

## ФИЗИКА

УДК 621.371: 550.837.6

### ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДВУХЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ

канд. техн. наук, доц. **В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, С.Н. АБРАМЕНКО**  
(Полоцкий государственный университет);

д-р физ.-мат. наук, проф. **В.А. БОГУШ**

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

*Приведен анализ распространения электромагнитных волн в режиме двухчастотного воздействия с использованием мощного низкочастотного сигнала в среде над углеводородными залежами. Исследовано поведение вещественных, мнимых составляющих комбинированных элементов и фазовых компонент тензора диэлектрической проницаемости анизотропной среды над залежью в режиме двухчастотных сигналов на основе используемого подхода при изучении плазмы. Проведен анализ составляющих компонент тензора диэлектрической проницаемости среды над углеводородами для электромагнитных волн с правой и левой круговыми поляризациями в зависимости от диэлектрической проницаемости и удельной проводимости среды. Установлено, что по амплитудным и фазовым характеристикам компонент тензора диэлектрической проницаемости среды над углеводородами при вариации частот зондирующего сигнала может осуществляться диагностика сред с целью повышения производительности геологоразведочных работ и точности определения границ залежей углеводородов.*

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

**Введение.** Актуальность исследуемых в работе задач определяется необходимостью разработки современных методов поиска углеводородных залежей (УВЗ) на основе активного внедрения электромагнитных методов (ЭММ) и аппаратуры для поиска углеводородов [1]. Тенденции развития ЭММ в поисковой геофизике определяются задачами создания эффективных методов с высоким уровнем достоверности обнаружения углеводородов. Возможности применения этих методов на практике обусловлены их высокой информативностью. Это связано с функциональными зависимостями компонент диэлектрической проницаемости среды над залежами углеводородов (нефть и газ), использование свойств которых дает дополнительные возможности для электроразведки [2–4]. В статье модернизация и разработка ЭММ основана на исследовании указанных выше зависимостей для двухчастотных сигналов.

Решение данных задач базируется на определении контрастного изменения сопротивления пород, характеристик электромагнитных волн (ЭМВ) – амплитудных значений различных составляющих, их фазовых компонент, поляризационных характеристик и т.д. [5]. Анализ электрофизических и электрохимических процессов в средах над залежами углеводородов при взаимодействии ЭМВ с исследуемым объектом дает возможность получать значительно больше результатов от исследуемых сред на основе вариации параметров зондирующих сигналов в различных диапазонах частот. На основе анализа электрофизических и электрохимических процессов над залежами углеводородов проводится электродинамическое моделирование среды. Аналогия исследуемой среды над залежью нефти и газа с плазмоподобным образованием позволяет использовать для изучения взаимодействия ЭМВ с УВЗ имеющиеся решения для плазмы и плазмоподобных сред. Оптимизации параметров зондирующих сигналов осуществляется с учетом специфических характеристик УВЗ и существующих решений при изучении плазмы на основе квазигидродинамического подхода [1].

Результаты применения методов поиска, идентификации месторождений УВЗ представлены во многих работах. В работе [6] исследовано применение радиоволнового метода поиска. Методы на основе электрорезонансного зондирования находят широкое применение для решения указанных выше задач [7]. Анализ компонент поверхностного импеданса среды над УВЗ с учетом влияния на верхний слой всех ниже расположенных слоев проведен в работе [8]. В основу многих методов георазведки углеводородов может быть положено исследование взаимодействия радиоимпульсных сигналов со средой над залежью [9]. Находят применение методы исследования свойств объектов, основанные на сравнении статистических свойств устанавливаемых электрических полей при морских измерениях [10]. Нефтегазовые резервуары выявляются на основе аномалии поля в водной среде [11]. Возможно обнаружение месторождений нефти и газа на основе способов поиска УВЗ с использованием амплитудно-модулированных сигналов [12; 13] по измерениям величины напряженности электрического поля и фазовых компонент отраженных от залежей сигналов. Различные варианты электромагнитных зондирований при поисках углеводородов

в транзитной зоне Каспийского моря получили широкое распространение, на основании опыта их применения наработаны различные методики зондирования УВЗ [14]. Применение для поиска УВЗ метода 3D-электроразведки становлением поля [15; 16] приводит к расширению функциональных зависимостей диэлектрической проницаемости среды над углеводородами от режимов зондирования, что позволяет повысить точность разрабатываемых методов поиска УВЗ.

**Воздействие двухчастотного сигнала на среду над УВЗ.** Распространение двухчастотных ЭМВ в среде над УВЗ рассмотрено в работе [1]. Полученные в этой работе результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что в компонентах тензора диэлектрической проницаемости среды заложены функциональные зависимости, позволяющие повышать информативность методов поиска УВЗ. Установлено, что существующие модели УВЗ показывают, что физико-химические свойства среды над залежью нефти и газа существенно отличаются от данных, полученных при исследовании образцов пород, отобранных непосредственно над УВЗ. В статье учитывается это обстоятельство. Анализ работ [3–5] показал, что аномалии электромагнитного поля могут достигать нескольких десятков процентов на реальном месторождении. Объяснение данных расхождений обусловлено электрическими свойствами вмещающих пород над УВЗ, которые приводят к существенному их влиянию на электродинамический отклик углеводородов на воздействие зондирующего сигнала. Полученные выражения для компонент тензоров диэлектрической проницаемости анизотропной среды (АС) над залежью определяют закономерности трансформации частотных зависимостей комбинационных элементов от соотношения частот и амплитуд двухчастотных сигналов. Вместе с тем для реализации новых методов георазведки представляет интерес анализ процесса взаимодействия двухчастотных ЭМВ, образующихся над залежами и скоплениями углеводородов, с АС в зависимости от диэлектрической проницаемости и удельной проводимости пород, находящихся над УВЗ и определяющих электродинамический отклик. Соответственно, изучение дополнительных режимов зондирования поверхности исследуемого профиля вмещающих пород над УВЗ позволяет установить реальную физическую картину, возникающую над реальным месторождением или скоплением нефти и газа.

Для зондирования ЭМВ среды над УВЗ выберем двухчастотный сигнал вида

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

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

Режимы зондирования определяются коэффициентами отношения амплитуд двух волн и их частот

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

поэтому процесс распространения двухчастотного сигнала (1) над средой с наличием углеводородов приводит к расширению возможностей георазведки и позволяет формировать ЭМВ с различными соотношениями параметров. При наличии достаточно большой базы применяемых режимов можно выбрать оптимальные с точки зрения повышения эффективности, уровня достоверности обнаружения углеводородов.

В работе проведено исследование воздействия на среду над УВЗ мощного низкочастотного (НЧ) сигнала с коэффициентами

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

Новизна исследования состоит в том, что полученные результаты способствуют выделению УВЗ по величине отличий компонент диэлектрической проницаемости среды над углеводородами по сравнению с однородными средами.

**Методика исследования.** Переносной передатчик перемещается вдоль исследуемого профиля с границей раздела сред с характеристиками воздушной среды распространения  $\epsilon_0, \mu_0, \sigma_0$  и с АС над УВЗ. Для зондирования выбирается режим наклонного падения плоской ЭМВ с вертикальной поляризацией. Определяются компоненты диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями по формулам

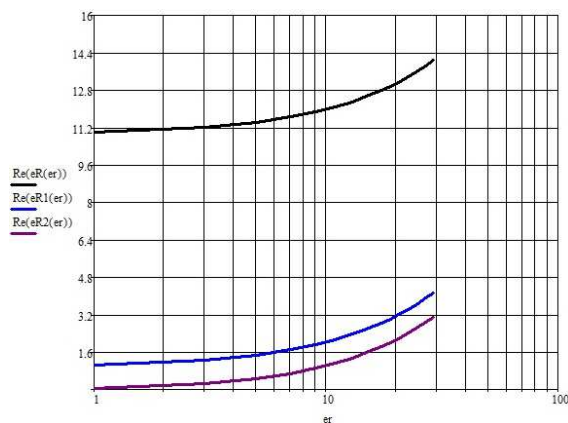
$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}}_R &= \dot{\mathbf{E}}_1 + \dot{\mathbf{E}}_2 = \text{Re } \mathbf{E}_R + j \text{Im } \mathbf{E}_R; \\ \dot{\mathbf{E}}_L &= \dot{\mathbf{E}}_1 - \dot{\mathbf{E}}_2 = \text{Re } \mathbf{E}_L + j \text{Im } \mathbf{E}_L. \end{aligned} \quad (2)$$

В выражениях (2) присутствуют элементы матрицы тензора [1]

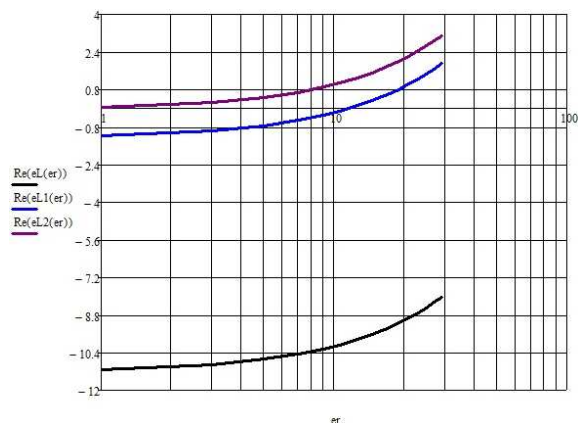
$$\dot{\hat{\epsilon}} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_1 & -j\dot{\epsilon}_2 & 0 \\ j\dot{\epsilon}_2 & \dot{\epsilon}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_3 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Определение величин компонент диэлектрической проницаемости для различных режимов облучения исследуемого профиля ЭМВ позволяет выделить границу УВЗ. Изменение свойств земной поверхности при переходе от изотропной среды к анизотропной сопровождается соответствующими изменениями компонент диэлектрической проницаемости и поверхностного импеданса.

**Результаты исследования.** Проведен анализ выражений (2) для компонент диэлектрической проницаемости среды над УВЗ. Вещественные значения для компонент диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями приведены соответственно на рисунках 1, 2.



**Рисунок 1.** – Зависимости  $\text{Re } \mathbf{\epsilon}_r = \psi(\epsilon_r)$  при изменении диэлектрической проницаемости среды



**Рисунок 2.** – Зависимости  $\text{Re } \mathbf{\epsilon}_l = \psi(\epsilon_r)$  при изменении диэлектрической проницаемости среды

Было учтено, что над залежами углеводородов экспериментально получены параметры среды [1]: удельная электрическая проводимость  $\sigma_r = (10^{-6} - 1) \text{ См/м}$ ; концентрация частиц  $N_e = N_n = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ; частота столкновения частиц  $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9 \text{ рад/с}$ . Диэлектрическая проницаемость среды исследовалась в диапазоне от 1 до 30. Коэффициенты соотношения частот и амплитуд задавали следующие:  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$ . Величина поверхностного импеданса среды над углеводородами определяется физико-химическими процессами в самой залежи и в околозалежном пространстве, составом кристаллического скелета и термодинамическими условиями залегания (давление и температура), приводящими к влиянию углеводородов на электрические свойства вмещающих пород над УВЗ. Компонента вещественной составляющей диэлектрической проницаемости для правой поляризации изменяется при вариации диэлектрической проницаемости пород по нелинейному закону, увеличиваясь с ростом  $\epsilon_r$ .

Составляющие тензора определены соответственно: без индекса – при высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала  $10^5 \text{ Гц}$ , с индексом 1 – при высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала  $10^6 \text{ Гц}$ , с индексом 2 – при высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала  $10^9 \text{ Гц}$ . При изменении коэффициентов соотношения частот и амплитуд закономерности поведения комбинационных составляющих диэлектрической проницаемости среды над УВЗ могут быть рекомендованы для диагностики анизотропных сред, поскольку представляют дополнительную информацию о среде над залежью. Компонента вещественной составляющей диэлектрической проницаемости для левой поляризации изменяется при вариации диэлектрической проницаемости пород по аналогичному закону, за исключением численных значений. Для данной составляющей тензора характерны как отрицательные, так и положительные значения. При высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала  $10^6 \text{ Гц}$  происходит переход характеристики через нуль в районе  $\epsilon_r = 10$ . Таким образом, по разностной компоненте могут быть получены дополнительные данные об исследуемой среде. Дополнительно были проанализированы фазовые составляющие компонент тензора диэлектрической проницаемости (рисунок 3).

Исследования показали, что составляющие фаз для ЭМВ с правой и левой поляризациями равны. Выделяется более контрастное поведение фазовой составляющей для высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала  $10^9 \text{ Гц}$ , когда происходит увеличение фазы от  $-1,6 \text{ рад}$  до  $1 \text{ рад}$  с переходом через нуль при  $\epsilon_r = 4,5$ . При уменьшении частоты зондирования наблюдается менее контрастное изменение данной комбинационной составляющей диэлектрической проницаемости среды над УВЗ при росте диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon_r$ . В отличие от предыдущего случая данная компонента всегда отрицательна в исследуемом диапазоне диэлектрической проницаемости среды. При этом использование

более низких частот зондирующего сигнала практически не влияет на фазовые характеристики. Закономерности изменения дисперсионных характеристик сохраняются за исключением численных значений. Характерной особенностью поведения компоненты ЭМВ с левой поляризацией является наличие отрицательного участка при низких значениях диэлектрической проницаемости наполнителя среды. В действительности реальная обстановка и характер среды над углеводородами сложнее приведенных усредненных значений характеристик анизотропной среды над залежью. Залежь поляризуется, это обусловлено высокими температурами и пластовым давлением. Составы горных пород пронизаны водно-солевыми растворами, которые закрывают углеводороды. Восстановительные процессы в области между УВЗ и окружающей средой характеризуются переходом ряда химических элементов в низковалентное состояние и преобладанием свободных электронов. Тем не менее закономерности, приведенные в статье, могут быть применены на практике с учетом поправочных коэффициентов.

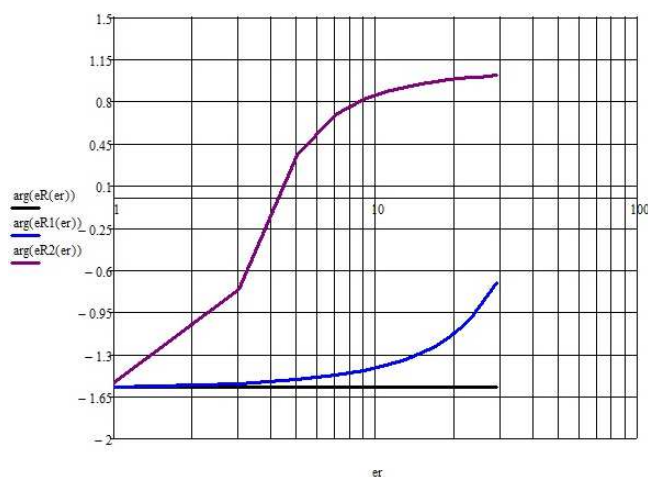


Рисунок 3. – Зависимости фазовой компоненты для ЭМВ с правой поляризацией

На этапе идентификации УВЗ данные графики могут использоваться для диагностики сред. Методика исследований состоит из нескольких этапов, включающих в себя вывод тензора среды над УВЗ в режиме двухчастотных сигналов, анализ комбинационных составляющих компонент диэлектрической проницаемости среды над углеводородами для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями, идентификацию среды над залежами по характеру и величине комбинированных суммарной и разностной компонент диэлектрической проницаемости анизотропного слоя.

Дополнительно были проанализированы зависимости мнимых составляющих и фазовых характеристик компонент тензора диэлектрической проницаемости при изменении удельной проводимости среды (рисунки 4, 5).

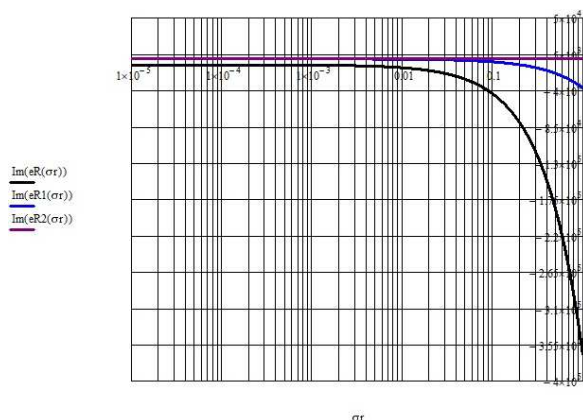


Рисунок 4. – Зависимости мнимых составляющих при изменении удельной проводимости среды

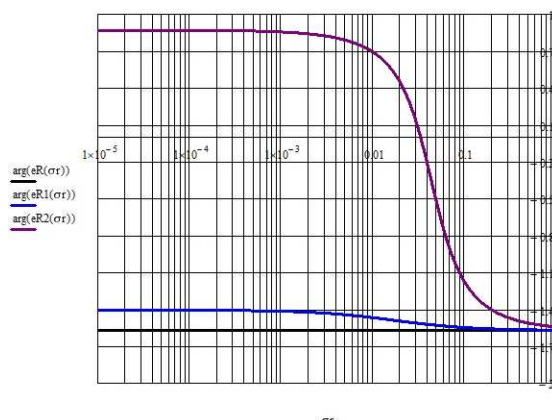


Рисунок 5. – Зависимости фазовых характеристик среды при изменении удельной проводимости

Поскольку данный параметр не влияет на вещественные составляющие тензора, было проанализировано его влияние на мнимые компоненты. Исследования показали, что составляющие компонент

для ЭМВ с правой и левой поляризациями равны. Составляющие тензора определены соответственно: без индекса – при высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала  $10^5$  Гц, с индексом 1 – при высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала  $10^8$  Гц, с индексом 2 – при высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала  $10^9$  Гц. Наиболее контрастное изменение (уменьшение) происходит для  $\sigma_r = (10^2 - 1)$  См/м. Для данной компоненты характерно уменьшение вещественной составляющей диэлектрической проницаемости при уменьшении высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала. При низких значениях удельной проводимости среды величина данной составляющей практически постоянна при вариации удельной проводимости среды подстилающей поверхности. Следует отметить, что использование высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала  $10^9$  Гц не влияет на мнимые составляющие. Фазовые составляющие поверхностного импеданса несут дополнительную информацию о характере сопротивления. Исследования показали, что фазовые составляющие компонент для ЭМВ с правой и левой поляризациями равны. Наиболее контрастное изменение (уменьшение) происходит для  $\sigma_r = (10^{-2} - 1)$  См/м для высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала  $10^9$  Гц, причем для данной компоненты характерен переход через нуль. Это свидетельствует об изменении характера проводимости. При этом использование более низких частот зондирующего сигнала практически не влияет на фазовые характеристики.

Распространение двухчастотных ЭМВ в режимах с правой и левой круговыми поляризациями над исследуемым геологическим профилем местности позволяет повысить производительность методов электроразведки. Дополнительная априорная информация может быть получена с помощью применения метода, основанного на перемещении передатчика и приемника вдоль участка исследуемого профиля. В результате процедуру диагностики среды можно осуществлять согласно методике решения обратной задачи, по которой на основании измерения компонент тензора диэлектрической проницаемости и его фазовых компонент осуществляется определение диэлектрической проницаемости, удельной проводимости среды и глубины слоя. Информативность повышается за счет набора конкретных значений расстояний и конкретизации электродинамических моделей УВЗ для повышения эффективности ЭММ георазведки с учетом влажности слоев, климатических факторов и особенностей измерений сезонного характера.

Важную роль играют физико-геологические свойства пород-коллекторов, которые в свою очередь определяются минералогическим и гранулометрическим составами пород, особенностями структурно-текстурного строения скелета при определении комбинационных составляющих компонент диэлектрической проницаемости среды над углеводородами. Двухканальная схема определения комбинационных составляющих позволяет учитывать характер пористости и проницаемости, вид цементирующего вещества и механические свойства скелета, количество пластовой воды в порах и ее минерализацию и т.д.

По рисунку 5 видно, что этот режим целесообразно использовать в приборе для обнаружения залежей, поскольку по сравнению с однородной средой наличие спадающего участка представляет дополнительные преимущества в повышении информативности систем поиска углеводородов.

**Заключение.** Проведенное исследование комбинационных составляющих компонент диэлектрической проницаемости среды над углеводородами показало следующее:

- вещественные и мнимые значения для комбинированных элементов и фазовых компонент диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями в режиме двухчастотного взаимодействия с использованием мощного НЧ-сигнала могут быть применены для определения электродинамических характеристик анизотропных сред над скоплением углеводородов;
- составляющие фаз для ЭМВ с правой и левой поляризациями равны, причем более контрастное поведение фазовой составляющей характерно для высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала  $10^9$  Гц;
- для высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала  $10^9$  Гц характерен переход фазовой компоненты через нуль, что свидетельствует об изменении характера проводимости и может быть применено для диагностики сред и повышения точности определения границ залежей углеводородов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
2. 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.
3. Способ поиска месторождений нефти и газа : а. с. SU 1264122 / А.Ф. Семенов, В.Ф. Семенов. – 1986. – Опубл. 15.10.1986.
4. Могилатов, В.С. Зондирования вертикальными токами / В.С. Могилатов, Б.П. Балашов. – Новосибирск : СО РАН, филиал «Гео», 2005.

5. Moskvichew, V.N. Interraction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V.N. Moskvichew // 9th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
6. Способ радиоволнового зондирования и устройство для его осуществления : пат. RU 2152060 / В.К. Томилин, Г.П. Астафьев, В.И. Луконин. – Опубл. 27.06.2000.
7. 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).
8. Adamovskiy, E. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits / E. Adamovskiy, V. Yanushkevich // 8 Junior researchers conference European and national dimension in research : in 3 p. / PSU. – Novopolotsk : PSU, 2016. – P. 3 : Technology. – P. 179–183.
9. 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.
10. Маловичко, М.С. Сравнение статистических свойств устанавливающихся электрических полей при морских измерениях / М.С. Маловичко. // Геофизика. – 2008. – № 5. – С. 59–64.
11. Электродинамические параметры подводных источников в поле поверхностной электромагнитной волны / Д.В. Гололобов [и др.]. // 35 Всерос. Межвуз. науч.-техн. конф. : тез. докл. – Владивосток. – 1992. – Т. 1, ч. 1. – С. 59–62.
12. Гололобов, Д.В. Импедансные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич, С.В. Калинин // Доклады БГУИР. – Минск, 2010. – № 6(52). – С. 13–17.
13. Гололобов, Д.В. Влияние параметров амплитудно-модулированного воздействия на фазовые составляющие поверхностного импеданса анизотропной среды плазмоподобного типа / Д.В. Гололобов, О.В. Орлова, В.Ф. Янушкевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 98–101.
14. Опыт применения электромагнитных зондирований при поисках углеводородов в транзитной зоне Каспийского моря / А.А. Петров [и др.] // Геофизика. – № 2. – 2010. – С. 60–64.
15. Тригубович, Г.М. 3D-электроразведка становлением поля / Г.М. Тригубович, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик. – Новосибирск : Наука, 2009. – 217 с.
16. Anderson, C. An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source / C. Anderson, J. Mattsson // First Break. – 2010. – Vol. 28, iss. 5. – P. 71–75.

Поступила 12.10.2020

## FEATURES OF PROPAGATION OF TWO-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVES OVER HYDROCARBONS

V. YANUSHKEVICH, S. ABRAMENKO, V. BOGUSH

*The article analyzes the propagation of electromagnetic waves in a two-frequency mode using a powerful low-frequency signal in an environment above hydrocarbon deposits. The behavior of the real, imaginary components of the combined elements and the phase components of the dielectric constant tensor of an anisotropic medium above the reservoir in the mode of two-frequency signals was investigated on the basis of the approach used in studying plasma. The analysis of the components of the tensor of the dielectric constant of the medium over hydrocarbons for electromagnetic waves with right and left circular polarizations is carried out depending on the dielectric constant and specific conductivity of the medium. It has been established that, based on the amplitude and phase characteristics of the components of the dielectric constant tensor of the medium over hydrocarbons, with a variation in the frequencies of the probing signal, the media can be diagnosed with an increase in the productivity of geological exploration and the accuracy of determining the boundaries of hydrocarbon deposits.*

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