

УДК 621.371:550.837.6

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, С.В. КАЛИНЦЕВ  
(Полоцкий государственный университет)

*Проанализировано взаимодействие электромагнитных волн в режиме радиоимпульсных сигналов со средой над углеводородными залежами. Выведен тензор диэлектрической проницаемости анизотропной среды над залежью в режиме радиоимпульсных сигналов на основе квазигидродинамического подхода с использованием многочастичных электронно-ионных токов. Проведен анализ комбинационных составляющих компонентов диэлектрической проницаемости среды над углеводородами для электромагнитных волн с правой и левой круговыми поляризациями в зависимости от концентрации частиц среды. Показано, что результаты исследований могут быть использованы для идентификации среды над залежами по характеру и величине суммарной и разностной компонент диэлектрической проницаемости анизотропного слоя.*

**Ключевые слова:** радиоимпульсный сигнал, анизотропная среда, углеводородная залежь, методы электромагнитной разведки.

**Введение.** Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач заключается в усовершенствовании существующих электромагнитных методов георазведки и разработке новых методов поиска, идентификации месторождений нефти и газа (углеводородов), являющихся стратегическим видом полезных ископаемых. Методы поиска углеводородных залежей (УВЗ) основаны на анализе электрофизических и электрохимических процессов в анизотропных средах (АС) над залежами углеводородов и оптимизации частотных, поляризационных, амплитудных, модуляционных и других параметров зондирующих сигналов с учетом специфических характеристик УВЗ.

Аналогия исследуемой среды над залежью нефти и газа с плазмopodobным образованием позволяет использовать для изучения взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ существующие решения при изучении плазмы и плазмopodobных сред. Установлено, что наиболее оптимальным для исследования сред над УВЗ является квазигидродинамический подход с использованием многочастичных электронно-ионных токов и феноменологически заданных частот столкновений, ввиду отсутствия необходимости учета точных пространственно-временных перемещений частиц [1].

Результаты анализа взаимодействия ЭМВ с УВЗ и его экспериментального исследования представлены во многих работах. В статье [2] выведен тензор диэлектрической проницаемости анизотропной среды над залежью в режиме гармонических сигналов. Обнаружение углеводородов осуществляется с помощью радиоволновых измерительных комплексов [3], по изменению поверхностного импеданса среды над залежами [4], на основе измерения сопротивлений в исследуемых точках геопрофиля с помощью поверхностных электродов [5].

Точность определения границ УВЗ может быть повышена за счет применения двухчастотных сигналов [6] на основе исследования сложных ионных соединений полупроводникового характера, образующихся над углеводородами [7], применением методов электрорезонансного зондирования [8]. Для реализации новых методов георазведки представляет интерес анализ процесса взаимодействия радиоимпульсных ЭМВ с АС, образующимися над залежами и скоплениями углеводородов. В работе [9] проведено исследование поверхностного импеданса среды над УВЗ с учетом влияния всех ниже расположенных слоев на верхний слой.

Основой многих методов георазведки углеводородов могут стать результаты исследования затухания радиоимпульсных сигналов в среде над залежью [10]. Способ поиска УВЗ [11] позволяет обнаруживать месторождения нефти и газа по измерениям величины напряженности электрического поля отраженных радиоимпульсных сигналов на глубинах до 200 м. Целью настоящей работы является качественное повышение уровня достоверности поиска и идентификации УВЗ обоснованием выбора характеристик ЭМВ при использовании радиоимпульсных сигналов, позволяющих измерять величины напряженности электрического поля отраженных сигналов на глубинах до 500 м.

В данной работе исследуется этап, который включает в себя вывод тензора среды над УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов, анализ комбинационных составляющих компонентов диэлектрической проницаемости среды над углеводородами для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями, идентификации среды над залежами по характеру и величине суммарной и разностной компонент диэлектрической проницаемости анизотропного слоя с учетом концентрации частиц среды.

Диагностика АС над углеводородами по воздействию зондирующего радиоимпульсного сигнала на исследуемый геопрофиль состоит из этапов, которые базируются на результатах исследований комби-

национных составляющих тензора диэлектрической проницаемости для ЭМВ с правой и левой круговой поляризациями. Новизна исследований, приведенных в данной статье, заключается в том, что полученные результаты способствуют определению анизотропных сред по измерению отличий сигналов двухканальной схемы на основе полученных величин отраженных сигналов. Это позволит повысить производительность геологоразведочных работ УВЗ.

**Взаимодействие анизотропных сред с углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов.** Качественное повышение уровня достоверности поиска и идентификации углеводородов достигается применением оптимальных режимов зондирования ЭМВ при взаимодействии импульсных сигналов со средой над УВЗ.

Рассмотрим процесс взаимодействия ЭМВ с УВЗ в режиме импульсного сигнала вида

$$S(f) = \frac{U \cdot \tau_u}{2} \cdot \frac{\sin \frac{(\omega - \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}{\frac{(\omega - \omega_0) \cdot \tau_u}{2}} + \frac{\sin \frac{(\omega + \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}{\frac{(\omega + \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}, \quad (1)$$

где  $\frac{U \cdot \tau_u}{2} = 1$  – амплитуда;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  – частота;

$\omega_0$  – несущая частота;

$\tau_u$  – длительность радиоимпульса.

Процесс взаимодействия ЭМВ с локальным включением на трассе распространения радиоволн можно представить в виде режима наклонного падения плоской волны с вертикальной поляризацией в среде с параметрами  $\epsilon_0, \mu_0, \delta_0$  на безграничную поверхность с анизотропным импедансом. Данная ЭМВ возбуждается с помощью переносного передатчика, перемещаемого вдоль исследуемого профиля.

Методика исследований заключается в облучении исследуемого профиля электромагнитной волной на фиксированной частоте, приеме отраженного сигнала. Измеряют напряженность электрического поля отраженного сигнала в точках измерения исследуемого профиля и по аномальным значениям напряженности электрического поля отраженного сигнала определяют границу углеводородной залежи.

Представляет интерес анализ частотных характеристик комбинационных составляющих:

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

В выражениях (2) присутствуют элементы матрицы

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

Информация о свойствах АС заложена в компонентах тензора (3)  $\dot{\mathcal{E}}_1, \dot{\mathcal{E}}_2, \dot{\mathcal{E}}_3$ , подлежащих исследованию в различных режимах взаимодействия среды с ЭМВ.

Выведем тензор диэлектрической проницаемости АС над УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов. В рамках квазигидродинамического приближения уравнение движения электрона имеет вид

$$m \frac{d\dot{\vartheta}}{dt} + v m \dot{\vartheta} = q \dot{\vec{E}} + q \mu_0 \left[ \dot{\vartheta}, \dot{\vec{H}}_0 \right], \quad (4)$$

где  $m, q, \dot{\vartheta}$  – масса, заряд и скорость движения частиц;

$v$  – частота столкновений электрона с тяжелыми частицами;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;

$\dot{\vec{E}}$  – напряженность электрического поля ЭМВ;

$\dot{\vec{H}}_0$  – напряженность магнитного поля Земли.

Заряд электрона равен элементарному заряду  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Найдем плотность полного тока в немагнитной анизотропной среде ( $\mu_r$  – магнитная проницаемость исследуемой среды не отличается от  $\mu_0$ )

$$\dot{\delta}_{\Sigma} = \dot{\delta}_{CM} + \dot{\delta}_{ПП} = j \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \dot{E} + \sum q_i \cdot N_i \cdot \dot{\vartheta}_i, \quad (5)$$

которая определяется токами в диэлектрическом наполнителе среды с проницаемостью  $\epsilon_r$  ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф·м<sup>-1</sup> – диэлектрическая проницаемость вакуума) и включает ток проводимости  $\delta_{ПП}$  с известной концентрацией электронов  $N_e$ .

Решение уравнений (4), (5) позволяет определить компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_r \cdot F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{F \cdot w_{ni}^2}{w} \cdot \frac{(w+n\Omega_1) \cdot [w_{\Gamma i}^2 - (w+n\Omega_1)^2 - v_i^2]}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w+n\Omega_1)^2]^2 + 4(w+n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ - jF \left[ \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot v_i \cdot \frac{(w+n\Omega_1)^2 + v_i^2 + w_{\Gamma i}^2}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w+n\Omega_1)^2]^2 + 4(w+n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} + \frac{\delta_r F}{w\epsilon_0} \right] \end{array} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot w_{\Gamma i} \cdot \frac{v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w+n\Omega_1)^2}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w+n\Omega_1)^2]^2 + 4(w+n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ - 2j \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot w_{\Gamma i} \cdot v_i \cdot \frac{w+n\Omega_1}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w+n\Omega_1)^2]^2 + 4(w+n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} \end{array} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 = \sum_{i=1}^2 \left\{ F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) \cdot \left[ \epsilon_r - \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot \frac{1}{(w+n\Omega_1)^2 + v_i^2} \right] - j \left[ \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot v_i \cdot \frac{1}{(w+n\Omega_1)^2 + v_i^2} + \frac{\delta_2 F}{w\epsilon_0} \right] \right\}. \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\text{Здесь } F = \frac{\tau}{T} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau)}{\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau},$$

$T, F_1$  – период, частота импульса;

$n$  – номер гармоники;

$\Omega_1$  – круговая частота импульса,  $\Omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot F_1$ ;

$\epsilon_r, \delta_r$  – диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость среды;

$\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;

$w_{ni}$  – плазменная частота;  $i = 1$  – для электронов,  $i = 2$  – для ионов;

$v_i$  – частота столкновения частиц;

$\omega_{\Gamma i}$  – гиротропная частота,  $\omega_{\Gamma i} = \frac{q_i \mu_0 H_0}{m_i}$ ;

$w_{ni}$  – плазменная частота,  $w_{ni} = q_i \left( \frac{N_i}{m_i \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}$ .

**Результаты исследований.** Проведен частотный анализ выражений (2) для частоты радиопульса  $5 \cdot 10^5$  Гц и концентрации частиц  $N_e = 10^{17}$  м<sup>-3</sup> (рисунок 1, 3) и  $N_e = 10^{15}$  м<sup>-3</sup> (рисунок 2, 4).

Результаты теоретических исследований и существующие модели УВЗ [1] показывают, что свойства среды над залежью нефти и газа отличаются от данных, полученных при исследовании образцов пород, отобранных непосредственно над УВЗ. При этом аномалии ЭМП на реальном месторождении

могут достигать нескольких десятков процентов. Данные расхождения объясняются непосредственным влиянием углеводородов на электрические свойства вмещающих пород над УВЗ.

Поэтому исследование отобранных образцов вмещающих пород над УВЗ в отрыве от естественных условий залегания не соответствует реальной физической картине, возникающей над реальным месторождением или скоплением нефти и газа. Тем не менее такие расчеты показывают основные закономерности поведения комбинационных составляющих диэлектрической проницаемости среды над УВЗ и могут быть рекомендованы для диагностики анизотропных сред.

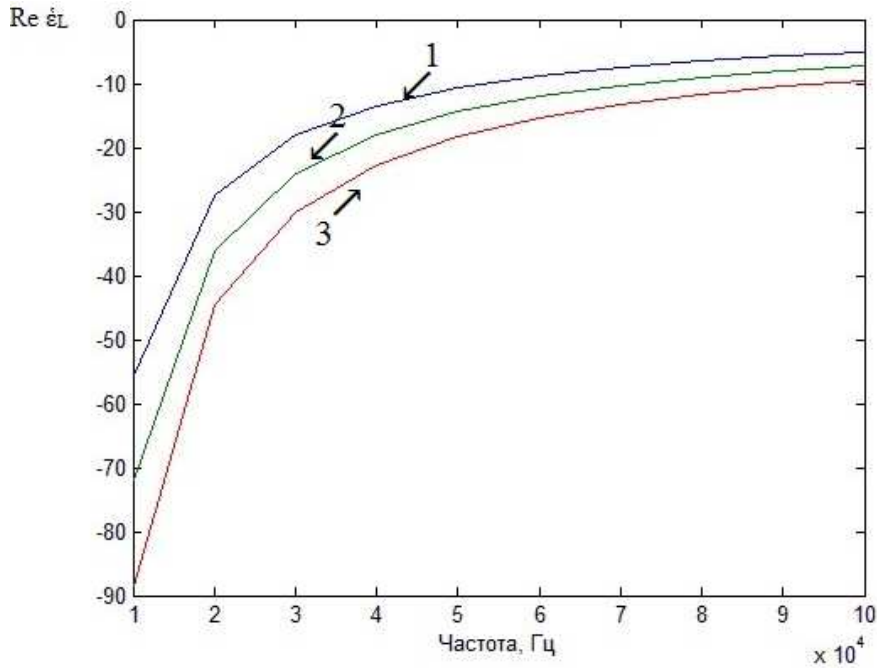


Рисунок 1. – Зависимости  $Re \epsilon_L = \psi(f)$  при концентрации  $N_c = 10^{17} \text{ м}^{-3}$ :  
1 – для  $\epsilon_r = 25$ ; 2 – для  $\epsilon_r = 15$ ; 3 – для  $\epsilon_r = 5$

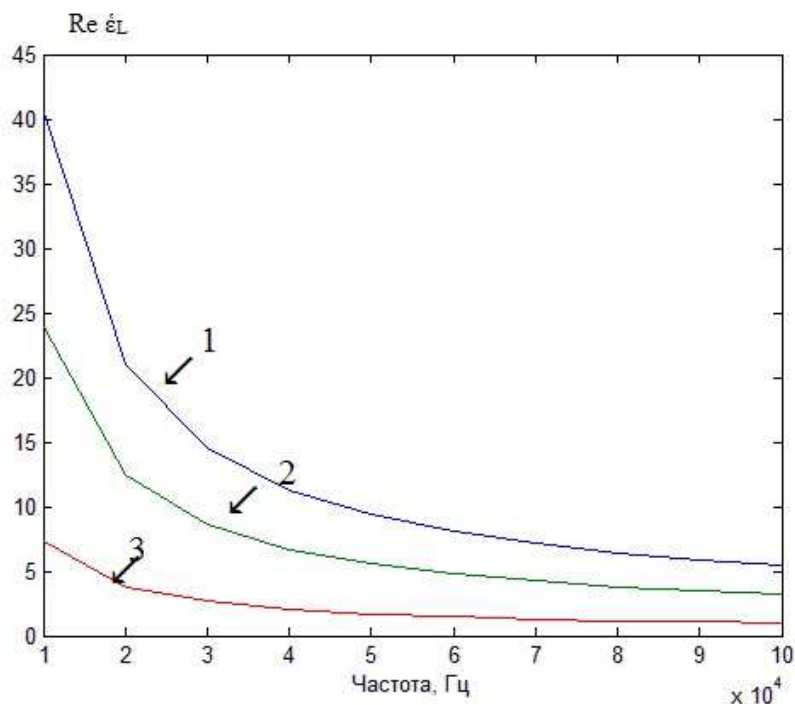


Рисунок 2 – Зависимости  $Re \epsilon_L = \psi(f)$  при концентрации  $N_c = 10^{15} \text{ м}^{-3}$ :  
1 – для  $\epsilon_r = 25$ ; 2 – для  $\epsilon_r = 15$ ; 3 – для  $\epsilon_r = 5$

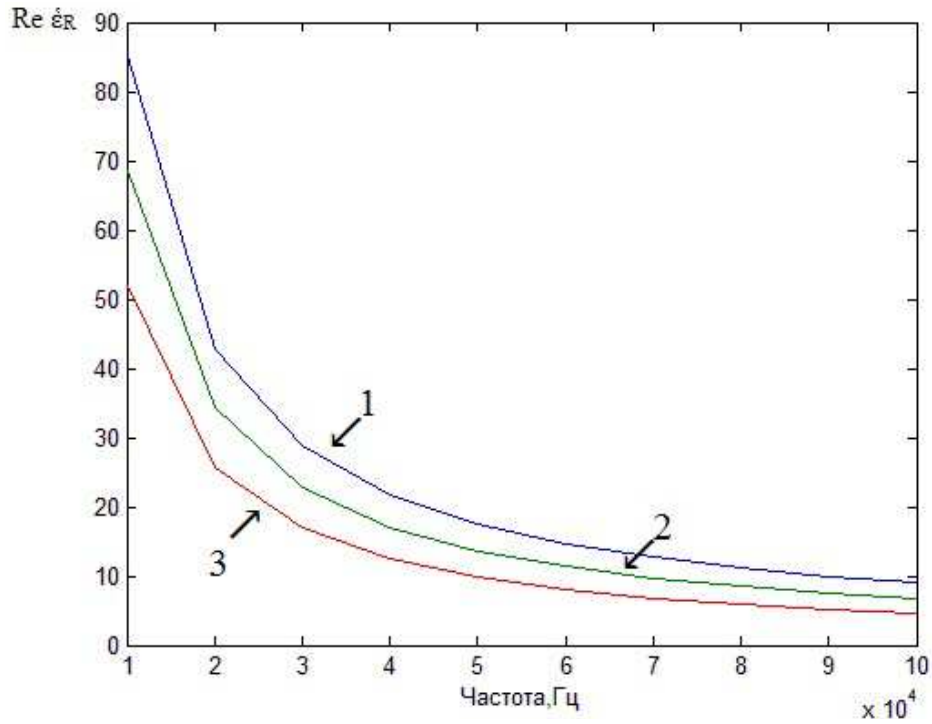


Рисунок 3 – Зависимости  $\text{Re } \hat{\epsilon}_R = \psi(f)$  при концентрации  $N_c = 10^{17} \text{ м}^{-3}$ :  
 1 – для  $\epsilon_r = 25$ ; 2 – для  $\epsilon_r = 15$ ; 3 – для  $\epsilon_r = 5$

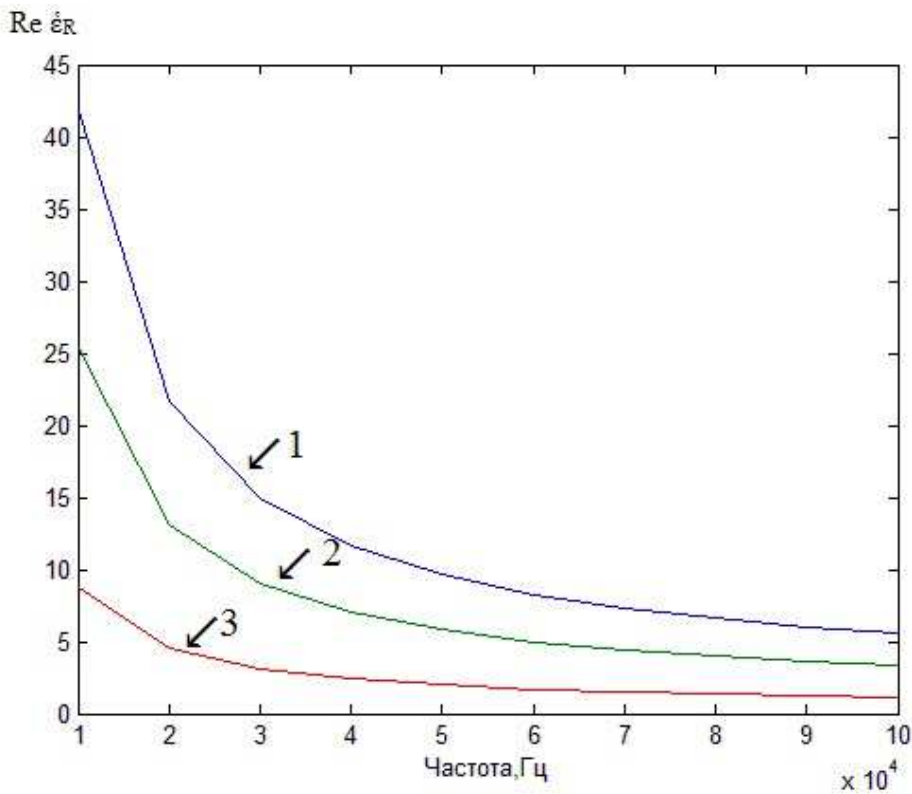


Рисунок 4. – Зависимости  $\text{Re } \hat{\epsilon}_R = \psi(f)$  при концентрации  $N_c = 10^{15} \text{ м}^{-3}$ :  
 1 – для  $\epsilon_r = 25$ ; 2 – для  $\epsilon_r = 15$ ; 3 – для  $\epsilon_r = 5$

Расчет компонентов тензоров диэлектрической проницаемости осуществлен на основании экспериментально полученных параметров среды над залежами углеводородов [2]: удельная электрическая

проводимость  $\delta_r = 10^{-5}$  См/м; концентрация частиц  $N_c = N_n = (10^{15} - 10^{17}) \text{ м}^{-3}$ ; частота столкновения частиц  $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$  рад / с. Значение  $n$  выбрано равным 5. Диэлектрическая проницаемость среды исследовалась в диапазоне от 1 до 25.

Выбор частоты радиоимпульсных сигналов  $F_n = 5 \cdot 10^5$  Гц обусловлен обеспечением глубин зондирования до 500 м для определения характеристик сред над залежами на больших глубинах по сравнению с дневной поверхностью [2]. Распространение ЭМВ с левой поляризацией при  $N_c = 10^{17} \text{ м}^{-3}$  характеризуется ростом комбинационной составляющей при увеличении частоты. При этом наблюдаются отрицательные значения разностной компоненты. Уменьшение концентрации частиц среды над УВЗ приводит к уменьшению комбинационной составляющей с ростом частоты, при этом она становится положительной.

Распространение ЭМВ с правой поляризацией при применении концентрации частиц в указанном выше диапазоне характеризуется одинаковым законом изменения суммарной компоненты диэлектрической проницаемости среды, отличаясь лишь численными значениями. При изменении диэлектрической проницаемости среды происходит изменение комбинационной составляющей без изменения знака суммарной компоненты.

Процедура диагностики среды осуществляется согласно методике решения обратной задачи [12], по которой определения диэлектрической проницаемости, удельной проводимости среды и глубины слоя основаны на измерении времени запаздывания отраженного сигнала и амплитуды напряженности электрического поля отраженной волны. С помощью перемещения передатчика и приемника вдоль исследуемого профиля получают дополнительную априорную информацию, задаваясь конкретными значениями расстояний. Двухканальная схема определения комбинационных составляющих ЭМВ в режимах с правой и левой круговыми поляризациями позволяет повысить производительность методов электроразведки, поскольку полученные результаты дают возможность выделения АС на фоне других сред [13].

**Заключение.** Проведен анализ взаимодействия анизотропного слоя над углеводородами с ЭМВ в режиме радиоимпульсных сигналов. Выведен тензор диэлектрической проницаемости АС над УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов. Результаты исследования могут быть применены в поисковой геофизике. При этом следует отметить:

- тензор диэлектрической проницаемости АС над УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов может быть использован для определения электродинамических характеристик среды над залежью в широком диапазоне частот зондируемых сигналов при изменении концентрации частиц сред;
- исследования могут быть полезны для определения характеристик среды над залежью при распространении ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями, что повышает информативность методов оконтуривания и выделения УВЗ;
- распространение ЭМВ с левой поляризацией при изменении концентрации частиц среды приводит к изменению комбинационной составляющей с изменением знака разностной компоненты, что может быть использовано для разработки методов электромагнитной разведки, поиска и идентификации УВЗ;
- проведенный анализ взаимодействия импульсных сигналов со средой над УВЗ показал, что в компонентах тензоров диэлектрической проницаемости появляются дополнительные составляющие, зависящие от параметров сигналов. Все это приводит к расширению функциональных зависимостей компонентов тензоров от режимов зондирования, что позволяет повысить точность разрабатываемых методов поиска УВЗ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
2. 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.
3. Поиск и разведка углеводородов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.companypetroservice.com> // . – Дата доступа: 10.01.2017.
4. Гололобов, Д.В. Поверхностный импеданс среды над углеводородными залежами в режиме частотно-модулированных сигналов / Д.В. Гололобов, С.В. Калинин, В.Ф. Янушкевич // Весці НАН Беларусі. Сeryя фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 4. – С. 98–101.
5. Asch, T. Mapping and monitoring electrical resistivity with surface and surface electrode arrays / T. Asch, H.F. 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. – Rydzyna, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
7. Huang, R.H. Low temperature (-80°C) thermionic electron emission from alkalis and electrides / 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 / 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, 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.] // Вестник ПГУ. Серия С, Фундаментальные 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 Междунар. науч.-техн. конф., 4 окт. 2016 г. – СПб., 2016. – Т. 1. – С. 107–111.
12. Копейкин, В.В. Обратная задача георадиолокации [Электронный ресурс]. – 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 : моногр. / В.Ф. Янушкевич. – Новополоцк : ПГУ, 2017. – 232 с.

Поступила 10.09.2018

**INFLUENCE OF CONCENTRATION OF PARTICLES  
OF MEDIUM ON HYDROCARBONS ON DISTRIBUTION OF RADIOIMPULSE SIGNALS**

**V. YANUSHKEVICH, S. KALINTSEV**

*The article analyzes the interaction of electromagnetic waves in the regime of radio pulse signals with the medium over hydrocarbon deposits. A tensor of the dielectric constant of an anisotropic medium above the deposit in the mode of radio-impulse signals is derived on the basis of a quasihydrodynamic approach using multi-particle electron-ion currents. The analysis of the combination components of the dielectric permittivity of the medium over hydrocarbons for electromagnetic waves with right and left circular polarizations is performed, depending on the concentration of the particles in the medium. It is shown that the results of research can be used to identify the environment above the halls by the nature and magnitude of the total and difference components of the dielectric permittivity of the anisotropic layer.*

**Keywords:** *radio impulse signal, anisotropic medium, hydrocarbon deposit, methods of electromagnetic reconnaissance.*