

УДК 621.371: 550.837.6

DOI 10.52928/2070-1624-2025-45-2-65-71

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЕДАНСА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ
В РЕЖИМЕ ДВУХЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ**

канд. техн. наук, доц. В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц. О. В. ТАНАНА,
С. П. АЛИЕВА, Е. С. БУРДИК
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

канд. техн. наук, доц. Чжишуй ЛЮ
(Чанъяньский университет, Китай)

Проведено моделирование импеданса поверхностного слоя над углеводородами в режиме двухчастотного воздействия с преобладанием низкочастотной составляющей зондирующего сигнала. Исследованы компоненты сопротивления поверхностного слоя над углеводородами, которые образуют симметричную матрицу. Определены зависимости модулей поверхностного слоя над углеводородами от концентраций электронов, ионов и частоты высокочастотной составляющей зондирующего сигнала. Проведено моделирование частотных зависимостей модулей импеданса исследуемых сред над залежами и влияния диэлектрической проницаемости слоя. Установлены резонансные частоты для составляющих сопротивления поверхностного слоя над углеводородами, которые могут служить критерием для идентификации месторождений нефти и газа. Полученные результаты по определению импеданса поверхностного слоя можно рекомендовать для использования в системах георазведки при обнаружении месторождений и скоплений углеводородов.

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

Введение. Актуальность применения методов поиска и разведки месторождений нефти и газа обусловлена стратегической задачей обеспечения энергетических комплексов современных государств ключевыми видами сырья. [1]. Все это требует рационального подхода к организации комплекса поисково-разведочных работ по обнаружению углеводородных залежей (УВЗ) [2]. Проведение испытаний методами электроразведки дает возможность оценить ресурсы углеводородов по электромагнитным данным [3]. Технология мониторинга CSAMT в сочетании с алгоритмом инверсии трехмерных измерений в разнообразных условиях [4]. Поверхностные электромагнитные волны находят широкое применение для решения различных практических задач [5].

Получили распространение технологии и методики, основанные на использовании геофизических методов исследования характеристик земной коры [6]. Уровень идентификации по обнаружению УВЗ можно повысить за счет регистрации собственного излучения залежей [7]. Методы с использованием двухчастотных, модулированных и импульсных сигналов позволяют расширить возможности тестирования поверхностного слоя над углеводородами [8]. На практике используются различные режимы зондирования сред: например, метод вертикальных токов [9] и метод электрорезонансного зондирования, применяемый в геолого-геофизических и инженерно-геологических исследованиях [10].

Сигнатура тонкого, изолированного резистивного горизонта вычисляется с использованием квазианалитического решения для одномерной Земли в ответ на возбуждение горизонтальной электрической дипольной антенной [11]. Широко используются различные виды электроразведки углеводородов [12]. Методы вызванной поляризации позволяют исследовать вторичные электромагнитные волны (ЭМВ) в земных средах под воздействием источника излучения¹. В отличие от методов с естественным источником, метод искусственного источника ЭМВ может быть разработан для оптимизации разрешения и минимизации взаимодействия с локальной структурой [13]. Режимы зондирования поверхностного слоя над УВЗ с использованием двухчастотных сигналов применяются в связи с их способностью повышать точность методов поиска [14].

Методика исследований. Целью данной работы является установление закономерностей поведения поверхностного слоя над УВЗ в режиме воздействия на него низкочастотного (НЧ) сигнала вида

$$\vec{e}(t) = \vec{e}_1(t) + \vec{e}_2(t) = E_1 \cos \omega_1 t + E_2 \cos \omega_2 t, \quad (1)$$

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

¹ Илаев М. Г. Метод вызванной поляризации [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cnsnb.ru/akdil/0042/base/RM/004621.shtml> (дата обращения: 09.06.2015).

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

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

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_{Γ} ; плазменная частота ω_{Π} ; столкновительных процессов ν_i ; относительная диэлектрическая проницаемость анизотропной среды (АС) ϵ_r ; проводимость поверхностного слоя σ_r ; диэлектрическая постоянная ϵ_0 ; коэффициенты отношения амплитуд и частот k_E и k_ω [8].

Методика исследований заключается в определении составляющих сопротивления поверхностного слоя над углеводородами (2) в зависимости от концентрации частиц N , фигурирующей в формуле для плазменной частоты ω_{Π} [8], и частоты f_2 .

Результаты исследований. Проведенный анализ моделей УВЗ (модели Пирсона, Дмитриева, Москвичева, Бабкина) показал, что для исследования углеводородов представляет интерес изучение физики процессов в поверхностном слое с учетом столкновительных явлений разноименных частиц [8]. В данной области определяется величина скорости миграционных эффектов заряженных частиц с учетом влияния концентрации химических элементов, составляющих структуру участков вертикального разреза профиля над залежью. Результаты теоретических расчетов коррелируются с полученными данными полевых испытаний. Для каждого конкретного практического случая применения электроразведки уточняются свои геологические особенности, корректирующие параметры и аппаратура.

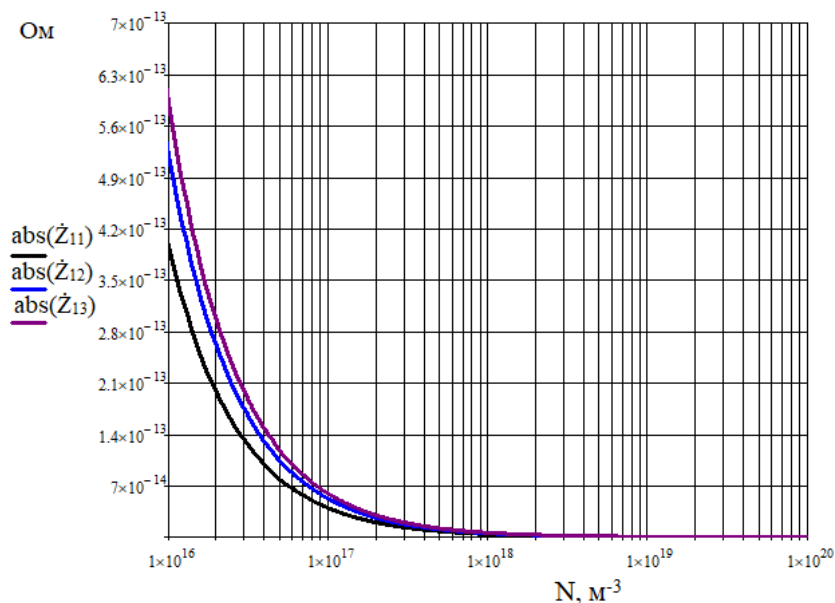
Зависимости модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами $|\dot{Z}_{11}|$ для концентраций электронов и ионов $N_e = N_{\text{и}} = (10^{16} - 10^{20}) \text{ м}^{-3}$ и высокочастотных составляющих $f_2 = (1 \cdot 10^8, 3 \cdot 10^8, 5 \cdot 10^8) \text{ Гц}$ приведены на рисунке 1. При расчетах использовались следующие значения: диэлектрическая проницаемость поверхностного слоя $\epsilon_r = 10$, электрическая проводимость $\sigma_r = 10^{-3} \text{ См/м}$, частота столкновения частиц $\nu = 2\pi \cdot 10^9 \text{ рад/с}$, коэффициенты отношения амплитуд и частот $k_E = 10^{-1}$, $k_\omega = 10^{-6}$. Происходит уменьшение модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами с ростом концентраций электронов и ионов. Особенно влияние концентрации частиц наблюдается на отрезке $N_e = N_{\text{и}} = (10^{16} - 10^{17}) \text{ м}^{-3}$. В диапазоне $N_e = N_{\text{и}} = (10^{17} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$ происходит изменение данной характеристики с меньшей крутизной. На отрезке $N_e = N_{\text{и}} = (10^{18} - 10^{20}) \text{ м}^{-3}$ влияние концентрации частиц практически отсутствует.

При увеличении частоты бигармонического сигнала f_2 значение модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами $|\dot{Z}_{11}|$ возрастает. Возможность вариации частоты электромагнитного излучения радиотехнической системы позволяет с помощью стационарного передатчика двухчастотной ЭМВ вертикальной поляризации определять сопротивление поверхностного слоя области предполагаемой залежи. Возможно построение приемника отраженного излучения по двухканальной схеме. По уровню принимаемого отраженного излучения осуществляется измерение величины модуля сопротивления поверхностного слоя на заданных частотах при расположении антенных излучателей вдоль исследуемого профиля земной поверхности в точках измерения. Для систем поиска следует рекомендовать выбор точек проведения измерений: обе точки определения модуля сопротивления поверхностного слоя находятся вне зоны УВЗ, одна точка определения модуля находится над зоной УВЗ, вторая точка определения модуля – вне зоны УВЗ, обе точки определения модуля находятся над зоной УВЗ. Таким образом, учитывая вариацию концентраций частиц в исследуемой частотной области зондирующих сигналов, возможно расширить режимы тестирования исследуемого профиля земной поверхности и улучшить эффективность проведения поисковых работ.

Зависимости модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами $|\dot{Z}_{11}|$ для концентраций электронов и ионов $N_e = N_{\text{и}} = (10^{16} - 10^{20}) \text{ м}^{-3}$ и высокочастотных составляющих $f_2 = (2 \cdot 10^9, 6 \cdot 10^9, 10 \cdot 10^9) \text{ Гц}$ приведены на рисунке 2. Проявляются те же закономерности поведения модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами, что и для приведенного выше диапазона частот, за исключением численных значений. Для высокочастотных составляющих $f_2 = (6 \cdot 10^9, 10 \cdot 10^9) \text{ Гц}$ зависимости модуля сопротивления

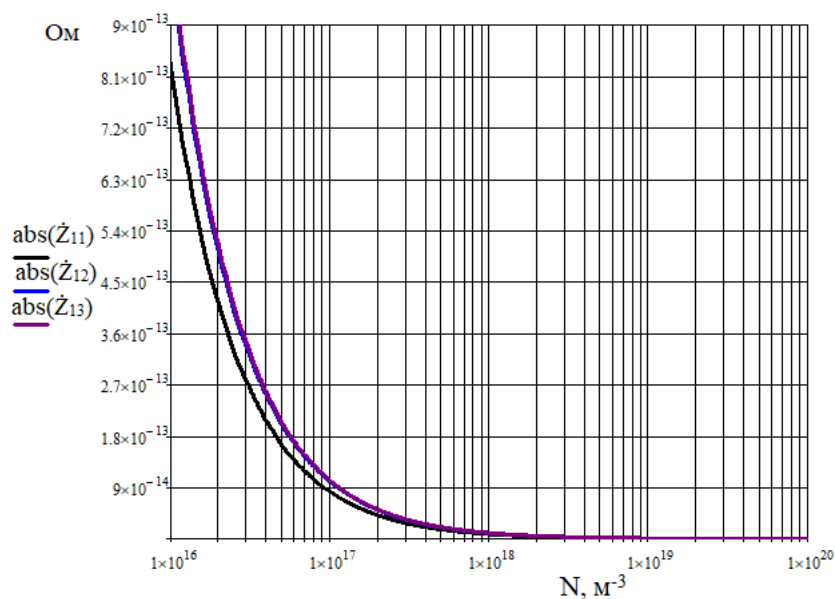
поверхностного слоя над углеводородами $|\dot{Z}_{11}|$ от концентраций электронов и ионов практически совпадают. Дополнительно возможно расширить режимы электромагнитного облучения исследуемого профиля земной поверхности при вариации значений коэффициентов отношения амплитуд и частот.

Зависимости модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами $|\dot{Z}_{11}|$ от частоты f_2 при значениях диэлектрической проницаемости слоя $\varepsilon_r = (5, 12, 25)$ представлены на рисунке 3. При расчетах применялись концентрации электронов и ионов $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_{ii} = 10^{18} \text{ м}^{-3}$ соответственно, коэффициенты отношения амплитуд и частот $k_E = 10^{-2}$, $k_\omega = 10^{-5}$.



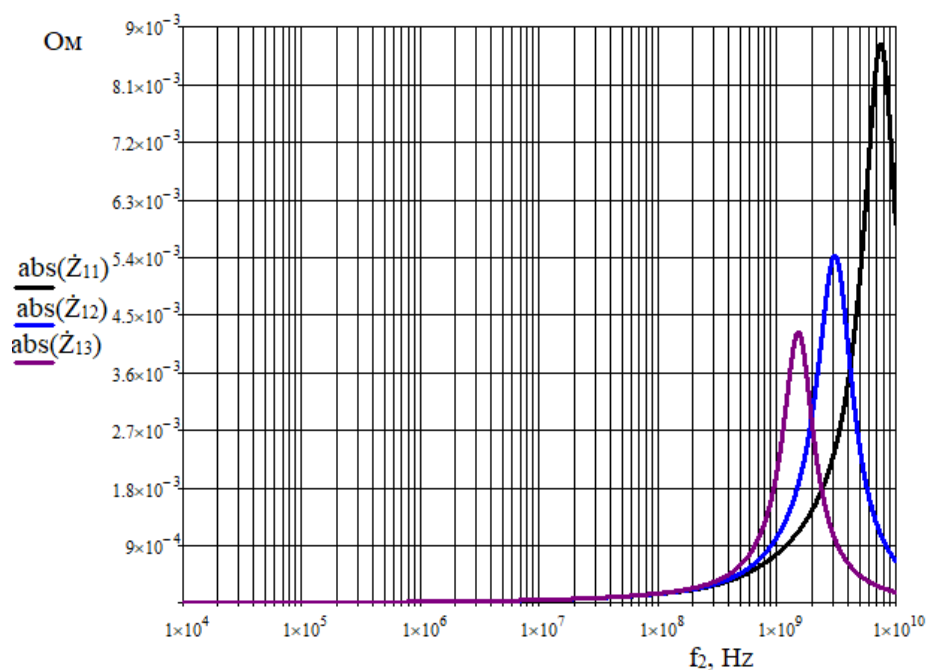
$|\dot{Z}_{11}|$ – для $f_2 = 1 \cdot 10^8 \text{ Гц}$; $|\dot{Z}_{12}|$ – для $f_2 = 3 \cdot 10^8 \text{ Гц}$; $|\dot{Z}_{13}|$ – для $f_2 = 5 \cdot 10^8 \text{ Гц}$

Рисунок 1. – Зависимости модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами от концентрации частиц



$|\dot{Z}_{11}|$ – для $f_2 = 2 \cdot 10^9 \text{ Гц}$; $|\dot{Z}_{12}|$ – для $f_2 = 6 \cdot 10^9 \text{ Гц}$; $|\dot{Z}_{13}|$ – для $f_2 = 10 \cdot 10^9 \text{ Гц}$

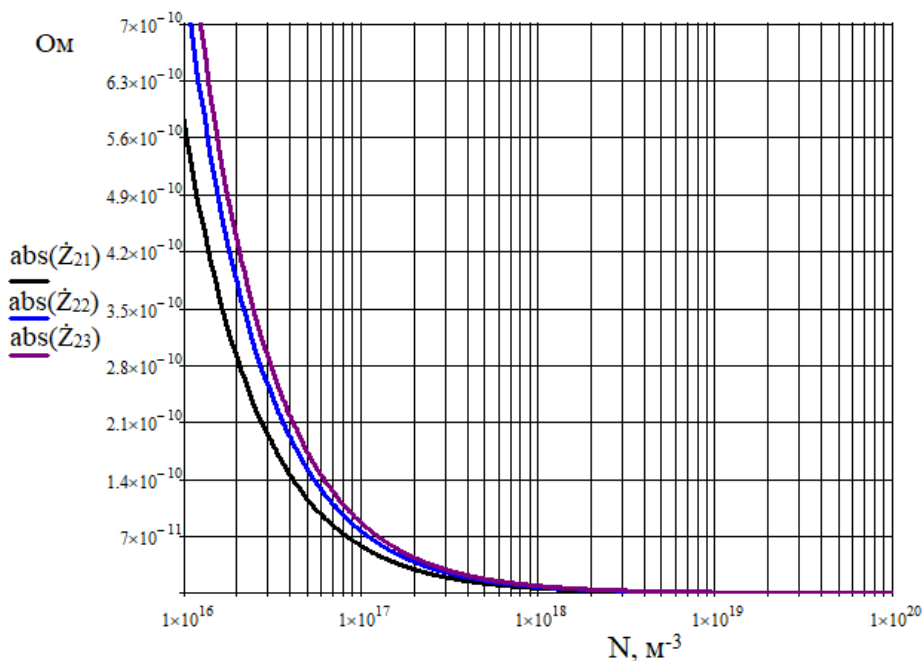
Рисунок 2. – Зависимости модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами от концентрации частиц



$|\dot{Z}_{11}|$ – для $\epsilon_r = 5$; $|\dot{Z}_{12}|$ – для $\epsilon_r = 12$; $|\dot{Z}_{13}|$ – для $\epsilon_r = 25$;

**Рисунок 3. – Зависимости модуля сопротивления
поверхностного слоя над углеводородами от частоты f_2**

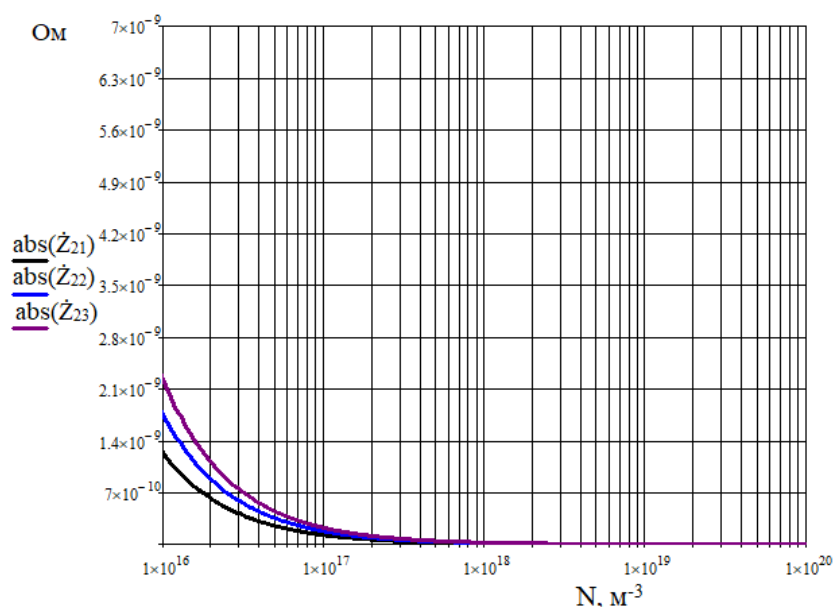
Зависимости модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами от концентрации частиц для частот $f_2 = (1 \cdot 10^8, 3 \cdot 10^8, 5 \cdot 10^8)$ Гц и $f_2 = (2 \cdot 10^9, 6 \cdot 10^9, 10 \cdot 10^9)$ Гц приведены на рисунках 4, 5 соответственно. На рисунке 6 показана зависимость модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами от частоты для диэлектрической проницаемости слоя $\epsilon_r = (5, 12, 25)$.



$|\dot{Z}_{21}|$ – для $f_2 = 1 \cdot 10^8$ Гц; $|\dot{Z}_{22}|$ – для $f_2 = 3 \cdot 10^8$ Гц; $|\dot{Z}_{23}|$ – для $f_2 = 5 \cdot 10^8$ Гц

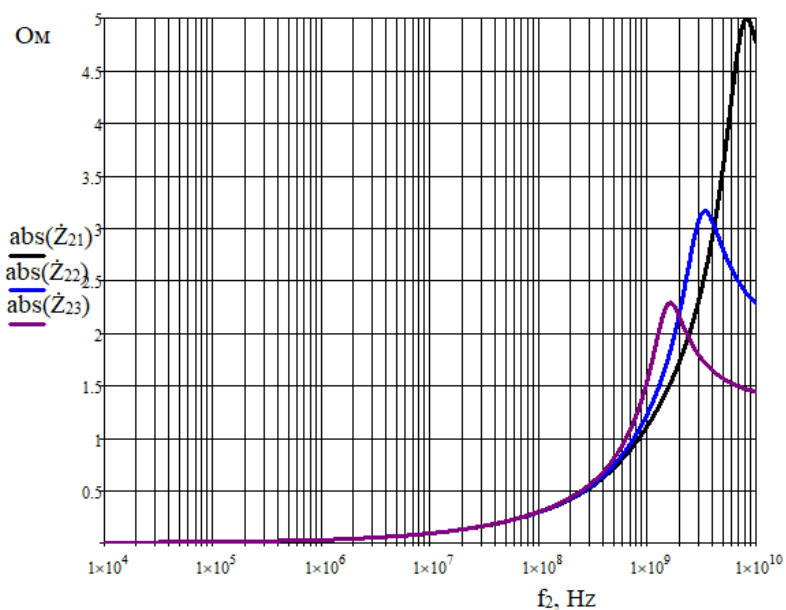
**Рисунок 4. – Зависимости модуля сопротивления
поверхностного слоя над углеводородами от концентрации частиц**

Расчет проводился для коэффициентов отношения амплитуд и частот $k_E = 10^{-1}$, $k_\omega = 10^{-6}$. Наблюдаются максимумы значений модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами на частотах 1...10 ГГц. С увеличением диэлектрической проницаемости слоя резонансная частота и значение данной компоненты уменьшаются. Следует отметить, что происходит уменьшение модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами с ростом концентраций электронов и ионов. На отрезке $N_e = N_i = (10^{16} - 10^{17}) \text{ м}^{-3}$ исследуемая характеристика изменяется с большим значением крутизны. В диапазоне $N_e = N_i = (10^{17} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$ происходит изменение данной характеристики с меньшей крутизной.



$|\dot{Z}_{21}|$ – для $f_2 = 2 \cdot 10^9$ Гц; $|\dot{Z}_{22}|$ – для $f_2 = 6 \cdot 10^9$ Гц; $|\dot{Z}_{23}|$ – для $f_2 = 10 \cdot 10^9$ Гц

Рисунок 5. – Зависимости модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами от концентрации частиц



$|\dot{Z}_{21}|$ – для $\epsilon_r = 5$; $|\dot{Z}_{22}|$ – для $\epsilon_r = 12$; $|\dot{Z}_{23}|$ – для $\epsilon_r = 25$;

Рисунок 6. – Зависимости модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами от частоты

На отрезке $N_e = N_n = (10^{18} - 10^{20}) \text{ м}^{-3}$ влияние концентрации частиц на значения модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами не проявляется.

Наблюдаются максимумы значений модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами $|\dot{Z}_{21}|$ на частотах 1...10 ГГц. Явление резонанса выражено не так контрастно, как для предыдущего случая. С увеличением диэлектрической проницаемости слоя резонансная частота и значение данной компоненты уменьшаются.

Использование измерений модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами для обнаружения анизотропных сред находит применение в геофизике. Сопротивление поверхностного слоя отличается от сопротивления однородного слоя и может применяться в качестве критерия для оценки различий в отражательных характеристиках данных слоев, а также для дифференциации подстилающих поверхностей геопрофиля на основании измерения характеристик антенн.

Использование значения сопротивления поверхностного слоя широко применяется при решении задач распространения радиоволн над УВЗ, дифракции и определения структуры ЭМВ вблизи границы раздела двух сред [15; 16]. По величине сопротивления можно оценить характеристики используемых в системах георазведки антенных излучателей, которые имеют фиксированное положение в точках измерения импеданса относительно границы раздела сред при изменении свойств поверхностного слоя. Это позволяет проводить качественную оценку свойств вмещающих пород над углеводородами. Количественную оценку свойств пород над УВЗ можно осуществить, выполнив дополнительные точные расчеты изменений электродинамических характеристик поверхностного слоя [17].

Полученные значения резонансных частот можно рекомендовать для использования в системах георазведки при обнаружении месторождений и скоплений углеводородов. Значения сопротивлений поверхностного слоя $|\dot{Z}_{11}|$ и $|\dot{Z}_{21}|$ могут быть применены для построения двухканальных устройств измерения импеданса исследуемых сред. Возможно изменение НЧ составляющей сигнала за счет изменения коэффициентов отношения амплитуд и частот.

Резонансный характер поведения частотной зависимости рассчитанных компонентов $|\dot{Z}_{11}|$ и $|\dot{Z}_{21}|$ коррелирует с закономерностями проявления аномалий частотных характеристик коэффициентов отражения от среды над УВЗ, фазовые изменения компонентов матрицы сопротивления поверхностного слоя свидетельствуют об увеличении мнимой части импеданса на частотах, соответствующих максимальным значениям модулей $|\dot{Z}_{11}|$ и $|\dot{Z}_{21}|$. Таким образом, на указанных частотах происходит рост значений модуля и фазы за счет влияния мнимых составляющих в компонентах матрицы сопротивления поверхностного слоя. Это говорит о том, что на данных частотах поверхность слоя над углеводородами из реактансной среды переходит в поглощающую.

Заключение. Проведенный теоретический анализ взаимодействия ЭМВ с поверхностным слоем над углеводородами в режиме НЧ-сигналов показал следующее:

- рост концентраций электронов и ионов приводит к уменьшению модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами, что особенно проявляется на отрезке $N_e = N_n = (10^{16} - 10^{17}) \text{ м}^{-3}$, причем крутизна характеристики на этом участке максимальная;
- при увеличении частоты бигармонического сигнала f_2 значение модулей поверхностного слоя над углеводородами $|\dot{Z}_{11}|$ и $|\dot{Z}_{21}|$ возрастает;
- сопротивления поверхностного слоя над углеводородами $|\dot{Z}_{11}|$ и $|\dot{Z}_{21}|$ имеют максимумы значений модуля на частотах 1...10 ГГц, данные резонансные явления могут служить критерием для идентификации углеводородов;
- для повышения уровня точности поиска и обнаружения УВЗ могут быть применены двухканальные системы георазведки, основанные на измерении сопротивлений поверхностного слоя $|\dot{Z}_{11}|$ и $|\dot{Z}_{21}|$, что позволяет расширить режимы тестирования исследуемых сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мухин В. М. Стадийность и основы методики поиска и разведки месторождений нефти и газа: учеб. пособие. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 2008. – 32 с.
2. Никонов Н. И. Рациональный комплекс поисково-разведочных работ на нефть и газ. – Ухта: УГТУ, 2006. – 312 с.
3. Поспеев А. В. Возможность оценки ресурсов углеводородов юга Сибирской платформы по электромагнитным данным // География и природные ресурсы. – 2016. – № 6. – С. 139–143.
4. Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method / Q. Sun, H. Tan, W. Wan et al. // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, iss. 14. – Art. ID 1560. – DOI: [10.3390/app14041560](https://doi.org/10.3390/app14041560).

5. Альтшуллер Е. Ю., Кац Л. И., Попов В. В. Поверхностные электромагнитные волны в технике СВЧ // Обзор. Серия 1. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1983. – С. 179–230.
6. Хмелевской В. К. Геофизические методы исследования земной коры: в 2 кн. – Дубна: Междунар. ун-т природы, общества и человека «Дубна», 1999. – Кн. 2: Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика: учеб. пособие. – С. 94–128.
7. Хасанов Д. И. Введение в электроразведку: пособие для самостоятельного изучения для слушателей курсов повышения квалификации специальности «Геофизика». – Казань: Казанский гос. ун-т, 2009. – 75 с.
8. Янушкевич В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей. – Новополюцк, ПГУ, 2017. – 232 с.
9. Могилатов В. С., Балашов Б. П. Зондирования вертикальными токами. – Новосибирск: СО РАН, филиал «Гео», 2005. – 240 с.
10. Electric-resonance sounding method and its application for, geological-geophysical and engineering-geological investigations / S. P. Levashov [et al.] // 66th EAGE Conference and Technical Exhibition, Paris, France, 7–10 June 2003 (CD-ROM Abstracts volume).
11. Weiss C. J. The fallacy of the “shallow-water problem” in marine CSEM exploration // Geophysics. – 2007. – Vol. 72, iss. 6. – P. A93–A97.
12. Хмелевской В. К. Электроразведка. – М.: МГУ, 1984. – 422 с.
13. 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.
14. 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: Conf. Ser. – 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).
15. Гололобов Д. В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. – Минск: Бестпринт, 2009. – 185 с.
16. Хаскинд М. Д. Распространение электромагнитных волн над гиротропной средой // Радиотехника и электроника. – М.: Наука, 1961. – Т. 6, № 6. – С. 886–894.
17. Moskvichew V. N. Interaction 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.

Поступила 03.09.2025

DETERMINATION OF THE IMPEDANCE OF THE SURFACE LAYER ABOVE HYDROCARBONS IN THE DUAL-FREQUENCY SIGNAL MODE

V. YANUSHKEVICH, O. TANANA, S. ALIEVA, E. BURDIK
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

Zhishui LIU
(Chang'an University, China)

The impedance of the surface layer above hydrocarbons was simulated in the dual-frequency mode with prevalence of the low-frequency component of the probing signal. The resistance components of the surface layer above hydrocarbons, which form a symmetric matrix, were investigated. The dependences of the moduli of the surface layer above hydrocarbons on the concentrations of electrons, ions and frequency of the high-frequency component of the probing signal were determined. The frequency dependences of the impedance moduli of the studied media above the deposits and the influence of the layer permittivity were simulated. Resonance frequencies for the resistance components of the surface layer above hydrocarbons were established, which can serve as a criterion for identifying oil and gas fields. The obtained results for determining the impedance of the surface layer can be recommended for use in geoexploration systems for detecting hydrocarbon deposits and accumulations.

Keywords: hydrocarbon deposit, surface layer, dual-frequency signal, electromagnetic waves.