

УДК 621.371: 550.837.6

DOI 10.52928/2070-1624-2026-46-1-47-54

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВУХВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН СО СРЕДОЙ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ

канд. техн. наук, доц. В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ, И. С. РУСЕЦКИЙ,

В. И. РАСКИН, Д. С. СИВАЦКИЙ

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

канд. техн. наук, доц. К. БАБАМУРАТОВ

(Термезский государственный университет инженерии и агротехнологий, Узбекистан)

Проведен анализ взаимодействия электромагнитных волн с поверхностным слоем над углеводородами в режиме двухволнового воздействия с преобладанием низкочастотной составляющей излучающего сигнала. Исследованы действительные части и фазы суммарной и разностной компонент тензоров диэлектрической проницаемости поверхностного слоя над углеводородами. Определены зависимости модулей и фаз поверхностного импеданса среды над углеводородами от частоты высокочастотной составляющей излучающего сигнала. Проведен расчет частот электронно-циклотронного и электронно-плазменного резонансов, которые позволяют повысить точность поиска месторождений нефти и газа за счет расширения режимов тестирования. Установлено, что для двухволнового режима отсутствуют резонансы модулей поверхностного импеданса поверхностного слоя над углеводородами в отличие от режимов одночастотного взаимодействия. Полученные результаты моделирования характеристик поверхностного слоя над углеводородами можно рекомендовать для применения в радиотехнических системах для георазведки углеводородных залежей.

Ключевые слова: углеводородная залежь, поверхностный слой, двухволновой сигнал, электромагнитные волны.

Введение. Актуальность разработки методов поиска и идентификации месторождений нефти и газа обусловлена их ключевой ролью в экономическом развитии государства. Поиск новых перспективных объектов требует применения современных методов исследований, таких как CSEM. Данные методы особенно эффективны для обнаружения залежей, поскольку электрическое сопротивление заполненных углеводородами резервуаров на порядок выше, чем у резервуаров, заполненных рассолом [1]. Метод зондирования становлением поля в ближней зоне используется для исследования геологических разрезов и показал высокую эффективность при проведении нефтегазописковых работ в комплексе с сейсморазведочными методами [2]. Технология электромагнитной разведки и мониторинга широко применяется в таких областях, как добыча угля, воды, нефти, газа, геотермальной энергии, инженерия, разработка ресурсов, а также в научных и экологических исследованиях [3]. Широко применяются методы электрорезонансного зондирования в экологических, геолого-геофизических и инженерно-геологических исследованиях [4]. Апробированы методы, основанные на сравнении характеристик антенных излучателей, имеющих противоположное направление вращения вектора поляризации, и последующей оценке входных сопротивлений и/или коэффициента эллиптичности [5].

Получили распространение технологии, в рамках которых в качестве альтернативного метода исследования природы «воздушной волны» предлагается использование переходной CSEM и анализ соответствующих временных рядов [6]. Достоверность обнаружения углеводородных залежей (УВЗ) можно повысить за счет регистрации их собственного излучения [7]. Методы на основе применения двухчастотных, модулированных и импульсных сигналов расширяют возможности диагностики поверхностного профиля над углеводородами [8]. Данные методы актуальны для систем мониторинга подземных хранилищ газа [9]. Анализ двухчастотного взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с анизотропными средами над углеводородами в низкочастотном и высокочастотном режимах сигнала приведен в работе [10].

Изучены характеристики среды над скоплениями углеводородов при воздействии частотно-модулированных сигналов в зависимости от несущей частоты, индекса частотной модуляции для правой и левой поляризации ЭМВ [11]. Исследовано влияние изменения концентрации частиц на частотные характеристики коэффициентов отражения от поверхности анизотропных сред над углеводородами [12]. Результаты экспериментов позволили получить удовлетворительные данные для интересующих глубин, которые доказывают необходимость различения горизонтальной и вертикальной проводимостей для максимально согласованной 3D-инверсии CSEM [13].

Важно обосновать выбор алгоритмов интерпретации, особенно учитывая, что процедуры прямого моделирования электромагнитного зондирования с контролируемым источником, как правило, существенно ограничены и не получили широкого распространения [14]. Комплексирование методов разведки повышает

точность обнаружения УВЗ [15; 16]. При исследовании поверхностных слоев над углеводородами учитываются тензорные свойства диэлектрической проницаемости среды [17; 18].

Методика исследований. Целью данной работы является установление закономерностей поведения характеристик поверхностного слоя над УВЗ в режиме воздействия на него двухволновой ЭМВ.

Для разработки радиотехнических методов поиска углеводородов представляет интерес установление отличий двухчастотного и двухволнового режимов взаимодействия ЭМВ с приповерхностным геологическим слоем над углеводородами.

Рассмотрим взаимодействие в режиме двухволновой ЭМВ вида

$$e(t) = e_1(t, z) + e_2(t, z); \quad (1)$$

$$e_1(t) = E_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 - k_1 z); \quad (2)$$

$$e_2(t) = E_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2 - k_2 z), \quad (3)$$

где $E_1, E_2, \omega_1 = 2\pi f_1, \omega_2 = 2\pi f_2$ – амплитуды и частоты двух ЭМВ соответственно;

φ_1, φ_2 – начальные фазы;

k_1, k_2 – волновые числа первой и второй ЭМВ;

z – направление распространения радиоволн.

Следует отметить принципиальное отличие двухволновой ЭМВ от двухчастотного сигнала. Формирование сигнала вида (1) осуществляется двумя независимыми источниками колебаний, которые генерируют две ЭМВ, распространяющиеся в среде со своими значениями волновых чисел k_1 (2) и k_2 (3).

Режим двухчастотного взаимодействия характеризуется источником ЭМВ, генерирующим сигнал в виде суммы двух колебаний [8]. Таким образом, отличие данных режимов заключается в том, что в режиме двухволновой ЭМВ осуществляется пространственное взаимодействие анизотропной среды и зондирующего сигнала.

Был проведен анализ изменения электродинамических параметров среды при применении двух принципиально отличающихся режимов взаимодействия. Тензор диэлектрической проницаемости среды над УВЗ представлен в [19]. Рассмотрено взаимодействие ЭМВ с залежью для случая воздействия двухволнового сигнала в режиме мощного НЧ-колебания с коэффициентами отношения амплитуд и частот

$$\begin{cases} k_E \ll 1; \\ k_\omega \ll 1. \end{cases} \quad (4)$$

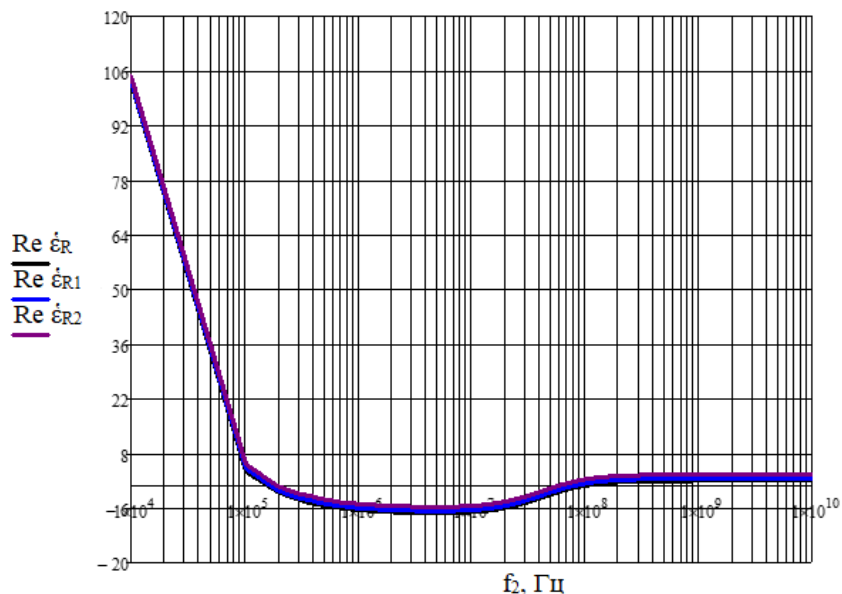
Сопrotивление поверхностного слоя над углеводородами представляет собой симметричную матрицу. В результате анализ сводится к определению двух компонент, которые рассчитываются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} &= -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L}} (\sqrt{\dot{\epsilon}_R} - \sqrt{\dot{\epsilon}_L}); \\ \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} &= \frac{1}{2\sqrt{\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L}} (\sqrt{\dot{\epsilon}_R} + \sqrt{\dot{\epsilon}_L}). \end{aligned} \quad (5)$$

Для расчетов использованы компоненты тензора $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$; комбинационные составляющие тензора для правой и левой поляризации ЭМВ $\dot{\epsilon}_R, \dot{\epsilon}_L$; гиротропная частота ω_{Ti} ; плазменная частота ω_{Pi} , частота столкновительных процессов ν_i ; относительная диэлектрическая проницаемость анизотропной среды $\dot{\epsilon}_r$; проводимость поверхностного слоя σ_r ; диэлектрическая постоянная ϵ_0 [8].

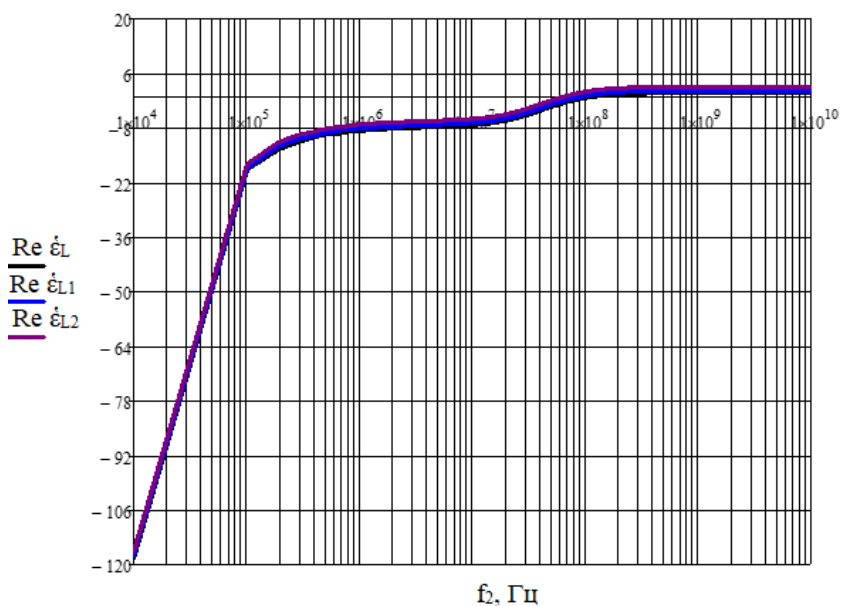
Результаты исследований. Теоретический анализ действительных частей суммарной и разностной компонент тензоров диэлектрической проницаемости поверхностного слоя над углеводородами выполнен для разности начальных фаз двух ЭМВ $\Delta\varphi = 0$ [19]. Данные зависимости показаны на рисунках 1, 2.

Как видно из рисунка 1, действительная составляющая $\text{Re} \dot{\epsilon}_R$ имеет две точки перехода через нуль на частотах $f_{2\Pi}$ и $f_{2\Pi}$, соответствующих электронному циклотронному и электронному плазменному резонансам.



$\text{Re}(\dot{\epsilon}_R(f_2))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$; $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R1}(f_2))$ – для $\epsilon_r = 15, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$;
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R2}(f_2))$ – для $\epsilon_r = 25, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$

Рисунок 1. – Зависимости действительной части суммарной компоненты тензора диэлектрической проницаемости поверхностного слоя над углеводородами от частоты f_2 ($N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}, N_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$)



$\text{Re}(\dot{\epsilon}_L(f_2))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$; $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{L1}(f_2))$ – для $\epsilon_r = 15, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$;
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{L2}(f_2))$ – для $\epsilon_r = 25, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$

Рисунок 2. – Зависимости действительной части разностной компоненты тензора диэлектрической проницаемости поверхностного слоя над углеводородами от частоты f_2 ($N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}, N_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$)

В работе [8] приведены результаты исследований для концентраций электронов и ионов $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}, N_i = 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Был проведен расчет частот электронно-циклотронного и электронно-плазменного резонансов, представленных в таблице (при концентрациях частиц $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и $N_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$).

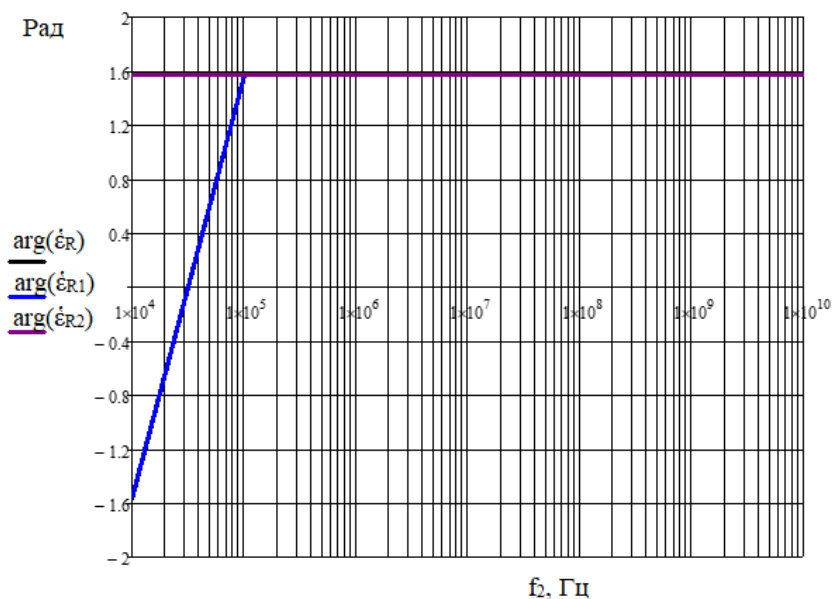
Таблица. – Расчетные значения частот f_2 бигармонического сигнала, при которых $\text{Re}(\dot{\epsilon}_R(f_2)) = 0$

k_ω	k_E	ϵ_r	$f_{2ц}$, Гц	$f_{2п}$, Гц
10^{-1}	10^{-1}	10	$15,1 \cdot 10^4$	$114 \cdot 10^6$
10^{-1}	10^{-1}	15	$16,1 \cdot 10^4$	$90 \cdot 10^6$
10^{-1}	10^{-1}	20	$17,5 \cdot 10^4$	$75 \cdot 10^6$
10^{-3}	10^{-1}	25	$18,5 \cdot 10^4$	$65 \cdot 10^6$
10^{-3}	10^{-1}	30	$20,0 \cdot 10^4$	$55 \cdot 10^6$

Установлено, что по сравнению с двухчастотным режимом происходит увеличение частот электронно-циклотронного и электронно-плазменного резонансов. Частоты электронно-циклотронного и электронно-плазменного резонансов находятся в диапазоне 150...200 кГц и 55...114 МГц соответственно.

Приведенные графики показывают, что anomальное поведение напряженности поля ЭМВ над УВЗ следует ожидать на частотах, соответствующих $f_{2ц}$ и $f_{2п}$. Отражение сигнала от поверхностного слоя над углеводородами будет наблюдаться на всех частотах, кроме частот резонансного взаимодействия. Путем изменения соотношения частот и амплитуд двух сигналов можно получить резонансные эффекты взаимодействия, причем в роли одного из сигналов может быть применена акустическая волна [8].

Фаза комбинационного элемента тензора диэлектрической проницаемости почвенно-грунтового слоя над углеводородами для правой поляризации (рисунок 3) изменяется только для $\epsilon_r = 15$ в диапазоне частот $f_2 = (10^4 \dots 10^5)$ Гц (для левой поляризации зависимости идентичны).

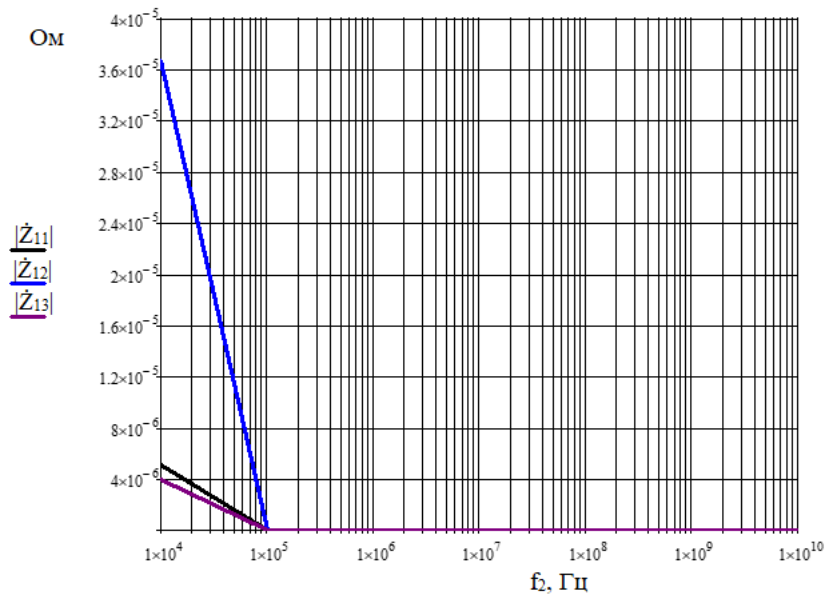


$\text{arg}(\dot{\epsilon}_R(f_2))$ – для $\epsilon_r = 10$, $k_\omega = 10^{-1}$, $k_E = 10^{-1}$; $\text{arg}(\dot{\epsilon}_{R1}(f_2))$ – для $\epsilon_r = 15$, $k_\omega = 10^{-1}$, $k_E = 10^{-1}$;
 $\text{arg}(\dot{\epsilon}_{R2}(f_2))$ – для $\epsilon_r = 25$, $k_\omega = 10^{-1}$, $k_E = 10^{-1}$

Рисунок 3. – Зависимости фазы суммарной компоненты тензора диэлектрической проницаемости поверхностного слоя над углеводородами от частоты f_2 ($N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$)

Результаты моделирования зависимости модуля и фазы компонент поверхностного импеданса поверхностного слоя над углеводородами \dot{Z}_{11} и \dot{Z}_{21} от частоты f_2 показаны на рисунках 4–7. Для модуля \dot{Z}_{11} происходит влияние данной частоты в диапазоне $f_2 = (10^4 \dots 10^5)$ Гц, причем для концентраций $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_i = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ зависимости модуля и фазы компонент поверхностного импеданса поверхностного слоя над углеводородами \dot{Z}_{11} имеют идентичный вид, за исключением численных значений. Фаза компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} изменяется в диапазоне частот $f_2 = (10^4 \dots 10^5)$ Гц для $\epsilon_r = 15$

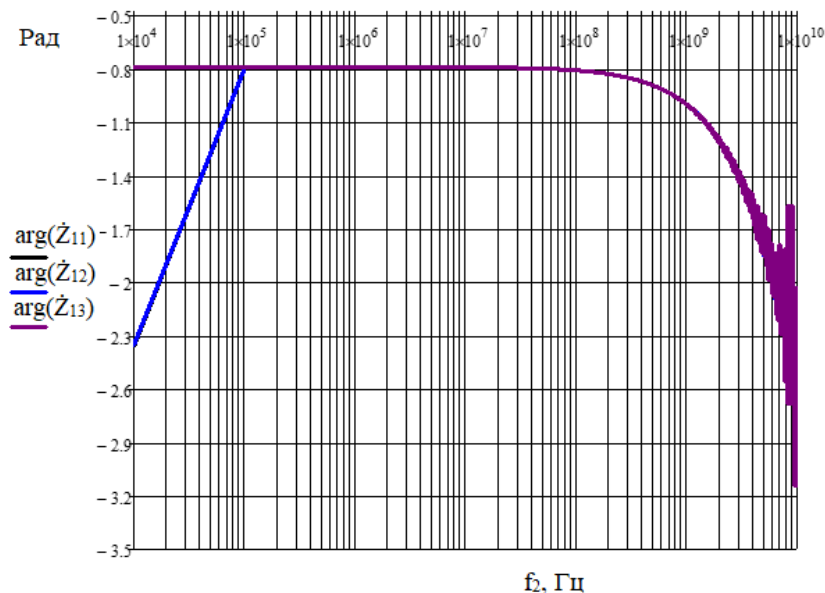
и в диапазоне частот $f_2 = (10^8 \dots 10^{10})$ Гц для всех значений диэлектрической проницаемости поверхностного слоя над углеводородами.



$$|\dot{Z}_{11}(f_2)| \text{ — для } \epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}; \quad |\dot{Z}_{12}(f_2)| \text{ — для } \epsilon_r = 15, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1};$$

$$|\dot{Z}_{13}(f_2)| \text{ — для } \epsilon_r = 25, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$$

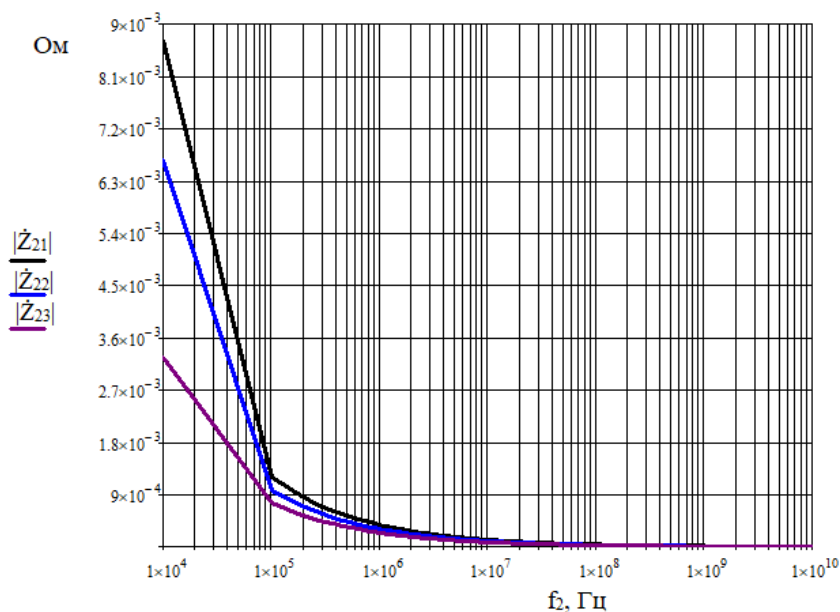
Рисунок 4. – Зависимости модуля компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} поверхностного слоя над углеводородами от частоты f_2 ($N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$)



$$\arg(\dot{Z}_{11}(f_2)) \text{ — для } \epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}; \quad \arg(\dot{Z}_{12}(f_2)) \text{ — для } \epsilon_r = 15, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1};$$

$$\arg(\dot{Z}_{13}(f_2)) \text{ — для } \epsilon_r = 25, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$$

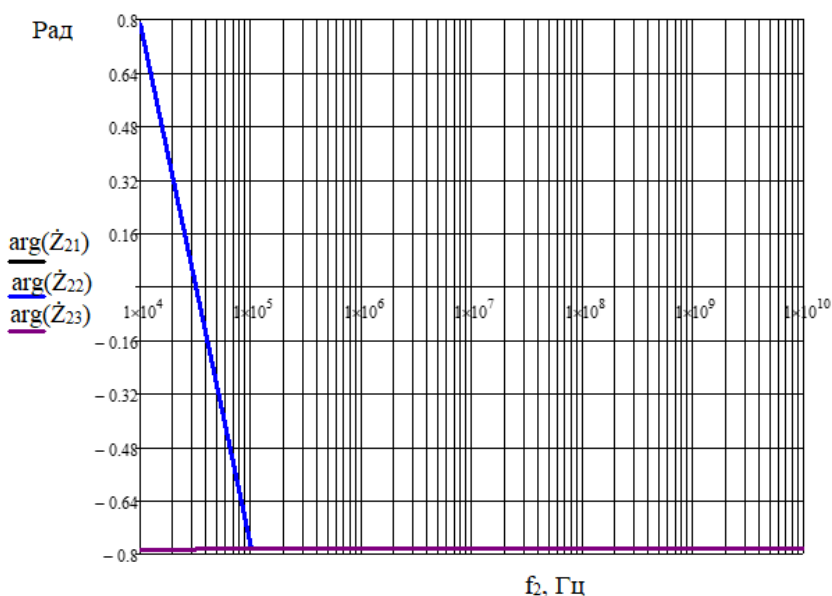
Рисунок 5. – Зависимости фазы компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} поверхностного слоя над углеводородами от частоты f_2 ($N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$)



$$|\dot{Z}_{21}(f_2)| \text{ – для } \varepsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}; \quad |\dot{Z}_{22}(f_2)| \text{ – для } \varepsilon_r = 15, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1};$$

$$|\dot{Z}_{23}(f_2)| \text{ – для } \varepsilon_r = 25, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$$

Рисунок 6. – Зависимости модуля компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} поверхностного слоя над углеводородами от частоты f_2 ($N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_i = 10^{16} \text{ м}^{-3}$)



$$\arg(\dot{Z}_{21}(f_2)) \text{ – для } \varepsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}; \quad \arg(\dot{Z}_{22}(f_2)) \text{ – для } \varepsilon_r = 15, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1};$$

$$\arg(\dot{Z}_{23}(f_2)) \text{ – для } \varepsilon_r = 25, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$$

Рисунок 7. – Зависимости фазы компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} поверхностного слоя над углеводородами от частоты f_2 ($N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$)

Для модуля \dot{Z}_{21} происходит влияние частоты в диапазонах $f_2 = (10^4 \dots 10^5) \text{ Гц}$ с большей крутизной характеристики и $f_2 = (10^5 \dots 10^7) \text{ Гц}$ с меньшей крутизной характеристики, причем для концентраций

$N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$ зависимости модуля и фазы компонент поверхностного импеданса поверхностного слоя над углеводородами \dot{Z}_{21} имеют идентичный вид, за исключением численных значений. Фаза компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} изменяется в диапазоне частот $f_2 = (10^4 \dots 10^5) \text{ Гц}$ для $\varepsilon_r = 15$.

Следует отметить, что, в отличие от двухчастотного режима, в двухволновом режиме отсутствуют резонансы модулей поверхностного импеданса поверхностного слоя над углеводородами \dot{Z}_{11} и \dot{Z}_{21} .

Таким образом, для режима низкочастотного взаимодействия двухволновых сигналов с поверхностным слоем над углеводородами установлены закономерности изменения компонент поверхностного импеданса данных слоев \dot{Z}_{11} и \dot{Z}_{21} от характеристик зондирующих сигналов f_2 , k_E , k_ω , определяющих параметры двух воздействующих на анизотропную среду сигналов. Данные параметры могут варьироваться в широких пределах, вызывая различный электродинамический отклик слоя над углеводородами, причем, в отличие от двухчастотного взаимодействия, электродинамические характеристики среды над углеводородами для данных компонент имеют принципиальные отличия.

Зондирование анизотропных сред двухволновыми ЭМВ в режимах с правой и левой круговыми поляризациями позволяет повысить производительность методов электроразведки и увеличить информативность за счет получения дополнительных данных по исследуемому геологическому профилю местности. Определение диэлектрической проницаемости, проводимости, глубины и поверхностного импеданса слоя над углеводородами возможно за счет конкретных значений расстояний между передатчиком и приемником (что исключает зависимость этих параметров от длины трассы) и конкретизации электродинамических моделей УВЗ. При этом учитываются влажность, климатические и сезонные условия, а также физические свойства среды: пористость, проницаемость, цементирующие вещества и механические характеристики пород скелета, количество и минерализация пластовой воды в порах и др.

Заключение. На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- действительные составляющие компонент тензора диэлектрической проницаемости поверхностного слоя над углеводородами для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями в режиме двухволнового взаимодействия имеют идентичный вид, за исключением численных значений;
- по сравнению с двухчастотным режимом происходит увеличение частот электронно-циклотронного и электронно-плазменного резонансов для концентраций $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$;
- для двухволнового режима отсутствуют резонансы модулей поверхностного импеданса поверхностного слоя над углеводородами \dot{Z}_{11} и \dot{Z}_{21} ;
- измерение фазы компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} в диапазоне частот $f_2 = 10^8 \dots 10^{10} \text{ Гц}$ может быть использовано для поиска углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gabrielsen P. T., Shantsev D. V., Fanavoll S. 3D CSEM for hydrocarbon exploration in the Barents Sea // EAGE 5th Saint Petersburg conference & exhibition. – 2012. – P. 1–5.
2. Интерпретация данных зондирования методом становления поля в ближней зоне с учетом индукционно-вызванной поляризации при площадных нефтегазопроисловых исследованиях на юге Сибирской платформы / С. В. Компаниец, Н. О. Кожевников, Е. В. Мурзина, В. С. Емельянов // Науки о Земле и недропользование. – 2019. – Т. 42, № 2. – С. 151–164. – DOI: [10.21285/2541-9455-2019-42-2-151-164](https://doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-151-164).
3. Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method / Q. Sun, H. Tan, W. Wan, Q. Hu // Appl. Sci. – 2024. – Vol. 14, iss. 4. – Art. ID 1560. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app14041560>.
4. Electric-resonance sounding method and its application for, geological-geophysical and engineering-geological investigations / S. P. Levashov [et al.] // 66nd EAGE Conference and Technical Exhibition, Paris, France, 7–10 June 2003 (CD-ROM Abstracts volume).
5. Гололобов Д. В., Москвичев В. Н. Использование поляризационных свойств зондирующего сигнала при диагностике плазмоподобных сред // Радиотехника и электроника. – Мн.: Выш. школа. – 1994. – Вып. 22. – С. 66–74.
6. Weiss C. J. The fallacy of the “shallow-water problem” in marine CSEM exploration // Geophysics. – 2007. – Vol. 72, iss. 6. – P. A93–A97.
7. Хасанов Д. И. Введение в электроразведку: пособие для самостоятельного изучения для слушателей курсов повышения квалификации специальности «Геофизика». – Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. – 75 с.
8. Янушкевич В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей. – Новополюк: ПГУ, 2017. – 232 с.
9. Нордин В. В., Белкина Н. В. Система мониторинга калининградского подземного хранилища // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2014. – № 2 (28). – С. 34–37.

10. Interaction of two-frequency electromagnetic waves with anisotropic media over hydrocarbon accumulation / V. F. Yanushkevich, D. A. Dauhiala, A. L. Adamovich et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2373, iss. 5. – Art. ID 052016. – DOI: [10.1088/1742-6596/2373/5/052016](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/5/052016).
11. Characteristics of anisotropic media over hydrocarbons in the mode of frequency-modulated signals / V. F. Yanushkevich, D. A. Dauhiala, T. V. Maladzechkina // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2373, iss. 5. – Art. ID 052026. – DOI: [10.1088/1742-6596/2373/5/052026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/5/052026).
12. Завадский С. А. Оценка частотных характеристик коэффициентов отражения при изменении концентрации частиц // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2010»: материалы 6-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф. / г. Севастополь (19–24 апр. 2010 г.). – Севастополь: СевНТУ, 2011. – С. 65.
13. Commer, M. Massively parallel electrical-conductivity imaging of hydrocarbons using the IBM Blue Gene/L supercomputer IBM / M. Commer, G. A. Newman, J. J. Carazzone et al. // Journal of Research and Development. – 2008. – Vol. 52, iss. 1. – P. 93–103. – DOI: [10.1147/rd.521.0093](https://doi.org/10.1147/rd.521.0093).
14. Boerner D. E. Controlled source electromagnetic deep sounding: theory, results and correlation with natural source results: Invited Review Paper for the 10th Workshop on EM Induction Ensenada Mexico // Surveys in Geophysics. – 1991. – Vol. 13. – P. 435–488.
15. Никитин А. А., Хмелевской В. К. Комплексирование геофизических методов: учебник для вузов. – Тверь: ГЕРС, 2004. – 294 с.
16. Гололобов Д. В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. – Мн.: Бестпринт, 2009. – 185 с.
17. Взаимодействие ЧМ-сигналов с анизотропной средой / Д. В. Гололобов [и др.] // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: сб. материалов II Междунар. науч.-техн. конф. / г. Новополоцк (15–17 мая 2002 г.). – Новополоцк: ПГУ, 2002. – С. 300–303.
18. 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.
19. Янушкевич В. Ф., Кременя К. И. Анализ двухволнового взаимодействия электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами // Мн.: Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2015. – № 2. – С. 111–115.

Поступила 30.01.2026

REGULARITIES OF TWO-WAVE INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES WITH THE MEDIUM ABOVE HYDROCARBONS

V. YANUSHKEVICH, I. RUSSETSKY, V. RASKIN, D. SIVATSKY
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

K. BABAMURATOV
(*Termez Institute of Engineering and Technology, Uzbekistan*)

An analysis of the interaction of electromagnetic waves with the surface layer above hydrocarbons was conducted using a two-wave interaction with a predominantly low-frequency component of the radiating signal. The real parts and phases of the sum and difference components of the permittivity tensors of the surface layer above hydrocarbons were investigated. The dependences of the moduli and phases of the surface impedance of the medium above hydrocarbons on the frequency of the high-frequency component of the radiating signal were determined. The frequencies of the electron cyclotron and electron-plasma resonances were calculated, which allow for increased accuracy in oil and gas field exploration by expanding the testing modes. It was found that for the two-wave interaction mode, there are no resonances in the moduli of the surface impedance of the surface layer above hydrocarbons compared to the two-frequency interaction mode. The obtained results of modeling the characteristics of the surface layer above hydrocarbons can be recommended for use in radiotechnical systems for geological exploration of hydrocarbon deposits.

Keywords: hydrocarbon deposit, surface layer, two-wave signal, electromagnetic waves.