

УДК 621.371: 550.837.6

DOI 10.52928/2070-1624-2022-38-4-81-91

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ПОИСКА И ОКОНТУРИВАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

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

V. Yanushkevich ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1433-8817>;

S. Alieva ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4804-7484>;

S. Kalintsev ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8414-2468>

*Проведено исследование характеристик анизотропной среды над углеводородами при комплексном использовании электромагнитных методов георазведки. Выполнено моделирование компонентов тензоров диэлектрической проницаемости в режиме амплитудно-модулированных, частотно-модулированных, амплитудно-частотно-модулированных и радиоимпульсных сигналов. Установлены частоты электронного плазменного и электронного циклотронного резонансов для указанных режимов. Проведено исследование влияния режимов зондирующих сигналов на характеристики анизотропной среды над залежами и компоненты тензора диэлектрической проницаемости. Проанализировано влияние вариации концентраций частиц на вещественные составляющие компонентов диэлектрической проницаемости анизотропной среды над углеводородными залежами (УВЗ). Даны рекомендации по совершенствованию методов электроразведки и применению их для поисковой геофизики.*

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

**Введение.** Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач заключается в активном усовершенствовании имеющихся и разработке новых эффективных электромагнитных методов (ЭММ) и технологий поиска и оконтуривания углеводородов [1; 2]. Выбор ЭММ и методики проведения экспериментальных испытаний основывается на анализе электрохимических и электрофизических процессов в образующихся над УВЗ анизотропных средах и нахождении откликов на воздействие зондирующих сигналов [3]. Активное внедрение различных методов и аппаратуры для поиска скоплений нефти и газа (углеводородов) основано на решении данных задач с высокими техническими характеристиками [4] за счет проявления широкого спектра аномальных эффектов. Отработанные методики комплексного использования магнитотеллурики с интеграцией сейсмических и гравиметрических данных активно применялись на севере Германии для изображения соляного купола [5]. Комплексное использование методов поиска при освоении углеводородных ресурсов на морских территориях является одним из направлений современных высокоэффективных технологий георазведки [6].

Исследования содействуют дальнейшему развитию этого направления путем модернизации имеющихся ЭММ с повышением их эффективности [7]. Радиоволновые методы поиска УВЗ используются для проведения геологоразведочных работ в поисковой геофизике [8]. Тенденции развития поисковой геофизики направлены на решение задач внедрения методов с высоким уровнем точности и достоверности обнаружения месторождений УВЗ с использованием системных подходов при реализации аппаратуры [9]. Методы электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования улучшают чувствительность и информативность методов поиска и выделения месторождений углеводородов наряду с возможностью их использования в сложной геологической обстановке [10]. Активное внедрение различных методов и аппаратуры для поиска углеводородов основано на исследовании взаимодействия [11] окружающей среды и кристаллического скелета, образованного над УВЗ и пронизанного электролитом и проводящими включениями за счет минералов с электронной проводимостью. Применение сейсмических методов активно используется для дифференциации исследуемых сред по определению характеристик поверхностного анизотропного слоя в зависимости от глубины расположения над УВЗ [12]. Современные возможности науки и техники определяются расширением зависимостей параметров среды над УВЗ от режимов воздействующих сигналов [13] и использованием дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на значительных площадях [14]. Большой опыт практического применения морских методов и экспериментальных испытаний может быть применен в поисковой геофизике [15]. Применение квазигидродинамического подхода для изучения откликов подстилающей поверхности над УВЗ приводит к улучшению точности выделения границ и уровня идентификации месторождений углеводородов [16] с помощью радиокомплексирования ЭММ георазведки, где применяется аналогия исследуемой среды над залежью нефти и газа с плазмоподобным образованием.

Использование амплитудно-модулированных, амплитудно-частотно-модулированных сигналов с регистрацией амплитудных и фазовых компонент поверхностного импеданса геологического участка местности возможно при поиске, оконтуривании залежей нефти и газа [17–19].

**Электромагнитные методы поиска и оконтуривания углеводородов.** Цель данной работы заключается в установлении дополнительных закономерностей физико-химических процессов в анизотропных средах над УВЗ по сравнению с результатами, полученными в [16], приводящих к разработке и совершенствованию ЭММ поиска и идентификации углеводородов на основе применения модулированных и радиоимпульсных сигналов.

Рассмотрим воздействие на анизотропную среду над углеводородами радиосигнала тональной амплитудной модуляции (АМ) вида

$$e(t) = E(1 + k_m \cos \Omega t) \cos \omega t,$$

где  $E$  – амплитуда несущего колебания;

$k_m$  – коэффициент амплитудной модуляции;

$\Omega = 2\pi F$ ,  $\omega = 2\pi f$  соответственно модулирующая и несущая частоты.

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости для двухчастичного потока определяются следующим образом [16]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_r + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} + j \left[ \frac{\epsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega(1 + k_m \cos \Omega t)} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega (v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} \right] \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} - \frac{2j v_i \omega_{\Pi i} \omega_{\Gamma i}}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 = \epsilon_r + \sum_{i=1}^2 \left\{ \omega_{\Pi i}^2 \frac{1}{v_i^2 + \omega^2} + j \left[ \frac{\epsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega(1 + k_m \cos \Omega t)} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega} \frac{1}{\omega^2 + v_i^2} \right] \right\}, \end{array} \right.$$

где  $\dot{\epsilon}_1$ ,  $\dot{\epsilon}_2$ ,  $\dot{\epsilon}_3$  – компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ;

$\omega_{\Pi i}$  – плазменная частота;

$\omega_{\Gamma i}$  – гиротропная частота;

$v_i$  – частота столкновения частиц;

$\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$\sigma_r$  – проводимость среды;

$\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

Процесс распространения радиосигнала частотной модуляции (ЧМ) над средой с наличием углеводородов, определяющей электродинамический отклик, имеет интерес с точки зрения анализа взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с анизотропными средами и может быть представлен выражением

$$e(t) = E_2 \cos(\omega_2 t + \beta \sin \omega_1 t),$$

где  $E_2$  и  $\omega_2$  – соответственно амплитуда и частота несущего колебания;

$\omega_1$  – модулирующая частота;

$\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_1}$  – индекс модуляции;

$\Delta\omega$  – девиация частоты.

Режим ЧМ-сигнала для зондирования анизотропных сред может быть применен как в режиме узкополосных, так и широкополосных сигналов, что существенно повышает возможности совершенствования имеющихся и разработки новых эффективных ЭММ георазведки. Введем следующие обозначения:

$$\tilde{\omega}_3 = \omega_2 [1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t]$$

$$k_{\omega} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

Компоненты тензора для двухчастичного потока представлены формулами [16]

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r (1 + \beta \cdot k_{\omega} \cos \omega_1 t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_3}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} - j \left[ \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2 (v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} \right] \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} - \frac{2j \tilde{\omega}_3 v_i \omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{[(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2] \omega_2} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r (1 + \beta \cdot k_{\omega} \cos \omega_1 t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_3}{\omega_2} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_3^2} - j \left[ \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_3^2 + v_i^2} \right] \right\}. \end{aligned} \right.$$

При одночастотной гармонической модуляции амплитуды и частоты радиосигнал имеет вид

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

где  $E_{\omega}$  – амплитуда сигнала несущей частоты  $\omega$ ;  
 $k_m, \beta$  – соответственно коэффициент амплитудной модуляции и индекс частотной модуляции.

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r (1 - k_m^2 \sin \Omega \cdot t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_4}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} + j \left[ \frac{\epsilon_r \beta \cdot k_m \sin \Omega \cdot t}{1 + \beta \cdot \cos \Omega \cdot t} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega} \frac{\tilde{\omega}_4^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} \right] \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} - \frac{2j \tilde{\omega}_4 v_i \omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega [(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2]} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r (1 - k_m^2 \sin \Omega \cdot t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_4}{\omega} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_4^2} + j \left[ \frac{\epsilon_r \beta \cdot k_m \sin \Omega \cdot t}{1 + \beta \cdot \cos \Omega \cdot t} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega} \frac{1}{\tilde{\omega}_4^2 + v_i^2} \right] \right\}. \end{aligned} \right.$$

где

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

Рассмотрим воздействие ЭМВ на УВЗ радиоимпульсным сигналом вида

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

где  $\frac{U \cdot \tau}{2} = 1$  – амплитуда радиоимпульса (для удобства исследований введена нормировка);  
 $f$  – частота сигнала;

$F_2$  – частота несущего сигнала;

$\tau$  – длительность импульса.

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости для такого режима взаимодействия имеют следующий вид [20]:

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

где  $\Omega_1$  – круговая частота следования импульсов;

$n$  – количество гармоник спектра радиоимпульсного сигнала;

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

где  $T$  – период;

$F_1$  – частота следования импульсов.

Представляет интерес анализ частотных характеристик комбинационных составляющих:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_R &= \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \dot{\epsilon}_R + j \text{Im} \dot{\epsilon}_R, \\ \dot{\epsilon}_L &= \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \dot{\epsilon}_L + j \text{Im} \dot{\epsilon}_L. \end{aligned} \quad (1)$$

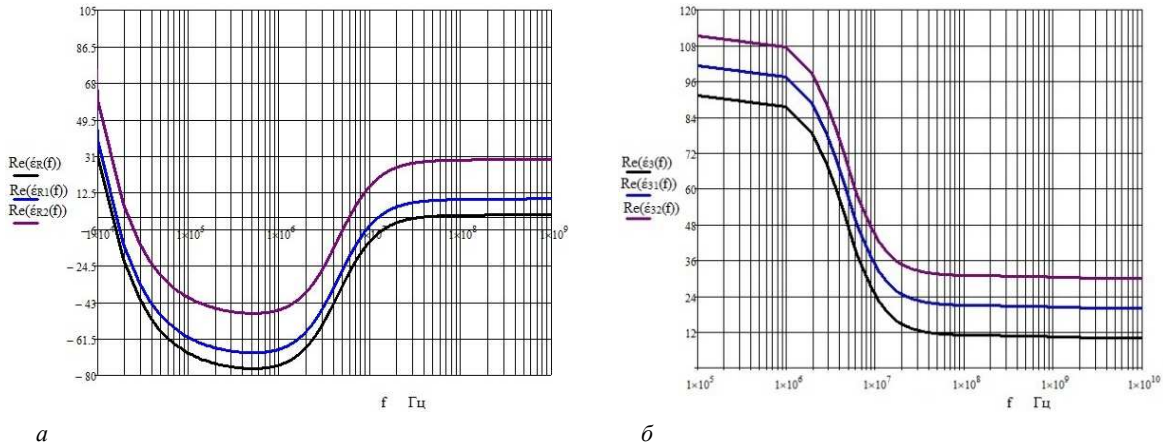
Проведено моделирование для параметров среды над залежами углеводородов [1]: значения диэлектрической проницаемости вмещающих пород  $\epsilon_r = 1 - 30$  и электрической проводимости  $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-3}$  См/м; частота столкновения частиц  $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$  рад/с, концентрации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

**Результаты исследований.** Проведен анализ выражений (1) для компонентов тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ в режиме АМ-сигнала. Зависимости вещественной составляющей компонент ЭМВ от частоты приведены на рисунке 1 ( $a$  – действительная часть суммарной компоненты;  $b$  – действительная часть компоненты  $\dot{\epsilon}_3$ ). При моделировании выбирались следующие концентрации частиц:  $N_e = N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_n = N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$ . Как видно из рисунка, вещественная составляющая ЭМВ с правой поляризацией имеет точки перехода через нуль на частотах  $f_{2П}$ , соответствующих электронному плазменному резонансу. Частота электронного плазменного резонанса лежит в пределах (5–15) МГц, причем с ростом диэлектрической проницаемости она уменьшается. Частота электронного циклотронного резонанса (значение точки перехода через нуль слева по оси абсцисс) лежит в пределах (15 – 25) кГц, причем с ростом диэлектрической проницаемости она увеличивается. В целом представляет интерес диапазон (15 кГц – 15 МГц), когда рассматриваемая компонента отрицательна. После прохождения значения частоты 200 МГц вещественная компонента практически стабильна при всех значениях несущей

частоты. Следует отметить, что поведение данной характеристики зависит от соотношения концентрации частиц, в зависимости от этого частота электронного плазменного резонанса может смещаться в диапазон (100 МГц – 3 ГГц) и выше.

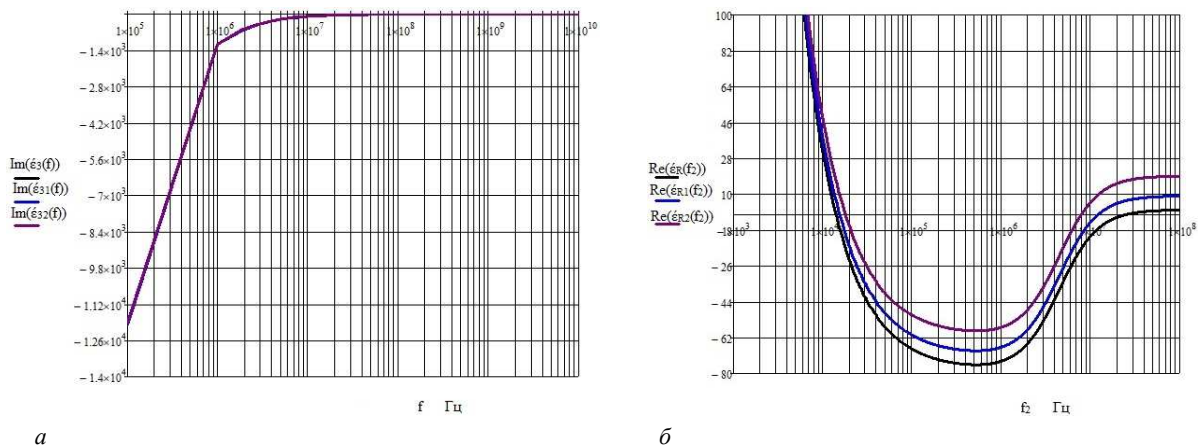
Как видно из рисунка 1, вещественная составляющая компоненты  $\epsilon_3$  при частоте несущего колебания  $f = (1 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^7)$  Гц скачкообразно уменьшается. В низкочастотном диапазоне характеристики уменьшаются незначительно. Большим значениям диэлектрической проницаемости анизотропной среды соответствуют большие значения вещественных составляющих компоненты тензора диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ  $\epsilon_3$ . В остальном диапазоне частот характеристики практически постоянны.



*a* –  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_R(f))$  – для  $F = 10^4$  Гц,  $\epsilon_r = 2$ ;  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R1}(f))$  – для  $F = 10^4$  Гц,  $\epsilon_r = 10$ ;  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R2}(f))$  – для  $F = 10^4$  Гц,  $\epsilon_r = 30$ ;  
*б* –  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_3(f))$  – для  $\Omega = 10^6$  рад/с,  $\epsilon_r = 10$ ,  $k_m = 0,5$ ;  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{31}(f))$  – для  $\Omega = 10^6$  рад/с,  $\epsilon_r = 20$ ,  $k_m = 0$ ;  
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{32}(f))$  – для  $\Omega = 10^6$  рад/с,  $\epsilon_r = 30$ ,  $k_m = 1$

**Рисунок 1. – Зависимости вещественной составляющей диэлектрической проницаемости от частоты  $f$  в режиме АМ-сигнала для  $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$**

Зависимости мнимой составляющей  $\epsilon_3$  и вещественной составляющей диэлектрической проницаемости ЭМВ с правой поляризацией от частоты приведены на рисунке 2 (*a* – режим АМ-сигнала, *б* – режим ЧМ-сигнала).

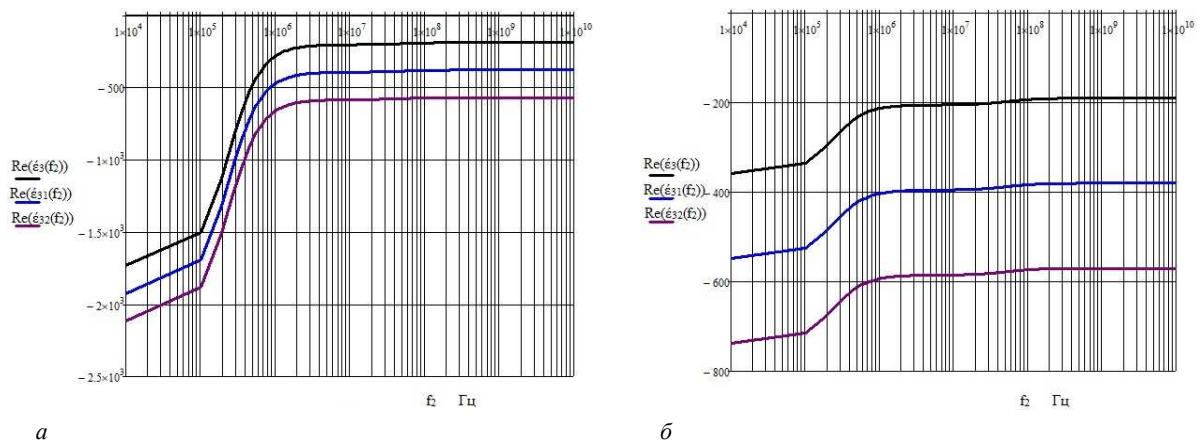


*a* –  $\text{Im}(\dot{\epsilon}_3(f))$  – для  $\Omega = 10^6$  рад/с,  $\epsilon_r = 10$ ,  $k_m = 0,5$ ;  $\text{Im}(\dot{\epsilon}_{31}(f))$  – для  $\Omega = 10^6$  рад/с,  $\epsilon_r = 20$ ,  $k_m = 0$ ;  
 $\text{Im}(\dot{\epsilon}_{32}(f))$  – для  $\Omega = 10^6$  рад/с,  $\epsilon_r = 30$ ,  $k_m = 1$ ;  
*б* –  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_R(f_2))$  – для  $\beta = 1$ ,  $\epsilon_r = 3$ ;  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R1}(f_2))$  – для  $\beta = 1$ ,  $\epsilon_r = 10$ ;  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R2}(f_2))$  – для  $\beta = 1$ ,  $\epsilon_r = 20$

**Рисунок 2. – Зависимости компонент тензора диэлектрической проницаемости от частоты для  $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$**

Мнимая составляющая  $\dot{\epsilon}_3$  увеличивается на отрезке частот  $f = (1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6)$  Гц с большим значением крутизны характеристики, в диапазоне частот  $f = (1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^7)$  Гц характерно более плавное изменение данной компоненты и на оставшемся отрезке частот характеристика постоянна. Следует отметить, что вариация диэлектрической проницаемости среды над УВЗ не приводит к изменениям мнимой составляющей. Проведен анализ выражений (1) для компонентов тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ в режиме ЧМ-сигнала. Как видно из рисунка, вещественная составляющая ЭМВ с правой поляризацией имеет частоты электронного плазменного резонанса в пределах (8 – 20) МГц, причем с ростом диэлектрической проницаемости она уменьшается. Частота электронного циклотронного резонанса лежит в пределах (15 – 20) кГц, причем с ростом диэлектрической проницаемости она увеличивается. В целом представляет интерес диапазон (15 кГц – 8 МГц), когда рассматриваемая компонента отрицательна. После прохождения значения частоты 50 МГц вещественная компонента практически стабильна при всех значениях несущей частоты.

Проведено моделирование зависимостей вещественной составляющей диэлектрической проницаемости от частоты в режиме ЧМ-сигнала (рисунок 3).



*a* –  $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$ :  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_3(f_2))$  – для  $\beta = 5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ;  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{31}(f_2))$  – для  $\beta = 5$ ,  $\epsilon_r = 20$ ;  
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{32}(f_2))$  – для  $\beta = 5$ ,  $\epsilon_r = 30$ ;

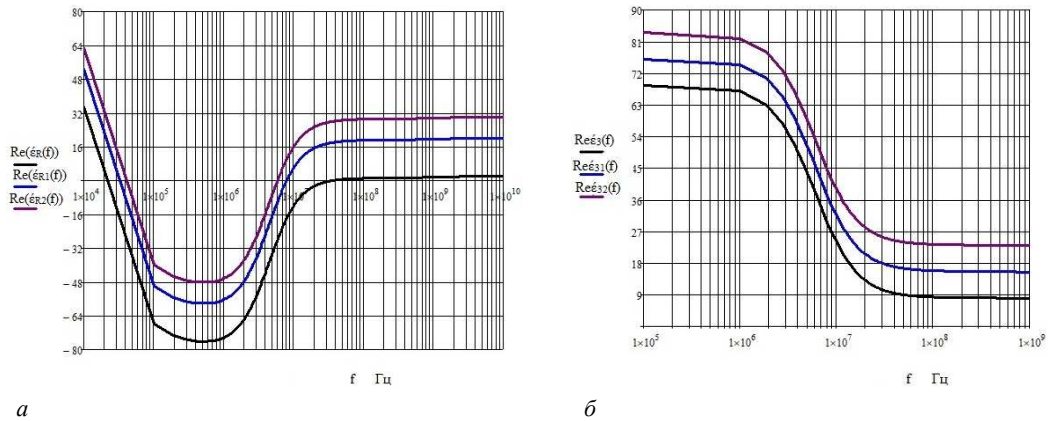
*б* –  $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{17} \text{ м}^{-3}$ :  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_3(f_2))$  – для  $\beta = 5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ;  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{31}(f_2))$  – для  $\beta = 5$ ,  $\epsilon_r = 20$ ;  
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{32}(f_2))$  – для  $\beta = 5$ ,  $\epsilon_r = 30$

**Рисунок 3. – Зависимости вещественной составляющей диэлектрической проницаемости от частоты в режиме ЧМ-сигнала**

В данном режиме на вещественные составляющие компонент диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ существенно влияет вариация концентраций частиц. Установлено, что характер их поведения при концентрациях частиц  $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$  скачкообразно меняется для высокочастотной составляющей  $f_2 = (1 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6)$  Гц. Для низкочастотной составляющей  $f_2 = (1 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5)$  Гц характерно незначительное увеличение значения вещественной составляющей диэлектрической проницаемости  $\dot{\epsilon}_3$ . В остальном диапазоне частот характеристики постоянны. Большим значениям диэлектрической проницаемости анизотропной среды соответствуют меньшие значения вещественных составляющих компоненты тензора диэлектрической проницаемости анизотропной среды над углеводородами. При концентрациях частиц  $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{17} \text{ м}^{-3}$  анализируемые характеристики скачкообразно увеличиваются с меньшим диапазоном изменения при высокочастотной составляющей  $f_2 = (1 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6)$  Гц. В остальном диапазоне частот характеристики практически постоянны. Большие значения вещественных составляющих компоненты тензора диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ соответствуют меньшим значениям диэлектрической проницаемости анизотропной среды.

Проведен анализ выражений (1) для компонент тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ в режиме АЧМ-сигнала. Зависимости вещественной составляющей компонент ЭМВ от частоты приведены на рисунке 4 (*a* – действительная часть суммарной компоненты; *б* – действительная часть компоненты  $\dot{\epsilon}_3$ ).

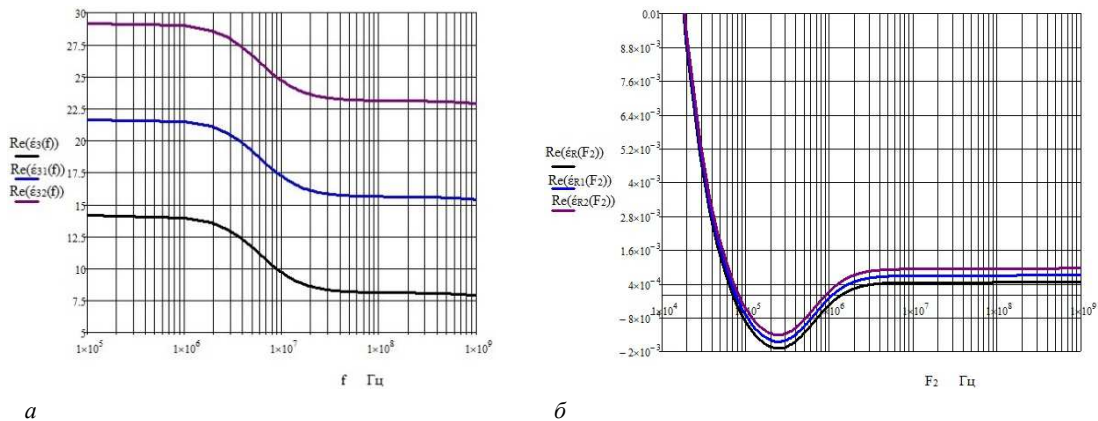
Как видно из рисунка, вещественная составляющая ЭМВ с правой поляризацией имеет частоты электронного плазменного резонанса в пределах (6 – 30) МГц, причем с ростом диэлектрической проницаемости она уменьшается. Частота электронного циклотронного резонанса лежит в пределах (20 – 40) кГц, причем с ростом диэлектрической проницаемости она увеличивается. В целом представляет интерес диапазон (20 кГц – 30 МГц), когда рассматриваемая компонента отрицательна. После прохождения значения частоты 100 МГц вещественная компонента практически стабильна при всех значениях несущей частоты. Установлено, что вещественная составляющая компоненты  $\dot{\epsilon}_3$  скачкообразно уменьшается при частоте несущего колебания  $f = (1 \cdot 10^6 - 50 \cdot 10^7)$  Гц. В низкочастотном диапазоне характеристики уменьшаются незначительно. В остальном диапазоне частот характеристики практически постоянны. Большие значения диэлектрической проницаемости анизотропной среды над УВЗ приводят к росту вещественных составляющих компоненты тензора диэлектрической проницаемости  $\dot{\epsilon}_3$ .



*a* –  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_R(f))$  – для  $\Omega = 10^5$  рад/с,  $\epsilon_r = 2$ ,  $k_m = 0,1$ ,  $\beta = 5$ ;  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R1}(f))$  – для  $\Omega = 10^5$  рад/с,  $\epsilon_r = 20$ ,  $k_m = 0,1$ ,  $\beta = 5$ ;  
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R2}(f))$  – для  $\Omega = 10^5$  рад/с,  $\epsilon_r = 30$ ,  $k_m = 0,1$ ,  $\beta = 5$ ;  
*б* –  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_3(f))$  – для  $\Omega = 10^5$  рад/с,  $\epsilon_r = 10$ ,  $k_m = 0,1$ ,  $\beta = 5$ ;  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{31}(f))$  – для  $\Omega = 10^5$  рад/с,  $\epsilon_r = 20$ ,  $k_m = 0,1$ ,  $\beta = 5$ ;  
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{32}(f))$  – для  $\Omega = 10^5$  рад/с,  $\epsilon_r = 30$ ,  $k_m = 0,1$ ,  $\beta = 5$

**Рисунок 4. – Зависимости вещественной составляющей диэлектрической проницаемости от частоты  $f$  в режиме АЧМ-сигнала для  $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$**

Проведено моделирование зависимостей компонент тензора диэлектрической проницаемости от частоты, которые представлены на рисунке 5 (*a* – режим АЧМ-сигнала, *б* – режим радиоимпульсного сигнала).



*a* –  $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{17} \text{ м}^{-3}$ :  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_3(f))$  – для  $\Omega = 10^5$  рад/с,  $\epsilon_r = 10$ ,  $k_m = 0,1$ ,  $\beta = 5$ ;  
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{31}(f))$  – для  $\Omega = 10^5$  рад/с,  $\epsilon_r = 20$ ,  $k_m = 0,1$ ,  $\beta = 5$ ;  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{32}(f))$  – для  $\Omega = 10^5$  рад/с,  $\epsilon_r = 30$ ,  $k_m = 0,1$ ,  $\beta = 5$ ;  
*б* –  $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$ :  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_R(F_2))$  – для  $\epsilon_r = 10$ ;  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R1}(F_2))$  – для  $\epsilon_r = 15$ ;  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{R2}(F_2))$  – для  $\epsilon_r = 20$

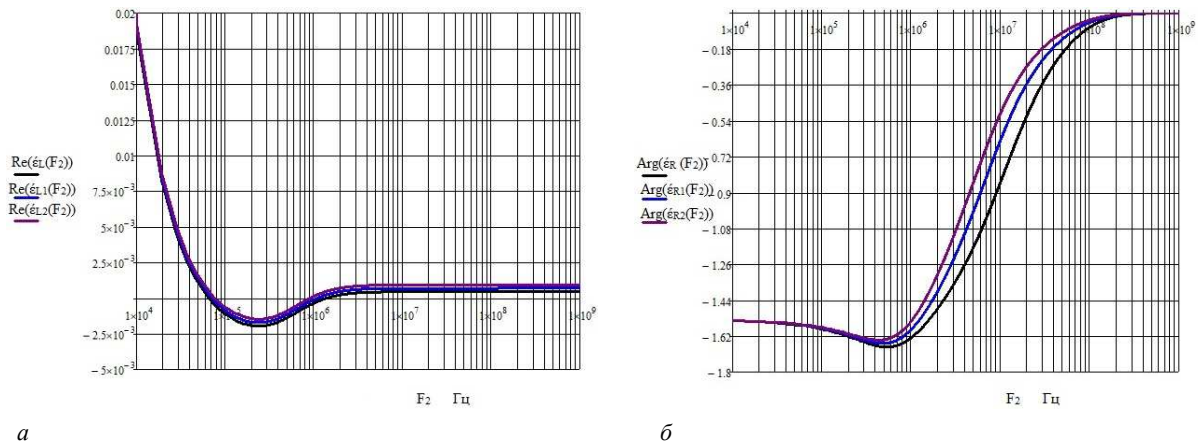
**Рисунок 5. – Зависимости компонент тензора диэлектрической проницаемости от частоты**



При концентрациях частиц  $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{17} \text{ м}^{-3}$  анализируемые характеристики скачкообразно уменьшаются с меньшим диапазоном изменения при высокочастотной составляющей  $f = (1 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^7) \text{ Гц}$ . В остальном диапазоне частот характеристики практически постоянны. Проведен анализ выражений (1) для компонент тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ в режиме радиоимпульсного сигнала. Выполнено исследование зависимостей компонент тензора диэлектрической проницаемости от частоты в режиме радиоимпульсного сигнала для  $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , которые представлены на рисунке 6 ( $a$  – вещественная составляющая для ЭМВ с левой поляризацией,  $b$  – фазовая составляющая для ЭМВ с левой поляризацией). Как видно из рисунка 6, вещественная составляющая ЭМВ с правой поляризацией имеет частоты электронного плазменного резонанса в пределах 800 кГц – 1,5 МГц, причем с ростом диэлектрической проницаемости она уменьшается. Частота электронного циклотронного резонанса лежит в пределах (70 – 90) кГц, причем с ростом диэлектрической проницаемости она увеличивается. В целом представляет интерес диапазон (70 кГц – 1,5 МГц), когда рассматриваемая компонента отрицательна. После прохождения значения частоты 10 МГц вещественная компонента практически стабильна при всех значениях несущей частоты.

Результаты моделирования показывают, что вещественные составляющие для ЭМВ с левой и правой поляризациями отличаются несущественно. Фазовая составляющая для ЭМВ с правой поляризацией (для левой поляризации характеристики совпадают) при частоте несущего колебания  $F_2 = (1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^6) \text{ Гц}$  имеет незначительные вариации с точкой минимума, на отрезке частот  $F_2 = (1 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9) \text{ Гц}$  фаза стабильна.

В целом представляет интерес диапазон  $F_2 = (1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^8) \text{ Гц}$ , когда рассматриваемая компонента подвержена существенному увеличению.



$a$  –  $\text{Re}(\hat{\epsilon}_L(F_2))$  – для  $\epsilon_r = 10$ ;  $\text{Re}(\hat{\epsilon}_{L1}(F_2))$  – для  $\epsilon_r = 15$ ;  $\text{Re}(\hat{\epsilon}_{L2}(F_2))$  – для  $\epsilon_r = 20$ ;  
 $b$  –  $\text{Arg}(\hat{\epsilon}_R(F_2))$  – для  $\epsilon_r = 10$ ;  $\text{Arg}(\hat{\epsilon}_{R1}(F_2))$  – для  $\epsilon_r = 15$ ;  $\text{Arg}(\hat{\epsilon}_{R2}(F_2))$  – для  $\epsilon_r = 20$

**Рисунок 6. – Зависимости компонент тензора диэлектрической проницаемости от частоты в режиме радиоимпульсного сигнала для  $N_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$**

Для повышения точности и достоверности определения границ УВЗ следует рекомендовать радиокомплексирование указанных выше ЭММ в сочетании с аппаратурой, содержащей цифровые системы навигации и обработки информации, и сверхширокодиапазонное исследование характеристик тестируемых поверхностей при увеличении количества информационных каналов.

**Заключение.** Проведенный анализ ЭММ при распространении ЭМВ в среде над углеводородами показал следующее:

– в режиме АМ-сигнала частота электронного плазменного резонанса лежит в пределах (5 – 15) МГц, частота электронного циклотронного резонанса соответствует значениям (15 – 25) кГц, вещественная составляющая компоненты  $\hat{\epsilon}_3$  при частоте несущего колебания  $f = (1 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^7) \text{ Гц}$  скачкообразно уменьшается;



- в режиме ЧМ-сигнала вещественная составляющая ЭМВ с правой поляризацией имеет частоты электронного плазменного резонанса в пределах (8 – 20) МГц, частота электронного циклотронного резонанса лежит в пределах (15 – 20) кГц;
- в режиме АЧМ-сигнала частоты электронного плазменного резонанса находятся в пределах (6 – 30) МГц, частота электронного циклотронного резонанса лежит в пределах (20 – 40) кГц;
- в режиме радиоимпульсного сигнала вещественная составляющая ЭМВ с правой поляризацией имеет частоты электронного плазменного резонанса в пределах 800 кГц – 1,5 МГц, частота электронного циклотронного резонанса лежит в пределах (70 – 90) кГц.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д. В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д. В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
2. Moskvichew, V. N. Interraction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V. N. Moskvichew // 9<sup>th</sup> Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
3. 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).
4. Геофизические методы исследования : учеб. пособие для геологических специальностей вузов / В. К. Хмелевской [и др.]. – Петропавловск-Камчатский : КГПУ, 2004. – 227 с.
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. 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.
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. Гололобов, Д. В. Поиски, разведка и мониторинг залежей нефти, газа и угля радиоволновым методом / Д. В. Гололобов, А. А. Кураев, Ю. Н. Стадник // Геологической службе России 300 лет : междунар. геофиз. конф. : тез. докл. / ВИРГ – Рудгеофизика ; А. А. Петров [и др.]. – СПб., 2005. – С. 171.
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. Болтинцев, В. Б. Метод электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования подстилающей среды [Электронный ресурс] / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, К. П. Безродный // Журн. радиоэлектроники. – 2012. – № 1. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/14/text.html>. – Дата доступа: 10.02.2022.
11. Бурцев, М. И. Поиски и разведка месторождений нефти и газа / М. И. Бурцев – М. : Рос. ун-т дружбы народов. – 2006. – 264 с.
12. Сейсмические методы при разведке полезных ископаемых и планировании горных работ – Введение / А. Малехмир [и др.] // Геофизика. – 2012. – DOI: [10.1190/2012-0724-SPSEIN.1](https://doi.org/10.1190/2012-0724-SPSEIN.1).
13. 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.
14. 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.
15. Констебл, С. Десять лет морской CSEM для разведки углеводородов / С. Констебл // Геофизика. – 2010. – Т. 75, № 5.
16. Янушкевич, В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В. Ф. Янушкевич. – Новополоцк : ПГУ, 2017. – 232 с.
17. 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. – Новополоцк, 2010. – № 9. – С. 98–101.
18. 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.
19. 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.
20. Янушкевич, В. Ф. Влияние режима радиоимпульсных сигналов на характеристики анизотропной среды над углеводородами / В. Ф. Янушкевич, С. П. Алиева, С. В. Калинин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2021. – № 12. – С. 47–54.

## REFERENCES

1. Gololobov, D. V. (2009) *Vzaimodeistvie elektromagnitnykh voln i uglevodorodnykh zalezhei [Interaction of electromagnetic waves and hydrocarbon deposits]*. Minsk: Bestprint. (In Russ.).
2. Moskvichew, V. N. (1991). Interraction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line, *9th Microw. Conf. NICON – 91: Vol. 1*, (240–244). Rydzyna.

3. 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).
4. 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.
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. Anderson, C., & Mattsson, J. (2010). An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source. *First Break*, 28(5), 71–75.
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. Gololobov, D. V., Kuraev, A. A., & Stadnik, Yu. N. (2005). Poiski, razvedka i monitoring zalezhei nefi, gaza i uglya radiovolnovym metodom [Search, exploration and monitoring of oil, gas and coal deposits by radio wave method]. *Geologicheskoi sluzhbe Rossii 300 let: tez. dokl. (171)*. Saint Petersburg: VIRG – Rudgeofizika. (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. Boltintsev, V. B., Il'yakhin, V. N., & Bezrodnyi, K. P. (2012). Metod elektromagnitnogo impul'snogo sverkhshirokopolosnogo zondirovaniya podstilayushchei sredy [Method of electromagnetic pulsed ultra-wideband sounding of the underlying medium]. *Zhurnal radioelektroniki*, (1). <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/14/text.html> (In Russ.).
11. Burtsev, M. I. (2006). *Poiski i razvedka mestorozhdenii nefi i gaza [Search and exploration of oil and gas fields]*. Moscow: RUDN. (In Russ.).
12. Malekhir, A., Uroevich, M., Bellefler, G., Dzhukhlin C., & Milkerait, B. (2012). Seismicheskie metody pri razvedke poleznykh iskopaemykh i planirovanii gornyykh rabot – Vvedenie [Seismic methods in mineral exploration and mine planning]. *Geofizika*. DOI: [10.1190/2012-0724-SPSEIN.1](https://doi.org/10.1190/2012-0724-SPSEIN.1).
13. Helwig, S. L., Wood, W., & Gloux B. (2019). Vertical–vertical controlled-source electromagnetic instrumentation and acquisition. *Geophysical Prospecting*, 67(6), 1582–1594.
14. Railyan, I. G. (2002). Novaya rossiiskaya sputnikovaya tekhnologiya poiska mestopolozhenii nefi, gaza i drugikh poleznykh iskopaemykh [New Russian satellite technology for searching for the locations of oil, gas and other minerals]. *Nefi', gaz i biznes*, (6), 20. (In Russ.).
15. Konstebl, S. (2010). Desyat' let morskoi CSEM dlya razvedki uglevodorodov [Ten years of offshore CSEM for hydrocarbon exploration]. *Geofizika*, 75(5). (In Russ.).
16. Yanushkevich, V. F. (2017). *Elektromagnitnye metody poiska i identifikatsii uglevodorodnykh zalezhei [Electromagnetic methods for searching and identifying hydrocarbon deposits]*. Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
17. 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.).
18. Gololobov, D. V., Yanushkevich, V. F., & Kalintsev, S. V. (2010). Impedantsnye granichnye usloviya anizotropnoi sredy dlya amplitudno-modulirovannogo signala [Impedance boundary conditions of an anisotropic medium for an amplitude modulated signal]. *Doklady BGUIR*, 6(52), 13–17. (In Russ., abstr. in Engl.).
19. Stepulenok, 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.).
20. Yanushkevich, V. F., Alieva, S. P., & Kalintsev, S. V. (2021). Vliyanie rezhima radioimpul'snykh signalov na kharakteristiki anizotropnoi sredy nad uglevodorodami [Influence of the regime of radio pulse signals on the characteristics of an anisotropic medium over hydrocarbons]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (12), 47–54. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 18.02.2022

## ELECTROMAGNETIC METHODS OF SEARCHING AND DEFINITION OF HYDROCARBON DEPOSITS

V. YANUSHKEVICH, S. ALIEVA, S. KALINTEV

*The article studies the characteristics of an anisotropic medium over hydrocarbons with the complex use of electromagnetic geo-exploration methods. The simulation of the components of dielectric permittivity tensors in the mode of amplitude-modulated, frequency-modulated, amplitude-frequency-modulated and radio pulse signals is carried out. The frequencies of the electron plasma and electron cyclotron resonances for the specified*

*regimes are established. A study was made of the influence of modes of probing signals on the characteristics of an anisotropic medium above deposits and the components of the dielectric tensor. The effect of particle concentration variation on the real components of the components of the dielectric permittivity of an anisotropic medium above the UVZ is analyzed. Recommendations are given for improving the methods of electrical exploration and their application for prospecting geophysics.*

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