

УДК 621.371: 550.837.6

DOI 10.52928/2070-1624-2022-39-11-89-98

МЕТОДЫ ПОИСКА И ОКОНТУРИВАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛИРОВАННЫХ И РАДИОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

канд. техн. наук, доц. В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Исследованы характеристики анизотропной среды над углеводородами с использованием модулированных и радиоимпульсных сигналов. Проведено моделирование компонент поверхностного импеданса среды над углеводородными залежами в режиме амплитудно-частотно-модулированных сигналов и вещественных составляющих тензора диэлектрической проницаемости в режиме радиоимпульсных сигналов. Акцентировано внимание на применение радиокомплексирования электромагнитных методов при увеличении количества информационных каналов. Исследовано влияние режимов зондирующих сигналов на характеристики анизотропной среды над залежами и компоненты тензора диэлектрической проницаемости. Предложены методы и способы геоэлектроразведки углеводородных залежей.

Ключевые слова: электромагнитные методы, углеводородная залежь, тензор диэлектрической проницаемости.

Введение. В настоящее время в поисковой геофизике при поиске углеводородных залежей (УВЗ) предпочтение отдается внедрению электромагнитных методов (ЭММ) георазведки [1–3]. При обнаружении углеводородов (нефти и газа) используется метод интегральных уравнений для трехмерной анизотропной инверсии электромагнитных данных, собранных системой с буксируемой косой и одновременной регистрацией сейсмических и электромагнитных данных [4]. Применение широкополосных магнитотеллурических данных естественного поля позволило улучшить определение контрастов удельного сопротивления с окружающими породами и визуализацию верхней части солевых пластов [5]. Геофизические методы исследования широко применяются на практике [6]. Использование вертикальных диполей с помощью CSEM методов позволяет разрабатывать аппаратуру с новыми методиками испытаний [7]. Результаты комплексного анализа материалов геофизических и гидродинамических исследований являются надежной основой эффективного использования промысловой геофизики для подсчета запасов и разработки месторождений [8].

Внедряются системы со структурой, подобной сейсмической аппаратуре с совмещением регистрации электромагнитных и микросейсмических данных в одном блоке [9]. Особенности режимов с применением модулированных сигналов позволяют повысить информативность ЭММ [10]. Современный этап проведения геолого-разведочных работ при поиске УВЗ характеризуется усложнением горно-геологических и природно-климатических условий их проведения [11]. Глубина исследований может достигать 15...16 км¹. Вертикально-вертикальный ЭММ с контролируемым источником является альтернативой другим методам получения трехмерных изображений удельного сопротивления недр. Он использует мощный вертикальный дипольный передатчик и комплекты приемников электрического поля с вертикальными и горизонтальными дипольными датчиками [12]. Использование дистанционных технологий поиска полезных ископаемых на основе установленного собственного изучения углеводородов [13] актуально для повышения производительности геолого-разведочных работ. Режимы зондирования в каждом конкретном способе георазведки основаны на особенностях проявления электродинамических откликов сред над УВЗ² [14; 15]. Установлено, что использование частотно-модулированных и амплитудно-частотно-модулированных сигналов позволяет повысить информативность методов поиска УВЗ за счет следующих эффектов: составляющие тензоров диэлектрической проницаемости сред над углеводородами имеют функциональную зависимость от характеристик сигналов и имеется отличие условий распространения электромагнитных волн (ЭМВ) над исследуемой анизотропной средой (АС) в различных режимах [16; 17].

Комплексное применение методов поиска выделения границ залежей углеводородов является одним из направлений современных высокоэффективных ЭММ [18] поисковой геофизики.

Методы поиска с использованием модулированных и радиоимпульсных сигналов. Цель данной работы заключается в установлении дополнительных закономерностей физико-химических процессов

¹ Способ и устройство для геофизических исследований путем обнаружения неоднородностей с использованием электромагнитных полей с экстремально низкими частотами : пат. US 5777478 / J. R. Jackson [et al.]. – Оpubл. 07.07.1998.

² Способ радиоволнового зондирования и устройство для его осуществления / В. К. Томилиг, Г. П. Астафьев, В. И. Луконин : пат. RU 2152060. – Оpubл. 27.06.2000.

в анизотропных средах над УВЗ с помощью радиокомплексирования ЭММ георазведки на основе применения модулированных и радиоимпульсных сигналов.

При одночастотной гармонической модуляции амплитуды и частоты радиосигнал имеет вид

$$e(t) = E_{\omega} (1 + k_m \cos \Omega t) \cos [\omega t + \beta \cdot \cos \Omega t], \quad (1)$$

где E_{ω} – амплитуда сигнала несущей частоты ω ;

k_m, β – соответственно коэффициент амплитудной модуляции и индекс частотной модуляции.

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= \varepsilon_r (1 - k_m^2 \sin^2 \Omega \cdot t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_4}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} + j \left[\frac{\varepsilon_r \beta \cdot k_m \sin \Omega \cdot t}{1 + \beta \cdot \cos \Omega \cdot t} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{\sigma_r}{\omega \varepsilon_0} - \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega} \frac{\tilde{\omega}_4^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} \right] \right\}, \\ \dot{\varepsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} - \frac{2j \tilde{\omega}_4 v_i \omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega [(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2]} \right\}, \\ \dot{\varepsilon}_3 &= \varepsilon_r (1 - k_m^2 \sin^2 \Omega \cdot t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_4}{\omega} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_4^2} + j \left[\frac{\varepsilon_r \beta \cdot k_m \sin \Omega \cdot t}{1 + \beta \cdot \cos \Omega \cdot t} - \frac{\sigma_r}{\omega \varepsilon_0} - \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega} \frac{1}{\tilde{\omega}_4^2 + v_i^2} \right] \right\}, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

при этом

$$\tilde{\omega}_4 = \omega [1 - k_m^2 \sin^2 \Omega t]. \quad (3)$$

Был проведен расчет компонент матрицы поверхностного импеданса анизотропной среды над УВЗ:

$$\dot{Z} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Компоненты матрицы (4) определяются по формулам

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} &= -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\varepsilon}_R \dot{\varepsilon}_L}} (\sqrt{\dot{\varepsilon}_R} - \sqrt{\dot{\varepsilon}_L}); \\ \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} &= \frac{1}{2\sqrt{\dot{\varepsilon}_R \dot{\varepsilon}_L}} (\sqrt{\dot{\varepsilon}_R} + \sqrt{\dot{\varepsilon}_L}). \end{aligned} \quad (5)$$

Представляет интерес анализ частотных характеристик комбинационных составляющих

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_R &= \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 = \operatorname{Re} \dot{\varepsilon}_R + j \operatorname{Im} \dot{\varepsilon}_R; \\ \dot{\varepsilon}_L &= \dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2 = \operatorname{Re} \dot{\varepsilon}_L + j \operatorname{Im} \dot{\varepsilon}_L. \end{aligned} \quad (6)$$

Рассмотрим воздействие ЭМВ на УВЗ радиоимпульсным сигналом вида

$$A(f) = \frac{U \cdot \tau}{2} \cdot \frac{\sin \frac{(2 \cdot \pi \cdot f - 2 \cdot \pi \cdot F_2) \cdot \tau}{2}}{(2 \cdot \pi \cdot f - 2 \cdot \pi \cdot F_2) \cdot \tau} + \frac{\sin \frac{(2 \cdot \pi \cdot f + 2 \cdot \pi \cdot F_2) \cdot \tau}{2}}{(2 \cdot \pi \cdot f + 2 \cdot \pi \cdot F_2) \cdot \tau}, \quad (7)$$

где U – амплитуда сигнала;

f – частота сигнала;

F_2 – частота несущего сигнала;

τ – длительность импульса.

Значение

$$F = \frac{\tau}{T} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau)}{\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau}, \quad (8)$$

где T – период,

F_1 – частота следования импульсов;

n – количество гармоник спектра радиоимпульсного сигнала.

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости для такого режима взаимодействия имеют следующий вид [14]:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r \cdot F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{\omega}\right) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} &\frac{F \cdot \omega_{\Gamma i}^2}{\omega} \cdot \frac{(\omega + n\Omega_1) \cdot [\omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2 - v_i^2]}{[v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2]^2 + 4(\omega + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ &-jF \left[\frac{\omega_{\Gamma i}^2}{\omega} \cdot v_i \cdot \frac{(\omega + n\Omega_1)^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{[v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2]^2 + 4(\omega + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} + \frac{\delta_r F}{\omega \epsilon_0} \right] \end{aligned} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} &\frac{\omega_{\Gamma i}^2}{\omega} \cdot F \cdot \omega_{\Gamma i} \cdot \frac{v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2}{[v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2]^2 + 4(\omega + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ &-2j \frac{\omega_{\Gamma i}^2}{\omega} \cdot F \cdot \omega_{\Gamma i} \cdot v_i \cdot \frac{\omega + n\Omega_1}{[v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2]^2 + 4(\omega + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} \end{aligned} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_3 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{\omega}\right) \cdot \left[\epsilon_r - \frac{\omega_{\Gamma i}^2}{\omega} \cdot \frac{1}{(\omega + n\Omega_1)^2 + v_i^2} \right] - j \left[\frac{\omega_{\Gamma i}^2}{\omega} \cdot F \cdot v_i \cdot \frac{1}{(\omega + n\Omega_1)^2 + v_i^2} + \frac{\delta_r F}{\omega \epsilon_0} \right] \right\}, \end{aligned} \right. \quad (9)$$

где Ω_1 – круговая частота следования импульсов.

Проведено моделирование для параметров среды над залежами углеводородов [1]: значения диэлектрической проницаемости вмещающих пород $\epsilon_r = 1 - 30$ и электрической проводимости $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-3}$ См/м; частота столкновения частиц $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$ рад/с, концентрации частиц $N_e = N_n = (10^{16} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$.

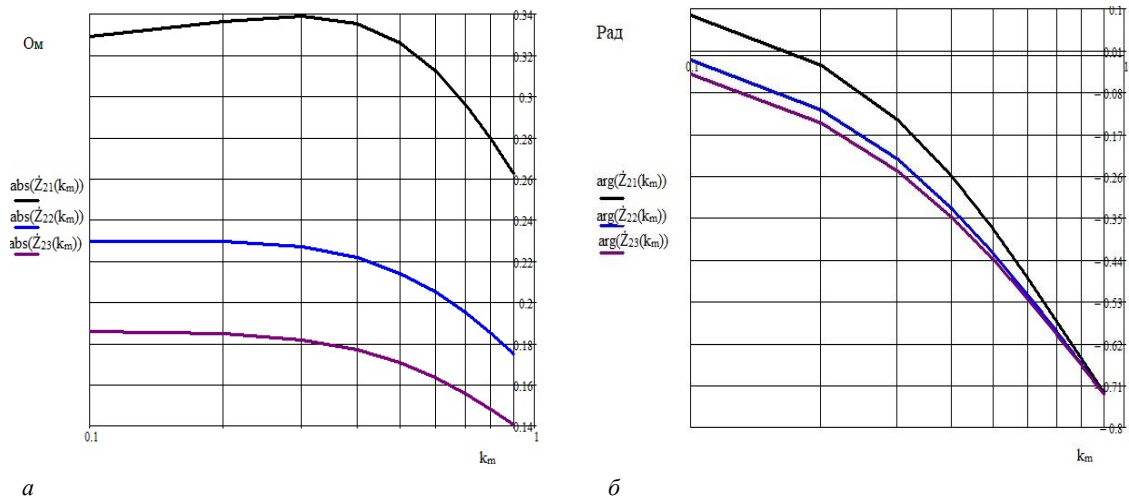
Проведено исследование влияния режимов зондирующих сигналов на характеристики анизотропной среды над залежами с учетом геомагнитной аномалии, физико-химической обстановки над УВЗ и изменения компонент тензора диэлектрической проницаемости.

Результаты исследований. Проведен анализ выражений (5) для компонент поверхностного импеданса среды над УВЗ в зависимости от коэффициента амплитудной модуляции. Абсолютные и фазовые значения для компонент поверхностного импеданса среды над УВЗ Z_{21} показаны на рисунке 1. С увеличением коэффициента амплитудной модуляции более 0,3 происходит уменьшение данной компоненты поверхностного импеданса. С уменьшением диэлектрической проницаемости наполнителя вмещающих пород значение этой компоненты поверхностного импеданса увеличивается, а ее фазовые характеристики с увеличением коэффициента амплитудной модуляции уменьшаются, причем диэлектрическая проницаемость при больших значениях не влияет на фазу. Дополнительно проводились экспериментальные исследования в диапазоне (1 – 3) ГГц, для реализации способа разработаны антенны в виде решетки спиральных излучателей. Результаты показали, что точность определения границ УВЗ можно повысить на (10 – 15)%.

Абсолютные и фазовые значения для компонент поверхностного импеданса среды над УВЗ Z_{11} в зависимости от индекса модуляции приведены на рисунке 2. Характерно резонансное поведение модуля данной составляющей поверхностного импеданса. С ростом диэлектрической проницаемости наполнителя вмещающих пород величина модуля уменьшается. Наиболее информативны значения индексов модуляции 3–10, когда наблюдаются максимумы поверхностного импеданса исследуемых сред. На фазовые характеристики данной составляющей поверхностного импеданса влияет диапазон индексов модуляции 1 – 10, когда наблюдается рост фазы поверхностного импеданса исследуемых АС.

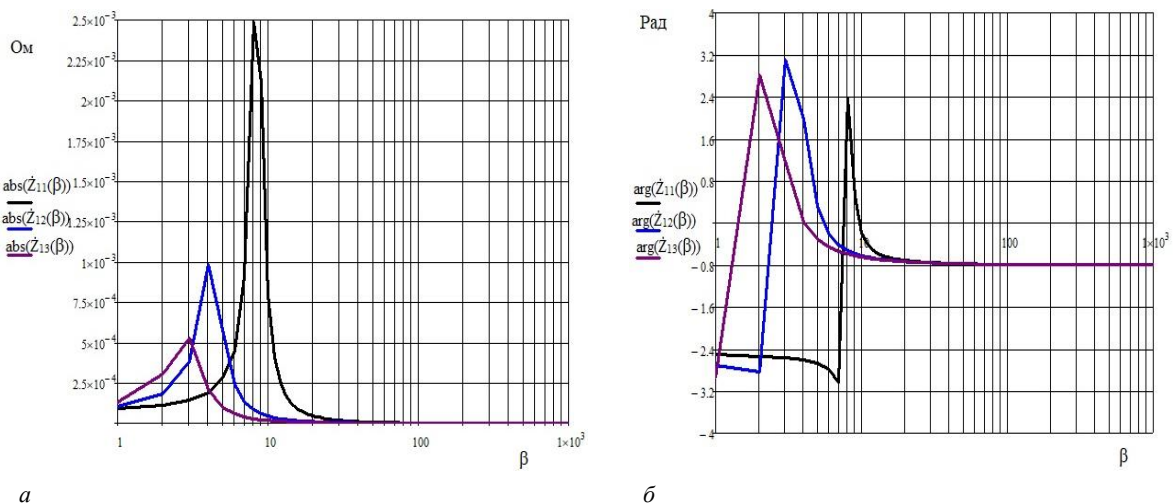
Проведено моделирование зависимостей компонент поверхностного импеданса Z_{21} от индекса модуляции (рисунок 3).

Установлено, что на модуль оказывают наибольшее влияние значения индексов модуляции 3–10, когда происходит резонансное увеличение поверхностного импеданса. Меньшим значениям диэлектрической проницаемости соответствуют большие значения поверхностного импеданса. Фаза данной составляющей поверхностного импеданса наиболее подвержена влиянию значения индексов модуляции в диапазоне 1–10, когда наблюдается резкое уменьшение фазы поверхностного импеданса с изменением знака сопротивления.



$a - |\dot{Z}_{21}(k_m)|$ для $\varepsilon_r = 10, \beta = 1, f = 10^7$ Гц, $|\dot{Z}_{22}(k_m)|$ для $\varepsilon_r = 20, \beta = 1, f = 10^7$ Гц,
 $|\dot{Z}_{23}(k_m)|$ для $\varepsilon_r = 30, \beta = 1, f = 10^7$ Гц; $b - \arg(\dot{Z}_{21}(k_m))$ для $\varepsilon_r = 10, \beta = 1, f = 10^7$ Гц,
 $\arg(\dot{Z}_{22}(k_m))$ для $\varepsilon_r = 20, \beta = 1, f = 10^7$ Гц, $\arg(\dot{Z}_{23}(k_m))$ для $\varepsilon_r = 30, \beta = 1, f = 10^7$ Гц

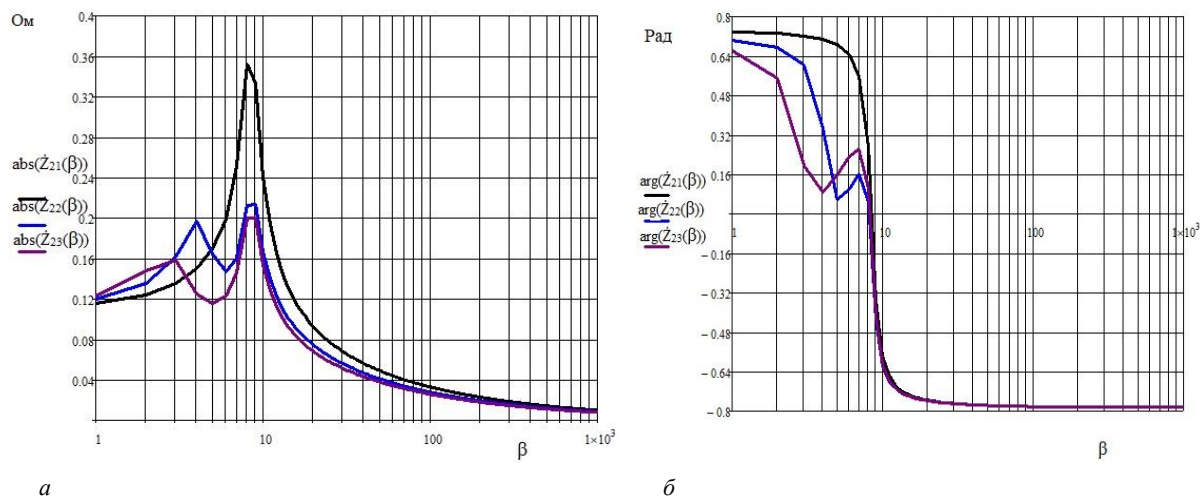
Рисунок 1. – Зависимости абсолютной и фазовой составляющих компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} от коэффициента амплитудной модуляции



$a - |\dot{Z}_{11}(\beta)|$ для $\varepsilon_r = 10, k_m = 0,5, f = 10^7$ Гц, $|\dot{Z}_{12}(\beta)|$ для $\varepsilon_r = 20, k_m = 0,5, f = 10^7$ Гц,
 $|\dot{Z}_{13}(\beta)|$ для $\varepsilon_r = 30, k_m = 0,5, f = 10^7$ Гц;
 $b - \arg(\dot{Z}_{11}(\beta))$ для $\varepsilon_r = 10, k_m = 0,5, f = 10^7$ Гц, $\arg(\dot{Z}_{12}(\beta))$ для $\varepsilon_r = 20, k_m = 0,5, f = 10^7$ Гц,
 $\arg(\dot{Z}_{13}(\beta))$ для $\varepsilon_r = 30, k_m = 0,5, f = 10^7$ Гц

Рисунок 2. – Зависимости абсолютной и фазовой составляющих компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} от индекса модуляции

Такое поведение характеристик поверхностного импеданса связано с наличием над залежью потока заряженных частиц, перемещающихся в полифазной среде от УВЗ к дневной поверхности, причем поток частиц вызывает проявление геомагнитных аномалий за счет сложения магнитного поля Земли и отрицательного магнитного поля перемещающихся заряженных частиц. Изменение геомагнитного поля приводит к изменению удельного сопротивления вмещающих пород над УВЗ и свидетельствует об анизотропном характере среды над УВЗ, присущем плазменным и плазмоподобным образованиям [1].



а – $|\dot{Z}_{21}(\beta)|$ для $\epsilon_r = 10, k_m = 0,5, f = 10^7$ Гц, $|\dot{Z}_{22}(\beta)|$ для $\epsilon_r = 20, k_m = 0,5, f = 10^7$ Гц,
 $|\dot{Z}_{23}(\beta)|$ для $\epsilon_r = 30, k_m = 0,5, f = 10^7$ Гц;
б – $\arg \dot{Z}_{21}(\beta)$ для $\epsilon_r = 10, k_m = 0,5, f = 10^7$ Гц, $\arg \dot{Z}_{22}(\beta)$ для $\epsilon_r = 20, k_m = 0,5, f = 10^7$ Гц,
 $\arg \dot{Z}_{23}(\beta)$ для $\epsilon_r = 30, k_m = 0,5, f = 10^7$ Гц

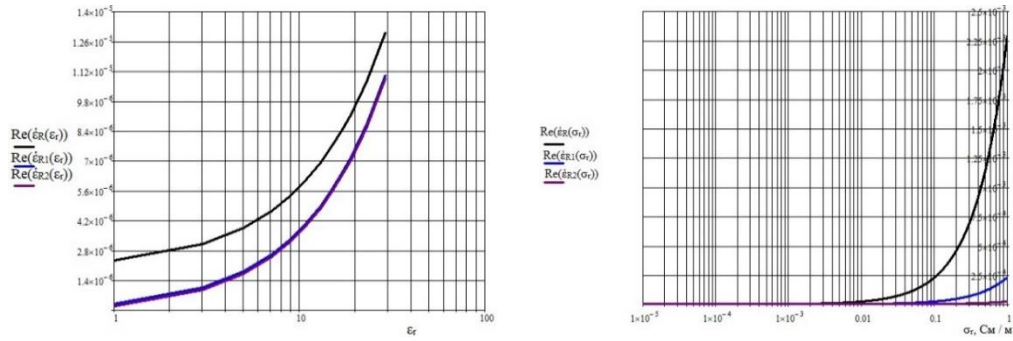
Рисунок 3. – Зависимости абсолютной части компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} от индекса модуляции

Особенности строения геологических профилей местности и их идентификационные характеристики устанавливаются по отличию литолого-физических свойств пластов осадочного чехла от подстилающих и перекрывающих пород (наличие глины в известняковых пластах и т. д.). При этом участки с повышенным импедансом в структуре пород указывают о присутствии месторождений углеводородов.

Проведено моделирование зависимостей вещественных составляющих суммарной компоненты тензора диэлектрической проницаемости от диэлектрической проницаемости наполнителя (рисунок 4, а). Установлено, что вещественные значения комбинационной составляющей для тензора диэлектрической проницаемости ЭМВ с правой поляризацией возрастают с ростом диэлектрической проницаемости, причем с увеличением частоты радиоимпульса наблюдается уменьшение данной компоненты. Значительный вклад в величину диэлектрической проницаемости наполнителя вносит влажность грунтов W , которая для песков и суглинков, осадочных пород и сред с большой влажностью имеет существенные отличия. Об этом свидетельствуют многочисленные экспериментальные исследования, подтверждающие сильное влияние влагосодержания сред на диэлектрическую проницаемость [6].

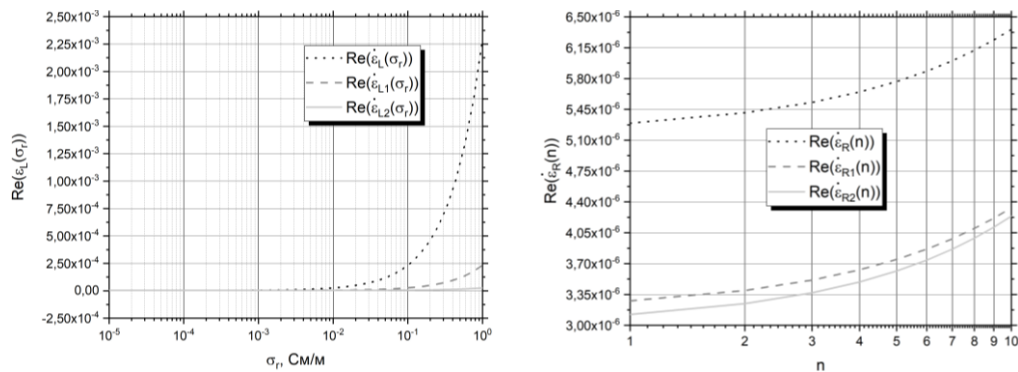
Проведено моделирование зависимостей вещественных составляющих компонент диэлектрической проницаемости от проводимости (рисунок 4, б; рисунок 5, а). На данную составляющую компонент диэлектрической проницаемости проводимость среды оказывает основное воздействие в диапазоне (0,01 – 1) См/м. При этом данная компонента резко увеличивается. Установлено, что на нее оказывают большее влияние низкие значения частоты радиоимпульса. Однако это приводит к недостатку данного метода – низкой разрешающей способности, хотя появляется неоспоримое преимущество – большая глубинность исследования при применении метрового и дециметрового диапазонов волн.

Установлено, что вещественные значения комбинационной составляющей для тензора диэлектрической проницаемости ЭМВ с правой и левой поляризациями (рисунки 5, б; 6, а) возрастают с ростом количества гармоник спектра радиоимпульсного сигнала, причем с увеличением частоты радиоимпульса наблюдается уменьшение данной компоненты. Для концентраций частиц $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$ закономерности изменения характеристик отличаются численными значениями (рисунок 6, б).



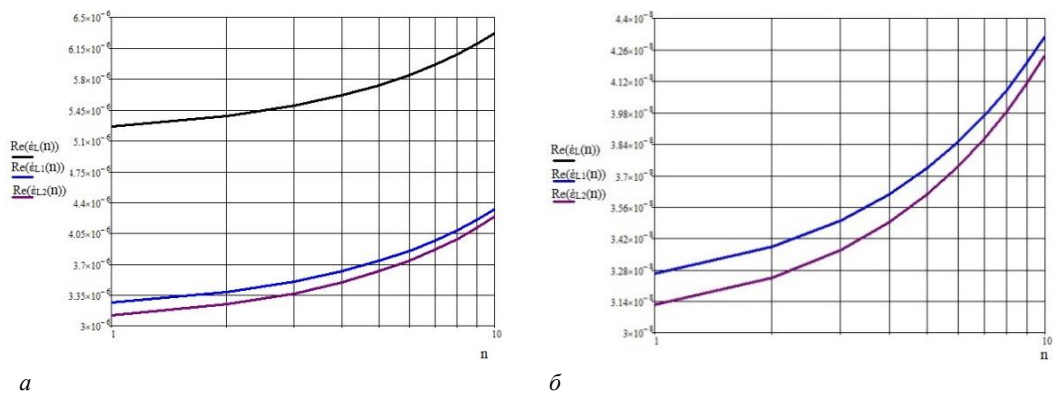
а – при $T = 2\tau$ $\text{Re}(\dot{\epsilon}_R(\epsilon_r))$ для $F_2 = 10^6$ Гц, $n = 5$, $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R1}(\epsilon_r))$ для $F_2 = 10^7$ Гц, $n = 5$, $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R2}(\epsilon_r))$ для $F_2 = 10^8$ Гц, $n = 5$;
б – при $T = 5\tau$ $\text{arg}(\dot{\epsilon}_R(\epsilon_r))$ для $F_2 = 10^6$ Гц, $n = 5$, $\text{arg}(\dot{\epsilon}_{R1}(\epsilon_r))$ для $F_2 = 10^7$ Гц, $n = 5$, $\text{arg}(\dot{\epsilon}_{R2}(\epsilon_r))$ для $F_2 = 10^8$ Гц, $n = 5$

Рисунок 4. – Зависимости вещественных составляющих суммарной компоненты тензора



а – $\text{Re}(\dot{\epsilon}_L(\sigma_r))$ для $F_2 = 10^6$ Гц, $n = 5$, $\epsilon_r = 10$, $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{L1}(\sigma_r))$ для $F_2 = 10^7$ Гц, $n = 5$, $\epsilon_r = 10$, $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{L2}(\sigma_r))$ для $F_2 = 10^8$ Гц, $n = 5$, $\epsilon_r = 10$;
б – $\text{Re}(\dot{\epsilon}_R(n))$ для $F_2 = 10^6$ Гц, $\epsilon_r = 10$, $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R1}(n))$ для $F_2 = 10^7$ Гц, $\epsilon_r = 10$, $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R2}(n))$ для $F_2 = 10^8$ Гц, $\epsilon_r = 10$

Рисунок 5. – Зависимости вещественных составляющих разностной и суммарной компонент тензора для $T = 2\tau$



а – для $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_2 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$; **б** – для $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_L(n))$ для $F_2 = 10^6$ Гц, $n = 5$, $\epsilon_r = 10$, $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{L1}(n))$ для $F_2 = 10^6$ Гц, $n = 5$, $\epsilon_r = 10$, $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{L2}(n))$ для $F_2 = 10^6$ Гц, $n = 5$, $\epsilon_r = 10$

Рисунок 6. – Зависимости вещественных составляющих суммарной компоненты тензора от количества гармоник

Для повышения точности и достоверности определения границ УВЗ следует рекомендовать радиокомплексирование указанных ЭММ при увеличении количества информационных каналов.

Таким образом, в ходе проведенного исследования:

- 1) предложен способ геоэлектроразведки углеводородных залежей в режиме радиоимпульсных сигналов с частотой 100 кГц, позволяющий измерять глубины залегания углеводородов до 500 м;
- 2) разработаны антенны для способа геоэлектроразведки углеводородных залежей в режиме амплитудно-модулированных сигналов с несущей частотой в диапазоне (1 – 3) ГГц, представляющие собой решетки спиральных излучателей;
- 3) апробирован способ геоэлектроразведки углеводородных залежей, основанный на измерении напряженности электрического поля на трех измерительных каналах в диапазоне частот (1 – 10) МГц, (10 – 20) МГц, (20 – 30) МГц.

Заключение

1. Впервые получены общие выражения компонент тензоров диэлектрической проницаемости АС над УВЗ при воздействии двухчастотных, модулированных и радиоимпульсных сигналов, позволяющие установить закономерности физико-химических процессов в анизотропных средах над углеводородными залежами при изменении значения диэлектрической проницаемости вмещающих пород 1 – 30 и электрической проводимости $1 \cdot 10^{-5} - 1$ См/м, концентрации частиц $N_e = N_n = (10^{15} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$, частоте столкновения частиц $\nu = 1 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{10}$ рад/с.

2. Установлены закономерности дисперсии тензоров диэлектрической проницаемости среды и изменения компонент поверхностного импеданса над УВЗ для режима ЧМ взаимодействия, на основе которых при значениях диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_r = 8 - 20$, электрической проводимости $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, частоте столкновения частиц $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$ рад/с определены частоты электронного циклотронного резонанса, соответствующие значениям (15 – 20) кГц, электронного плазменного резонанса, равные (8 – 20) МГц при концентрациях частиц $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и $N_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, установлены резонансное увеличение компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} на частотах (10 – 400) МГц, увеличение составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} на участке (1 МГц – 1 ГГц) при концентрациях частиц $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и $N_i = 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

3. Определены закономерности дисперсии тензоров диэлектрической проницаемости среды и изменения компонент поверхностного импеданса над УВЗ для режима АЧМ взаимодействия, на основе которых при значениях диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_r = 5 - 25$, электрической проводимости $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, частоте столкновения частиц $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$ рад/с установлены частоты электронного циклотронного резонанса, равные (20 – 40) кГц, частоты электронного плазменного резонанса, соответствующие (6 – 30) МГц, при концентрациях частиц $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и $N_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, установлены резонансное увеличение компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} на частотах (10 – 400) МГц, увеличение составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} на участке (1 МГц – 1 ГГц) при концентрациях частиц $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и $N_i = 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

4. Установлены закономерности дисперсии тензоров диэлектрической проницаемости среды и изменения компонент поверхностного импеданса над УВЗ в режиме радиоимпульсного сигнала, на основе которых при значениях диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_r = 10 - 20$, электрической проводимости $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, частоте столкновения частиц $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$ рад/с определены частоты электронного циклотронного резонанса, равные (70 – 90) кГц, частоты электронного плазменного резонанса, соответствующие 800 кГц – 1,5 МГц, при концентрациях частиц $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и $N_n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, установлены резонансное увеличение компоненты поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} на частотах (10 – 400) МГц, увеличение составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} на участке (1 МГц – 1 ГГц) при концентрациях частиц $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и $N_i = 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

5. Предложены методы и способы геоэлектроразведки углеводородных залежей (таблица).

Таблица. – Методы и способы геоэлектроразведки углеводородных залежей

Методы и способы	Частоты, МГц	Точность определения границ, м	Уровень идентификации, %	Возможность использования транспортного средства
1. Способ регистрации естественного излучения УВЗ	8500	30...50	90	+
2. Метод регистрации границ УВЗ по аномальным изменениям поля на двух частотах	$f_1 = 1...10$; $f_2 = 10...100$	10...30	95	+
3. Метод использования акустического сигнала	0,0001; 50	50...80	85	–
4. Метод использования модулированных сигналов	$F1 = 1...10$; $f_2 = 10...100$	30...50	90	+
5. Метод использования измерений импеданса антенн	$f_1 = 10000$; $f_2 = 34000$	40...60	85	+
6. Метод измерения диаграммы направленности	0,001...0,003; 1...50	60...80	80	–
7. Способ измерения фазовых характеристик в режиме АМ-сигнала	$f_1 = 1000...5000$; $F2 = 10...100$	35...55	85	+
8. Способ измерения фазовых характеристик поверхностного импеданса в режиме АЧМ-сигнала	$f_1 = 100...2000$; $F2 = 10...100$	30...50	90	+
9. Способ исследования отражательных характеристик	$f_1 = 1...10$; $f_2 = 10...100$	30...50	90	+
10. Способ исследования отражательных характеристик в режиме мощного НЧ-сигнала	$f_1 = 1...10$; $f_2 = 10...300$	20...40	90	–
11. Способ исследования отражательных характеристик в режиме мощного ВЧ-сигнала	$f_1 = 1...10$; $f_2 = 10...300$	20...40	90	–
12. Метод использования радиоимпульсного сигнала	20...35, 0,9–6	5...20	95	+
13. Способ геоэлектроразведки углеводородных залежей, основанный на измерении напряженности электрического поля на трех измерительных каналах	1 – 10, 10 – 20, 20 – 30	5...10	95	+

ЛИТЕРАТУРА

1. Moskvichew, V. N. Interaction 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.
2. Effect of a powerful low-frequency signal on an anisotropic medium over hydrocarbon / V. F. Yanushkevich [et al.] // J. of Physics : Conference Series. – 2021. – Vol. 1889. – DOI: [10.1088/1742-6596/1889/2/022059](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/2/022059).
3. Гололобов, Д. В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д. В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
4. 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.
5. Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic) / C. H. Henke [et al.] // Interpretatio. – 2020. – Vol. 8. – № 4. – P. 15–24.
6. Геофизические методы исследования : учеб. пособие для геологических специальностей вузов / В. К. Хмелевской [и др.]. – Петропавловск-Камчатский : КГПУ, 2004. – 227 с.
7. Time lapse CSEM reservoir monitoring of the Norne field with vertical dipoles / T. Holten [et al.] // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2016. – Vol. 35. – P. 971–975.
8. Косков, В. Н. Геофизические исследования скважин : учеб. пособие / В.Н. Косков. – Пермь : Перм. гос. техн. ун-т. – 2004. – 122 с.
9. Geldmacher, I. A Fit-for-purpose electromagnetic System for Reservoir Monitoring and Geothermal Exploration / I. Geldmacher, K. Strack // GRC Transactions. – 2017. – Vol. 41. – P. 1649–1658.
10. Гололобов, Д. В. Взаимодействие АМ-сигнала с углеводородной залежью / Д. В. Гололобов, В. Ф. Янушкевич // Современные проблемы радиотехники, электроники и связи : тез. докл. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию радио, Минск, 1995 г. / Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 1995. – С. 6–7.
11. Бурцев, М. И. Поиски и разведка месторождений нефти и газа / М. И. Бурцев – М. : Рос. ун-т дружбы народов. – 2006. – 264 с.

12. Helwig, S. L. Vertical–vertical controlled-source electromagnetic instrumentation and acquisition / S. L. Helwig, W. Wood, B. Gloux // *Geophysical Prospecting*. – 2019. – Vol. 67. – № 6. – P. 1582–1594.
13. Райлян, И. Г. Новая российская спутниковая технология поиска местоположений нефти, газа и других полезных ископаемых / И. Г. Райлян // *Нефть, газ и бизнес*. – 2002. – № 6. – С. 20.
14. Янушкевич, В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В. Ф. Янушкевич. – Новополоцк : ПГУ, 2017. – 232 с.
15. Гололобов, Д. В. Влияние параметров амплитудно-модулированного воздействия на фазовые составляющие поверхностного импеданса анизотропной среды плазмopodobного типа. / Д. В. Гололобов, О. В. Орлова, В. Ф. Янушкевич // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки*. – Новополоцк, 2010. – № 9. – С. 98–101.
16. Взаимодействие ЧМ-сигналов с анизотропной средой / Д. В. Гололобов [и др.] // *Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : сб. материалов II междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 15–17 мая 2002 г.* / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2002. – С. 300–303.
17. Степуленок, С. В. Взаимодействие амплитудно-частотно-модулированных сигналов со средой над углеводородными залежами / С. В. Степуленок, В. Ф. Янушкевич // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки*. – 2009. – № 9. – С. 103–108.
18. Гололобов, Д. В. Радиоконспектирование методов электромагнитной разведки при поиске залежей углеводородов / Д. В. Гололобов // *Докл. БГУИР*. – 2008. – № 8(38). – С. 30–36.

REFERENCES

1. Moskvichew, V. N. (1991). Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line, *9th Microw. Conf. NICON – 91: Vol. 1*, (240–244). Rydzyna.
2. Yanushkevich, V. F., Dauhiala, D. A., Adamovich, A. L., Abramenska, S. N., & Bogush, V. A. (2021). *Effect of a powerful low-frequency signal on an anisotropic medium over hydrocarbon* // *Journal of Physics [Conference Series]*, (1889). DOI: [10.1088/1742-6596/1889/2/022059](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/2/022059).
3. Gololobov, D. V. (2009) *Vzaimodeistvie elektromagnitnykh voln i uglevodorodnykh zalezhei [Interaction of electromagnetic waves and hydrocarbon deposits]*. Minsk: Bestprint. (In Russ.).
4. Anderson, C., & Mattsson, J. (2010). An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source. *First Break*, 28(5), 71–75.
5. Henke, C. H., Krieger, M., Strack, K., & Zerilli, A. (2020). Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic). *Interpretatio*, 8(4), 15–24.
6. Khmelevskoi, V. K., Gorbachev, Yu. I., Kalinin, A. V., Popov, M. G., Seliverstov, N. I., & Shevnin, V. A. (2004). *Geofizicheskie metody issledovaniya [Geophysical research methods]*. Petropavlovsk-Kamchatskii: KGPU.
7. Holten, T., Luo, X., Naevdal, G., & Helwig, S. L. (2016). Time lapse CSEM reservoir monitoring of the Norne field with vertical dipoles. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, (35), 971–975.
8. Koskov, V. N. (2004). *Geofizicheskie issledovaniya skvazhin [Geophysical research of wells]*. Perm: Perm. gos. tekhn. un-t. (In Russ.).
9. Geldmacher, I., & Strack, K. (2017). A Fit-for-purpose electromagnetic System for Reservoir Monitoring and Geothermal Exploration. *GRC Transactions*, (41), 1649–1658.
10. Gololobov, D. V., & Yanushkevich, V. F. (1995). Vzaimodeistvie AM-sigнала s uglevodorodnoi zalez'yu [Interaction of the AM-signal with a hydrocarbon reservoir]. In *Sovremennye problemy radiotekhniki, elektroniki i svyazi [Modern problems of radio engineering, electro-dynamics and communications]* (6–7). Minsk: BSUIR. (In Russ.).
11. Burtsev, M. I. (2006). *Poiski i razvedka mestorozhdenii nefiti i gaza [Search and exploration of oil and gas fields]*. Moscow: RUDN. (In Russ.).
12. Helwig, S. L., Wood, W., & Gloux B. (2019). Vertical–vertical controlled-source electromagnetic instrumentation and acquisition. *Geophysical Prospecting*, 67(6), 1582–1594.
13. Railyan, I. G. (2002). Novaya rossiiskaya sputnikovaya tekhnologiya poiska mestopolozhenii nefiti, gaza i drugikh poleznykh iskopaemykh [New Russian satellite technology for searching for the locations of oil, gas and other minerals]. *Neft', gaz i biznes*, (6), 20. (In Russ.).
14. Yanushkevich, V. F. (2017). *Elektromagnitnye metody poiska i identifikatsii uglevodorodnykh zalezhei [Electromagnetic methods for searching and identifying hydrocarbon deposits]*. Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
15. Gololobov, D. V., Orlova, O. V., & Yanushkevich, V. F. (2010). Vliyanie parametrov amplitudno-modulirovannogo vozdeistviya na fazovye sostavlyayushchie poverkhnostnogo impedansa anizotropnoi sredy plazmopodobnogo tipa [Influence of the amplitude-modulated effect parameters on the phase components of the surface impedance of an anisotropic plasma-like medium]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (9), 98–101. (In Russ., abstr. in Engl.).
16. Gololobov, D. V., Tsyvis, N. V., Yanushkevich, V. F., Kalintsev, S. V., & Khadyko, D. L. (2002). Vzaimodeistvie ChM-signalov s anizotropnoi sredoi [Interaction of FM signals with an anisotropic medium]. In *Problemy proektirovaniya i proizvodstva radioelektronnykh sredstv [Problems of design and production of radio electronic facilities]* (300–303). Novopolotsk: PSU. (In Russ.).
17. Stepuленок, S. V., & Yanushkevich, V. F. (2009). Vzaimodeistvie amplitudno-chastotno-modulirovannykh signalov so sredoi nad uglevodo-rodnyimi zalezhami [Interaction of amplitude-frequency-modulated signals with the environment above hydrocarbon deposits]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (9), 103–108. (In Russ., abstr. in Engl.).

18. Gololobov, D. V. (2008). Radiokompleksirovanie metodov elektromagnitnoi razvedki pri poiske zalezhei uglevodorodov [Radiocomplexation of the electromagnetic geological methods for exploration of hydrocarbon objects]. *Doklady BGUIR*, 8(38), 30–36. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 07.09.2022

METHODS OF SEARCHING AND DELINERING OF HYDROCARBON DEPOSITS USING MODULATED AND RADIO PULSE SIGNALS

V. YANUSHKEVICH

(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article studies the characteristics of an anisotropic medium over hydrocarbons using modulated and radio pulse signals. The modeling of the components of the surface impedance of the medium over hydrocarbon deposits in the mode of amplitude-frequency-modulated signals and the real components of the permittivity tensor in the mode of radio pulse signals was carried out. Attention is focused on the use of radio complexing of electromagnetic methods with an increase in the number of information channels. A study was made of the influence of probing signal modes on the characteristics of an anisotropic medium above deposits and the components of the permittivity tensor. Recommendations are given for the practical use of the results. Methods and techniques for geoelectric exploration of hydrocarbon deposits are proposed.

Keywords: *electromagnetic methods, hydrocarbon reservoir, permittivity tensor.*