

УДК 621.371: 550.837.6

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-69-75

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ*канд. техн. наук, доц. В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

Проведено исследование электродинамического отклика анизотропной среды над углеводородами при воздействии зондирующих сигналов для режимов импульсных и двухчастотных с преобладанием высокочастотного сигналов. Исследованы характеристики геологического профиля над углеводородными залежами при использовании импульсных сигналов в зависимости от несущей частоты и периода радиоимпульса. Для режима двухчастотных сигналов проведено моделирование зависимостей вещественных и фазовых составляющих поверхностного импеданса исследуемой среды над месторождениями нефти и газа в зависимости от коэффициентов отношения амплитуд и частот. Установлено, что увеличение диэлектрической проницаемости геологического профиля над залежами приводит к уменьшению частот резонансов и величин абсолютной составляющей поверхностного импеданса Z_{11} . Обнаруженные проявления аномальных эффектов расширяют сведения о характеристиках среды над залежами при воздействии импульсных электромагнитных волн и представляют практический интерес для поисковой геофизики. Полученные результаты могут быть использованы для электроразведки при создании аппаратуры обнаружения месторождений нефти и газа.

Ключевые слова: углеводородная залежь, анизотропная среда, зондирующий сигнал, частота, радиоимпульс.

Введение. Актуальность усовершенствования и разработки методов поиска углеводородных залежей (УВЗ) определяется многофакторными эффектами получения информации об обнаружении полезных ископаемых на основе разведки коллекторов, инфразвуковых технологий и учета ослабления поверхностной волны анизотропной средой¹ [1; 2]. Дифференциация исследуемых сред при освоении площадей с наличием углеводородных ресурсов может осуществляться на основе исследования подземных резервуаров². Электродинамический отклик анизотропной среды над углеводородами определяется влиянием высоких температур и пластового давления, избытка свободных электронов, ионных соединений полупроводникового характера. Это приводит к уменьшению плотности залежи по сравнению с законтурной областью, повышению суммарного электрического сопротивления данного участка, понижению скорости сейсмических продольных волн, увеличению их поглощения (ослабления) и к другим эффектам [3–5].

Современные возможности науки и техники дают оценку перспектив использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на шельфах [6]. Используется математическое моделирование характеристик анизотропной среды над залежами углеводородов для сигналов с применением амплитудно-частотной и амплитудной модуляции в зависимости от диэлектрической проницаемости, коэффициента амплитудной модуляции, индекса модуляции и проводимости геологического профиля [7; 8]. Исследуются факторы, имеющие решающее значение для более высокой добычи углеводородов и позволяющие снизить эксплуатационные расходы и решать проблемы охраны окружающей среды [9]. Проводятся каротажи геологических скважин, результаты которых используются при моделировании пластов [10]. Создается модель недр Земли, которая учитывает все сейсмические, сейсмоэлектрические, электросейсмические и электромагнитные данные³. Спектр применения электромагнитных методов охватывает многочисленные отрасли: геофизику, горнодобывающую, экологическую, нефтяную и машиностроительную промышленности [11]. Разработаны комбинированный наземный и скважинный комплексный электромагнитный аппарат для определения свойств пластовых флюидов и комплексная скважинная система

¹ Способ электромагнитной разведки коллекторов углеводородов: пат. DE 2395563 / Л. М. Маегрегор, М. С. Синха, Р. Уэанер. – Оpubл. 01.12.2004.

² Способ для определения характера подземных резервуаров и способ поиска углеводородсодержащих подземных ресурсов: пат. RU 2277251 / С. Эллингеруд, Т. Эйдемсо, Х. М. Педерсен, Т. Скёуг-Петерсен. – Оpubл. 27.05.2006.

³ Method of acquiring and interpreting electromagnetic measurements: US Patent 7,356,411 / С. Н. Стойер, К. М. Страк. – Оpubл. 04.03.2008.

обнаружения и мониторинга резервуаров^{4,5}. Известны способ и устройство для измерения удельного сопротивления пласта через обсадную колонну с использованием одножильного электрического каротажного кабеля⁶. В настоящее время широко применяются методы CSEM для наземного мониторинга резервуаров на основе сложной трехмерной модели [12].

Воздействие зондирующих сигналов. Проявления аномальных эффектов и расширение сведений о характеристиках среды над залежами при воздействии импульсных электромагнитных волн (ЭМВ) на геологический профиль над УВЗ представляют практический интерес для электроразведки.

Рассмотрим взаимодействие ЭМВ с УВЗ при использовании импульсного сигнала с круговой частотой ω , частотой несущего сигнала F_2 и длительностью импульса τ .

Составляющие тензора геологического профиля над УВЗ $\dot{\epsilon}_1$, $\dot{\epsilon}_2$, $\dot{\epsilon}_3$ для данного режима зондирования определяются следующими формулами [13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_r \cdot F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{\omega}\right) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{F \cdot \omega_{ni}^2 \cdot (\omega + n\Omega_1) \cdot [\omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2 - v_i^2]}{\omega \left[v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2 \right]^2 + 4(\omega + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ - jF \left[\frac{\omega_{ni}^2 \cdot v_i \cdot (\omega + n\Omega_1)^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{\left[v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2 \right]^2 + 4(\omega + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} + \frac{\delta_r F}{\omega \epsilon_0} \right] \end{array} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega_{ni}^2 \cdot F \cdot \omega_{\Gamma i} \cdot \frac{v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2}{\left[v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2 \right]^2 + 4(\omega + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ - 2j \frac{\omega_{ni}^2 \cdot F \cdot \omega_{\Gamma i} \cdot v_i \cdot (\omega + n\Omega_1)}{\left[v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2 \right]^2 + 4(\omega + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} \end{array} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_3 = \sum_{i=1}^2 \left\{ F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{\omega}\right) \cdot \left[\epsilon_r - \frac{\omega_{ni}^2}{\omega} \cdot \frac{1}{(\omega + n\Omega_1)^2 + v_i^2} \right] - j \left[\frac{\omega_{ni}^2 \cdot F \cdot v_i}{(\omega + n\Omega_1)^2 + v_i^2} + \frac{\delta_r F}{\omega \epsilon_0} \right] \right\}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где ω_{ni} – частота плазменных колебаний;
 $\omega_{\Gamma i}$ – гиротропная частота;
 v_i – частота столкновения частиц;
 ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость профиля;
 σ_r – проводимость профиля;
 ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;
 Ω_1 – круговая частота следования импульсов;

$$F = \frac{\tau}{T} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau)}{\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau},$$

где T – период;
 F_1 – частота следования импульсов;
 n – количество гармоник импульсного сигнала.

При зондировании геологического профиля над УВЗ в режиме высокочастотного сигнала представляют интерес дополнительные характеристики: частотная компонента $\tilde{\omega}_2$, амплитуды и частоты ЭМВ

⁴ Combine surface and borehole integrated electromagnetic apparatus to determine reservoir fluid properties: US Patent 6,739,165 / К. М. Strack. – Опубл. 25.05.2004.

⁵ Integrated borehole system for reservoir detection and monitoring: US Patent 6,541,975 / К. М. Strack. – Опубл. 01.04.2003.

⁶ Method and apparatus for measuring formation resistivity through casing using single-conductor electrical logging cable: US Patent 5,543,715 (assigned to Baker Hughes) / В. Singer, Н. М. Maurer, К. М. Strack. – Опубл. 06.08.1996.

$A_1, A_2, \omega_1, \omega_2$. Составляющие тензора геологического профиля над УВЗ $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$ для данного режима зондирования определяются следующими формулами [5]:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_2}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_2}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2 - \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 \nu_i^2} - j \left[\frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 \nu_i}{\omega_2} \frac{\tilde{\omega}_2^2 + \nu_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(\nu_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 \nu_i^2} \right] \right\}; \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2 + \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 \nu_i^2} - \frac{2j\tilde{\omega}_2 \nu_i \omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{[(\nu_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 \nu_i^2] \omega_2} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_2}{\omega_2} - \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_2}{\omega_2} \frac{1}{\nu_i^2 + \tilde{\omega}_2^2} - j \left[\frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 \nu_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_2^2 + \nu_i^2} \right] \right\}. \end{aligned} \right.$$

Соотношения амплитуд ЭМВ и их частот задаются коэффициентами

$$\begin{cases} k_E \gg 1; \\ k_\omega \ll 1. \end{cases} \quad (3)$$

Проводилось моделирование характеристик поверхностного импеданса при следующих данных:

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

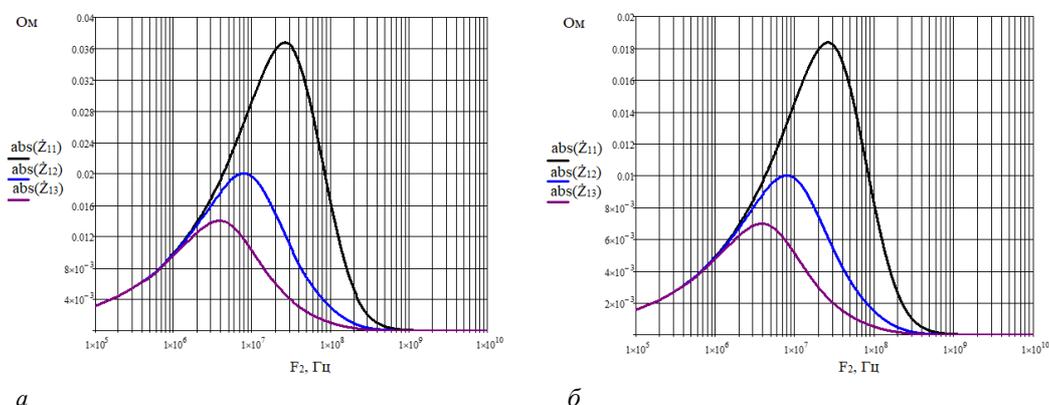
– концентрации частиц среды $N_e = N_n = 10^{16} \text{ м}^{-3}$;

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

Методика исследований заключается в определении поверхностного импеданса по формулам

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

Результаты исследований. Зависимости абсолютной составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} от несущей частоты радиоимпульса приведены на рисунке 1, а и б соответственно для $T = 2\tau$ и $T = 5\tau$. Наблюдаются ярко выраженные максимумы модуля поверхностного импеданса среды на частотах (4 – 30) МГц. Увеличение диэлектрической проницаемости геологического профиля над УВЗ приводит к уменьшению частот резонансов и величин абсолютной составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} . Для $T = 5\tau$ величины модуля \dot{Z}_{11} меньше.



а – для $n = 5, T = 2\tau$; б – для $n = 5, T = 5\tau$;
 $|\dot{Z}_{11}(F_2)|$ – для $\epsilon_r = 5$; $|\dot{Z}_{12}(F_2)|$ – для $\epsilon_r = 15$; $|\dot{Z}_{13}(F_2)|$ – для $\epsilon_r = 30$

Рисунок 1. – Зависимости абсолютной составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} от несущей частоты радиоимпульса

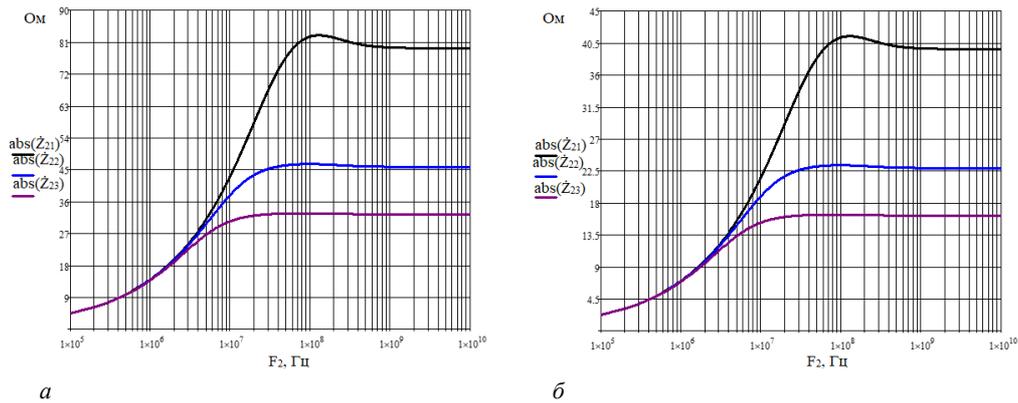
Дополнительно были проанализированы амплитудные составляющие компонент поверхностного импеданса среды над УВЗ \dot{Z}_{21} (рисунок 2, *a* и *б* соответственно для $T = 2\tau$ и $T = 5\tau$). Следует отметить, что для данной компоненты поведение составляющей поверхностного импеданса отличается по сравнению с предыдущим случаем. Наблюдается увеличение модуля в диапазоне несущих частот радиопульса ($1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^8$) Гц.

Проведено моделирование выражений (4) для вещественной и фазовой составляющих поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} геологического профиля над УВЗ в зависимости от вариации значений коэффициентов отношения амплитуд. Абсолютные и фазовые значения полученных компонент поверхностного импеданса анизотропной среды над УВЗ \dot{Z}_{11} приведены на рисунке 3, *a* и *б*. Аппаратура для поиска УВЗ на основе использования низких значений частоты ($f_2 = 10^5$ Гц) не вызывает вариации вещественной составляющей \dot{Z}_{11} . Поверхностный импеданс геологического профиля над УВЗ изменяется при высоких значениях составляющей двухчастотного сигнала ($f_2 = 10^7$ Гц, 10^9 Гц) и коэффициентах отношения амплитуд 1 – 10, когда увеличиваются данные компоненты поверхностного импеданса.

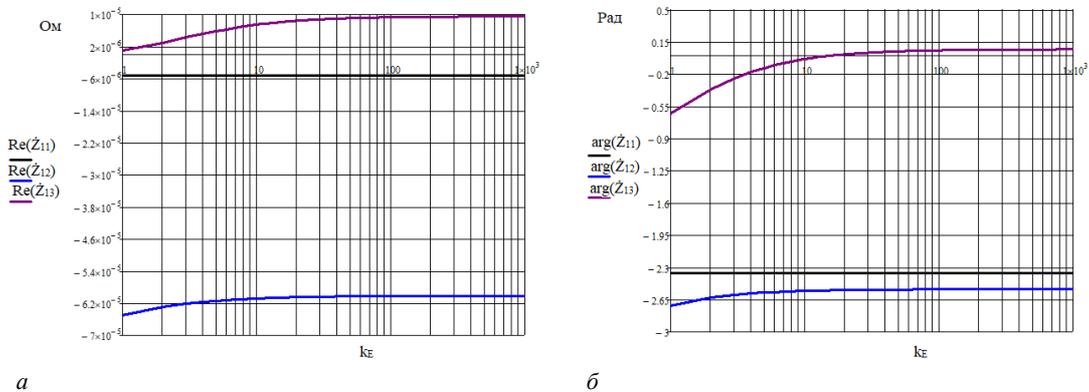
Вещественные и фазовые характеристики для составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} для двухчастотных сигналов приведены на рисунке 4, *a* и *б*. Наблюдается увеличение $\text{Re}(\dot{Z}_{21}(k_E))$ при использовании частоты сигнала $f_2 = 10^9$ Гц, при низких частотах влияния на характеристики не происходит. Фазовые характеристики изменяются при уменьшении диэлектрической проницаемости геологического профиля над УВЗ при вариации коэффициента отношения амплитуд в диапазоне 1 – 10.

Зависимости составляющих поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} от коэффициента отношения частот показаны на рисунке 5, *a* и *б*. Установлено, что влияние величины k_ω на $\text{Re}(\dot{Z}_{11}(k_\omega))$ отсутствует, а фаза изменяется на отрезке 0,01 – 0,1 при уменьшении диэлектрической проницаемости вмещающих пород.

Аналогичные зависимости компонент поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} от коэффициента отношения частот представлены на рисунках 6, *a* и *б*. Установлено, что изменение $\text{Re}(\dot{Z}_{21}(k_\omega))$ происходит при увеличении значений k_ω и f_2 , а фаза не изменяется.

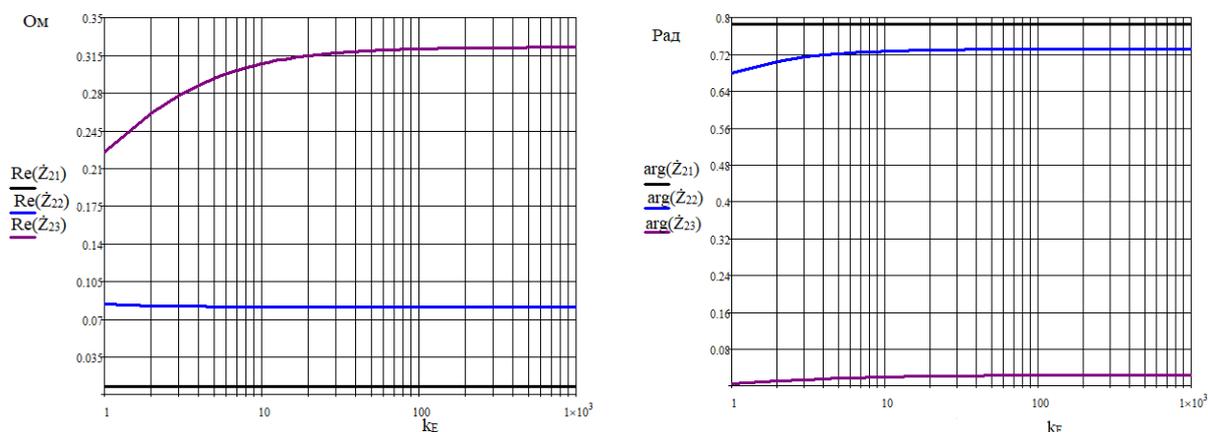


a – для $n = 5, T = 2\tau$; *б* – для $n = 5, T = 5\tau$;
 $|\dot{Z}_{21}(F_2)|$ – для $\epsilon_r = 5$; $|\dot{Z}_{22}(F_2)|$ – для $\epsilon_r = 15$; $|\dot{Z}_{23}(F_2)|$ – для $\epsilon_r = 20$
 Рисунок 2. – Зависимости модуля \dot{Z}_{21} от несущей частоты радиопульса



a – вещественная составляющая; *б* – фазовая составляющая;
 $\text{Re}(\dot{Z}_{11}(k_E)), \text{arg}(\dot{Z}_{11}(k_E))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, f_2 = 10^5$ Гц;
 $\text{Re}(\dot{Z}_{12}(k_E)), \text{arg}(\dot{Z}_{12}(k_E))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, f_2 = 10^7$ Гц;
 $\text{Re}(\dot{Z}_{13}(k_E)), \text{arg}(\dot{Z}_{13}(k_E))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, f_2 = 10^9$ Гц
 Рисунок 3. – Зависимости \dot{Z}_{11} от коэффициента отношения амплитуд

Следует отметить, что для одной из частот характер проводимости отрицательный, а для других – положительный. Данное обстоятельство позволяет учитывать при исследовании электродинамического отклика на воздействие электрических полей в земле электропроводности твердых веществ, их поляризуемости и ряд других факторов. Фаза для компоненты поверхностного импеданса среды над УВЗ \dot{Z}_{11} постоянна при низких значениях высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала ($f_2 = 10^5$ Гц). Высокие значения высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала ($f_2 = 10^7$ Гц, 10^9 Гц) приводят к изменению фазовой составляющей компоненты \dot{Z}_{11} в зависимости от коэффициента отношения амплитуд. Данные характеристики поверхностного импеданса среды над УВЗ изменяются на отрезке значений коэффициента отношения амплитуд 1 – 10, когда происходит увеличение данной компоненты поверхностного импеданса. Высокие значения высокочастотной составляющей ($f_2 = 10^9$ Гц) приводят к большему диапазону вариации фазовой составляющей компоненты \dot{Z}_{11} .



a

б

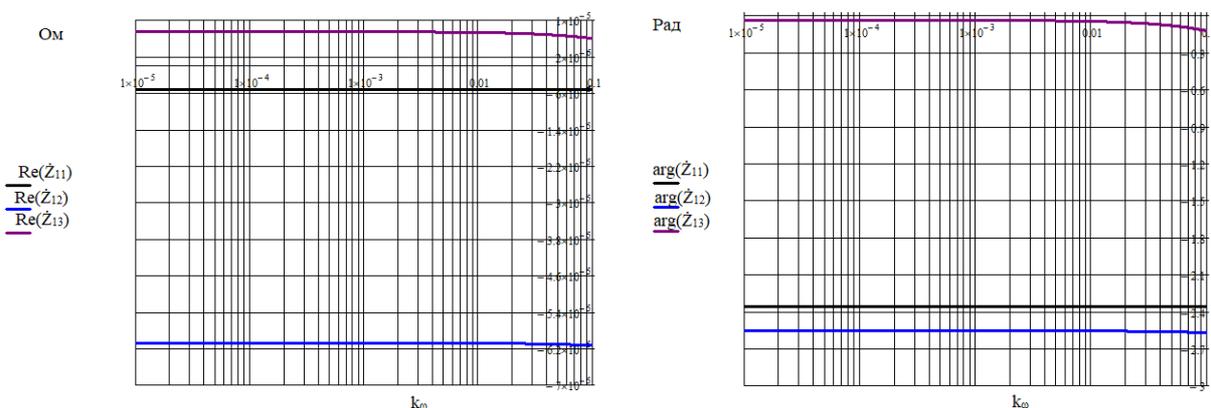
a – вещественная составляющая; *б* – фазовая составляющая;

$\text{Re}(\dot{Z}_{21}(k_E)), \text{arg}(\dot{Z}_{21}(k_E))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, f_2 = 10^5$ Гц;

$\text{Re}(\dot{Z}_{22}(k_E)), \text{arg}(\dot{Z}_{22}(k_E))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, f_2 = 10^7$ Гц;

$\text{Re}(\dot{Z}_{23}(k_E)), \text{arg}(\dot{Z}_{23}(k_E))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, f_2 = 10^9$ Гц

Рисунок 4. – Зависимости \dot{Z}_{21} от коэффициента отношения амплитуд



a

б

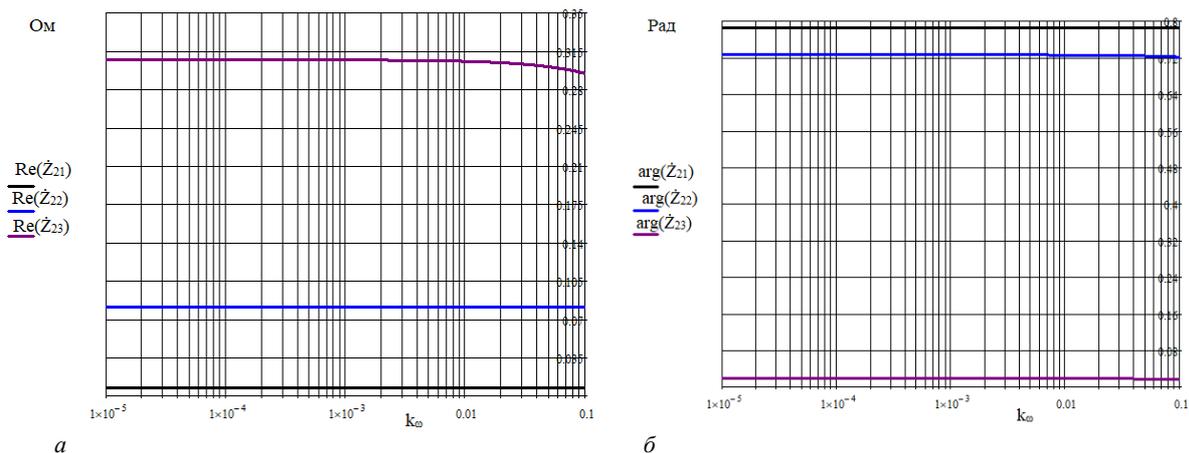
a – вещественная составляющая; *б* – фазовая составляющая;

$\text{Re}(\dot{Z}_{11}(k_\omega)), \text{arg}(\dot{Z}_{11}(k_\omega))$ – для $\epsilon_r = 10, k_E = 10, f_2 = 10^5$ Гц;

$\text{Re}(\dot{Z}_{12}(k_\omega)), \text{arg}(\dot{Z}_{12}(k_\omega))$ – для $\epsilon_r = 10, k_E = 10, f_2 = 10^7$ Гц;

$\text{Re}(\dot{Z}_{13}(k_\omega)), \text{arg}(\dot{Z}_{13}(k_\omega))$ – для $\epsilon_r = 10, k_E = 10, f_2 = 10^9$ Гц

Рисунок 5. – Зависимости \dot{Z}_{11} от коэффициента отношения частот



a – вещественная составляющая; b – фазовая составляющая;

$\text{Re}(\dot{Z}_{21}(k_\omega), \text{arg}(\dot{Z}_{21}(k_\omega))$ – для $\epsilon_r = 10, f_2 = 10^5$ Гц;

$\text{Re}(\dot{Z}_{22}(k_\omega), \text{arg}(\dot{Z}_{22}(k_\omega)), \text{arg}(\dot{Z}_{23}(k_\omega))$ – для $\epsilon_r = 10, f_2 = 10^7$ Гц;

$\text{Re}(\dot{Z}_{23}(k_\omega)$ – для $\epsilon_r = 10, f_2 = 10^9$ Гц

Рисунок 6. – Зависимости \dot{Z}_{21} от коэффициента отношения частот

Заключение. В ходе проведенных исследований определены закономерности изменения компонент поверхностного импеданса над УВЗ, на основании которых установлено увеличение составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} на участке несущих частот радиоимпульса ($1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^8$) Гц и максимумы модулей поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} при значениях диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_r = 1 - 30$, электрической проводимости $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, частоте столкновения частиц $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$ рад/с, при концентрациях частиц $N_e = 10^{16}$ м $^{-3}$ и $N_n = 10^{16}$ м $^{-3}$ на частотах (4 – 30) МГц для периодов сигнала $T = 2\tau$ и $T = 5\tau$ в режиме импульсных сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов О. Л. и др. Российская инфразвуковая технология АНЧАР: уникальная практика разведки и освоения нефтяных и газовых ресурсов // Геологической службе России 300 лет : тез. докл. междунар. геофиз. конф., С.-Петербург (2–6 октября 2000 г.) / ВИРГ – Рудгеофизика; А. А. Петров [и др.]. – СПб., 2000. – С. 193.
2. Гололобов Д. В., Москвичёв В. Н. Ослабление поверхностной волны анизотропной средой // Радиотехника и электроника. – Минск: Выш. шк., 1990. – Вып. 19. – С. 191–195.
3. Moskvichew V. N. Interraction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line // 9th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
4. Гололобов Д. В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. – Минск: Бестпринт, 2009. – 185 с.
5. Янушкевич В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей. – Новополоцк, ПГУ, 2017. – 232 с.
6. Ковалев Н. И., Филимонова Т. А., Гох В. А. Оценка возможностей использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на шельфах. Оптика атмосферы и океана // Материалы III Всерос. конф. «Добыча, подготовка, транспортировка нефти и газа» / г. Томск, (20–24 сент. 2004 г.). – Томск: Ин-т оптики атмосферы СО РАН, 2004. – С. 67–70.
7. Янушкевич, В. Ф., Калинин, С. В., Шпак, К. В. и др. Применение сложных сигналов для определения свойств анизотропных сред над углеводородами // Современные инновации, системы и технологии. – 2023. – Т. 3, № 3. – С. 0101–0116. – DOI: [10.47813/2782-2818-2023-3-3-0101-0116](https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-3-0101-0116).
8. Янушкевич В. Ф., Калинин С. В., Судько И. В. и др. Определение свойств анизотропной среды над углеводородными залежами в режиме амплитудномодулированных сигналов // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 3(56). – С. 81–87. – URL: http://pfmt.gsu.by/files/pfmt_2023_3_56.pdf (дата обращения 22.02.2024).
9. Strack K. M., Aziz A. A. Full Field Array Electromagnetics: A tool kit for 3D applications to unconventional resources // GSH spring symposium honoring R. E. Sheriff (11–12 Apr. 2012). – P. 28.
10. Luthi S. M. Geological well logs—their use in reservoir modeling. – Berlin: Springer, 2001. – 373 p.
11. Sheard S. N., Ritchie T., Christopherson K., Brand E. Mining, environmental, petroleum and engineering industry applications of electromagnetics techniques in geophysics // Surveys in Geophysics. – 2005. – Vol. 26. – P. 653–669. – DOI: [10.1007/s10712-005-1760-0](https://doi.org/10.1007/s10712-005-1760-0).
12. Wirianto M., Mulder W. A., Slob E. C. Feasibility study of land CSEM reservoir monitoring in a complex 3-D model // Geophys. J. Intern. – Vol. 181, iss. 2. – 2010. – P. 741–755. – DOI: [10.1111/j.1365-246X.2010.04544.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04544.x).

13. Янушкевич В. Ф. Методы поиска и оконтуривания углеводородных залежей с использованием модулированных и радиоимпульсных сигналов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2022. – № 11. – С. 89–98.

REFERENCES

1. Kuznecov, O. L. et al. (2000). Rossijskaja infrazvukovaja tehnologija ANChAR: unikal'naja praktika razvedki i osvoenija nef'tnyh i gazovyh resursov. In A. A. Petrov et al. (Eds.), *Geologicheskij sluzhbe Rossii 300 let (193)*. St. Petersburg: VIRG – Rudgeofizika. (In Russ.).
2. Gololobov, D. V., & Moskvichjov, V. N. (1990). Oslablenie poverhnostnoj volny anizotropnoj sredoj. In *Radiotekhnika i jelektronika, Vol. 19 (191–195)*. Minsk: Vyshnejshaja shkola (In Russ.).
3. Moskvichew, V. N. (1991). Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line. In *9th Microw. Conf. NICON – 91: Vol. 1 (240–244)*. Rydzyna.
4. Gololobov, D. V. (2009) *Vzaimodejstvie elektromagnitnykh voln i uglevodorodnykh zalezhei*. Minsk: Bestprint. (In Russ.).
5. Yanushkevich, V. F. (2017). *Elektromagnitnye metody poiska i identifikatsii uglevodorodnykh zalezhei*. Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
6. Kovalev, N. I., Filimonova, T. A., & Goh, V. A. (2004). Ocenka vozmozhnostej ispol'zovanija distancionnyh tehnologij poiska poleznyh iskopaemyh pri osvoenii uglevodorodnyh resursov na shel'fah. Optika atmosfery i okeana. In *Dobycha, podgotovka, transportirovka nef'ti i gaza (67–70)*. Tomsk: In-t optiki atmosfery SO RAN. (In Russ.).
7. Janushkevich, V. F., Kalincev, S. V., Shpak, K. V., Kizina, O. A., & Bogush, V. A. (2023). Primenenie slozhnyh signalov dlja opredelenija svojstv anizotropnyh sred nad uglevodorodami. [Application of complex signals to determine the properties of anisotropic media over hydrocarbons]. *Sovremennye innovacii, sistemy i tekhnologii [Modern Innovations, Systems and Technologies]*, 3(3), 0101–0116. DOI: 10.47813/2782-2818-2023-3-3-0101-0116.
8. Janushkevich, V. F., Kalincev, S. V., Sud'ko, I. V., & Bogush, V. A. (2023). Opredelenie svojstv anizotropnoj sredy nad uglevodorodnymi zalezhami v rezhime amplitudnomodulirovannyh signalov [Determination of the Properties of an Anisotropic Medium Above Hydrocarbon Deposits in the Mode of Amplitude-Modulated Signals]. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki [Problems of Physics, Mathematics and Technics]*, 3(56), 81–87. http://pfmt.gsu.by/files/pfmt_2023_3_56.pdf. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Strack K. M., Aziz A. A. (2012). Full Field Array Electromagnetics: A tool kit for 3D applications to unconventional resources. In *GSH spring symposium honoring R. E. Sheriff, (28)*.
10. Luthi, S. M. (2001). *Geological well logs—their use in reservoir modeling*. Berlin: Springer.
11. Sheard, S. N., Ritchie, T., Christopherson, K., & Brand, E. (2005). Mining, Environmental, Petroleum, and Engineering Industry Applications of Electromagnetic Techniques in Geophysics. *Surveys in Geophysics*, (26), 653–669. DOI: [10.1007/s10712-005-1760-0](https://doi.org/10.1007/s10712-005-1760-0).
12. Wirianto, M., Mulder, W. A., Slob, E. (2010). A feasibility study of land CSEM reservoir monitoring in a complex 3-D model. *Geophys. J. Intern.* 181(2), 741–755. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2010.04544.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04544.x).
13. Janushkevich, V. F. (2022). Metody poiska i okonturivaniya uglevodorodnyh zalezhej c ispol'zovaniem modulirovannyh i radioimpul'snyh signalov [Methods for searching and delineating hydrocarbon deposits using modulated and radio-pulse signals]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (11), 89–98. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 07.02.2024

ELECTRODYNAMIC RESPONSE OF ANISOTROPIC MEDIUM OVER HYDROCARBONS TO THE INFLUENCE OF PROBING SIGNALS

V. YANUSHKEVICH
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

A study was carried out of the electrodynamic response of an anisotropic medium over hydrocarbons under the influence of probing signals for pulsed and dual-frequency modes with a predominance of high-frequency signals. The characteristics of the geological profile above hydrocarbon deposits were studied using pulse signals depending on the carrier frequency and period of the radio pulse. For the dual-frequency signal mode, the dependences of the material and phase components of the surface impedance of the studied medium over oil and gas fields were modeled depending on the amplitude and frequency ratios. It has been established that an increase in the dielectric constant of the geological profile above the deposits leads to a decrease in resonance frequencies and the values of the absolute component of surface impedance Z_{11} . The revealed manifestations of anomalous effects expand information about the characteristics of the environment above deposits under the influence of pulsed electromagnetic waves and are of practical interest for exploratory geophysics. The results obtained can be used for electrical prospecting when creating equipment for detecting oil and gas fields.

Keywords: hydrocarbon reservoir, anisotropic medium, probing signal, frequency, radio pulse.