

УДК 621.371: 550.837.6

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ИМПЕДАНС СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ В РЕЖИМЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ



В.Ф. Янушкевич

Доцент кафедры энергетики и электроники ПГУ имени Евфросинии Полоцкой, кандидат технических наук, доцент
v.yanushkevich@psu.by



С.В. Калинин

Старший преподаватель кафедры вычислительных систем и сетей ПГУ имени Евфросинии Полоцкой
s.kalintsev@psu.by



О.А. Кизина

Ассистент кафедры энергетики и электроники ПГУ имени Евфросинии Полоцкой
o.kizina@psu.by



Д.С. Сивацкий

Лаборант кафедры физики ПГУ имени Евфросинии Полоцкой, магистрант
d.sivatskiy@psu.by

В.Ф. Янушкевич

Окончил Минский радиотехнический институт. Область научных интересов связана с разработкой методов и устройств георазведки углеводородных залежей, организацией учебного и научно-исследовательского процессов в техническом университете.

С.В. Калинин

Окончил Полоцкий государственный университет. Область научных интересов связана с разработкой решений для вычислительных систем и сетей.

О.А. Кизина

Окончила Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. Область научных интересов связана с разработкой методов и устройств георазведки углеводородных залежей, организацией учебного и научно-исследовательского процессов в техническом университете.

Д.С. Сивацкий

Магистрант Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой. Область научных интересов связана с микроэлектроникой, радиотехникой, робототехникой.

Аннотация. В статье приводится анализ воздействия электромагнитных волн в режиме мощного высокочастотного сигнала на анизотропную среду над углеводородами. Исследованы компоненты тензоров диэлектрической проницаемости и поверхностного импеданса среды над залежами. Предложено внедрение различных методов и аппаратуры для поиска углеводородов на основе анализа вещественных, мнимых и фазовых составляющих комбинированных элементов тензора диэлектрической проницаемости и поверхностного импеданса среды над углеводородами. Исследованы характеристики среды над углеводородами для электромагнитных волн с правой и левой круговыми поляризациями в зависимости от частоты, коэффициента отношения амплитуд сигналов, удельной проводимости. Рекомендованы режимы зондирования анизотропных сред над углеводородами для повышения производительности геологоразведочных работ и точности определения границ залежей углеводородов.

Ключевые слова: углеводородная залежь, электромагнитная волна, двухчастотный сигнал

Введение. В настоящее время в поисковой геофизике является актуальным направлением разработка методов поиска и оконтуривания углеводородных залежей (УВЗ) на основе электромагнитных методов (ЭММ) георазведки [1,2]. Выбор метода георазведки определяет методику проведения натуральных испытаний и повышает точность определения границ и уровень идентификации месторождений УВЗ [3]. На основе анализа электрохимических и электрофизических процессов над анизотропными средами, образующимися над скоплениями нефти и газа (углеводородов) строятся электродинамические модели сред и находятся отклик на воздействие зондирующих сигналов [1, 2]. Аналогия исследуемой среды над залежью нефти и газа с плазмоподобным образованием позволяет использовать для изучения взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ существующие решения при изучении плазмы и плазмоподобных сред на основе квазигидродинамического подхода с использованием многочастичных электронно-ионных токов и феноменологически заданных частот столкновений. 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. Под действием высоких температур и пластового давления над залежью углеводородов происходят электрохимические процессы, приводящие к образованию на границе с воздушным пространством промежуточной области, характеризующейся избытком свободных электронов [3]. Эти процессы оказывают влияние на отклик зондирующих сигналов.

Современное состояние науки и техники дает оценку возможностей использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на шельфах [4]. Тенденции развития поисковой геофизики направлены на решение задач внедрения эффективных методов георазведки с высоким уровнем точности и достоверности обнаружения месторождений УВЗ [5]. Различные модификации способов вертикального зондирования находят широкое использование для поиска углеводородов [6]. Методы электромагнитной разведки с применением сложных сигналов содержат уникальную информацию об установленных на данный момент сведениях о характеристиках электромагнитных полей над УВЗ [7]. Активное внедрение различных методов и аппаратуры для поиска углеводородов обусловлено научным и практическим интересами по решению данных задач для создания надежного инструмента при поиске, оконтуривании и идентификации залежей нефти и газа с помощью радиокомплексирования ЭММ георазведки [8, 9]. Методы исследования свойств объектов при морских измерениях предполагают получение необходимой информации для различения сред [10]. Активно применяются на практике способы для решения задач электроразведки [11]. Находит широкое использование для определения свойств

геологического профиля местности метод на основе выявления аномалий поля в анизотропной среде [12]. Совместная инверсия морских магнитотеллурических и гравиметрических данных с учетом сейсмических ограничений применяются в современных системах поиска полезных ископаемых [13]. Универсальные способы для мониторинга коллектора и геотермальных исследований применяются в поисковой геофизике для решения задач электроразведки [14]. Различные модификации способов и аппаратуры для вертикального зондирования находят широкое использование для поиска углеводородов [15]. Использование амплитудно-модулированных сигналов и модификации способов поиска УВЗ построены на обнаружении месторождений углеводородов по регистрации амплитудных и фазовых компонент поверхностного импеданса геологического профиля [16]. Исследование компонентов составляющих поверхностного импеданса анизотропной среды над УВЗ с учетом влияния на самый верхний слой от всех ниже расположенных слоев проведено в работе [17].

Взаимодействие ЭМВ со средой над УВЗ. Распространение двухчастотных ЭМВ в среде над УВЗ рассмотрено в работе [2]. Вместе с тем для реализации новых методов георазведки представляет интерес анализ процесса взаимодействия двухчастотных ЭМВ с анизотропными средами в режиме мощного высокочастотного (ВЧ) сигнала. Компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды в данном режиме имеют вид [2]:

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

В выражениях (1) фигурируют компоненты тензора $\hat{\epsilon}_1$, $\hat{\epsilon}_2$, $\hat{\epsilon}_3$; частотная составляющая, характеризующая режим ВЧ зондирования $\tilde{\omega}_2$, плазменная частота ω_{Π} ; гиротропная частота ω_{Π} ; частота столкновения частиц v_i ; относительная диэлектрическая проницаемость среды ϵ_r ; проводимость среды σ_r ; диэлектрическая постоянная ϵ_0 ; $\alpha = \omega_2 - \omega_1 = \omega_2(1 - k_\omega)$ – разность частот двух ЭМВ с амплитудами и частотами $A_1, A_2, \omega_1, \omega_2$. Режимы измерений задаются коэффициентами соотношения амплитуд двух волн и их частот

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

для режима ВЧ выбираются коэффициенты

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

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

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

где \dot{Z}_{11} и \dot{Z}_{12} – компоненты поверхностного импеданса среды,

$\dot{\epsilon}_R$, $\dot{\epsilon}_L$ – диэлектрическая проницаемость для суммарной и разностной компонент ЭМВ.

Проводился анализ комбинационных составляющих тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для параметров среды над залежами углеводородов [1]:

- значения диэлектрической проницаемости вмещающих пород $\epsilon_r = 1 - 30$ и электрической проводимости $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-5} - 1$ См/м;
- концентрации частиц $N_e = N_n = (10^{16} - 10^{18})\text{м}^{-3}$.
- частота столкновения частиц $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$ рад / с.

Такие данные задаются, исходя из исследований образцов пород над УВЗ, свидетельствующих о хлоридно-натриевой составляющей в рассолах повышенного количества щелочных и щёлочноземельных металлов, а также изотопных элементов [1]. Это приводит к образованию в зоне над УВЗ сложных ионных соединений полупроводникового характера с повышенной термоэлектронной эмиссией (до 10.0 мкА/м² при температуре 20°C).

Залежь отличается по физическим свойствам от пород-коллекторов, где она располагается, по уменьшению плотности залежи по сравнению с законтурной областью, повышению суммарного электрического сопротивления данного участка, понижению скорости сейсмических продольных волн, увеличению их поглощения (ослабления) и других факторов.

Количественные проявления этих эффектов отражаются на величинах составляющих поверхностного импеданса, на которые влияют физико-геологические характеристики пород-коллекторов. В качестве основных, определяющих наиболее весомый вклад, следует отнести гранулометрическую и минералогическую структуру пород, структурно-текстурные проявления скелета, коэффициент пористости и проницаемость, вид цементирующих добавок, механические особенности скелета, содержание пластовой воды в порах, ее минерализация, термодинамические условия месторождения (всестороннее давление и температура).

Следует отметить, что на величину поверхностного импеданса оказывает влияние перестройка физических и химических процессов в промежуточной области. Это отражается в прохождении обменных реакций и соответствующих преобразований, приводящих к перемещению свободных носителей заряда в направлении к границе раздела сред над месторождением углеводородов (в результате появляются токи, в данном случае компенсирующие ионные токи). Вертикальной миграции заряженных частиц способствует поляризация УВЗ, определяемая окислительно-восстановительными эффектами, что вызывает дрейф флюидов и увеличение за счет тепловых колебаний кристаллических решеток количества свободных электронов.

Таким образом, на величину поверхностного импеданса оказывает влияние физико-химическая обстановка над УВЗ [1]. Над залежью образуется поток электронов, приводящий в свою очередь к появлению геомагнитной аномалии из-за проявления диамагнитных свойств перемещающихся частиц в анизотропной среде. Появляется слабая лоренцева сила, действие которой приводит к коррекции траектории движения электрона в постоянном магнитном поле.

Возникновение электронного потока в структурах вмещающих пород приводит к изменению проводимости анизотропной среды над залежью, что коррелируется с данными, полученными с помощью метода радиокип. Продольное или поперечное изменение величины удельной проводимости полупроводникового образца нефтегазоносной неоднородности происходит за счёт влияния аномалии постоянного магнитного поля Земли. Экспериментальные исследования на реальных месторождениях углеводородов, проведённые в СВ-КВ-диапазонах, показывают, что над ними отмечается увеличение удельного электрического сопротивления [1].

Результаты исследований. Проведен анализ выражений (1) для компонентов диэлектрической проницаемости среды над УВЗ. Абсолютные значения для компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ приведены на рисунке 1, а. На частотах (10 – 400) МГц происходит резонансное увеличение данной компоненты поверхностного импеданса. Зондирование анизотропных сред двухчастотными ЭМВ в ВЧ режимах позволяет исследовать физико-геологические свойства пород-коллекторов, минералогический и гранулометрический состав пород, структурно-текстурное строение скелетов. С увеличением диэлектрической проницаемости наполнителя вмещающих пород частота резонанса смещается влево по оси абсцисс. Значения составляющих тензора анизотропной среды над углеводородами зависят от физико-химических процессов в самой залежи и условий залегания (значения давления и температуры), влияющих на электрические свойства вмещающих пород и сред над УВЗ, поэтому частота резонанса может смещаться в область высоких частот.

Фазовые характеристики для составляющей поверхностного импеданса для двухчастотных сигналов приведены на рисунке 1, б. Наблюдается скачкообразный рост фазовой составляющей на частотах 20 МГц – 60 МГц. С увеличением значения диэлектрической проницаемости среды частота увеличения фазы смещается влево. Фазовые характеристики рассматриваемой компоненты не меняются в диапазоне частот 10 кГц – 1 МГц. На участке 60 МГц – 10 ГГц происходит уменьшение фазы с положительных значений на отрицательные и переходом через нуль между (1 – 2) ГГц.

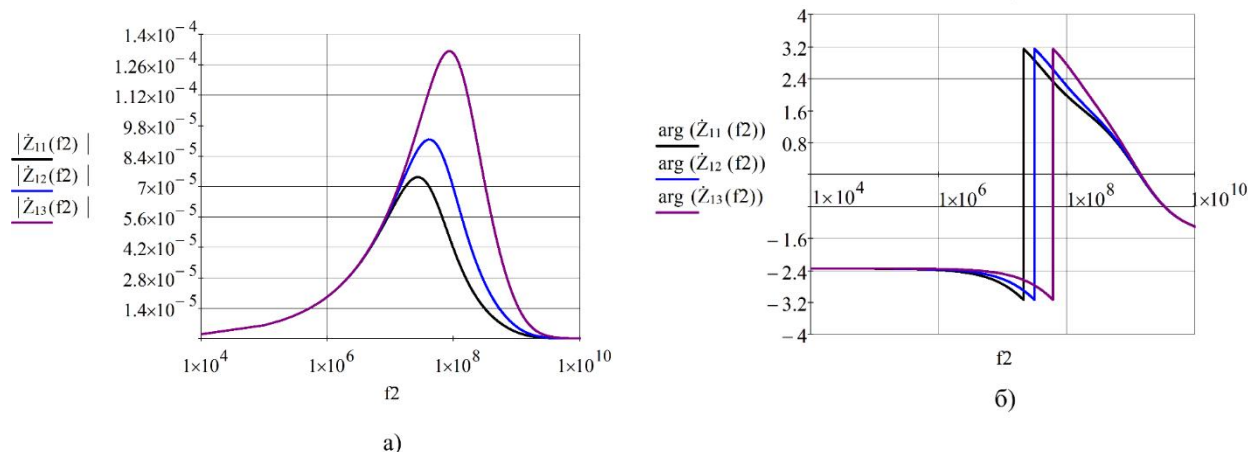
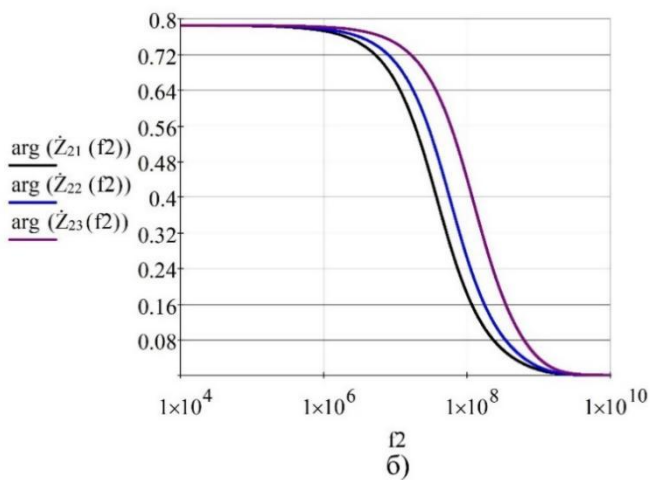
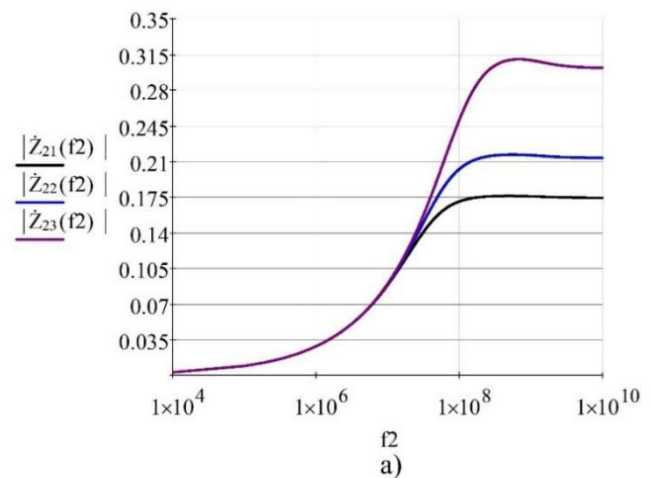


Рисунок 1. Зависимости компонентов поверхностного импеданса от частоты f_2
 а) абсолютная часть ; б) фазовая составляющая поверхностного импеданса
 $|\dot{Z}_{11}(f_2)|$, $\arg(\dot{Z}_{11}(f_2))$ – для $\epsilon_r=30$, $:k_\omega=10^{-6}$, $k_E=10$; $|\dot{Z}_{12}(f_2)|$, $\arg(\dot{Z}_{12}(f_2))$ – для
 $\epsilon_r=20$, $:k_\omega=10^{-6}$, $k_E=10$; $|\dot{Z}_{13}(f_2)|$, $\arg(\dot{Z}_{13}(f_2))$ – для $\epsilon_r=10$, $:k_\omega=10^{-6}$, $k_E=10$

Дополнительно были проанализированы амплитудные составляющие компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ для $|\dot{Z}_{21}(f_2)|$ (рис.2, а). Закон изменения абсолютной составляющей для данной компоненты отличается от рассмотренной выше характеристики. На участке (1 МГц – 1 ГГц) происходит увеличение поверхностного

импеданса и при дальнейшем росте частоты зондирования характеристика не меняется. Дополнительная априорная информация получается с помощью перемещения передатчика и приемника по территории исследуемого профиля. При определении комбинационных составляющих поверхностного импеданса среды над углеводородами повышаются производительность методов электроразведки и информативность за счет получения дополнительных данных по исследуемому геологическому профилю местности.

Проведено моделирование зависимостей фазовых характеристик компонентов данной составляющей поверхностного импеданса от частоты (рис.2, б). Установлено, что низкие значения частоты f_2 не влияют на амплитудную компоненту рассматриваемой составляющей. На участке (1 МГц – 1 ГГц) происходит уменьшение фазы поверхностного импеданса и при дальнейшем росте частоты зондирования характеристика не меняется.



а) абсолютная часть; б) фазовая составляющая поверхностного импеданса
Рисунок 2. Зависимости компонентов поверхностного импеданса $|\dot{Z}_{21}(f_2)|$ от частоты f_2

$|\dot{Z}_{21}(f_2)|, \arg(\dot{Z}_{21}(f_2))$ – для $\varepsilon_r=30, :k_\omega= 10^{-6}, k_E= 10$; $|\dot{Z}_{22}(f_2)|, \arg(\dot{Z}_{22}(f_2))$ – для $\varepsilon_r=20, :k_\omega= 10^{-6}, k_E= 10$; $|\dot{Z}_{23}(f_2)|, \arg(\dot{Z}_{23}(f_2))$ – для $\varepsilon_r=10, :k_\omega= 10^{-6}, k_E= 10$

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.

Проведено моделирование зависимостей амплитудных характеристик компонентов составляющей \dot{Z}_{11} поверхностного импеданса от проводимости наполнителя вмещающих пород над УВЗ (рис.3, а). Для сред, обладающих повышенной проводимостью (0.01 – 1 См / м), данная характеристика подвержена влиянию сопротивления пород на общее сопротивление верхнего слоя. Следует выделить значение частоты зондирования $f_2 = 10^7$ Гц, когда происходит резкое увеличение рассматриваемой составляющей на отрезке (0.001 – 1) См / м. Применение данной частоты хорошо коррелируется со значениями частот, приведенных выше (рисунок 1), когда происходит резонансное увеличение данной компоненты поверхностного импеданса (ее абсолютное значение).

На рисунке 3, б отражены зависимости мнимой составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} . Как и в предыдущем случае, влияние проводимости проявляется в диапазоне (0.001 – 1) См/м. Использование более низких частот зондирования приводит к уменьшению мнимых составляющих в указанном отрезке проводимостей среды над УВЗ. На частоте $f_2 = 10^9$ Гц наблюдается резкое увеличение анализируемой характеристики с точкой резонанса при 0.5 См/м.

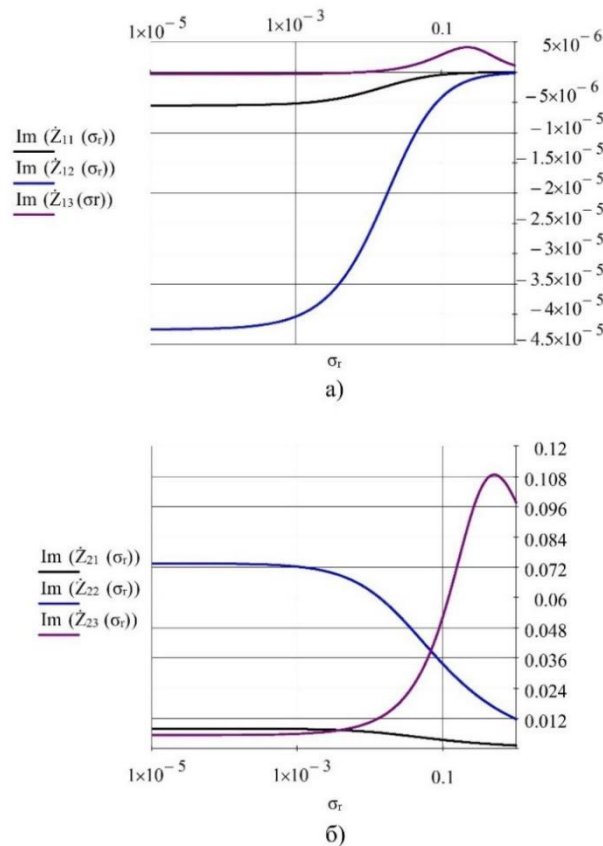


Рисунок 3. Зависимости мнимых составляющих поверхностного импеданса

а) компоненты \dot{Z}_{11} ; б) компоненты \dot{Z}_{21}

$\text{Im}(\dot{Z}_{11}(\sigma_r))$, $\text{Im}(\dot{Z}_{21}(\sigma_r))$ – для $\varepsilon_r=10$, $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E=10$, $f_2 = 10^5$ Гц; $\text{Im}(\dot{Z}_{12}(\sigma_r))$, $\text{Im}(\dot{Z}_{22}(\sigma_r))$ – для $\varepsilon_r=10$, $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E=10$, $f_2 = 10^7$ Гц; $\text{Im}(\dot{Z}_{13}(\sigma_r))$, $\text{Im}(\dot{Z}_{23}(\sigma_r))$ – для $\varepsilon_r=10$, $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E=10$, $f_2 = 10^9$ Гц

Зависимости вещественной составляющей \dot{Z}_{11} приведены на рисунке 4, а. При этом использование аппаратуры для поиска с низкими значениями частот ВЧ составляющих не влияет на вещественную компоненту. Переход в сантиметровый диапазон повышает информативность от исследования данной характеристики, поскольку появляется

зависимость от диэлектрической проницаемости анизотропных сред, с ростом которой происходит уменьшение вещественной составляющей.

Фазовые характеристики величины \dot{Z}_{11} при изменении диэлектрической проницаемости наполнителя показаны на рисунке 4, б. Увеличение частот зондирования влияет на изменения фазы. Частота 10^9 Гц характерна тем, что на ней происходит изменение знака фазовой компоненты с положительной на отрицательную в районе $\epsilon_r = 6$.

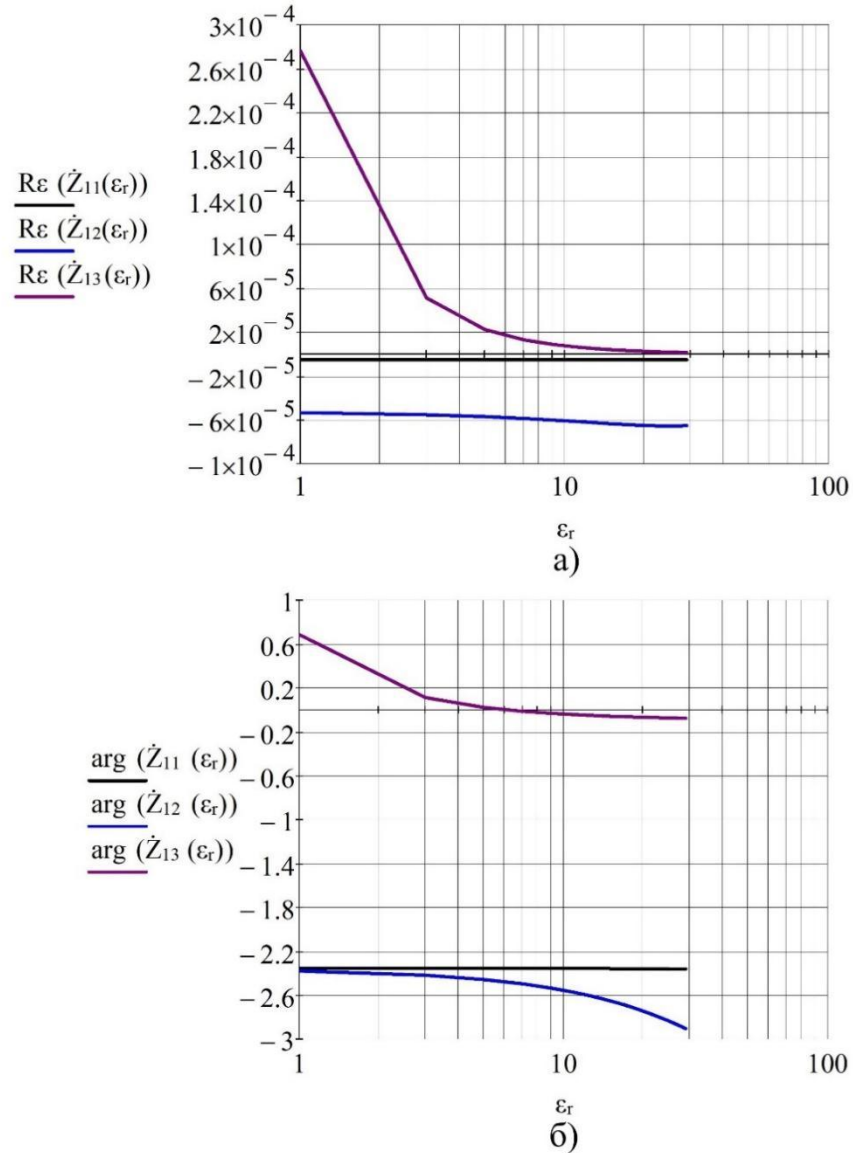


Рисунок 4. а) Зависимости вещественной составляющей Z11 б) Зависимости фазовой составляющей компоненты Z11

$\text{Re}(\dot{Z}_{11}(\epsilon_r)), \text{arg}(\dot{Z}_{11}(\epsilon_r))$ – для $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10$, $f_2 = 10^5$ Гц ; $\text{Re}(\dot{Z}_{12}(\epsilon_r)), \text{arg}(\dot{Z}_{12}(\epsilon_r))$ – для $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10$, $f_2 = 10^7$ Гц ; $\text{Re}(\dot{Z}_{13}(\epsilon_r)), \text{arg}(\dot{Z}_{13}(\epsilon_r))$ – для $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10$, $f_2 = 10^9$ Гц

Амплитудные характеристики вещественной величины \dot{Z}_{21} при изменении диэлектрической проницаемости наполнителя показаны на рисунке 5, а. Для нее характерна та же закономерность, что и для рассмотренной выше компоненты за исключением численных значений. Фазовые характеристики данной компоненты

показаны на рисунке 5, б. По-прежнему, на ее изменение оказывают влияние частоты сантиметрового диапазона.

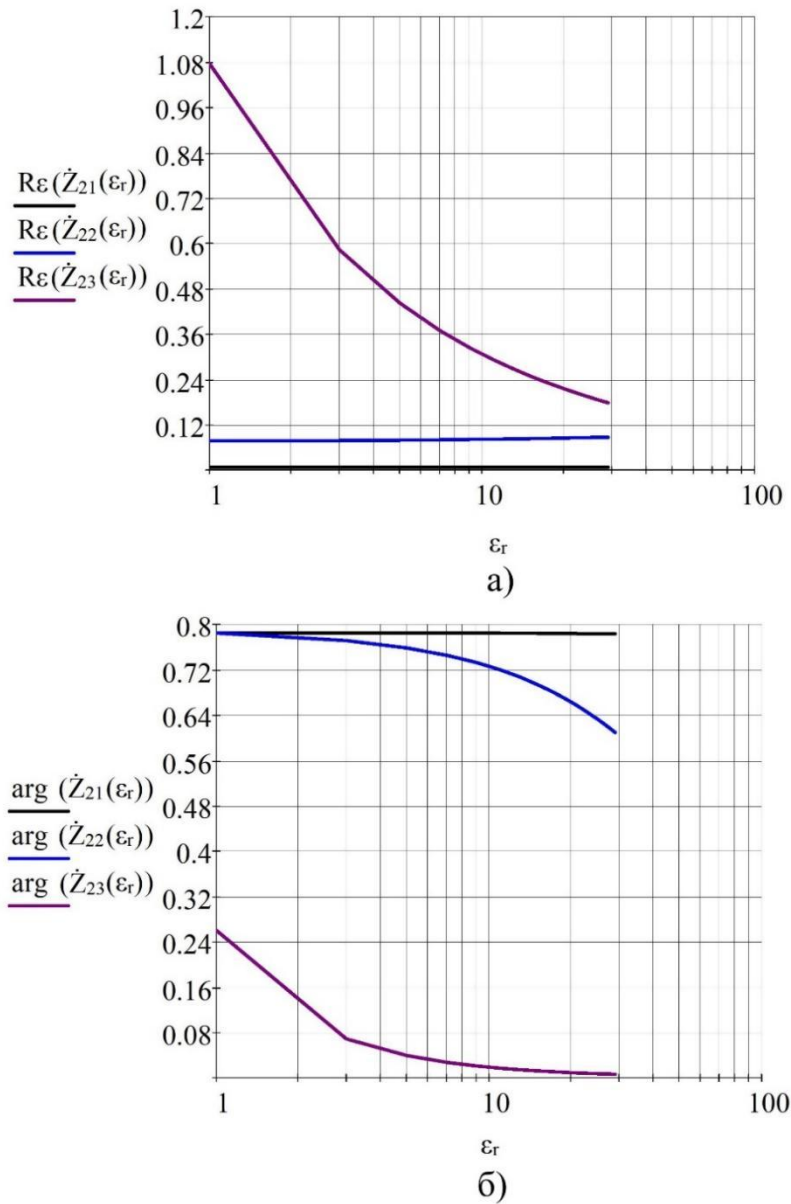


Рисунок 5. а) Зависимости вещественной составляющей \dot{Z}_{21} б) Зависимости фазовой составляющей компоненты \dot{Z}_{21}

$\text{Re}(\dot{Z}_{21}(\epsilon_r)), \text{arg}(\dot{Z}_{21}(\epsilon_r))$ – для $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10$, $f_2 = 10^5$ Гц ; $\text{Re}(\dot{Z}_{22}(\epsilon_r)), \text{arg}(\dot{Z}_{22}(\epsilon_r))$ – для $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10$, $f_2 = 10^7$ Гц ; $\text{Re}(\dot{Z}_{23}(\epsilon_r)), \text{arg}(\dot{Z}_{23}(\epsilon_r))$ – для $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10$, $f_2 = 10^9$ Гц

К такому поведению характеристик поверхностного импеданса приводит тот факт, что над залежью существует поток заряженных частиц, перемещающийся в полифазной среде от УВЗ к дневной поверхности, причем поток частиц вызывает проявление геомагнитных аномалий за счёт сложения магнитного поля Земли и отрицательного магнитного поля перемещающихся заряженных частиц. Изменение геомагнитного поля приводит к изменению удельного сопротивления вмещающих пород над УВЗ и свидетельствует об анизотропном характере среды над УВЗ, присущему плазменным и плазмоподобным образованиям [1].

Заключение. Проведенный анализ составляющих поверхностного импеданса среды над углеводородами показал, что:

1 На частотах (10 – 400) МГц происходит резонансное увеличение компоненты поверхностного импеданса Z_{11} , что может быть применено для поиска и идентификации углеводородов с высокой точностью.

2 Наблюдается скачкообразный рост фазовой составляющей \hat{Z}_{11} на частотах 20 МГц – 60 МГц и это может принести дополнительную информативность методов поиска и выделения УВЗ.

3 На участке (1 МГц – 1 ГГц) происходит увеличение составляющей поверхностного импеданса \hat{Z}_{12} и на основании этого возможна реализация системы поиска на основе двухканальных схем определения комбинационных составляющих и вариации характеристик сигналов.

4 Представляет интерес отрезок значений коэффициента отношения частот 0.01 – 0.1 для получения дополнительной информации с помощью перемещения передатчика и приемника по территории исследуемого профиля.

5 Для систем поиска углеводородов можно рекомендовать значение частоты зондирования $f_2 = 10^7$ Гц, когда происходит резкое увеличение мнимой составляющей \hat{Z}_{11} на отрезке (0.001 – 1) См / м.

Список литературы

- [1] Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
- [2] Янушкевич, В.Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В.Ф. Янушкевич. – Новополоцк, ПГУ, 2017. – 232 с.
- [3] Moskvichew, V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V.N. Moskvichew // 9-th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20-22, 1991. – Vol. 1. – P. 240-244.
- [4] Ковалев, Н.И. 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.) / Н.И. Ковалев, Т.А. Филимонова, В.А. Гох и др. // – Томск: Ин-т оптики атмосферы СО РАН, -2004. – С. 67–70.
- [5] Малехмир, А. Сейсмические методы при разведке полезных ископаемых и планировании горных работ - Введение / А. Малехмир, М. Уросевич, Г. Беллефлер, С. Джухлин, В. Милкерайт. // Геофизика. -2012 г.
- [6] Holten, T. Time lapse CSEM reservoir monitoring of the Norne field with vertical dipoles / T. Holten, X. Luo, G. Naevdal, S.L. Helwig // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2016. – Vol. 35. – P. 971–975.
- [7] Степуленок, С.В. Взаимодействие амплитудно-частотно-модулированных сигналов со средой над углеводородными залежами. / С.В. Степуленок, В.Ф. Янушкевич // Вестник ПГУ Серия С. Фундаментальные науки. Физика. – Новополоцк, 2009. – №9. – С.103-108.
- [8] Гололобов, Д.В. Радиоконспектирование методов электромагнитной разведки при поиске залежей углеводородов / Д.В. Гололобов // Докл. БГУИР. – 2008. – № 8(38). – С. 30–36.
- [9] Henke, C. H. Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic) / C.H. Henke, M. Krieger, K. Strack, A. Zerilli // Interpretatio.– 2020. – Vol. 8. – № 4. – P. 15 – 24.
- [10] Anderson, C. An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source / C. Anderson, J. Mattsson // First Break. – 2010. – First Break. – Vol. 28. – iss.5. – 71 – 75.
- [11] Бурцев, М.И. Поиски и разведка месторождений нефти и газа / М.И. Бурцев // – М.: -Издательство Российского университета дружбы народов, -2006. – 264 с.
- [12] 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.
- [13] Джеген, М. Совместная инверсия морских магнитотеллурических и гравиметрических данных с учетом сейсмических ограничений - предварительные результаты построения изображений суббазальтов у Фарерского шельфа / М. Джеген, Р.В.Хобс , П. Тариц, А. Чаве // Планета Земля Sci Lett:-2009.- С. 47–55.
- [14] 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] Гололобов, Д.В. Импедансные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала. / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич, С.В. Калинин // Доклады БГУИР. – Мн, 2010. – №6(52). – С.13-

[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 Parts. – Part 3. TECHNOLOGY. – PSU, Novopolotsk, 2016. – V. 179 – 183.

Авторский вклад

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

SURFACE IMPEDANCE OF THE MEDIUM OVER HYDROCARBONS IN THE HIGH-VALUE SENSING MODE

V.F. Yanushkevich

Associate Professor of the Department of Power Engineering and Electronics of Euphrosyne Polotskaya state university of Polotsk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

S.V. Kalintsev

Senior Lecturer of the Department of Computing Systems and Networks, Euphrosyne Polotskaya state university of Polotsk

O.A. Kizina

*Assistant of the Department of Power Engineering and Electronics
Euphrosyne Polotskaya state university of Polotsk*

D.S. Sivatsky

*Laboratory assistant
physics department
Euphrosyne Polotskaya state university of Polotsk, Master's student*

Abstract. The article provides an analysis of the impact of electromagnetic waves in the mode of a powerful high-frequency signal on an anisotropic medium above hydrocarbons. The components of the dielectric constant and surface impedance tensors of the medium above the deposits were studied. The introduction of various methods and equipment for the search for hydrocarbons is proposed based on the analysis of the real, imaginary and phase components of the combined elements of the dielectric constant tensor and the surface impedance of the medium above hydrocarbons. The characteristics of the medium above hydrocarbons for electromagnetic waves with right and left circular polarizations were studied depending on frequency, signal amplitude ratio, and specific conductivity. Probing modes for anisotropic media above hydrocarbons are recommended to increase the productivity of geological exploration and the accuracy of determining the boundaries of hydrocarbon deposits.

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