

УДК 621.371: 550.837.6

DOI 10.52928/2070-1624-2022-39-11-80-88

## ХАРАКТЕРИСТИКИ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ И МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

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

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*Исследованы характеристики анизотропной среды над углеводородами при комплексном использовании электромагнитных методов георазведки. Проведено моделирование компонент 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 компонент диэлектрической проницаемости анизотропной среды над углеводородными залежами (УВЗ). Даны рекомендации по совершенствованию методов электроразведки и их применению для поисковой геофизики.*

**Ключевые слова:** анизотропные среды, углеводородная залежь, электромагнитные методы.

**Введение.** Актуальность разработки новых эффективных электромагнитных методов (ЭММ) и аппаратуры для поиска и оконтуривания скоплений нефти и газа (углеводородов) [1–3] основывается на анализе электрохимических и электрофизических процессов в образованных над УВЗ анизотропных средах (АС) и применении свойств зондирующих сигналов, позволяющих дифференцировать объекты по откликам на формирующее воздействие. Активное совершенствование имеющихся и внедрение [4; 5] новых методик и технологий заключается в использовании широкого спектра аномальных эффектов, полученных от воздействия сигналов с повышенной избирательностью к наличию углеводородов. Выбор ЭММ и методики проведения экспериментальных испытаний определяются путем расширения зависимостей характеристик среды над УВЗ от режимов воздействующих сигналов [6]. Внедрение методов и аппаратуры для поиска и оконтуривания УВЗ основано на решении данных задач с использованием различных режимов зондирования [7]. Разрабатываются методики по высокоэффективному, научно-обоснованному прогнозированию, оконтуриванию и освоению продуктивных зон [8]. Аппаратура для мониторинга пластов и геотермальной разведки состоит из системы с использованием архитектуры, подобной сейсмической узловой системе и совмещающей регистрацию микросейсмических и электромагнитных данных в одном блоке [9]. 3D-модели удельного сопротивления, полученные путем инвертирования данных CSEM, помогают найти области, представляющие интерес, и снизить потенциальные риски [10]. Активное внедрение различных методов и аппаратуры для поиска и оконтуривания УВЗ базируется на широком диапазоне направлений современных высокоэффективных технологий георазведки. При этом учитывается исследование взаимодействия окружающей среды и кристаллического скелета, образованного в АС над УВЗ и пронизанного проводящими включениями и электролитом с наличием минералов с электронной проводимостью [11].

Комплексное использование магнитотеллурических данных с интеграцией гравиметрических и сейсмических данных активно применялось на севере Германии для исследований соляного купола [12]. Современные возможности науки и техники в сочетании с применением управляемых источников излучения и их использованием в сложной геологической обстановке улучшают чувствительность и информативность методов поиска и оконтуривания месторождений УВЗ [13]. Исследования содействуют модернизации имеющихся ЭММ с повышением их эффективности, примером чего являются электроразведочные работы, проводимые методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), при картировании рифейских отложений на территории Республики Саха (Якутия) [14] и многопараметровая аэро-разведка на основе метода сверхдлинноволнового радиоприемника (СДВР) для аэрогеофизических исследований нефтяных объектов Татарии [15]. Экспериментальные испытания и опыт практического применения морских методов может быть использован в поисковой геофизике [16]. Использование амплитудно-модулированных, частотно-модулированных, амплитудно-частотно-модулированных сигналов с регистрацией амплитудных и фазовых компонент поверхностного импеданса геологического участка местности возможно при поиске, оконтуривании залежей нефти и газа [17–20].

**Режимы зондирования углеводородов.** Цель данной работы заключается в разработке и совершенствовании ЭММ поиска и оконтуривания углеводородов на основе применения высокочастотных и модулированных сигналов. Для повышения точности и достоверности определения границ УВЗ следует рекомендовать радиокомплексирование указанных выше ЭММ.

Режим высокочастотного сигнала характеризуют составляющие  $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$  с частотной компонентой  $\tilde{\omega}_2$ , плазменная частота  $\omega_{\text{Пл}}$ ; гиротропная частота  $\omega_{\text{Гл}}$ ; частота столкновения частиц  $\nu_i$ ; относительная диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon_r$ ; проводимость среды  $\sigma_r$ ; диэлектрическая постоянная  $\epsilon_0$ ;  $\alpha = \omega_2 - \omega_1 = \omega_2(1 - k_\omega)$  – разность частот двух ЭМВ с амплитудами и частотами  $A_1, A_2, \omega_1, \omega_2$ . Компоненты тензора диэлектрической проницаемости АС над УВЗ в высокочастотном режиме (для двухчастотного воздействия) имеют вид [6]

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_2}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left[ \frac{\omega_{\text{Пл}}^2 \tilde{\omega}_2}{\omega_2} \frac{\omega_{\text{Гл}}^2 - \tilde{\omega}_2^2 - \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{\text{Гл}}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 \nu_i^2} - j \left[ \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\text{Пл}}^2 \nu_i}{\omega_2 (\nu_i^2 + \omega_{\text{Гл}}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 \nu_i^2} \right] \right]; \\ \dot{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega_{\text{Пл}}^2 \omega_{\text{Гл}}}{\omega_2} \frac{\omega_{\text{Гл}}^2 - \tilde{\omega}_2^2 + \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{\text{Гл}}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 \nu_i^2} - \\ - \frac{2j\tilde{\omega}_2 \nu_i \omega_{\text{Пл}} \omega_{\text{Гл}}}{[(\nu_i^2 + \omega_{\text{Гл}}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 \nu_i^2] \omega_2} \end{array} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_3 = \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_2}{\omega_2} - \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\text{Пл}}^2 \tilde{\omega}_2}{\omega_2} \frac{1}{\nu_i^2 + \tilde{\omega}_2^2} - j \left[ \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\text{Пл}}^2 \nu_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_2^2 + \nu_i^2} \right] \right\}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Коэффициенты соотношения амплитуд двух волн и их частот

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

выбираются из условий

$$\left\{ \begin{array}{l} k_E \gg 1; \\ k_\omega \ll 1. \end{array} \right. \quad (3)$$

Представляет интерес анализ частотных характеристик комбинационных составляющих (4).

Проводился анализ комбинационных составляющих тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для параметров среды над залежами углеводородов [2]:

– значения диэлектрической проницаемости вмещающих пород  $\epsilon_r = 1 - 30$  и электрической проводимости  $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-5} - 1$  См/м;

– концентрации частиц  $N_e = N_n = (10^{16} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$ .

– частота столкновения частиц  $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$  рад/с.

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

$$e(t) = E(1 + k_m \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (5)$$

где  $E$  – амплитуда несущего колебания;

$k_m$  – коэффициент амплитудной модуляции;

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

Для данного режима проводился анализ комбинационных составляющих тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ и компонент поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{11}$  и  $\dot{Z}_{12}$  (6).

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости для двухчастичного потока определяются следующим образом [6]:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= \varepsilon_r + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} + j \left[ \frac{\varepsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega(1 + k_m \cos \Omega t)} - \frac{\sigma_r}{\omega \varepsilon_0} \right] - \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega} \frac{\omega^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} \right\}; \\ \dot{\varepsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i} \omega_{\Gamma i}}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} - \frac{2j v_i \omega_{\Pi i} \omega_{\Gamma i}}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} \right\}; \\ \dot{\varepsilon}_3 &= \varepsilon_r + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2}{\omega} \frac{1}{v_i^2 + \omega^2} + j \left[ \frac{\varepsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega(1 + k_m \cos \Omega t)} - \frac{\sigma_r}{\omega \varepsilon_0} - \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega} \frac{1}{\omega^2 + v_i^2} \right] \right\}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

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 АС и может быть представлен выражением

$$e(t) = E_2 \cos(\omega_2 t + \beta \sin \omega_1 t), \quad (7)$$

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

$\omega_1$  – модулирующая частота;

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

где  $\Delta\omega$  – девиация частоты.

Компоненты тензора для двухчастичного потока представлены формулами [6]:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= \varepsilon_r (1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_3}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} - j \left[ \frac{\sigma_r}{\omega_2 \varepsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{\tilde{\omega}_3^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} \right] \right\}; \\ \dot{\varepsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i} \omega_{\Gamma i}}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} - \frac{2j \tilde{\omega}_3 v_i \omega_{\Pi i} \omega_{\Gamma i}}{[(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2] \omega_2} \right\}; \\ \dot{\varepsilon}_3 &= \varepsilon_r (1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_3}{\omega_2} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_3^2} - j \left[ \frac{\sigma_r}{\omega_2 \varepsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_3^2 + v_i^2} \right] \right\}. \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Режим ЧМ-сигнала характеризуется частотной составляющей

$$\tilde{\omega}_3 = \omega_2 [1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t]. \quad (9)$$

Проведено исследование влияния режимов зондирующих сигналов на характеристики АС над залежами.

**Результаты исследований.** На основании проведенного анализа была предложена адаптивная геоэлектрическая модель залежей углеводородов (рисунок 1). Она представляет собой комбинирование моделей Москвичёва и Сейфуллина с учетом проведенных исследований.

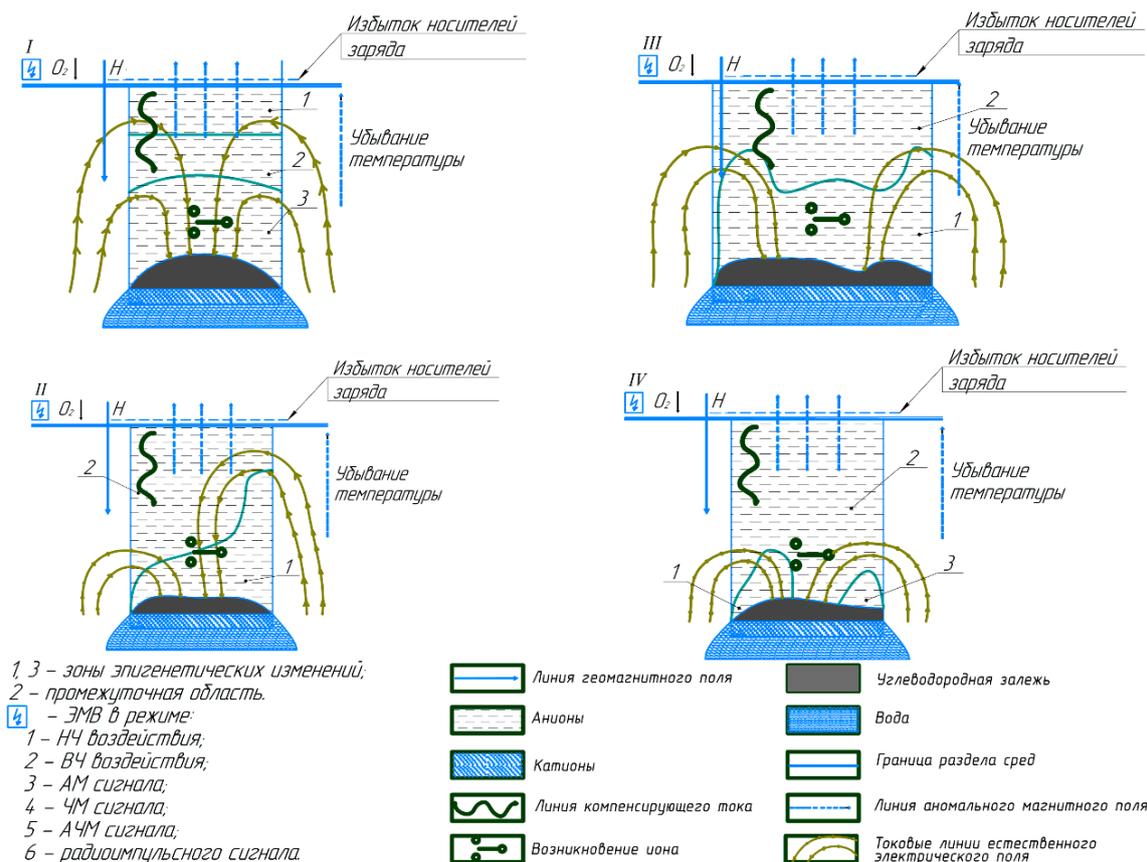


Рисунок 1. – Геоэлектрические модели залежей углеводородов

По модели Москвичёва [2] были задействованы положения:

- среда над залежью углеводородов – избирательная система многорезонансного характера;
- данная среда – анизотропное образование плазмоподобного типа с наличием магнитной аномалии поля  $\Delta \vec{H}$ ;
- физико-химические процессы во вмещающих породах приводят к смещению свободных носителей заряда по температурному градиенту;
- увеличение удельного электрического сопротивления над углеводородами из-за магнитной аномалии.

По модели Сейфуллина [21] приняты следующие факторы:

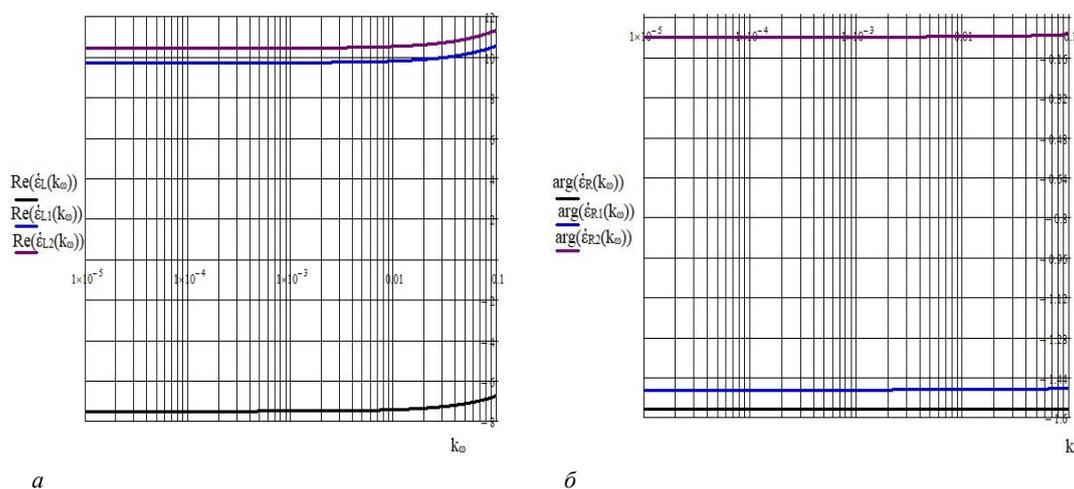
- повышение удельного сопротивления среды над УВЗ (совпадает с положением Москвичёва);
- формирование в таких средах источников естественных электрических полей (у Москвичёва более расширенная трактовка) и повышение поляризуемости этих же объемов среды;
- учет факторов, влияющих на эффект миграции вещества и на глубинность исследований;
- наличие вариантов моделей в зависимости от сочетания различных факторов.

Автором данной работы предложено дополнение к комбинированной модели, заключающееся в анализе свойств АС над УВЗ на основе определения тензоров диэлектрической проницаемости среды в следующих режимах:

- двухчастотное взаимодействие ЭМВ и среды над углеводородами (режимы мощного низкочастотного и мощного высокочастотного сигналов);
- взаимодействие модулированных ЭМВ с УВЗ (режимы АМ, ЧМ и амплитудно-частотно-модулированных (АЧМ) сигналов);
- режим радиоимпульсных сигналов.

Было принято решение назвать такую модель адаптивной вследствие возможности ее дополнения в будущем результатами исследований среды над УВЗ в других режимах зондирования и получения большего объема информации о характеристиках данной среды. Также предполагается коррекция модели по результатам экспериментальных исследований, применения для этого методов радиокомплексирования и выделения варианта модели залежи углеводородов по методике Сейфуллина [21].

Системы поиска на основе двухканальных схем определения комбинационных составляющих позволяют использовать характеристики сигналов согласно рисунку 2. Представляет интерес отрезок значений коэффициента отношения частот 0,01 – 0,1. Вариация данного параметра влияет на разностную компоненту, и данное обстоятельство позволяет учитывать возможность выполнения более глубоких зондирований с лучшей помехозащищенностью при активном использовании методик испытаний и ряд других факторов.



**а** –  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_L(k_\omega))$  – для  $\epsilon_r = 30$ ,  $k_E = 10$ ,  $f_2 = 10^5$  Гц;  $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{L1}(k_\omega))$  – для  $\epsilon_r = 20$ ,  $k_E = 10$ ,  $f_2 = 10^7$  Гц;  
 $\text{Re}(\dot{\epsilon}_{L2}(k_\omega))$  – для  $\epsilon_r = 10$ ,  $k_E = 10$ ,  $f_2 = 10^9$  Гц;  
**б** –  $\text{arg}(\dot{\epsilon}_R(k_\omega))$  – для  $\epsilon_r = 30$ ,  $k_E = 10$ ,  $f_2 = 10^5$  Гц;  $\text{arg}(\dot{\epsilon}_{R1}(k_\omega))$  – для  $\epsilon_r = 20$ ,  $k_E = 10$ ,  $f_2 = 10^7$  Гц;  
 $\text{arg}(\dot{\epsilon}_{R2}(k_\omega))$  – для  $\epsilon_r = 10$ ,  $k_E = 10$ ,  $f_2 = 10^9$  Гц

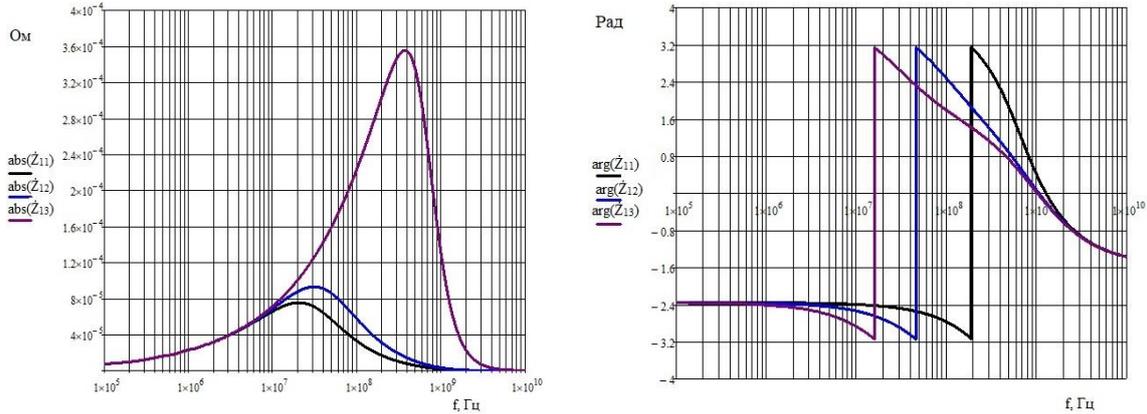
**Рисунок 2.** – Зависимости вещественной и фазовой составляющих разностной компоненты тензора от коэффициента отношения частот ( $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_n = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ )

Установлено, что фаза суммарной компоненты не подвержена влиянию коэффициента отношения частот. В каждом конкретном случае учитывается значение скорости миграций заряженных частиц в отдельных участках вертикального разреза над залежью, влияние концентрации отдельных химических элементов и корреляция результатов расчетов с данными полевых измерений, применение особенностей профилей местности и корректирующих факторов при испытаниях.

Таким образом, при осуществлении геологоразведочных работ на нефть и газ проводится большой комплекс исследований: полевых геологических, геофизических, геохимических, электроразведочных и буровых работ. В зависимости от целей, масштаба, особенностей изучаемой территории и стадийности работ доминирует тот или иной метод.

Проведен анализ компонент поверхностного импеданса среды над УВЗ. Абсолютные и фазовые значения для компонент поверхностного импеданса среды над УВЗ  $\dot{Z}_{11}$  приведены на рисунке 3. На частотах (10 – 400) МГц происходит резонансное увеличение данной компоненты поверхностного импеданса. Зондирование АС двухчастотными ЭМВ в режиме АМ-сигналов позволяет исследовать физико-геологические свойства пород-коллекторов вдоль геологического профиля, волновые эффекты, основанные на исследовании поглощения радиоволн горными породами и рудами, процессы отражения, преломления и дифракции на исследуемых геологических объектах. С увеличением диэлектрической проницаемости наполнителя вмещающих пород частота резонанса смещается влево по оси абсцисс.

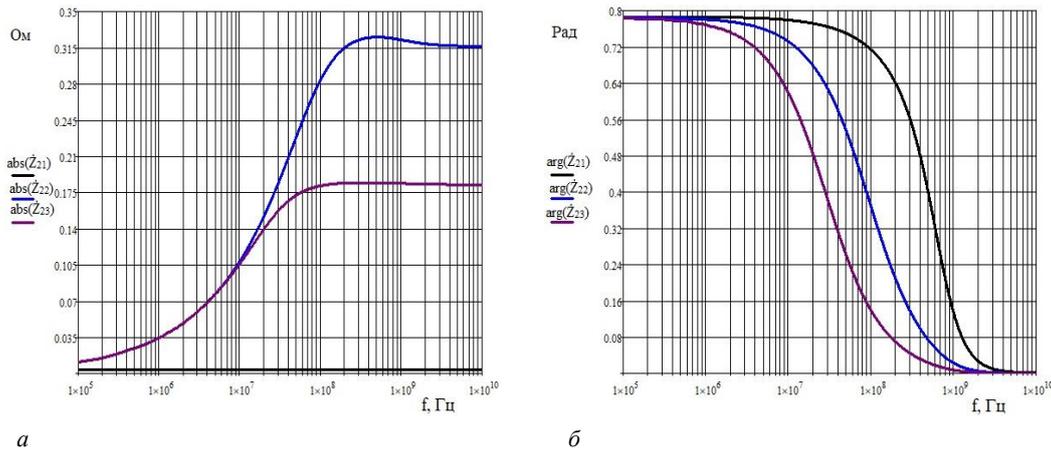
Значения составляющих тензора анизотропной среды над углеводородами зависят от поглощения радиоволн в мощности пласта породы, поэтому частота резонанса может смещаться в область высоких частот. Наблюдается скачкообразный рост фазовой составляющей на частотах 20 МГц – 200 МГц. С увеличением значения диэлектрической проницаемости среды частота увеличения фазы смещается влево. Фазовые характеристики рассматриваемой компоненты не меняются в диапазоне частот 10 кГц – 1 МГц. На участке 60 МГц – 10 ГГц происходит уменьшение фазы с положительных значений на отрицательные и переходом через нуль между (1 – 2) ГГц.



**а** —  $|\dot{Z}_{11}(f)|$  — для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц;  $|\dot{Z}_{12}(f)|$  — для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц;  
 $|\dot{Z}_{13}(f)|$  — для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц;  
**б** —  $\arg(\dot{Z}_{11}(f))$  — для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц;  $\arg(\dot{Z}_{12}(f))$  — для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц;  
 $\arg(\dot{Z}_{13}(f))$  — для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц

**Рисунок 3. – Зависимости абсолютной и фазовой составляющих поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{11}$  от частоты несущего колебания**

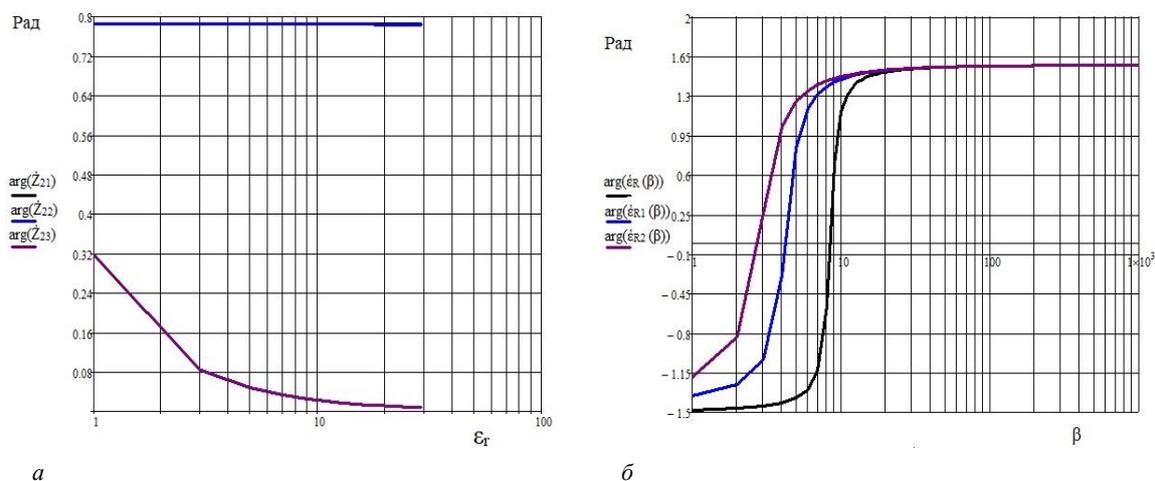
Дополнительно были проанализированы амплитудные составляющие компонент поверхностного импеданса среды над УВЗ для  $|\dot{Z}_{21}(f_2)|$  (рисунок 4, а). Закон изменения абсолютной составляющей для данной компоненты отличается от рассмотренной выше характеристики. На участке (1 МГц – 1 ГГц) происходит увеличение поверхностного импеданса и при дальнейшем росте частоты зондирования характеристика не меняется. Проведено моделирование зависимостей фазовых характеристик компонент данной составляющей поверхностного импеданса от частоты (рисунок 4, б). Установлено, что низкие значения частоты  $f_2$  не влияют на амплитудную компоненту рассматриваемой составляющей. На участке (1 МГц – 1 ГГц) происходит уменьшение фазы поверхностного импеданса, и при дальнейшем росте частоты зондирования характеристика не меняется.



**а** —  $|\dot{Z}_{21}(f)|$  — для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц;  $|\dot{Z}_{22}(f)|$  — для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц;  
 $|\dot{Z}_{23}(f)|$  — для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц;  
**б** —  $\arg(\dot{Z}_{21}(f))$  — для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц;  $\arg(\dot{Z}_{22}(f))$  — для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц;  
 $\arg(\dot{Z}_{23}(f))$  — для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц

**Рисунок 4. – Зависимости абсолютной и фазовой составляющих поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{12}$  от частоты несущего колебания**

Проведено моделирование зависимостей фаз поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{21}$  и диэлектрической проницаемости среды над УВЗ  $\arg(\dot{\epsilon}_R)$ , представленных на рисунке 5.



**а** –  $\arg(\dot{Z}_{21}(\epsilon_r))$  – для  $f_2 = 10^4$  Гц,  $\beta = 1$ ;  $\arg(\dot{Z}_{22}(\epsilon_r))$  – для  $f_2 = 10^5$  Гц,  $\beta = 1$ ;  
 $\arg(\dot{Z}_{23}(\epsilon_r))$  – для  $f_2 = 10^9$  Гц,  $\beta = 1$ ;  
**б** –  $\arg(\dot{\epsilon}_R(\beta))$  – для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 10$ ;  $\arg(\dot{\epsilon}_{R1}(\beta))$  – для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 20$ ;  
 $\arg(\dot{\epsilon}_{R2}(\beta))$  – для  $k_m = 0,5$ ,  $\epsilon_r = 30$

**Рисунок 5.** – Зависимости фазовых составляющих поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{21}$  и диэлектрической проницаемости среды над УВЗ  $\arg(\dot{\epsilon}_R)$

Установлено, что данные характеристики (см. рисунок 5, а) не изменяются при низких значениях частоты несущей. На частоте  $f_2 = 10^9$  Гц с ростом диэлектрической проницаемости характеристики имеют большую крутизну. Это влияние проявляется для значений диэлектрических проницаемостей меньше 10. Фазовые характеристики для компонент диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой круговой поляризацией имеют наибольшие изменения при значениях индекса частотной модуляции 1 – 10.

**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  $\dot{\epsilon}_3$  при частоте несущего колебания  $f = (1 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^7)$  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. Бурцев, М. И. Поиски и разведка месторождений нефти и газа / М. И. Бурцев – М. : Рос. ун-т дружбы народов. – 2006. – 264 с.
2. Moskvichew, V. N. Interaction 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. 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).
6. Янушкевич, В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В. Ф. Янушкевич. – Новополоцк : ПГУ, 2017. – 232 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. Шайдуллин, Р. Р. Поиск перспективных на углеводороды объектов с использованием методов ГИС на примере отложений Саргаевского горизонта / Р. Р. Шайдуллин, С. Е. Воронков // Междунар. журн. гуманитарных и естественных наук. – Vol. 4-1 (67), 2022. – P. 66–73. – DOI: [10.24412/2500-1000-2022-4-1-66-73](https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-4-1-66-73).
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. Gabrielsen, P. T. 3D CSEM for hydrocarbon exploration in the Barents Sea / P. T. Gabrielsen, D. V. Shantsev, S. Fanavoll // EAGE 5<sup>th</sup> St. Petersburg conf. & exhib. – 2012. – DOI: [10.3997/2214-4609.20143664](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20143664).
11. Гололобов, Д. В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д. В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
12. 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.
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. Мисюркеева, Н. В. Результаты электроразведочных работ методом ЗСБ при картировании рифейских отложений на территории Республики Саха (Якутия) / Н. В. Мисюркеева, И. В. Буддо, Ю. А. Агафонов // Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири : материалы II науч.-практ. конф., Новосибирск, 21–24 апр. 2015 г. / Сиб. НИИ геологии, геофизики и минер. сырья. – Новосибирск, 2015. – С. 80–83.
15. Барышников, И. А. Многопараметровая аэроаэрозондировка методом СДВР при аэрогеофизических исследованиях на нефтяных объектах Татарии / И. А. Барышников, А. Ю. Татарский // Электромагнитные исследования с контролируемые источниками : тез. докл. междунар. геофиз. конф., СПб., 24–31 мая 1996 г. / ВИРГ – Рудгеофизика ; редкол.: А. А. Петров [и др.]. – СПб., 1996. – С. 39–40.
16. Anderson, C. An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source / C. Anderson, J. Mattsson // First Break. – 2010. – Vol. 28, iss. 5. – P. 71–75.
17. 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.
18. Взаимодействие ЧМ-сигналов с анизотропной средой / Д. В. Гололобов [и др.]. // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : сб. материалов 2-й междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 15–17 мая 2002 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2002. – С. 300–303.
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. Гололобов, Д. В. Взаимодействие АМ-сигнала с углеводородной залежью / Д. В. Гололобов, В. Ф. Янушкевич // Современные проблемы радиотехники, электродинамики и связи : тез. докл. науч.-техн. конф., посвященной столетию радио / Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 1995. – С. 6–7.
21. Эффективность электроразведки при поисках залежей углеводородов на западе Украины / Р. С. Сейфуллин [и др.] // Методика и практика геофизических исследований. – Львов : УкрНИГРИ, 1981. – С. 101–103.

## REFERENCES

1. Burtsev, M. I. (2006). *Poiski i razvedka mestorozhdenii nefiti i gaza [Search and exploration of oil and gas fields]*. Moscow: RUDN. (In Russ.).
2. 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.
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. Malekhmir, A., Urosevich, 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).
6. Yanushkevich, V. F. (2017). *Elektromagnitnye metody poiska i identifikatsii uglevodorodnykh zalezhei [Electromagnetic methods for searching and identifying hydrocarbon deposits]*. Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
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. Shaidullin, R. R., & Voronkov, S. E. (2022). Poisk perspektivnykh na uglevodorody ob'ektov s ispol'zovaniem metodov GIS na primere otlozhenii Sargaevskogo gorizonta (Search for objects promising for hydrocarbons using well logging methods on the example of deposits of the Sargaev horizon). *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk [International Journal of Humanities and Natural Sciences]*, 4-1(67), 66–73. DOI: [10.24412/2500-1000-2022-4-1-66-73](https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-4-1-66-73).

9. Geldmacher, I., & Strack, K. (2017). A Fit-for-purpose electromagnetic System for Reservoir Monitoring and Geothermal Exploration. *GRC Transactions*, (41), 1649–1658.
10. Gabrielsen, P.T., Shantsev, D.V., & Fanavoll, S. (2012). 3D CSEM for hydrocarbon exploration in the Barents Sea. In *EAGE 5<sup>th</sup> St. Petersburg conf. & exhib.* DOI: [10.3997/2214-4609.20143664](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20143664).
11. Gololobov, D. V. (2009) *Vzaimodeistvie elektromagnitnykh voln i uglevodorodnykh zalezhei [Interaction of electromagnetic waves and hydrocarbon deposits]*. Minsk: Bestprint. (In Russ.).
12. 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.
13. Helwig, S. L., Wood, W., & Gloux B. (2019). Vertical-vertical controlled-source electromagnetic instrumentation and acquisition. *Geophysical Prospecting*, 67(6), 1582–1594.
14. Misyurkeeva, N. V., Buddo, I. V., & Agafonov, Yu. A. (2015). Rezul'taty elektrorazvedochnykh rabot metodom ZSB pri kartirovaniy rifeiskikh otlozhenii na territorii Respubliki Sakha (Yakutiya) [The results of electrical exploration works using the TSB method when mapping Riphean deposits on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)]. In *Geologiya, geofizika i mineral'noe syr'e Sibiri [Geology, geophysics and mineral raw materials of Siberia]* (80–83). Novosibirsk: SNIIGIMS. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Baryshnikov, I. A., & Tatarskii, A. Yu. (1996). Mnogoparametrovaya aerorazvedka metodom SDVR pri aerogeofizicheskikh issledovaniyakh na nefyanykh ob'ektakh Tatarii [Multi-parameter aerial survey using the SDVR method in airborne geophysical studies at oil facilities in Tataria]. In A. A. Petrov [et al.] (Eds.) *Elektromagnitnye issledovaniya s kontroli-ruemyimi istochnikami [Electromagnetic research with controlled sources]* (39–40). St. Petersburg: VIRG – Rudgeofizika. (In Russ.).
16. Anderson, C., & Mattsson, J. (2010). An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source. *First Break*, 28(5), 71–75.
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., 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: Publ. PSU. (In Russ.).
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. Gololobov, D. V., & Yanushkevich, V. F. (1995). Vzaimodeistvie AM-signala s uglevodorodnoi zalezh'yu [Interaction of the AM-signal with a hydrocarbon reservoir]. In *Sovremennye problemy radiotekhniki, elektrodinamiki i svyazi [Modern problems of radio engineering, electrodynamics and communications]* (6–7). Minsk: Publ. BSUIR. (In Russ.).
21. Seifullin, R. S., Ozerskii, I. P., Freik, I. N., & Khavenzy, I. V. (1981). Effektivnost' elektrorazvedki pri poiskakh zalezhei uglevodorodov na zapade Ukrainy [The effectiveness of electrical exploration in the search for hydrocarbon deposits in the west of Ukraine]. In *Metodika i praktika geofizicheskikh issledovaniy [Methods and Practice of Geophysical Research]* (101–103). Lviv: UkrNIGRI. (In Russ.).

Поступила 22.06.2022

## ELECTROMAGNETIC METHODS OF SEARCHING AND DEFINITION OF HYDROCARBON DEPOSITS

V. YANUSHKEVICH  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*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.*