

УДК 621.371: 550.837.6

**ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ***канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, С.В. КАЛИНЦЕВ**(Полоцкий государственный университет)**д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. БОГУШ**(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)*

*Приводится анализ применения двухчастотных электромагнитных волн с использованием мощного низкочастотного сигнала для поиска и оконтуривания границ углеводородных залежей. Исследованы характеристики анизотропной среды над залежами на основании полученного отклика от воздействия двухчастотного сигнала. Проанализированы вещественные и фазовые составляющие комбинированных элементов тензора диэлектрической проницаемости, абсолютные, мнимые и фазовые характеристики поверхностного импеданса среды над углеводородами. Проведен анализ характеристик среды над углеводородами для электромагнитных волн с правой и левой круговыми поляризациями в зависимости от частоты, коэффициента отношения амплитуд сигналов и удельной проводимости. Установлено, что по амплитудным и фазовым характеристикам компонентов тензора диэлектрической проницаемости и поверхностного импеданса среды над углеводородами может осуществляться диагностика сред с целью повышения производительности геологоразведочных работ и точности определения границ залежей углеводородов.*

**Ключевые слова:** *углеводородная залежь, электромагнитная волна, двухчастотный сигнал.*

**Введение.** Совершенствование и разработка новых методов поиска углеводородных залежей (УВЗ) является актуальным направлением в современной поисковой геофизике [1–3]. Активное внедрение электромагнитных методов (ЭММ) и технических средств для поиска углеводородов (нефти и газа) обусловлены научным и практическим интересами по решению данных задач для обеспечения экономик стран важнейшим источником энергии. В соответствии с этим тенденции развития ЭММ в поисковой геофизике направлены на решение задач внедрения эффективных методов георазведки с высоким уровнем точности и достоверности обнаружения месторождений углеводородов. Реализация этих методов на практике обусловлена их высокой информативностью. Функциональные зависимости компонентов тензоров диэлектрической проницаемости среды над залежами углеводородов дают дополнительные возможности для георазведки.

В данной статье исследовалось применение двухчастотных сигналов для модернизации и разработки ЭММ поиска УВЗ на основе исследования характеристик электромагнитных волн (ЭМВ) над залежами. Результаты применения методов поиска, идентификации месторождений УВЗ представлены во многих работах. Различные модификации способов вертикального зондирования широко используются для поиска углеводородов [4]. В работе [5] исследованы электрофизические и электрохимические процессы над залежами углеводородов на основе электродинамического моделирования среды над залежью по аналогии исследуемой среды с плазмоподобными образованиями на базе квазигидродинамического подхода.

Радиоволновые методы поиска [6] широко применяются для решения поставленных задач. Различные варианты электромагнитных зондирований при поисках углеводородов в транзитной зоне Каспийского моря получили широкое распространение, на основании их опыта применения наработаны разнообразные методики зондирования УВЗ [7]. Исследование компонентов составляющих поверхностного импеданса анизотропной среды над УВЗ с учетом влияния на самый верхний слой от всех ниже расположенных слоев проведено в работе [8]. Метод на основе электрорезонансных зондирований широко используется для определения свойств геологического профиля местности [9]. Методы исследования свойств объектов при морских измерениях, основанные на сравнении статистических свойств устанавливаемых электрических полей, предполагают получение необходимой информации для различения сред [10]. Используются исследования нефтегазовых резервуаров, выявляемые на основе аномалии поля в анизотропной среде [11]. Модификации способов поиска УВЗ с использованием амплитудно-модулированных сигналов построены на обнаружении месторождений углеводородов по регистрации амплитудных и фазовых компонент поверхностного импеданса геологического профиля [12; 13]. Универсальный способ для мониторинга коллектора и геотермальных исследований может применяться на практике для решения задач электроразведки [14]. Различные модификации способов вертикального зондирования широко используются для поиска углеводородов [15]. Применение для поиска УВЗ метода 3D-электроразведки становлением поля [16] приводит к расширению функциональных зависимостей диэлектрической проницаемости среды над углеводородами от режимов зондирования, что позволяет повысить точность разрабатываемых методов поиска УВЗ.

**Методика проведения исследований.** Применение двухчастотных ЭМВ для определения свойств анизотропных сред над УВЗ основано на использовании функциональных зависимостей компонентов

тензоров диэлектрической проницаемости среды над углеводородами [1]. Для формирования ЭМВ для исследования свойств среды над УВЗ выберем двухчастотный сигнал вида

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

где  $A_1, A_2, \omega_1, \omega_2$  – соответственно амплитуды и частоты данных ЭМВ.

Режимы измерений определяются коэффициентами соотношения амплитуд двух волн и их частот:

$$k_E = \frac{A_2}{A_1}, \quad k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (2)$$

поэтому процесс распространения двухчастотного сигнала (1) над средой с наличием углеводородов представляет интерес с точки зрения анализа взаимодействия ЭМВ с анизотропными средами, образующимися над залежами и скоплениями углеводородов, в зависимости от диэлектрической проницаемости и удельной проводимости пород, находящихся над УВЗ и определяющих электродинамический отклик. Различие возможных вариантов построения систем поиска позволяет формировать ЭМВ с различными соотношениями параметров. В данной статье проведен анализ распространения ЭМВ над средой расположения УВЗ для мощного низкочастотного (НЧ) сигнала с коэффициентами

$$k_E \ll 1, \quad k_\omega \ll 1. \quad (3)$$

Проведено исследование электродинамических характеристик среды на основе тензора диэлектрической проницаемости среды в режиме двухчастотных сигналов [1]:

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

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

$\tilde{\omega}_1$  – частотная составляющая, характеризующая данный режим зондирования;

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

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

$v_i$  – частота столкновения частиц;

$\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$\sigma_r$  – удельная проводимость среды;

$\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;

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

Проводился анализ комбинационных составляющих тензора диэлектрической проницаемости и поверхностного импеданса среды над УВЗ.

Методика исследований заключается в определении компонентов диэлектрической проницаемости среды над УВЗ  $\text{Re} \dot{\epsilon}_R$  и компонентов поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{11}$  и  $\dot{Z}_{12}$ .

**Результаты исследований.** Расчет компонентов тензоров диэлектрической проницаемости производится на основании экспериментально полученных параметров среды над залежами углеводородов [1]:

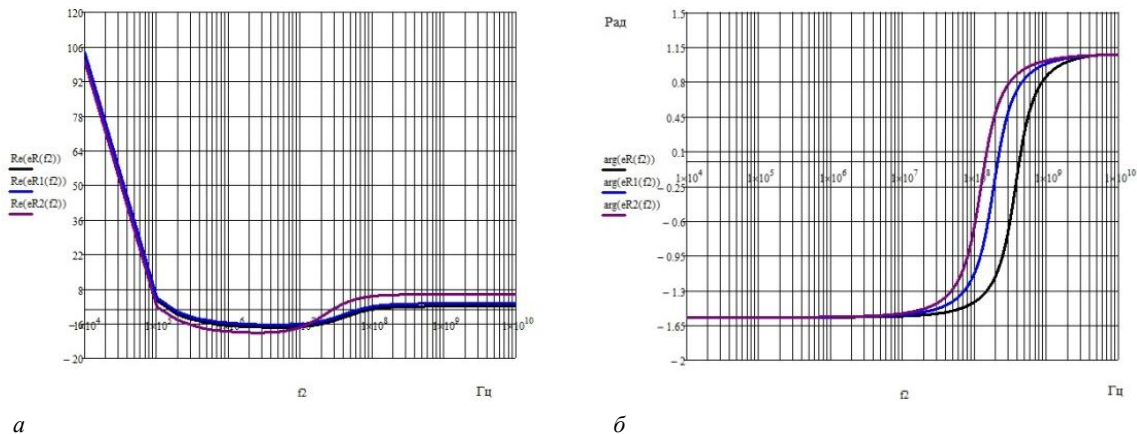
– залегания УВЗ на глубинах  $h = 2,0 - 3,5$  км;

– значений диэлектрической проницаемости вмещающих пород  $\varepsilon_r = 1 - 30$  и электрической проводимости  $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-5} - 1$  См/м;

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

– частоты столкновения частиц  $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$  рад/с.

Проведен анализ выражений (4) для компонентов диэлектрической проницаемости среды над УВЗ. Вещественные значения для компонентов диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой круговой поляризацией приведены на рисунке 1. Как видно из рисунка, вещественная составляющая  $\text{Re} \dot{\varepsilon}_R$  имеет две точки перехода через нуль на частотах  $f_{2ц}$  и  $f_{2п}$ , соответствующих электронному циклотронному и электронному плазменному резонансам. Частота электронного циклотронного резонанса лежит в пределах 100–200 кГц, причем с ростом диэлектрической проницаемости она смещается влево по оси абсцисс. Частота электронного плазменного резонанса соответствует 20–100 МГц и с увеличением диэлектрической проницаемости также уменьшается. Таким образом, для принятых значений параметров среды следует выделить частотный диапазон высокочастотной составляющей 100 кГц – 100 МГц, где  $\text{Re} \dot{\varepsilon}_R$  является отрицательной. Фазовые характеристики постоянны в диапазоне частот 10 кГц – 10 МГц и 3–10 ГГц. Применение верхней частоты зондирования, лежащей между указанными диапазонами, сопровождается ростом фазы от  $-1,6$  до  $1,1$  рад с переходом через нуль на частотах 100–400 МГц. Увеличение диэлектрической проницаемости среды смещает данную точку влево.



**а** – действительная часть суммарной компоненты; **б** – фазовая составляющая суммарной компоненты;

$\text{Re}(eR(f_2)), \text{arg}(eR(f_2))$  для  $\varepsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$ ;

$\text{Re}(eR1(f_2)), \text{arg}(eR1(f_2))$  для  $\varepsilon_r = 200, k_\omega = 10^{-3}, k_E = 10^{-1}$ ;

$\text{Re}(eR2(f_2)), \text{arg}(eR2(f_2))$  для  $\varepsilon_r = 30, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$

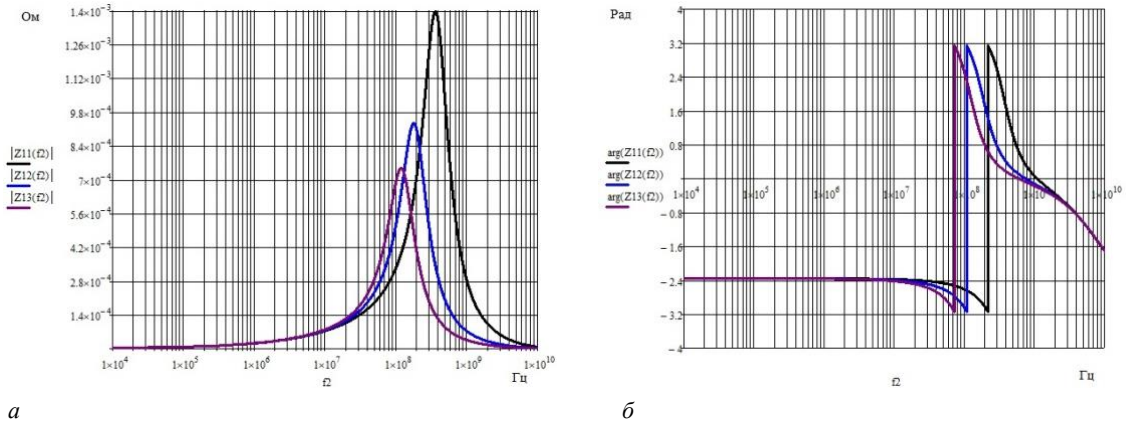
**Рисунок 1.** – Зависимости компонентов тензора от частоты  $f_2^1$

Вещественные значения для компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ для двухчастотных ЭМВ приведены соответственно на рисунке 2. Наблюдаются ярко выраженные максимумы модуля поверхностного импеданса среды на частотах 100–400 МГц. С увеличением значения диэлектрической проницаемости среды частота резонанса смещается влево и значение компоненты уменьшается. Фазовые характеристики поверхностного импеданса не меняются в диапазоне частот 10 кГц – 10 МГц. На участке 10–200 МГц происходит уменьшение фазы. Представляют интерес частоты 70–200 МГц, характеризующиеся скачкообразным ростом фазы. В оставшемся диапазоне значений высокочастотной компоненты происходит уменьшение значений до отрицательных с переходом через нуль при 500 МГц – 1 ГГц.

Значения модуля и фазы поверхностного импеданса анизотропной среды над углеводородами зависят от происходящих физико-химических процессов в самой залежи и в среде, определяющей околозалежное пространство, от состава кристаллической структуры скелета и термодинамических условий залегания (значения давления и температуры), влияющих на электрические свойства вмещающих пород и сред над УВЗ. Дополнительно были проанализированы амплитудные и фазовые составляющие компонент поверхностного импеданса среды над УВЗ  $Z_{12}$  (рисунок 3). Выполняется условие симметричности, т.е.  $Z_{11} = Z_{22}$  и  $Z_{12} = Z_{21}$ . Следует отметить, что для данной компоненты также существуют точки резонансов, выраженные

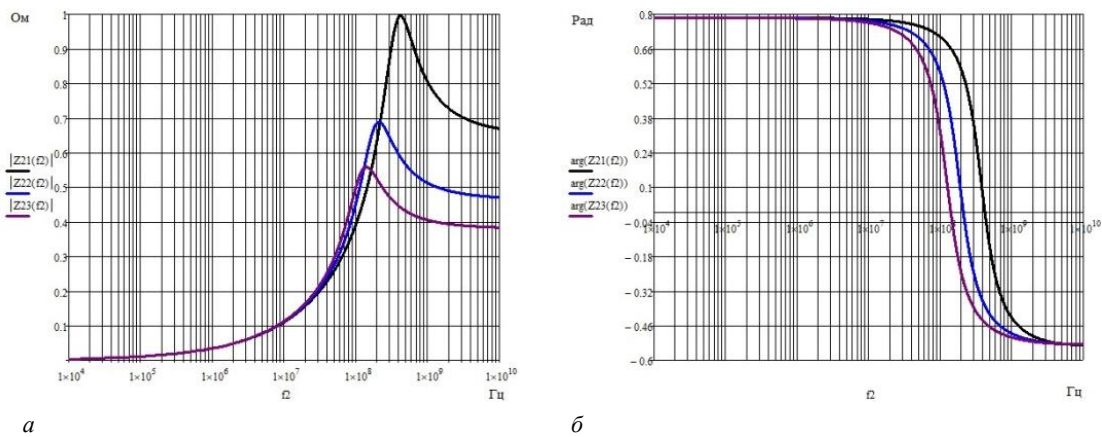
<sup>1</sup> Здесь и далее на рисунках  $\dot{Z}_{11} = Z_{11}, \dot{Z}_{12} = Z_{12}, \dot{Z}_{21} = Z_{21}, \dot{Z}_{22} = Z_{22}$ .

не так существенно, как для предыдущего случая. Они характерны для того же диапазона частот 100–400 МГц. После прохождения точек резонансов величины сопротивления уменьшаются, принимая стабильный характер в сантиметровом диапазоне. Фазовые характеристики постоянны при частотах 10 кГц – 10 МГц и в сантиметровом диапазоне. Наиболее интересен отрезок частот между указанными диапазонами с точкой перехода через нуль для 100–400 МГц.



***a*** – модуль  $\dot{Z}_{11}$ ; ***б*** – фазовая составляющая  $\dot{Z}_{11}$ ;  
 $|Z11(f2)|, \arg(Z11(f2))$  для  $\epsilon_r = 10, k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$ ;  
 $|Z12(f2), \arg(Z12(f2))$  для  $\epsilon_r = 20, k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$ ;  
 $|Z13(f2), \arg(Z13(f2))$  для  $\epsilon_r = 30, k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$

**Рисунок 2.** – Зависимости модуля  $\dot{Z}_{11}$  и его фазы от частоты  $f_2$



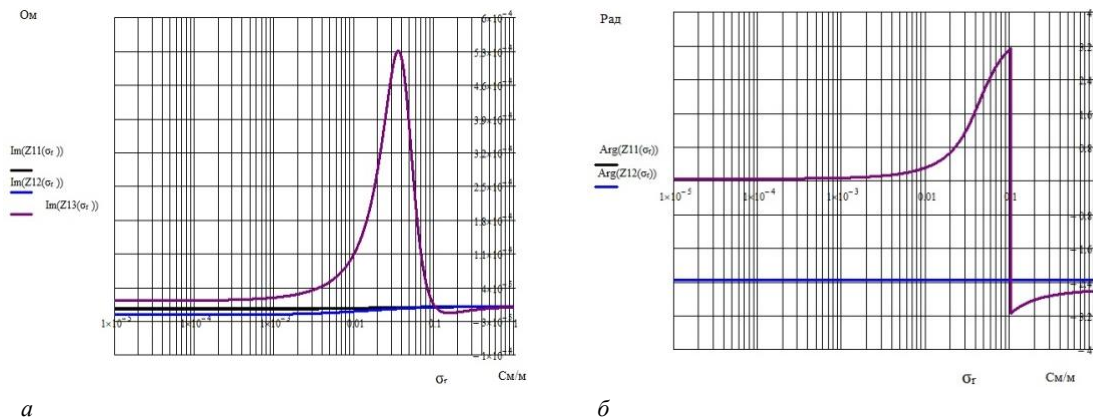
***a*** – модуль  $\dot{Z}_{21}$ ; ***б*** – фазовая составляющая  $\dot{Z}_{21}$ ;  
 $|Z21(f2), \arg(Z21(f2))$  для  $\epsilon_r = 10, k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$ ;  
 $|Z22(f2), \arg(Z22(f2))$  для  $\epsilon_r = 20, k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$ ;  
 $|Z23(f2), \arg(Z23(f2))$  для  $\epsilon_r = 30, k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$

**Рисунок 3.** – Зависимости модуля  $\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21}$  и его фазы от частоты  $f_2$

Дополнительно были проанализированы зависимости мнимых составляющих и фазовых характеристик компонент поверхностного импеданса при изменении удельной проводимости среды (рисунок 4). Установлено, что низкие значения частоты  $f_2$  не влияют на амплитудную компоненту мнимой составляющей, за исключением  $f_2 = 10^9$  Гц, когда наблюдается резонансный всплеск при значениях проводимости 0,01–0,1 См/м. Аналогично влияние удельной проводимости сказывается на фазе составляющей поверхностного импеданса. Уникальным значением является величина 0,1 См/м, когда происходит скачкообразное изменение фазы от положительных значений до отрицательных.

При определении комбинационных составляющих компонентов диэлектрической проницаемости среды над углеводородами важную роль играют физико-геологические свойства пород-коллекторов,

которые в свою очередь определяются минералогическим и гранулометрическим составом пород, особенностями структурно-текстурного строения скелета. Дополнительно были проанализированы зависимости мнимой составляющей  $\dot{Z}_{21}$  при изменении удельной проводимости среды и модуля  $\dot{Z}_{11}$  при изменении коэффициента отношения амплитуд (рисунок 5). По графикам видно, что низкие значения частот зондирования не влияют ни на амплитудные, ни на фазовые характеристики, за исключением  $f_2 = 10^9$  Гц, когда происходит резкое изменение данных характеристик проводимости с отрицательных (емкостных) на положительные (индуктивные). Точка перехода лежит в районе 0,03–0,04 См/м. При увеличении удельной проводимости происходит уменьшение величины поверхностного импеданса.



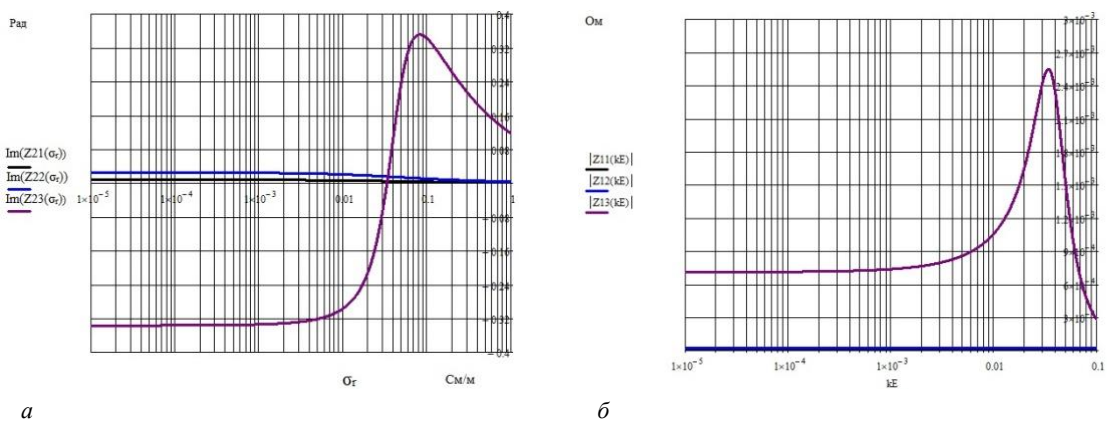
*a* – модуль  $\dot{Z}_{11}$ ; *б* – фазовая составляющая  $\dot{Z}_{11}$ ;

$\text{Im}(Z11(\sigma_r))$ ,  $\text{arg}(Z11(\sigma_r))$  для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$ ,  $f_2 = 10^5$  Гц;

$\text{Im}(Z12(\sigma_r))$ ,  $\text{arg}(Z12(\sigma_r))$  для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$ ,  $f_2 = 10^6$  Гц;

$\text{Im}(Z13(\sigma_r))$ ,  $\text{arg}(Z13(\sigma_r))$  для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$ ,  $f_2 = 10^9$  Гц

Рисунок 4. – Зависимости мнимой составляющей и фазы при изменении удельной проводимости среды



*a* – мнимая составляющая  $\dot{Z}_{11}$ ; *б* – модуль  $\dot{Z}_{11}$ ;

$\text{Im}(Z21(\sigma_r))$ ,  $|Z11(k_E)|$  для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$ ,  $f_2 = 10^5$  Гц;

$\text{Im}(Z22(\sigma_r))$ ,  $|Z12(k_E)|$  для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$ ,  $f_2 = 10^6$  Гц;

$\text{Im}(Z23(\sigma_r))$ ,  $|Z13(k_E)|$  для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$ ,  $f_2 = 10^9$  Гц

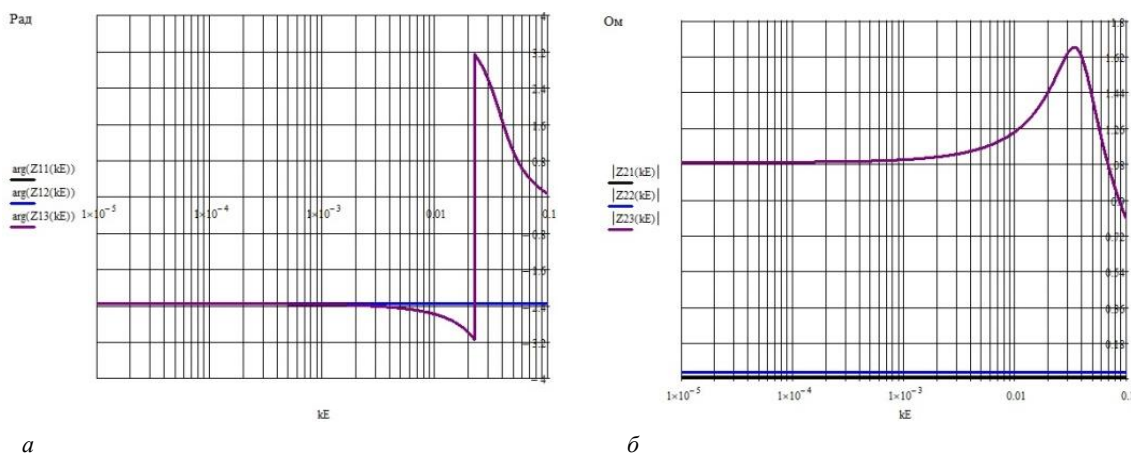
Рисунок 5. – Зависимости поверхностного импеданса

Зондирование анизотропных сред двухчастотными ЭМВ в режимах с правой и левой круговыми поляризациями позволяет повысить производительность методов электроразведки и повысить информативность за счет получения дополнительных данных по исследуемому геологическому профилю местности. Определение диэлектрической проницаемости, удельной проводимости среды и глубины слоя возможно на основании дополнительной априорной информации, получаемой с помощью перемещения передатчика и приемника по территории исследуемого профиля. 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.

Системы поиска на основе двухканальных схем определения комбинационных составляющих позволяют учитывать характер пористости и проницаемости сред, характеристики цементирующих веществ и механические свойства пород скелета, количество пластовой воды в порах, ее минерализацию и ряд других факторов.

Было проанализировано влияние вариации диапазона изменения характеристик зондирующих сигналов (коэффициентов  $k_E$ ), показанных на рисунках 6.



**а** – фазовая составляющая  $\dot{Z}_{21}$ ; **б** – модуль  $\dot{Z}_{21}$ ;

$\arg(Z11(k_E)), |Z21(k_E)|$  для  $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}, f_2 = 10^5$  Гц;

$\arg(Z12(k_E)), |Z22(k_E)|$  для  $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}, f_2 = 10^6$  Гц;

$\arg(Z13(k_E)), |Z23(k_E)|$  для  $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}, f_2 = 10^9$  Гц

**Рисунок 6. – Зависимости поверхностного импеданса**

При значениях  $k_E$  в диапазоне от 0,01 до 0,1 происходит резонансный рост компоненты, свидетельствующий о том, что возможность перестройки системы поиска углеводородов дает возможность повысить информативность методов георазведки углеводородов. Аналогично при таких же значениях коэффициентов отношения амплитуд происходит скачкообразное изменение (рост) величины модуля поверхностного импеданса.

**Закключение.** Проведенный анализ комбинационных составляющих компонентов диэлектрической проницаемости и поверхностного импеданса среды над углеводородами показал следующее:

- частота электронного циклотронного резонанса для режима НЧ взаимодействия лежит в пределах 100–200 кГц, частота электронного плазменного резонанса соответствует 20–100 МГц и для других значений параметров среды может смещаться в диапазон более высоких частот, включая сантиметровый;
- наблюдаются ярко выраженные максимумы модуля поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{11}$  среды на частотах 100–400 МГц;
- для компоненты  $\dot{Z}_{21}$  также существуют точки резонансов, выраженные однако не так существенно, как для предыдущего случая. Они характерны для того же диапазона частот 100–400 МГц;
- фазовые характеристики могут быть применены для дифференциации сред, так как они характеризуются скачкообразным ростом фазы;
- влияние удельной проводимости и коэффициентов отношения амплитуд может принести дополнительную информативность методов поиска и выделения УВЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
2. 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.
3. 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.

4. 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.
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. Способ радиоволнового зондирования и устройство для его осуществления : пат. RU 2152060 / В.К. Томилин, Г.П. Астафьев, В.И. Луконин. – Опубл. 27.06.2000.
7. Опыт применения электромагнитных зондирований при поисках углеводородов в транзитной зоне Каспийского моря / А.А. Петров [и др.] // Геофизика. – № 2. – 2010. – С. 60–64.
8. 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.
9. Levashov, S.P. Electric-resonance sounding method and its application for, geological-geophysical and engineering-geological investigations [Electronic resource] / S.P. Levashov // 66nd EAGE Conference and Technical Exhibition, Paris, France, 7–10 June 2003. – (CD-ROM Abstracts volume).
10. Маловичко, М.С. Сравнение статистических свойств устанавливаемых электрических полей при морских измерениях / М.С. Маловичко // Геофизика. – 2008. – № 5. – С. 59–64.
11. Frasher, A. Self-potential anomalies as possible indicators in search for oil and gas reservoirs / A. Frasher // 57th EAGE Conf. and Tech. Exhib., Glasgow, 29 May–2 June 1995. – Glasgow, UK. – P. 8.
12. 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.
13. Гололобов, Д.В. Влияние параметров амплитудно-модулированного воздействия на фазовые составляющие поверхностного импеданса анизотропной среды плазмopodobного типа / Д.В. Гололобов, О.В. Орлова, В.Ф. Янушкевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 98–101.
14. 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.
15. 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.
16. 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.

Поступила 25.03.2021

## APPLICATION OF TWO-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVES FOR DETERMINING THE PROPERTIES OF A MEDIUM OVER HYDROCARBONS

V. YANUSHKEVICH, S. KALINTSEV, V. BOGUSH

*The article analyzes the application of two-frequency electromagnetic waves using a powerful low-frequency signal to search and delineate the boundaries of hydrocarbon deposits. The characteristics of the anisotropic medium above the deposits were investigated on the basis of the received response from the effect of a two-frequency signal. The real and phase components of the combined elements of the dielectric constant tensor, the absolute, imaginary and phase characteristics of the surface impedance of the medium over hydrocarbons are analyzed. The analysis of the characteristics of the medium over hydrocarbons for electromagnetic waves with right and left circular polarizations is carried out depending on the frequency, the ratio of signal amplitudes and conductivity. It has been established that, based on the amplitude and phase characteristics of the components of the dielectric constant tensor and surface impedance of the medium over hydrocarbons, it is possible to diagnose the media while increasing the productivity of exploration and the accuracy of determining the boundaries of hydrocarbon deposits.*

**Keywords:** hydrocarbon reservoir, electromagnetic wave, dual-frequency signal.