
3. Time Lapse CSEM Reservoir Monitoring of the Norne Field with Vertical Dipoles / T. Holten [et al.] // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 2016. Vol. 35. P. 971–975. DOI: 10.1190/segam2016-13858739.1.
4. Anderson, C. An Integrated Approach to Marine Electromagnetic Surveying Using a Towed Streamer and Source / C. Anderson, J. Mattsson // *First Break*. 2010. Vol. 28, Iss. 5. P. 71–75.
5. Moskvichew, V. N. Interaction of Electromagnetic Waves (EMW) with Anisotropic Inclusion in Communication Line / V. N. Moskvichew // 9th Microw. Conf. NICON–91, Rydzyna, May 20–22. 1991. Vol. 1. P. 240–244.
6. Гололобов, Д. В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д. В. Гололобов. Минск: Бестпринт, 2009.
7. Янушкевич, В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В. Ф. Янушкевич. Новополоцк: Полоцк. госуд. ун-т им. Ефросинии Полоцкой, 2017.
8. Способ электромагнитной разведки коллекторов углеводородов: пат. DE 2395563 / L. M. Maegregor, M. C Sinha, R. Weaner. Оpubл. 01.12.2004.
9. Effect of a Powerful Low-Frequency Signal on an Anisotropic Medium Over Hydrocarbon / V. F. Yanushkevich [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1889. Mode of access: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1889/2/022059/pdf>. Date of access: 18.05.2021.
10. Гололобов, Д. В. Ослабление поверхностной волны анизотропной средой / Д. В. Гололобов, В. Н. Москвичёв // *Радиотехника и электроника*. 1990. Вып. 19. С. 191–195.
11. Способ для определения характера подземных резервуаров и способ поиска углеводородсодержащих подземных ресурсов: пат. RU 2277251 / С. Эллингсруд, Т. Эйдесмо, Х. М. Педерсен, Т. Скёуг-Петерсен. Оpubл. 27.05.2006.
12. Helwig, S. L. Vertical-Vertical Controlled-Source Electromagnetic Instrumentation and Acquisition / S. L. Helwig, W. Wood, B. Gloux // *Geophysical Prospecting*. 2019. Vol. 67, No 6. P. 1582–1594. DOI: 10.1111/1365-2478.12771.
13. Frasheri, A. Self-Potential Anomaleies as Possible Indicators in Search for Oil and Gas Reservoirs / A. Frasheri // 57th EAGE Conf. and Tech. Exhib., Glasgow, 29 May – 2 June 1995. UK: Glasgow, 1995. P. 8.
14. Гололобов, Д. В. Импедансные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала. / Д. В. Гололобов, В. Ф. Янушкевич, С. В. Калинин // *Доклады БГУИР*. 2010. Т. 52, № 6. С. 13–17.
15. Совместная инверсия морских магнитотеллурических и гравиметрических данных с учетом сейсмических ограничений – предварительные результаты построения изображений суббазальтов у Фарерского шельфа / М. Дженген [и др.] // *Планета Земля Sci Lett*. 2009. С. 47–55.

References

1. Henke C. H., Krieger M., Strack K., Zerilli A. (2020) Subsalt Imaging in Northern Germany Using Multi-Physics (Magnetotellurics, Gravity, and Seismic). *Interpretatio*. 8 (4), 15–24. DOI: 10.1190/int-2020-0026.1.
2. Geldmacher I., Strack K. (2017) A Fit-for-Purpose Electromagnetic System for Reservoir Monitoring and Geothermal Exploration. *GRC Transactions*. 41, 1649–1658. DOI: 10.3997/2214-4609.201702593.
3. Holten T., Luo X., Naevdal G., Helwig S. L. (2016) Time Lapse CSEM Reservoir Monitoring of the Norne Field with Vertical Dipoles. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 35, 971–975. DOI: 10.1190/segam2016-13858739.1.

4. Anderson C., Mattsson J. (2010) An Integrated Approach to Marine Electromagnetic Surveying Using a Towed Streamer and Source. *First Break*. 28 (5), 71–75.
5. Moskvichew V. N. (1991) Interaction of Electromagnetic Waves (EMW) with Anisotropic Inclusion in Communication Line. *9th Microw. Conf. NICON-91, Rydzyna, May 20–22*. 1, 240–244.
6. Gololobov D. V. (2009) *Interaction of Electromagnetic Waves and Hydrocarbon Deposits*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
7. Janushkevich V. F. (2017) *Electromagnetic Methods for Searching and Identifying Hydrocarbon Deposits*. Novopolock, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (in Russian).
8. Maegregor L. M., Sinha M. C., Weaner R. (2004) *The Method of Electromagnetic Exploration of Hydrocarbon Reservoirs*. Pat. DE 2395563. Published 01.12.2004 (in Russian).
9. Yanushkevich V. F., Dauhiala D. A., Adamovich A. L., Abramenska S. N. (2021) Effect of a Powerful Low-Frequency Signal on an Anisotropic Medium Over Hydrocarbon. *Journal of Physics: Conference Series*. 1889. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1889/2/022059/pdf/> (Accessed 18 May 2021).
10. Gololobov D. V., Moskvichjov V. N. (1990) Attenuation of a Surface Wave by an Anisotropic Medium. *Journal of Communications Technology and Electronics*. (18), 191–195 (in Russian).
11. Jellingsrud C., Jejdesmo T., Pedersen H. M., Skjoug-Petersen. T. (2006) *Method for Determining the Nature of Underground Reservoirs and a Method for Searching for Hydrocarbon-Containing Underground Resources*. Pat. RU 2277251. Published 27.05.2006 (in Russian).
12. Helwig S. L., Wood W., Gloux B. (2019) Vertical-Vertical Controlled-Source Electromagnetic Instrumentation and Acquisition. *Geophysical Prospecting*. 67 (6), 1582–1594. DOI: 10.1111/1365-2478.12771.
13. Frasheri A. (1995) Self-Potential Anomaleies as Possible Indicators in Search for Oil and Gas Reservoirs. *57th EAGE Conf. and Tech. Exib., Glasgow, 29 May–2 June*. UK, Glasgow. 8.
14. Gololobov D. V., Janushkevich V. F., Kalincev S. V. (2010) Impedance Boundary Conditions of an Anisotropic Medium for an Amplitude Modulated Signal. *Doklady BGUIR*. 52 (6), 13–17 (in Russian).
15. Dzhegen M., Hobs R. V., Taric P., Chave A. (2009) Joint Inversion of Marine Magnetotelluric and Gravity Data with Seismic Constraints – Preliminary Results of Subbasalt Imaging Off the Faroe Shelf. *Earth and Planetary Sciences Letters*. 47–55 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Янушкевич В. Ф., к. т. н., доцент кафедры энергетики и электроники Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой

Кизина О. А., ассистент кафедры энергетики и электроники Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой

Богущ В. А., д. ф.-м. н., профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

211440, Республика Беларусь,
г. Новополоцк, ул. Блохина, 29
Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
Тел.: +375 214 59-95-73
E-mail: o.kizina@psu.by
Кизина Оксана Анатольевна

Information about the authors

Yanushkevich V. F., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Power Engineering and Electronics of the Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

Kizina O. A., Assistant at the Department of Power Engineering and Electronics of the Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

Bogush V. A., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

211440, Republic of Belarus,
Novopolotsk, Blokhina St., 29
Euphrosyne Polotskaya State University
of Polotsk
Tel.: +375 214 59-95-73
E-mail: o.kizina@psu.by
Kizina Oksana Anatol'evna