

УДК 621.371: 550.837.6

МЕТОДЫ РАДИОКОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ПРИ ПОИСКЕ УГЛЕВОДОРОДОВ

канд. техн. наук, доц. В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ, С. П. АЛИЕВА, С. В. КАЛИНЦЕВ
(Полоцкий государственный университет)

Исследованы характеристики анизотропной среды над углеводородами при воздействии мощного низкочастотного сигнала, мощного высокочастотного сигнала и радиоимпульсных сигналов. Проведено моделирование компонент тензоров диэлектрической проницаемости и поверхностного импеданса среды над углеводородными залежами. Исследованы зависимости вещественной составляющей диэлектрической проницаемости от частоты для режимов мощного низкочастотного сигнала, мощного высокочастотного сигнала. Промоделированы характеристики анизотропной среды над углеводородными залежами для радиоимпульсных сигналов от несущей частоты и длительности радиоимпульса. Исследованы зависимости абсолютных, мнимых и фазовых характеристик поверхностного импеданса анизотропной среды над углеводородами. Могут быть даны рекомендации по совершенствованию методов электроразведки и аппаратуры для их реализации на основе применения радиокомплексирования электромагнитных методов георазведки с целью повышения точности определения границ залежей нефти и газа и информативности рассмотренных электромагнитных методов электроразведки. Результаты исследований могут быть применены в поисковой геофизике.

Ключевые слова: углеводородная залежь, электромагнитные методы, методы радиокомплексирования.

Введение. Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач определяется активным внедрением электромагнитных методов (ЭММ) и технических средств для повышения точности и производительности выделения углеводородов [1–3]. Эффективность данных методов определяется проявлением широкого спектра аномальных эффектов, за счет которых расширяются функциональные зависимости компонент диэлектрической проницаемости среды над углеводородными залежами (УВЗ) от режимов воздействующих сигналов [4–6]. Усовершенствование имеющихся и разработка новых методов поиска на основе использования высокоэффективных технологий обнаружения полезных ископаемых основаны на большом опыте проведения геологоразведочных работ в поисковой геофизике [7; 8]. Отработанные методики полевых исследований содействуют дальнейшему развитию работ в этом направлении путем модернизации имеющихся ЭММ с повышением точности определения границ нефти и газа [9]. Современные возможности науки и техники дают оценку возможностей использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на шельфах [10] и улучшают чувствительность и информативность методов поиска и выделения месторождений углеводородов наряду с возможностью их использования в сложной геологической обстановке.

Тенденции развития поисковой геофизики направлены на решение задач внедрения эффективных методов георазведки с высоким уровнем точности и достоверности обнаружения месторождений УВЗ с использованием сейсмических методов [11]. Активное внедрение различных методов и аппаратуры для поиска углеводородов основано на решении данных задач с достаточно хорошими характеристиками [12]. Применение квазигидродинамического подхода для изучения откликов подстилающей поверхности над месторождениями нефти и газа приводит к улучшению точности выделения границ и уровня идентификации месторождений углеводородов [13]. Современные высокоэффективные технологии поиска полезных ископаемых используются при освоении углеводородных ресурсов на морских территориях [14]. На базе использования спутниковых технологий поиска местоположений нефти, газа и других полезных ископаемых возможна реализация методик освоения углеводородных ресурсов на значительных площадях [15].

Установлено, что окружающее углеводороды пространство находится в физическом и химическом равновесии с окружающей средой и содержит твердый кристаллический скелет, пронизанный электролитом и проводящими включениями за счет минералов с электронной проводимостью [16]. С учетом влияния на самый верхний слой всех ниже расположенных слоев может быть осуществлена дифференциация исследуемых сред по определению характеристик поверхностного импеданса анизотропной среды над УВЗ [17]. Использование амплитудно-частотно-модулированных сигналов и модификации способов поиска УВЗ построены на обнаружении месторождений углеводородов по регистрации амплитудных и фазовых компонент поверхностного импеданса геологического участка местности [18; 19].

Выбор методов ЭММ основывается на построении электродинамических моделей сред, образующихся над скоплениями нефти и газа, и нахождении откликов на воздействие зондирующего сигнала по анализу электрохимических и электрофизических процессов над образующимися над УВЗ анизотропными средами и определяет методику проведения экспериментальных испытаний [8].

Методы радиокомплексирования при поиске углеводородов. Достижение высоких показателей точности и идентификации возможно при поиске, оконтуривании залежей нефти и газа с помощью радиокомплексирования ЭММ георазведки, где применены аналогия исследуемой среды над залежью нефти и газа с плазмоподобным образованием и сочетание высокоэффективных методов поиска и выделения месторождений углеводородов. Это позволяет использовать для изучения взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ существующие решения при изучении плазмы и плазмоподобных сред [5].

Использование функциональных зависимостей компонент тензоров диэлектрической проницаемости среды над углеводородами при применении двухчастотных ЭМВ для определения свойств анизотропных сред над УВЗ [8] позволяет повысить точность и достоверность обнаружения залежей. Для формирования ЭМВ для исследования свойств среды над УВЗ выберем двухчастотный сигнал вида

$$\vec{s}(t) = \vec{s}_1(t) + \vec{s}_2(t) = A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t, \quad (1)$$

где $A_1, A_2, \omega_1, \omega_2$ – соответственно амплитуды и частоты воздействующих на анизотропную среду над углеводородами ЭМВ.

Процесс распространения двухчастотного сигнала (1) над средой с наличием углеводородов, определяющей электродинамический отклик, представляет интерес с точки зрения анализа взаимодействия ЭМВ с анизотропными средами, образующимися над залежами и скоплениями углеводородов в зависимости от режимов измерений, которые определяются коэффициентами соотношения амплитуд двух волн и их частот

$$k_E = \frac{A_2}{A_1}, \quad k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$

Для решения задач поиска, оконтуривании залежей нефти и газа с помощью радиокомплексирования ЭММ проведено исследование электродинамических характеристик среды в режиме мощного низкочастотного сигнала с коэффициентами

$$\begin{cases} k_E \ll 1, \\ k_\omega \ll 1 \end{cases}$$

на основе тензора диэлектрической проницаемости среды [8]

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} - \right. \\ \left. - j \left[\frac{-\epsilon_r k_E (1 - k_\omega) \sin \alpha t}{1 + k_E \cos \alpha t} + \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Gamma i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{\tilde{\omega}_1^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} \right] \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} - \frac{2j\tilde{\omega}_1 v_i \omega_{\Gamma i}^2 \omega_{\Gamma i}}{[(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2] \omega_2} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 = \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_1^2} - j \left[\frac{-\epsilon_r k_E (1 - k_\omega) \sin \alpha t}{1 + k_E \cos \alpha t} + \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Gamma i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_1^2 + v_i^2} \right] \right\}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$ – компоненты тензора;

$\omega_{\Gamma i}$ – плазменная частота;

$\omega_{\Gamma i}$ – гиротропная частота;

v_i – частота столкновения частиц;

ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

σ_r – удельная проводимость среды;

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;

$\alpha = \omega_2 - \omega_1 = \omega_2(1 - k_\omega)$ – разность частот двух ЭМВ;

$\tilde{\omega}_1 = \omega_2 [k_\omega + k_E^2 + k_E(1 - k_\omega) \cos \alpha t]$ – частотная составляющая, характеризующая данный режим зондирования.

Вместе с тем для реализации новых методов георазведки представляет интерес анализ процесса взаимодействия двухчастотных ЭМВ с анизотропными средами в режиме мощного высокочастотного сигнала с коэффициентами

$$\begin{cases} k_E \gg 1, \\ k_\omega \ll 1. \end{cases}$$

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды в данном режиме имеют вид [8]

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

Частотная составляющая, характеризующая режим ВЧ зондирования

$$\tilde{\omega}_2 = \omega_2 \left[k_\omega + 1 + \frac{1 - k_\omega}{k_E} \cos \alpha t \right].$$

Для решения поставленных задач с помощью радиокомплексирования ЭММ георазведки рассмотрим воздействие ЭМВ на УВЗ радиоимпульсным сигналом со следующими параметрами: f – частота сигнала; F_2 – частота несущего сигнала; τ – длительность импульса.

Методика исследований основана на определении компонент поверхностного импеданса среды над углеводородами по формулам

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

где

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_R &= \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \epsilon_R + j \text{Im} \epsilon_R, \\ \dot{\epsilon}_L &= \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \epsilon_L + j \text{Im} \epsilon_L. \end{aligned}$$

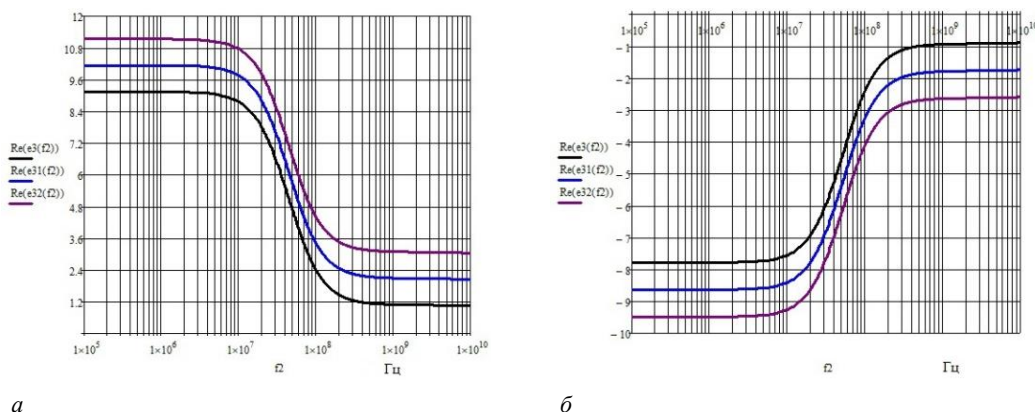
Проведено моделирование для параметров среды над залежами углеводородов [5]: значения диэлектрической проницаемости вмещающих пород $\epsilon_r = 1 - 30$ и электрической проводимости $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-5} - 1 \text{ См/м}$; частоты столкновения частиц $\nu = (0,6 \cdot \pi \cdot 10^9 - 3 \cdot \pi \cdot 10^9) \text{ рад/с}$, концентрации частиц $N_c = N_n = (10^{16} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$.

Выполнено исследование влияния режимов зондирующих сигналов на характеристики анизотропной среды над залежами с учетом того, что над залежью существует изменение геомагнитного поля, приводящее к появлению геомагнитной аномалии, изменение физико-химической обстановки над УВЗ и изменение компонент поверхностного импеданса.

Полученные результаты базируются на изучении характеристик анизотропной среды над углеводородами на основании полученного отраженного сигнала от верхнего слоя при воздействии радиоимпульсного сигнала, по которым возможно определение глубины залегания УВЗ.

Результаты исследований. Проведен анализ выражений (2) для компоненты тензора диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ $\dot{\epsilon}_3$ в режиме мощного низкочастотного сигнала для осуществления радиокомплексирования ЭММ георазведки. Зависимости вещественной составляющей диэлектрической проницаемости от частоты f_2 приведены на рисунке 1. Концентрации частиц равны $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

Характеристики анизотропной среды над залежами зависят от физико-геологических свойств пород-коллекторов и физико-химических процессов в самой залежи и условий залегания (значения давлений и температур), что определяет значения составляющих компонент тензора диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ. Установлено, что на вещественные составляющие компонент диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ коэффициенты соотношения амплитуд двух волн и их частот влияют по-разному. Так при несущественном отличии частот сигналов ($k_0 = 10^{-1}$) величины вещественной составляющей диэлектрической проницаемости ϵ_3 имеют положительный характер. Для высокочастотной составляющей $f_2 = (1 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^8)$ Гц характерно скачкообразное уменьшение анализируемой компоненты. В остальном диапазоне частот характеристики постоянны. Большим значениям диэлектрической проницаемости анизотропной среды соответствуют большие значения вещественных составляющих компоненты тензора диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ ϵ_3 . Для большего диапазона отличия частот сигналов ($k_0 = 10^{-6}$) величины вещественной составляющей диэлектрической проницаемости ϵ_3 имеют отрицательный характер. Для высокочастотной составляющей $f_2 = (1 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^8)$ Гц характерно скачкообразное увеличение анализируемой компоненты. В остальном диапазоне частот характеристики постоянны. Большим значениям диэлектрической проницаемости анизотропной среды соответствуют меньшие значения вещественных составляющих компоненты тензора диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ ϵ_3 .



$a - k_0 = 10^{-1}, k_E = 10^{-6}; \delta - k_0 = 10^{-6}, k_E = 10^{-6};$
Re($\epsilon_3(f_2)$) для $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\epsilon_r = 10$; Re($\epsilon_{31}(f_2)$) для $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\epsilon_r = 20$;
Re($\epsilon_{32}(f_2)$) для $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\epsilon_r = 30$

Рисунок 1. – Зависимости вещественной составляющей диэлектрической проницаемости от частоты f_2

Зависимости вещественной составляющей диэлектрической проницаемости от частоты f_2 в режиме мощного высокочастотного сигнала приведены на рисунке 2. В данном режиме на вещественные составляющие компонент диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ вариация коэффициентов соотношения амплитуд двух волн и их частот влияет не так существенно. Установлено, что при изменении данных коэффициентов величины вещественной составляющей диэлектрической проницаемости ϵ_3 изменяются незначительно. Характер их поведения меняется с отрицательного на положительный при концентрациях частиц $N_1 = 10^{16}$ м³, $N_2 = 10^{18}$ м³ для высокочастотной составляющей $f_2 = 6 - 7$ МГц со скачкообразным увеличением анализируемой компоненты. Для высокочастотной составляющей $f_2 = 1 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$ Гц характерно изменение величины вещественной составляющей диэлектрической проницаемости ϵ_3 . В остальном диапазоне частот характеристики постоянны. Большим значениям диэлектрической проницаемости анизотропной среды соответствуют большие значения вещественных составляющих компоненты тензора диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ. При концентрациях частиц $N_1 = 10^{16}$ м³, $N_2 = 10^{17}$ м³ характер поведения анализируемых характеристик положительный и скачкообразно увеличивается для высокочастотной составляющей $f_2 = 1 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$ Гц. В остальном диапазоне частот характеристики постоянны. Большие значения вещественных составляющих компоненты тензора диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ соответствуют большим значениям диэлектрической проницаемости анизотропной среды.

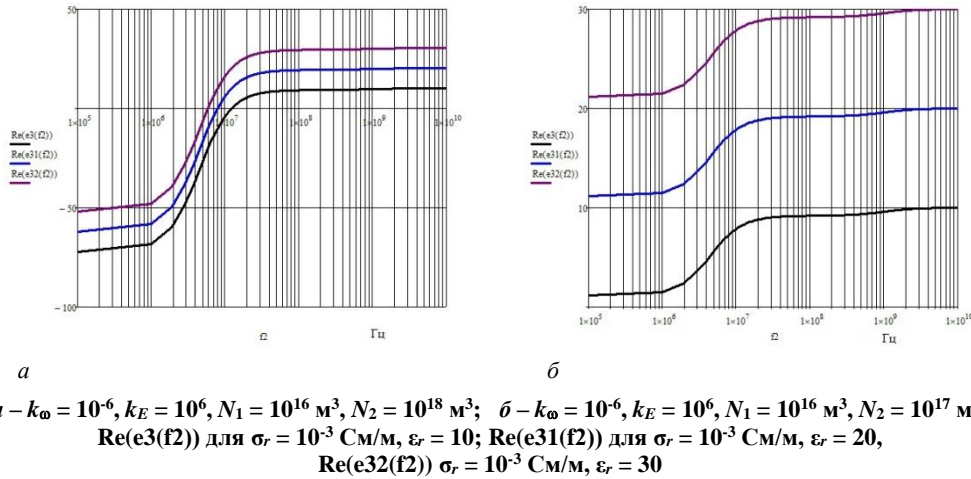
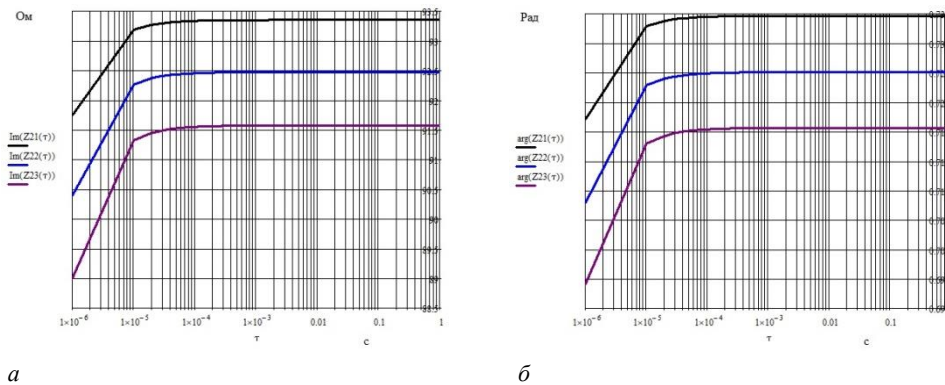


Рисунок 2. – Зависимости вещественной составляющей диэлектрической проницаемости от частоты f_2

Проведено моделирование зависимостей компонент поверхностного импеданса от длительности радиоимпульса для частоты несущего сигнала $F_2 = 10^6$ Гц (рисунок 3). На мнимую составляющую поверхностного импеданса Z_{21} анизотропной среды над УВЗ оказывают наибольшее влияние значения длительности радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$ с, когда происходит увеличение данной компоненты). Значения длительности радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$ с приводят к незначительному увеличению мнимой составляющей поверхностного импеданса Z_{21} . Оставшийся отрезок значений длительности радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-4} - 1$ с не влияет на характеристики поверхностного импеданса анизотропной среды над залежами. При больших значениях диэлектрической проницаемости среды над УВЗ мнимая составляющая поверхностного импеданса Z_{21} анизотропной среды над УВЗ имеет меньшие значения. Фазовые составляющие поверхностного импеданса Z_{21} изменяются по аналогичным закономерностям, также при больших значениях диэлектрической проницаемости среды над УВЗ фазовая составляющая поверхностного импеданса Z_{21} анизотропной среды над УВЗ имеет меньшие значения.

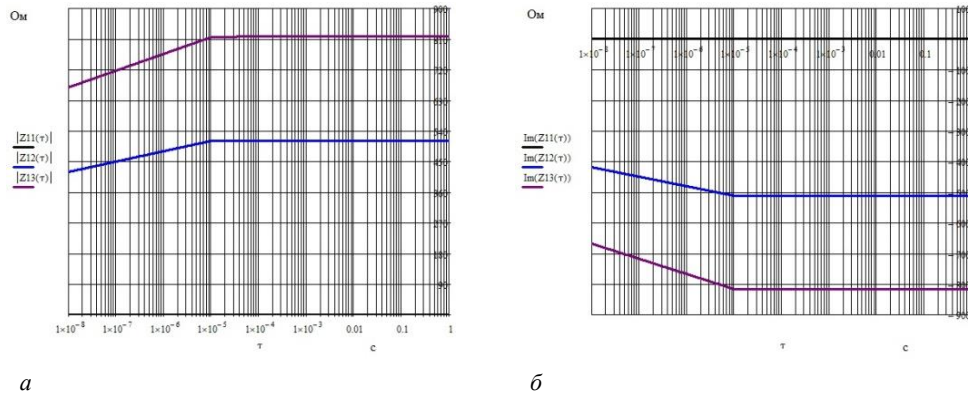


$a -$ мнимая составляющая поверхностного импеданса $Z_{21};$
 $b -$ фазовая составляющая поверхностного импеданса $Z_{21};$
 $\text{Im}(Z_{21}(\tau)), \text{arg}(Z_{21}(\tau))$ для $n = 5, \sigma_r = 10^{-3} \text{ См/м}, \epsilon_r = 10;$
 $\text{Im}(Z_{22}(\tau)), \text{arg}(Z_{22}(\tau))$ для $n = 5, \sigma_r = 10^{-3} \text{ См/м}, \epsilon_r = 15;$
 $\text{Im}(Z_{23}(\tau)), \text{arg}(Z_{23}(\tau))$ для $n = 5, \sigma_r = 10^{-3} \text{ См/м}, \epsilon_r = 20$

Рисунок 3. – Зависимости компонент поверхностного импеданса от длительности радиоимпульса для частоты несущего сигнала $F_2 = 10^6$ Гц

Зависимости компонент поверхностного импеданса от длительности радиоимпульса для частоты несущего сигнала $F_2 = 1 \cdot 10^8$ Гц приведены на рисунке 4. Модуль составляющей поверхностного импеданса Z_{21} при низких значениях диэлектрической проницаемости наполнителя вмещающих пород ($\epsilon_r = 10$) равен нулю. При больших значениях диэлектрической проницаемости среды над УВЗ на модуль составляющей поверхностного импеданса Z_{21} анизотропной среды над УВЗ оказывают наибольшее влияние значения длительности радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-5}$ с, когда происходит увеличение данной компоненты). Оставшийся отрезок значений длительности радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-5} - 1$ с не влияет на характеристики поверхностного импеданса анизотропной среды над залежами. Мнимая составляющая поверхностного импеданса

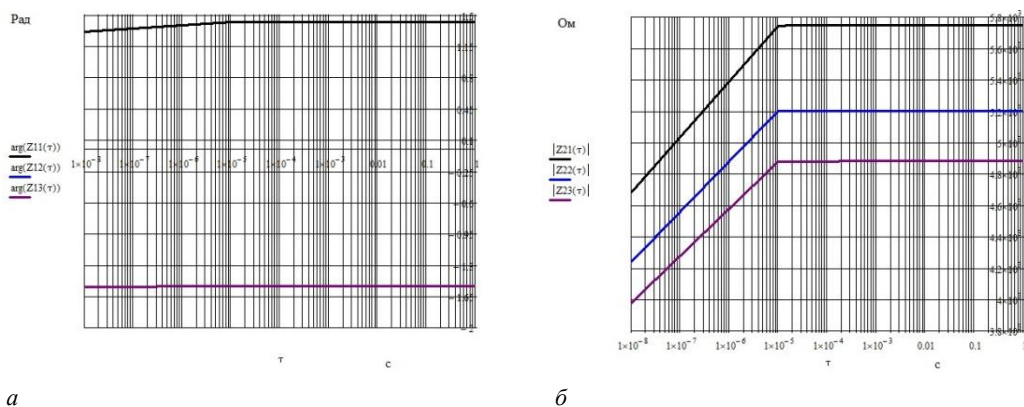
Z_{11} при низких значениях диэлектрической проницаемости наполнителя вмещающих пород ($\epsilon_r = 10$) равна нулю. На мнимую составляющую поверхностного импеданса Z_{11} анизотропной среды над УВЗ оказывают наибольшее влияние значения длительности радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-5}$ с), когда происходит уменьшение данной компоненты. Значения длительности радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-5} - 1$ с) не влияют на характеристики поверхностного импеданса анизотропной среды над залежами. При больших значениях диэлектрической проницаемости среды над УВЗ мнимая составляющая поверхностного импеданса Z_{11} анизотропной среды над УВЗ имеет меньшие значения.



**a – модуль составляющей поверхностного импеданса Z_{11} ;
 b – мнимая составляющая поверхностного импеданса Z_{11} ;
 $|Z_{11}(\tau)|$, $\text{Im}(Z_{11}(\tau))$ для $n = 5$, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\epsilon_r = 10$, $|Z_{12}(\tau)|$, $\text{Im}(Z_{12}(\tau))$ для $n = 5$, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\epsilon_r = 15$, $|Z_{13}(\tau)|$,
 $\text{Im}(Z_{13}(\tau))$ для $n = 5$, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\epsilon_r = 20$**

Рисунок 4. – Зависимости компонент поверхностного импеданса от длительности радиоимпульса

Проведено моделирование зависимостей компонент поверхностного импеданса от длительности радиоимпульса для частоты несущего сигнала $F_2 = 1 \cdot 10^8$ Гц (рисунок 5). Фазовая составляющая поверхностного импеданса только при низких значениях диэлектрической проницаемости наполнителя вмещающих пород ($\epsilon_r = 10$) имеет несущественные изменения при длительности радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-5}$ с). Оставшийся отрезок значений длительности радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-5} - 1$ с) не влияет на характеристики поверхностного импеданса анизотропной среды над залежами. Модуль составляющей поверхностного импеданса Z_{21} увеличивается при всех значениях диэлектрической проницаемости наполнителя вмещающих пород при длительности радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-5}$ с) и далее постоянен.

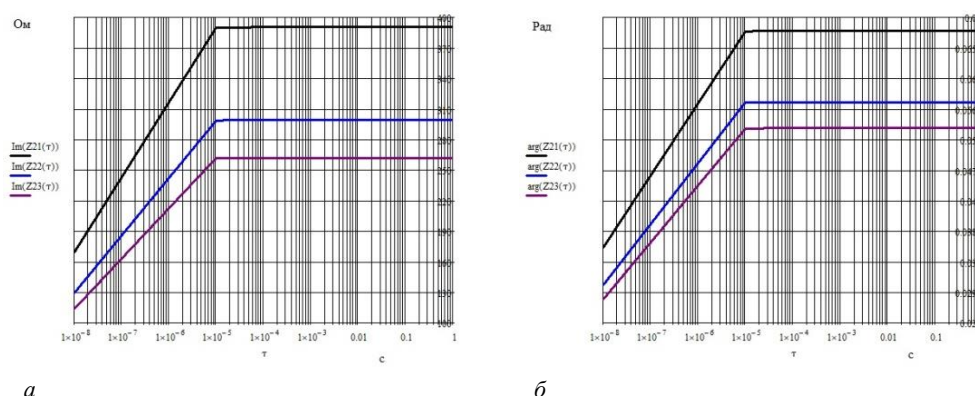


**a – фазовая составляющая поверхностного импеданса Z_{11} ;
 b – модуль составляющей поверхностного импеданса Z_{21} ;
 $\arg(Z_{11}(\tau))$, $|Z_{21}(\tau)|$ для $n = 5$, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\epsilon_r = 10$; $\arg(Z_{12}(\tau))$, $|Z_{22}(\tau)|$ для $n = 5$, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\epsilon_r = 15$;
 $\arg(Z_{13}(\tau))$, $|Z_{23}(\tau)|$ для $n = 5$, $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, $\epsilon_r = 20$**

Рисунок 5. – Зависимости компонент поверхностного импеданса от длительности радиоимпульса для частоты несущего сигнала $F_2 = 10^8$ Гц

Проведено исследование зависимостей компонент поверхностного импеданса от длительности радиоимпульса для частоты несущего сигнала $F_2 = 1 \cdot 10^8$ Гц (рисунок 6). Как видно из рисунков, и мнимая

составляющая поверхностного импеданса Z_{21} и фазовая характеристика данной составляющей поверхностного импеданса увеличиваются в диапазоне длительностей радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-5}$) с и на оставшемся отрезке значений длительности радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-5} - 1$) с не изменяются.



а – мнимая составляющая поверхностного импеданса Z_{21} ;
б – фазовая составляющая поверхностного импеданса Z_{21} ;
 $\text{Im}(Z_{21}(\tau))$, $\text{arg}(Z_{21}(\tau))$ для $n = 5$, $\sigma\tau = 10^{-3}$ См/м, $\epsilon_r = 10$;
 $\text{Im}(Z_{22}(\tau))$, $\text{arg}(Z_{22}(\tau))$ для $n = 5$, $\sigma\tau = 10^{-3}$ См/м, $\epsilon_r = 15$;
 $\text{Im}(Z_{23}(\tau))$, $\text{arg}(Z_{23}(\tau))$ для $n = 5$, $\sigma\tau = 10^{-3}$ См/м, $\epsilon_r = 20$

Рисунок 6. – Зависимости компонент поверхностного импеданса от длительности радиоимпульса для частоты несущего сигнала $F_2 = 10^8$ Гц

Зондирование анизотропных сред двухчастотными ЭМВ в режимах мощного низкочастотного сигнала, мощного высокочастотного сигнала и радиоимпульсного сигнала позволяет повысить производительность и информативность методов электроразведки за счет получения дополнительных данных по исследуемому геологическому профилю местности и расширения функциональных зависимостей компонент тензоров диэлектрической проницаемости, зависящих от параметров сигналов.

Заключение. Проведенный анализ указанных режимов сигналов при распространении ЭМВ в среде над углеводородами показал следующее:

- вещественные составляющие компонент диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ в режиме мощного низкочастотного сигнала при коэффициентах соотношения частот двух волн $k_\omega = 10^{-1}$ и $k_\omega = 10^{-6}$ имеют противоположный характер изменения параметров;
- характер поведения вещественных составляющие компонент диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ в режиме мощного высокочастотного сигнала меняется с отрицательного на положительный при концентрациях частиц $N_1 = 10^{16}$ м³, $N_2 = 10^{18}$ м³ для высокочастотной составляющей $f_2 = 6 - 7$ МГц со скачкообразным увеличением анализируемой компоненты;
- компоненты поверхностного импеданса для частоты несущего сигнала $F_2 = 10^6$ Гц изменяются при значениях длительности радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$) с;
- компоненты поверхностного импеданса для частоты несущего сигнала $F_2 = 10^8$ Гц изменяются при значениях длительности радиоимпульса ($1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-5}$) с;
- на основе применения исследованных режимов мощного низкочастотного сигнала, мощного высокочастотного сигнала и радиоимпульсных сигналов могут быть даны рекомендации по совершенствованию методов электроразведки и аппаратуры для их реализации с целью повышения точности определения границ залежей углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Frasheri, A. Self-potential anomalies as possible indicators in search for oil and gas reservoirs / A. Frasheri // 57th EAGE Conf. and Tech. Exhib., Glasgow, 29 May – 2 June 1995. – Glasgow, UK. – P. 8.
3. 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.
4. 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.

5. Гололобов, Д. В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д. В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
6. Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic) / С. Н. Henke [et al.] // Interpretatio. – 2020. – Vol. 8. – № 4. – P. 15–24.
7. 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.
8. Янушкевич, В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В. Ф. Янушкевич. – Новополоцк, ПГУ, 2017. – 232 с.
9. Time lapse CSEM reservoir monitoring of the Norne field with vertical dipoles / Т. Holten [et al.] // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2016. – Vol. 35. – P. 971–975.
10. Оценка возможностей использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на шельфах. Оптика атмосферы и океана / Н. И. Ковалев [и др.] // Добыча, подготовка, транспортировка нефти и газа : материалы III Всерос. конф., Томск, 20–24 сент. 2004 г. / Ин-т оптики атмосферы СО РАН. – Томск, 2004. – С. 67–70.
11. Сейсмические методы при разведке полезных ископаемых и планировании горных работ – Введение / А. Малехмир [и др.] // Геофизика. – 2012 г. – DOI: 10.1190/2012-0724-SPSEIN.1.
12. Бурцев, М. И. Поиски и разведка месторождений нефти и газа / М. И. Бурцев – М. : Рос. ун-т дружбы народов. – 2006. – 264 с.
13. Effect of a powerful low-frequency signal on an anisotropic medium over hydrocarbon [Electronic resours] / V. F. Yanushkevich [et al] // J. 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: 05.09.2021. – DOI:10.1088/1742-6596/1889/2/022059.
14. Констебл, С. Десять лет морской CSEM для разведки углеводородов / С. Констебл // Геофизика. – 2010. – Т. 75, № 5.
15. Райлян, И. Г. Новая российская спутниковая технология поиска местоположений нефти, газа и других полезных ископаемых / И. Г. Райлян // Нефть, газ и бизнес. – 2002. – № 6. – С. 20.
16. 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. / ВИРГ – Рудгеофизика ; А. А. Петров [и др.]. – СПб., 2005 г. – С. 171.
17. Adamovskiy, E. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits / E. Adamovskiy, V. Yanushkevich // 8 Junior researchers conference European and national dimension in research : in 3 p. / PSU. – Novopolotsk : PSU, 2016. – P. 3 : Technology. – P. 179–183.
18. Степуленок, С. В. Взаимодействие амплитудно-частотно-модулированных сигналов со средой над углеводородными залежами / С. В. Степуленок, В. Ф. Янушкевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2009. – № 9. – С. 103–108.
19. Гололобов, Д. В. Импедансные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала. // Д. В. Гололобов, В. Ф. Янушкевич, С. В. Калинин // Доклады БГУИР. – Минск, 2010. – № 6 (52). – С. 13–17.

Поступила 14.09.2021

METHODS OF RADIO COMPLEXING IN SEARCHING FOR HYDROCARBONS

V. YANUSHKEVICH, S. ALIEVA, S. KALINTSEV

The article studies the characteristics of an anisotropic medium over hydrocarbons under the influence of a powerful low-frequency signal, a powerful high-frequency signal and radio pulse signals. The modeling of the components of the tensors of the dielectric constant and the surface impedance of the medium over hydrocarbon deposits has been carried out. The dependences of the real component of the dielectric constant on frequency are investigated for the modes of a powerful low-frequency signal, a powerful high-frequency signal. The characteristics of an anisotropic medium over hydrocarbon deposits for radio pulse signals from the carrier frequency and radio pulse duration are modeled. The dependences of the absolute, imaginary and phase characteristics of the surface impedance of an anisotropic medium over hydrocarbons are investigated. Recommendations are given for improving the methods of electrical prospecting and equipment for their implementation based on the use of radiocomplexing of electromagnetic methods of geological prospecting in order to increase the accuracy of determining the boundaries of oil and gas deposits and the information content of the considered electromagnetic methods of electrical prospecting. The research results can be applied for exploration geophysics.

Keywords: hydrocarbon reservoir, electromagnetic methods, radiocomplexing methods.