

УДК 621.371: 550.837.6

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ
В РЕЖИМЕ МОЩНОГО НИЗКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА****канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, И.С. РУСЕЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)**

Приводится анализ взаимодействия электромагнитных волн в режиме двухчастотных сигналов со средой над углеводородными залежами. Исследовано поведение компонентов поверхностного импеданса диэлектрической проницаемости анизотропной среды над залежью в режиме двухчастотных сигналов на основе квазигидродинамического подхода. Проведен анализ составляющих компонентов поверхностного импеданса среды над углеводородами для электромагнитных волн с правой и левой круговыми поляризациями в зависимости от диэлектрической проницаемости и концентрации частиц среды. Показано, что результаты исследований могут быть использованы для идентификации среды над залежами по характеру и величине фазовых компонент поверхностного импеданса анизотропного слоя.

Ключевые слова: углеводородная залежь, электромагнитные методы разведки, двухчастотный сигнал, диэлектрическая проницаемость.

Введение. В современных экономических условиях наметилась тенденция активного применения электромагнитных методов (ЭММ) в поисковой геофизике. Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач заключается в усовершенствовании существующих ЭММ георазведки и разработке новых методов поиска, идентификации месторождений нефти и газа (углеводородов), поскольку важнейшей особенностью данных методов является высокая чувствительность и возможность их использования в сложной геологической обстановке. Эффективность их применения обусловлена достаточной достоверностью, экологической чистотой по сравнению с методами грави-, сейсмо- и магниторазведки [1–3].

Требования по информативности и достоверности методов поиска и выделения месторождений и скоплений углеводородных залежей (УВЗ) ведут к дальнейшему совершенствованию ЭММ, целью которого является повышение производительности геологоразведочных работ, повышение точности определения границ залежей полезных ископаемых. Проводятся активные исследовательские работы по разработке ЭММ, по результатам которых создается аппаратура, используемая на практике [4].

Электромагнитные методы обладают существенными преимуществами перед методами на постоянном токе и позволяют определять не только контраст сопротивления пород, но и характеристики электромагнитных волн (ЭМВ): амплитуды различных составляющих, их фазовые компоненты, поляризацию и т.д. Набор этой информации о взаимодействии ЭМВ с объектом дает возможность получать значительно больше данных от исследуемых объектов, варьируя параметрами ЭМВ в различных диапазонах частот. Решение данных задач позволяет создать малогабаритную, маловесную, мобильную аппаратуру и повысить производительность геологических работ [1].

Методы поиска УВЗ базируются на анализе электрофизических и электрохимических процессов в средах над залежами углеводородов. Оптимизации частотных, поляризационных, амплитудных, модуляционных и других параметров зондирующих сигналов осуществляется с учетом специфических характеристик УВЗ. Аналогичные исследования для плазмоподобных сред позволяют использовать для изучения взаимодействия ЭМВ с УВЗ существующие решения при изучении плазмы на основе квазигидродинамического подхода [3].

Результаты исследований взаимодействия ЭМВ с УВЗ представлены во многих работах. В статье [5] обнаружение углеводородов осуществляется на основе измерения сопротивлений в исследуемых точках геопрофиля с помощью поверхностных электродов [5].

Применение двухчастотных сигналов [6] позволяет повысить точность определения границ УВЗ. Широко используются методы на основе исследования сложных ионных соединений полупроводникового характера, образующихся над углеводородами [7], и электрорезонансного зондирования [8]. В работе [9] проведен анализ поверхностного импеданса среды над УВЗ с учетом влияния всех нижерасположенных слоев на верхний слой.

Затухание радиоимпульсных сигналов в среде над залежью может быть положено в основу многих методов георазведки углеводородов [10]. По измерениям величины напряженности электрического поля отраженных радиоимпульсных сигналов на глубинах до 200 м возможно обнаружение месторождений нефти и газа на основе способа поиска УВЗ [11]. Диагностика сред над углеводородами по воздействию зондирующего сигнала на исследуемый геопрофиль состоит из нескольких этапов, которые основываются на результатах исследований диэлектрической проницаемости среды над УВЗ [12–15].

Целью настоящей работы является качественное повышение уровня достоверности поиска и идентификации УВЗ обоснованием выбора характеристик ЭМВ для определения поверхностного импеданса при использовании двухчастотных сигналов.

Взаимодействие среды над УВЗ с двухчастотными сигналами. Оптимальные режимы зондирования ЭМВ позволяют качественно повысить уровень достоверности поиска и идентификации углеводородов. Рассмотрим процесс взаимодействия ЭМВ с УВЗ в режиме двухчастотного 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 $E_1, E_2, \omega_1, \omega_2$ – соответственно амплитуды и частоты двух ЭМВ;

t – время.

Введем коэффициенты отношения амплитуд двух волн и их частот

$$k_E = \frac{E_2}{E_1}, \quad k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (2)$$

и рассмотрим взаимодействие сложного сигнала (1) с различными соотношениями параметров формируемой ЭМВ с анизотропной средой над УВЗ.

При воздействии на данную среду мощного низкочастотного (НЧ) сигнала составляющим ЭМВ соответствуют коэффициенты

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

Процесс взаимодействия ЭМВ, возбуждаемой с помощью переносного передатчика, перемещаемого вдоль исследуемого профиля, с локальным включением на трассе распространения радиоволн можно представить в виде наклонного падения плоской волны с вертикальной поляризацией. Среда распространения обладает параметрами $\varepsilon_0, \mu_0, \sigma_0$, волна падает на безграничную поверхность с анизотропным импедансом. Методика исследований заключается в определении поверхностного импеданса среды над УВЗ по формулам:

$$\begin{aligned} E_x &= -Z_0(Z_{11}H_x - Z_{12}H_y), \\ E_y &= -Z_0(Z_{21}H_x - Z_{22}H_y), \\ Z_{11} = Z_{22} &= -\frac{1}{j2\sqrt{\dot{\varepsilon}_R\dot{\varepsilon}_L}}(\sqrt{\dot{\varepsilon}_R} - \sqrt{\dot{\varepsilon}_L}), \\ Z_{12} = Z_{21} &= -\frac{1}{2\sqrt{\dot{\varepsilon}_R\dot{\varepsilon}_L}}(\sqrt{\dot{\varepsilon}_R} + \sqrt{\dot{\varepsilon}_L}), \end{aligned} \quad (4)$$

где $E_{x,y}, H_{x,y}$ – проекции падающей и отраженной волны на соответствующие координатные оси;

Z_0 – характеристическое сопротивление среды, окружающей анизотропную неоднородность;

$Z_{11}, Z_{12}, Z_{21}, Z_{22}$ – компоненты поверхностного импеданса среды.

$\dot{\varepsilon}_R$ и $\dot{\varepsilon}_L$ рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_R &= \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 = \text{Re} \varepsilon_R + j \text{Im} \varepsilon_R, \\ \dot{\varepsilon}_L &= \dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2 = \text{Re} \varepsilon_L + j \text{Im} \varepsilon_L. \end{aligned} \quad (5)$$

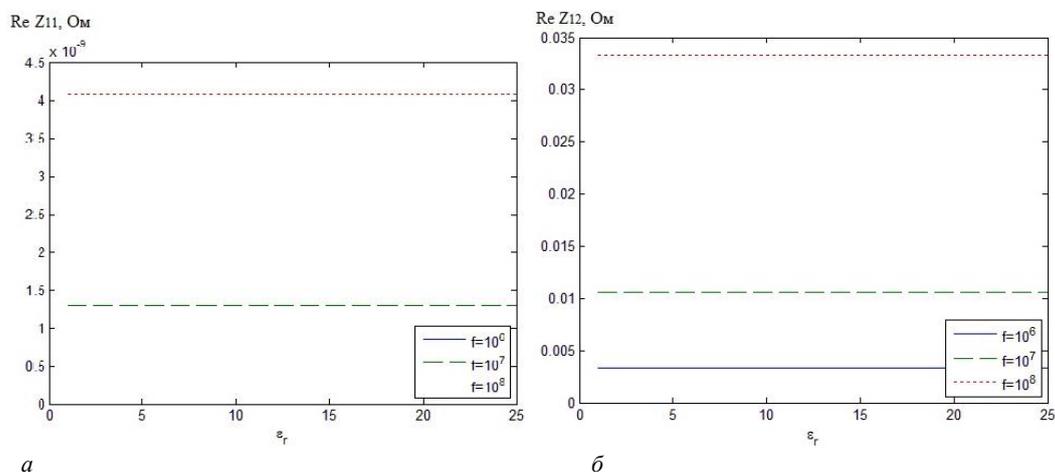
В выражениях (5) присутствуют элементы матрицы:

$$\dot{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_1 & -j\dot{\varepsilon}_2 & 0 \\ j\dot{\varepsilon}_2 & \dot{\varepsilon}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\varepsilon}_3 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Определение величин поверхностного импеданса для различных режимов облучения исследуемого профиля ЭМВ позволяет выделить границу УВЗ. Переход от изотропной среды к анизотропной сопровождается изменением свойств земной поверхности, что приводит к соответствующим изменениям компонентов поверхностного импеданса.

Результаты исследований. Проведен анализ выражений (4) для высокочастотной составляющей сигнала (1) в диапазоне 10^6 – 10^8 Гц при изменении концентрации частиц $N_e = N_i = (10^{13}$ – $10^{17}) \text{ м}^{-3}$ (рассматривается двухчастичная электронно-ионная среда). Исследовано поведение действительных частей обеих составляющих поверхностного импеданса (4) и их фазовых компонент. Составляющие $\text{Re} \dot{Z}_{11}$ и $\text{Re} \dot{Z}_{12}$ (рисунок 1) не изменяются при вариации диэлектрической проницаемости среды, потому что величина сопротивления весьма мала и вклад ε_r в эти величины не проявляется. Изменение частоты сигнала при вы-

полнении условий $k_E = 0,1$, $k_o = 0,1$ влияет на численное значение сопротивлений, хотя для вариации диэлектрической проницаемости это также не проявляется. Поэтому исследование вмещающих пород над УВЗ по приведенным характеристикам может осуществляться путем их численного сравнения с параметрами изотропной среды вне контура месторождения или скопления нефти и газа. При других значениях k_E и k_o получается набор значений сопротивлений, которые расширяют информативность ЭММ поиска нефти и газа.

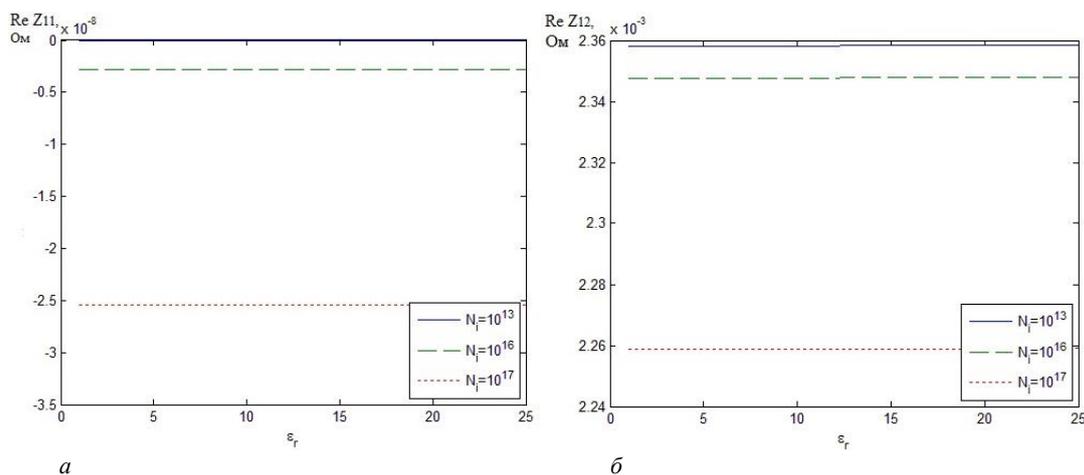


$$a - \operatorname{Re} \dot{Z}_{11} = \psi(\epsilon_r), \quad b - \operatorname{Re} \dot{Z}_{12} = \psi(\epsilon_r)$$

Рисунок 1. – Зависимости при изменении частоты сигнала

Тем не менее такие расчеты показывают основные закономерности поведения комбинационных составляющих поверхностного импеданса среды над УВЗ и могут быть рекомендованы для диагностики анизотропных сред.

Дополнительную информацию при таких исследованиях дает анализ фазовых характеристик компонент поверхностного импеданса. Влияние диэлектрической проницаемости на фазовые компоненты не существенно, поэтому их графики не приведены в данной статье. Диагностика анизотропных сред над УВЗ по этому признаку невозможна. Дополнительно было проанализировано влияние концентрации частиц среды над залежью (рисунок 2).

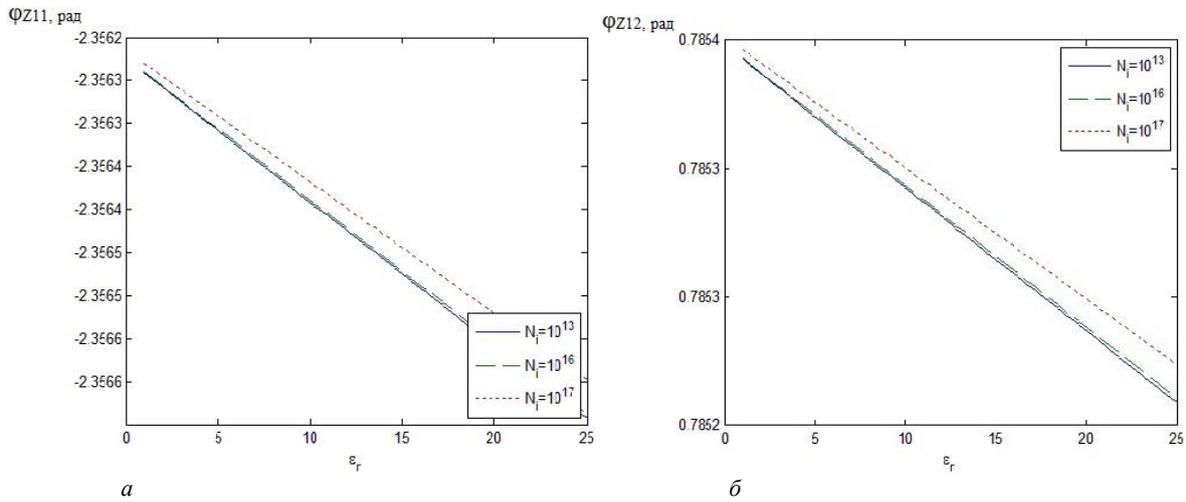


$$a - \operatorname{Re} \dot{Z}_{11} = \psi(\epsilon_r), \quad b - \operatorname{Re} \dot{Z}_{12} = \psi(\epsilon_r)$$

Рисунок 2. – Зависимости при изменении концентрации частиц

Установлено, что компонента $\operatorname{Re} \dot{Z}_{11}$ равномерна в исследуемом диапазоне диэлектрических проницаемостей, а с ростом концентрации частиц увеличивается по модулю, имея при этом емкостной характер (отрицательные значения). Компонента $\operatorname{Re} \dot{Z}_{12}$ имеет индуктивный характер и с ростом концентрации частиц уменьшается.

Проанализировано влияние концентрации частиц на поведение действительных частей обеих составляющих поверхностного импеданса (4) и их фазовых компонент (рисунок 3). Влияние диэлектрической проницаемости на действительные части компонент несущественно, поэтому их графики не приведены в данной статье.



$$a - \Phi_{Z11} = \psi(\epsilon_r), \quad б - \Phi_{Z12} = \psi(\epsilon_r)$$

Рисунок 3. – Зависимости при изменении концентрации частиц

Фазовые составляющие поверхностного импеданса с ростом диэлектрической проницаемости и концентрации уменьшаются. Таким образом, процедура диагностики среды осуществляется согласно методики решения обратной задачи [12], по которой определение диэлектрической проницаемости, удельной проводимости среды и глубины слоя основано на измерении компонент поверхностного импеданса и его фазовых компонент. С помощью перемещения передатчика и приемника вдоль исследуемого профиля получают дополнительную априорную информацию, задавая конкретными значениями расстояний. Двухканальная схема определения комбинационных составляющих $\text{Re} \dot{Z}_{11}$ и $\text{Re} \dot{Z}_{12}$ ЭМВ в режимах с правой и левой круговыми поляризациями позволяет повысить производительность методов электроразведки.

Количественные проявления этих процессов при определении поверхностного импеданса определяются физико-геологическими свойствами пород-коллекторов: гранулометрическим и минералогическим составом пород, структурно-текстурными особенностями скелета, характером пористости и проницаемости, видом цементирующего вещества и механическими свойствами скелета, количеством пластовой воды в порах и ее минерализацией и т.д. Влажность слоев предполагает учет климатических факторов и особенностей измерений сезонного характера, что предполагает конкретизацию электродинамических моделей УВЗ для повышения эффективности ЭММ георазведки.

Заключение. Проведенный анализ взаимодействия двухчастотных сигналов со средой над УВЗ показал, что в компонентах поверхностного импеданса появляются дополнительные составляющие, зависящие от параметров сигналов. Все это приводит к расширению функциональных зависимостей данных компонентов от режимов зондирования, что позволяет повысить точность разрабатываемых методов поиска УВЗ.

При этом следует отметить:

- составляющие поверхностного импеданса среды над УВЗ в режиме двухчастотных сигналов могут быть использованы для определения электродинамических характеристик среды над залежью в широком диапазоне частот зондируемых сигналов при изменении концентрации частиц сред;
- исследования могут быть применены для определения характеристик среды над залежью при распространении ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями, что повышает информативность методов оконтуривания и выделения УВЗ;
- фазовые характеристики поверхностного импеданса обладают большей информативностью, по ним может осуществляться диагностика сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
2. Гололобов, Д.В. Фазовые методы идентификации углеводородных залежей / Д.В. Гололобов, А.О. Рак, В.Ф. Янушкевич // Изв. бел. инженер. акад. – 2001. – №1 (20). – С. 16–18.

3. Москвичёв, В.Н. Исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью / В.Н. Москвичёв // Радиотехника и электроника. – Минск : Выш. шк., 1989. – Вып. 18. – С. 91–96.
4. Взаимодействие ЧМ-сигналов с анизотропной средой / Д.В. Гололобов [и др.]. // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы 2 междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 15–17 мая 2002 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк : ПГУ, 2002. – С. 300–303.
5. Asch T. and Morrison. Mapping and monitoring electrical resistivity with surface and surface electrode arrays / T. Asch, Morrison // Geophysics, 1989. – P. 235–244.
6. 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.
7. Huang R.H. Zow temperature (–80 C) termionic electron emission from alkalides and electrioles / R.H. Huang, I.Z. Dyl // Chem Phys Zett. – 1990. – Vol.166, № 2. – P. 133–136.
8. 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.
9. 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.
10. Взаимодействие электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов. / В.Ф. Янушкевич [и др.]. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2016. – № 12. – С. 45–50.
11. Иванова, К.И. Способ геоэлектроразведки углеводородной залежи с использованием радиоимпульсных сигналов. Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире / К.И. Иванова, В.Ф. Янушкевич // Материалы XV Международной НТК, СПб., 4 окт. 2016 г. – СПб., 2016. – Т. 1. – С. 107–111.
12. Копейкин, В.В. Обратная задача георадиолокации [Электронный ресурс] / В.В. Копейкин. – Режим доступа: <http://www.geo-radar.ru/articles/article4.php>. – Дата доступа: 15.01.2013.
13. Янушкевич, В.Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В.Ф. Янушкевич. – Новополоцк : ПГУ, 2017. – 232 с.
14. Электродинамические параметры подводных источников в поле поверхностной электромагнитной волны / Д.В. Гололобов [и др.]. // 35 Всерос. Межвузов. науч.-техн. конф. : тез. докл. – Владивосток, 1992. – Т. 1, ч. 1. – С. 59–62.
15. Янушкевич, В.Ф. Моделирование двухчастотного взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью / В.Ф. Янушкевич // Приборы. Справ. журн. – 1999. – № 10. – С. 27–29.

Поступила 05.09.2019

CHARACTERISTICS OF THE EARTH SURFACE OVER HYDROCARBONS IN THE POWERFUL LOW FREQUENCY SIGNAL MODE

V. YANUSHKEVICH, I. RUSETSKIY

The article provides an analysis of the interaction of electromagnetic waves in the regime of two-frequency signals with the medium above hydrocarbon deposits. The behavior of the components of the surface impedance of the dielectric constant of an anisotropic medium over the reservoir in the regime of two-frequency signals based on the quasi-hydrodynamic approach is investigated. The analysis of the constituent components of the surface impedance of the medium over hydrocarbons for electromagnetic waves with right and left circular polarizations, depending on the dielectric constant and the concentration of particles of the medium. It was shown that the research results can be used to identify the medium above the deposits by the nature and magnitude of the phase components of the surface impedance of the anisotropic layer.

Keywords: hydrocarbon reservoir, electromagnetic exploration methods, two-frequency signal, dielectric permeability.