

УДК 621.371:550.837.6

Взаимодействие радиоимпульсных сигналов с анизотропной средой над углеводородными залежами

Янушкевич В.Ф.

*Полоцкий государственный университет,
ул. Блохина, 29, Новополоцк, 211440, Беларусь
e-mail: yanushkevich-09@mail.ru*

Аннотация

В статье приводится анализ взаимодействия 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, что повышает информативность методов оконтуривания и выделения углеводородных залежей. 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 (ЭММ) георазведки и разработке новых методов поиска, идентификации месторождений нефти и газа (углеводородов). Результаты исследований могут быть применены как для наземной георазведки, так и для создания приборов авиационной техники, используемых для дистанционного зондирования Земли. Методы поиска углеводородных залежей (УВЗ) основаны на анализе электрофизических и электрохимических процессов в анизотропных средах (АС) над залежами углеводородов. Аналогия исследуемой среды над залежью нефти и газа с плазмоподобным образованием позволяет использовать для изучения взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ существующие решения при изучении плазмы и плазмоподобных 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]. Выбор метода электроразведки определяет методику проведения натуральных испытаний, точность определения границ и уровень идентификации УВЗ. Современные методы электромагнитной разведки требуют базы уникальной информации об установленных на данный момент сведениях о свойствах УВЗ. Такие знания служат

надежным инструментом при поиске, оконтуривании и идентификации залежей нефти и газа с помощью электромагнитных методов георазведки.

Оптимизация частотных, поляризационных, амплитудных, модуляционных и других параметров зондирующих сигналов возможна с учетом специфических характеристик УВЗ, позволяющих в совокупности повысить уровень идентификации углеводородов до требуемого уровня, определяющего порог принятия решения о наличии именно искомой среды, определяемой как УВЗ. 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 по изменению поверхностного импеданса среды над залежами [3], на основе измерения сопротивлений в исследуемых точках геопрофиля с помощью поверхностных электродов [4]. Точность определения границ УВЗ может быть улучшена за счет применения двухчастотных сигналов [5], на основе исследования сложных ионных соединений полупроводникового характера, образующихся над углеводородами [6], применением методов электрорезонансного зондирования [7]. Вместе с тем для реализации новых методов георазведки представляет интерес анализ процесса взаимодействия радиоимпульсных ЭМВ с АС, образующихся над залежами и скоплениями углеводородов. В работе [8] проведен анализ 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 [9]. Способ поиска УВЗ [10] 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. Диагностика АС над углеводородами по воздействию зондирующего радиоимпульсного сигнала на исследуемый геопрофиль состоит из следующих этапов: определение реакции среды над углеводородами на комбинационные составляющие тензора диэлектрической проницаемости для ЭМВ с правой и левой круговой поляризациями; измерение частотных, поляризационных, амплитудных, модуляционных и других параметров отраженных от среды над залежью сигналов; выявление аномальных участков земной поверхности (по отличию комбинационных составляющих двухканальной системы, состоящей из приемников для правой и левой круговых поляризаций); интерпретация результатов измерений с помощью средств вычислительной техники, позволяющих пересчитывать характеристики отраженных сигналов в значения диэлектрической проницаемости среды. Математическая специфика обратной задачи восстановления параметров среды по данным измерений заключается в том, что она является некорректной задачей, поскольку нарушено хотя бы одно из условий: существование решения, единственность решения, его устойчивость (условие, при котором решение непрерывно зависит от входных данных, то есть устойчиво по отношению к малым возмущениям данных наблюдений). Для

получения решения некорректную задачу нужно дополнить априорной информацией из опыта исследований и экспериментальных данных, подобрать наиболее оптимальную упрощающую модель, и в рамках этой модели интерпретировать полученные данные.

В данной статье исследуется первый 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. 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.

Взаимодействие АС с УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов

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 $\frac{U \cdot \tau_{и}}{2} = 1$ – амплитуда радиоимпульса;

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

ω_0 – несущая частота радиоимпульса;

$\tau_{и}$ – 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 $\varepsilon_0, \mu_0, \delta_0$ на безграничную поверхность с анизотропным импедансом. Данная ЭМВ возбуждается с помощью переносного передатчика, перемещаемого вдоль исследуемого профиля. Выведем тензор диэлектрической проницаемости АС над УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов. В рамках квазигидродинамического приближения уравнение движения электрона имеет вид:

$$m \frac{d\dot{\vec{\vartheta}}}{dt} + \nu m \dot{\vec{\vartheta}} = q \dot{\vec{E}} + q \mu_0 \left[\dot{\vec{\vartheta}}, \dot{\vec{H}}_0 \right], \quad (2)$$

где $m, q, \dot{\vec{\vartheta}}$ – масса, заряд и скорость движения частиц, ν – частота столкновений электрона с тяжелыми частицами, μ_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.

Представим суммарный сигнал в виде:

$$\vec{e}(t) = \vec{E}_m(t) \cdot \exp[j\Omega(t)]. \quad (3)$$

Для нахождения огибающей $\vec{E}_m(t)$ и мгновенной частоты $\Omega(t)$ двух воздействующих сигналов $\vec{e}_1(t)$ и $\vec{e}_2(t)$ использовано преобразование Гильберта [2].

Найдём плотность полного тока в немагнитной анизотропной среде (μ_r – магнитная проницаемость исследуемой среды не отличается от μ_0)

$$\dot{\delta}_{\Sigma} = \dot{\delta}_{CM} + \dot{\delta}_{IP} = j \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \dot{E} + \sum_{i=1}^N q_i \cdot N_i \cdot \dot{g}_i, \quad (4)$$

которая определяется токами в диэлектрическом наполнителе среды с проницаемостью ε_r ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума) и включает ток проводимости δ_{IP} с известной концентрацией электронов N_e .

Совместное решение уравнения (2) и (4) позволяет представить тензор диэлектрической проницаемости в виде матрицы:

$$\dot{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_1 & -j\dot{\varepsilon}_2 & 0 \\ j\dot{\varepsilon}_2 & \dot{\varepsilon}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\varepsilon}_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Информация о свойствах АС заложена в компонентах тензора (5) $\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, \dot{\varepsilon}_3$, подлежащих исследованию в различных режимах взаимодействия среды с ЭМВ.

Решение уравнения (2) относительно составляющих скорости движения электрона в выбранной системе координат даёт

$$\begin{cases} g_x = \frac{e}{m} E_x \cdot \frac{F \cdot j(\omega + n\Omega_1) + \nu}{[j(\omega + n\Omega_1) + \nu]^2 + \omega_{\Gamma}^2} - \frac{e}{m} \cdot E_y \cdot \omega_{\Gamma} \cdot F \cdot \frac{1}{[j(\omega + n\Omega_1) + \nu]^2 + \omega_{\Gamma}^2}, \\ g_y = \frac{e}{m} \cdot \omega_{\Gamma} \cdot E_x \cdot F \cdot \frac{1}{[j(\omega + n\Omega_1) + \nu]^2 + \omega_{\Gamma}^2} + \frac{e}{m} \cdot E_y \cdot F \cdot \frac{j(\omega + n\Omega_1) + \nu}{[j(\omega + n\Omega_1) + \nu]^2 + \omega_{\Gamma}^2}, \\ g_z = \frac{e}{m} \cdot E_z \cdot F \cdot \frac{1}{j(\omega + n\Omega_1) + \nu}, \end{cases} \quad (6)$$

где гиротропная частота

$$w_{\Gamma i} = \frac{q_i \mu_0 H_0}{m_i}. \quad (7)$$

С учётом выражения для плотности полного тока и его привязки к выбранной системе координат, с учётом (7) можно записать:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\delta}_x = j\omega \varepsilon_0 E_x \left\{ \left[\varepsilon_r \cdot F \cdot \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) - j \frac{\delta_r \cdot F}{w \cdot \varepsilon_0} \right] - j \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \frac{j(w + n\Omega_1) + \nu}{[j(w + n\Omega_1) + \nu]^2 + w_{\Gamma i}^2} \right\} + \\ + jw \varepsilon_0 E_y \cdot \left[j \frac{w_{ni}^2 \cdot w_{\Gamma i} \cdot F}{w} \cdot \frac{1}{[j(w + n\Omega_1) + \nu]^2 + w_{\Gamma i}^2} \right], \\ \vec{\delta}_y = j\omega \varepsilon_0 E_y \left[\frac{w_{ni}^2 \cdot F \cdot w_{\Gamma i}}{w} \cdot \frac{1}{[j(w + n\Omega_1) + \nu]^2 + w_{\Gamma i}^2} \right] + \\ + jw \varepsilon_0 E_x \left\{ \left[\varepsilon_r F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) - j \frac{\delta_r \cdot F}{w \varepsilon_0} \right] - j \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot \frac{F \cdot j(w + n\Omega_1) + \nu}{[j(w + n\Omega_1) + \nu]^2 + w_{\Gamma i}^2} \right\}, \\ \vec{\delta}_z = j\omega_2 \varepsilon_0 E_z \left[\varepsilon_r \cdot F \cdot \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) - j \left[\frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot \frac{1}{j(w + n\Omega_1) + \nu} + \frac{\delta_r \cdot F}{w \varepsilon_0} \right] \right]. \end{array} \right. \quad (8)$$

Здесь $w_{ni} = q_i \left(\frac{N_i}{m_i \varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}$ – плазменная частота, (9)

δ_r – удельная проводимость среды.

Координатное разложение напряжённости электрического поля с учётом (9) позволяет записать компоненты тензора диэлектрической проницаемости в виде:

$$\left\{ \begin{aligned}
\dot{\mathcal{E}}_1 &= \varepsilon_r \cdot F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned}
&\frac{F \cdot w_{ni}^2}{w} \cdot \frac{(w + n\Omega_1) \cdot [w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2 - v_i^2]}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\
&-jF \left[\frac{w_{ni}^2}{w} \cdot v_i \cdot \frac{(w + n\Omega_1)^2 + v_i^2 + w_{\Gamma i}^2}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} + \frac{\delta_r F}{w\varepsilon_0} \right] \end{aligned} \right\}, \\
\dot{\mathcal{E}}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned}
&\frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot w_{\Gamma i} \cdot \frac{v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\
&-2j \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot w_{\Gamma i} \cdot v_i \cdot \frac{w + n\Omega_1}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} \end{aligned} \right\}, \\
\dot{\mathcal{E}}_3 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) \cdot \left[\varepsilon_r - \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot \frac{1}{(w + n\Omega_1)^2 + v_i^2} \right] - j \left[\frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot v_i \cdot \frac{1}{(w + n\Omega_1)^2 + v_i^2} + \frac{\delta_2 F}{w\varepsilon_0} \right] \right\}.
\end{aligned} \right. \quad (10)$$

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 , n – период, частота импульса и номер гармоники, $\Omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot F_1$,

$i = 1$ для электронов, $i = 2$ для ионов. Представляет интерес анализ частотных характеристик комбинационных составляющих

$$\begin{aligned}
\dot{\mathcal{E}}_R(\omega) &= \dot{\mathcal{E}}_1 + \dot{\mathcal{E}}_2 = \text{Re } \mathcal{E}_R + j \text{Im } \mathcal{E}_R \\
\dot{\mathcal{E}}_L(\omega) &= \dot{\mathcal{E}}_1 - \dot{\mathcal{E}}_2 = \text{Re } \mathcal{E}_L + j \text{Im } \mathcal{E}_L.
\end{aligned} \quad (11)$$

Результаты исследований

Проведен частотный анализ выражений (11) для частот радиоимпульса 10^5 Гц (рис.1,2) и 10^6 Гц (рис.3,4).

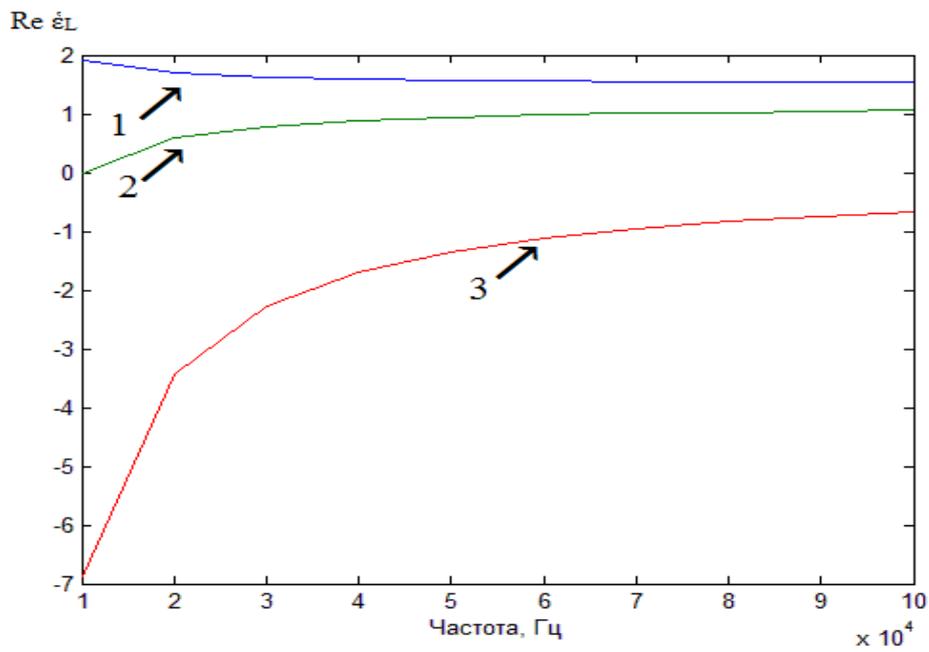


Рисунок 1 – Зависимости $\text{Re } \hat{\epsilon}_L = \Psi(f)$: 1 – для $\epsilon_r = 25$; 2 – для $\epsilon_r = 20$; 3 – для $\epsilon_r = 2$.

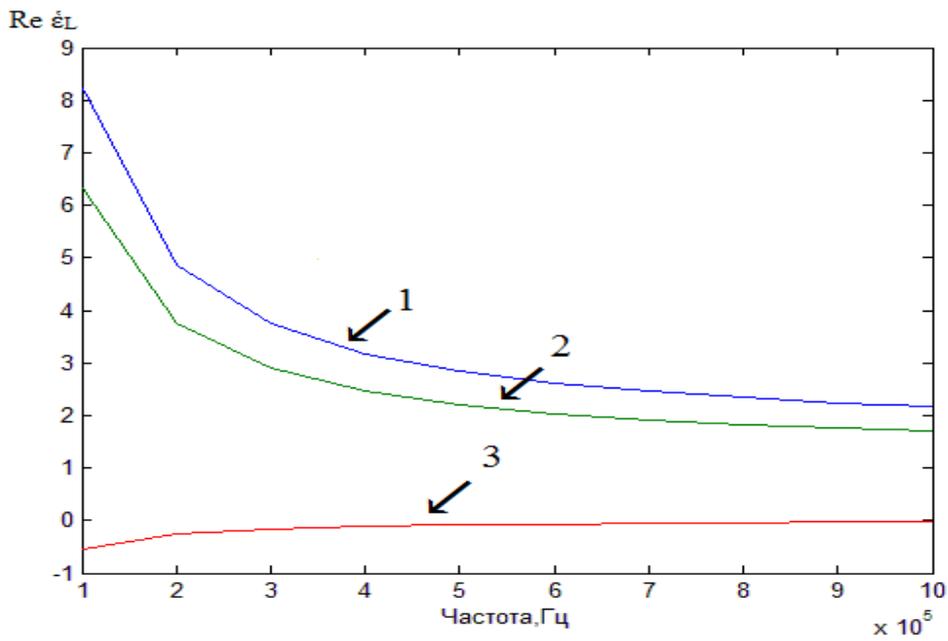


Рисунок 2 – Зависимости $\text{Re } \hat{\epsilon}_L = \Psi(f)$: 1 – для $\epsilon_r = 25$; 2 – для $\epsilon_r = 20$; 3 – для ϵ_r

= 2

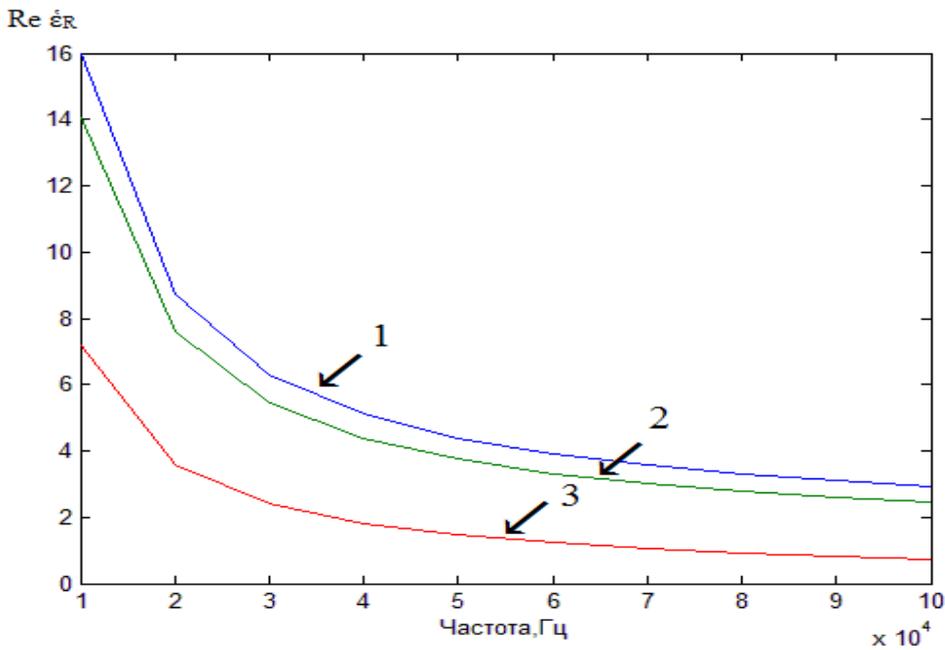


Рисунок 3 – Зависимости $\text{Re } \hat{\epsilon}_R = \psi(f)$: 1 – для $\epsilon_r = 25$; 2 – для $\epsilon_r = 20$; 3 – для $\epsilon_r = 2$.

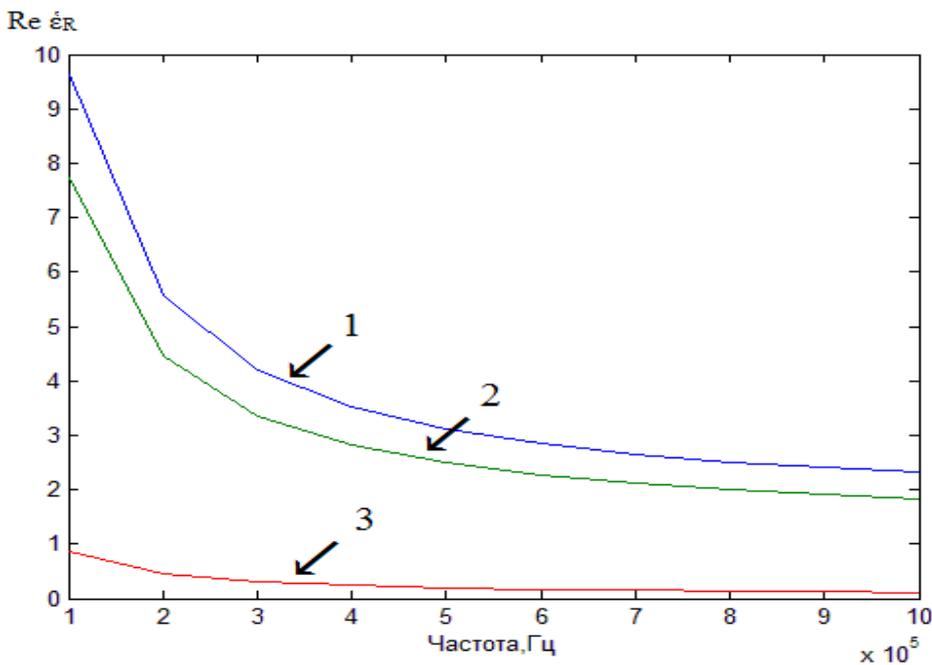


Рисунок 4 – Зависимости $\text{Re } \hat{\epsilon}_R = \psi(f)$: 1 – для $\epsilon_r = 25$; 2 – для $\epsilon_r = 20$; 3 – для $\epsilon_r = 2$.

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 $N_e = N_n = 10^{16} \text{ м}^{-3}$; 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 частот радиоимпульсных сигналов $F_{и} = (10^5 - 10^6)$ 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 может быть использовано для разработки методов электромагнитной разведки, поиска и идентификации УВЗ, поскольку при изменении диэлектрической проницаемости среды происходит изменение комбинационной составляющей с изменением знака разностной компоненты. Исследование процессов распространения ЭМВ вблизи точки перехода диэлектрической проницаемости через нуль связано с аномальным поведением напряженности электрического поля, различными резонансными эффектами и может быть применено для поиска и идентификации УВЗ [11].

При $F_{и} = 10^5$ Гц для низких значений диэлектрической проницаемости среды свойственны отрицательные значения разностной компоненты $Re \epsilon_L$. Для высоких значений диэлектрической проницаемости среды наблюдаются положительные величины разностной компоненты. Применение для зондирования частоты импульса $F_{и} = 10^6$ Гц приводит к противоположному характеру изменения разностной компоненты при высоких значениях диэлектрической проницаемости среды. Для низких значений диэлектрической проницаемости среды диапазон изменения менее выражен по сравнению с предыдущим случаем.

Распространение ЭМВ с правой поляризацией при применении частот радиоимпульсных сигналов $F_{и} = (10^5 - 10^6)$ Гц 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 определение диэлектрической проницаемости, удельной проводимости среды и глубины слоя основано на измерении времени запаздывания отраженного сигнала, 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.

Заключение

Проведен анализ взаимодействия анизотропного слоя плазмopodobного типа с ЭМВ в режиме радиоимпульсных сигналов. Выведен тензор диэлектрической проницаемости АС над УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов. Результаты исследования могут быть исследованы 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, диэлектрических проницаемостей и удельных проводимостей 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;

– распространение ЭМВ с левой поляризацией при изменении диэлектрической проницаемости 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.

– ЭММ поиска и идентификации углеводородов могут быть усовершенствованы за счет получения информации об объектах не по одному или двум информационным каналам, а по большему их числу, что позволяет с

достаточно высоким уровнем достоверности выделять их границы на фоне подстилающей среды.

– по сравнению с существующими аналогами данный способ обнаружения УВЗ основывается на определении комбинационных составляющих тензора диэлектрической проницаемости среды для правой и левой поляризаций ЭМВ в режиме радиоимпульсных сигналов, построении двухканальной измерительной системы, позволяющей повысить точность определения границ углеводородов.

Библиографический список

1. Гололобов Д.В., Катлеров П.М. Электродинамические методы поиска и оконтуривания углеводородных залежей // Доклады БГУИР. Минск. 2004. № 2(6). С. 117–129.
2. Москвичев В.Н. Исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью // Радиотехника и электроника. 1989. № 18. С. 91-96.
3. Гололобов Д.В., Калинин С.В., Янушкевич В.Ф. Поверхностный импеданс среды над углеводородными залежами в режиме частотно-модулированных сигналов // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия: Физико-технические науки. 2010. № 4. С. 98 – 101.
4. Asch T. and Morrison. Mapping and monitoring electrical resistivity with surface and surface electrode arrays // Geophysics, 1989. no. 54, pp. 235-244.
5. Moskvichew V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line // 9-th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20-22 1991, vol. 1, pp. 240-244.

6. Huang R.H., Dyl. I.Z. Low temperature (-80 C) thermionic electron emission from alkalides and electrides // Chemical Physics Letters. 1990. Vol. 166, no. 2, pp. 133 – 136.
7. Levashov S.P. Electric-resonance sounding method and its application for, geological-geophysical and engineering-geological investigations // 66nd EAGE Conference and Technical Exhibition, Paris, France, 7–10 June 2003, (CD-ROM Abstracts volume).
8. Adamovskiy E., Yanushkevich V. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits // 8 Junior researchers conference European and national dimension in research. In 3 Parts. Part 3. TECHNOLOGY. PSU, Novopolotsk, 2016, pp. 179 – 183.
9. Янушкевич В.Ф., Кременя К.И., Иванов М.М., Молодечкина Т.В. Взаимодействие электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов // Вестник Полоцкого государственного университета. 2016. №12. С. 45 - 50.
10. Иванова К.И., Янушкевич В.Ф. Способ геоэлектроразведки углеводородной залежи с использованием радиоимпульсных сигналов // Материалы XV Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире», Санкт-Петербург, 4 октября 2016. Т.1. С.107 – 111.
11. Васильев И.С., Козлов И.П. Распространение электромагнитной волны в плоскостром диэлектрике вблизи нуля диэлектрической проницаемости // Труды МАИ. 2010. № 41. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=23785>
12. Копейкин В.В. Обратная задача георадиолокации. URL: <http://www.geo-radar.ru/articles/article4.php>