

## МОДЕЛЬ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

*канд. техн. наук, доц. В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ*  
*(Полоцкий государственный университет*  
*имени Евфросинии Полоцкой)*

*В статье проведено исследование характеристик анизотропной среды над углеводородами при воздействии амплитудно-модулированных сигналов. Предложена адаптивная модель залежи углеводородов с возможностью ее коррекции по результатам экспериментальных исследований по методике Сейфуллина. Проведено моделирование компонентов поверхностного импеданса среды над углеводородными залежами. Исследовано влияние характеристик зондирующих сигналов на анизотропную среду над углеводородами. Акцентировано внимание на применение методов радиокомплексирования для высокоэффективного, научно-обоснованного прогнозирования, оконтуривания углеводородных залежей. Даны рекомендации по совершенствованию методов электроразведки для поисковой геофизики при вариации параметров зондирующих сигналов.*

**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, 2] основывается на анализе электрохимических и электрофизических процессов над образованными над углеводородными залежами (УВЗ) анизотропными средами (АС) и применении свойств зондирующих сигналов, позволяющих дифференцировать объекты по откликам на формирующее воздействие. Активное усовершенствование имеющихся и внедрение [3] 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 [4]. Внедрение методов и аппаратуры для поиска и оконтуривания УВЗ основано на решении данных задач с использованием различных режимов зондирования [5].

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

Методика исследований заключается в определении поверхностного импеданса среды над УВЗ по формулам

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} &= -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L}} \left( \sqrt{\dot{\epsilon}_R} - \sqrt{\dot{\epsilon}_L} \right), \\ \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} &= \frac{1}{2\sqrt{\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L}} \left( \sqrt{\dot{\epsilon}_R} + \sqrt{\dot{\epsilon}_L} \right),\end{aligned}\tag{1}$$

где  $\dot{\epsilon}_R, \dot{\epsilon}_L$  – диэлектрическая проницаемость для суммарной и разностной компонент электромагнитных волн (ЭМВ),

$\dot{Z}_{11}$  и  $\dot{Z}_{12}$  – компоненты поверхностного импеданса среды.

Режим модулированных сигналов характеризуют составляющие  $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$  с частотной компонентой  $\tilde{\omega}_2$ , плазменная частота  $\omega_{pi}$ ; гиротропная частота  $\omega_{gi}$ ; частота столкновения частиц  $\nu_i$ ; относительная диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon_r$ ; проводимость среды  $\sigma_r$ ; диэлектрическая постоянная  $\epsilon_0$ .

Комбинационные составляющие равны

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_R &= \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \dot{\epsilon}_R + j \text{Im} \dot{\epsilon}_R \\ \dot{\epsilon}_L &= \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \dot{\epsilon}_L + j \text{Im} \dot{\epsilon}_L.\end{aligned}\tag{2}$$

Рассмотрено воздействие на АС над скоплениями углеводородов радиосигнала тональной амплитудной (АМ) модуляции вида

$$e(t) = E(1 + k_m \cos \Omega t) \cos \omega t,\tag{3}$$

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 [4]:

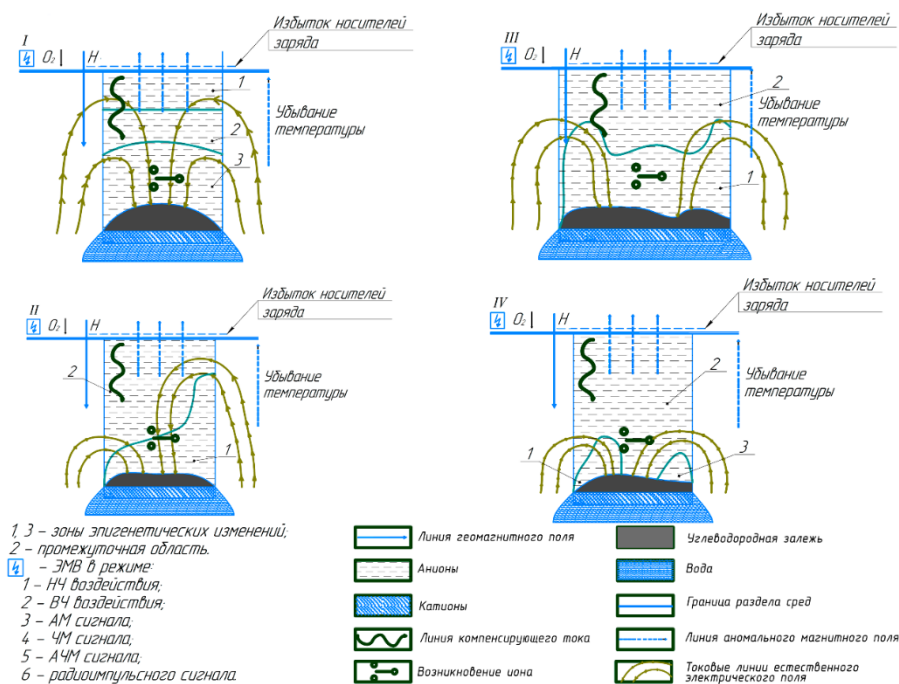
$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2 - \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \nu_i^2} + j \left[ \frac{\epsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega(1 + k_m \cos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

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

**Результаты исследований.** Проводилось исследование поверхностного импеданса среды над УВЗ для параметров [1]:

- значения диэлектрической проницаемости вмещающих пород  $\epsilon_r = 1 - 30$  и электрической проводимости  $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-5} - 1$  См/м;
- концентрации частиц  $N_e = N_{и} = (10^{16} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$ .
- частота столкновения частиц  $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$  рад/с.

На основании проведенного анализа была предложена адаптивная геоэлектрическая модель залежей углеводородов (рис. 1).



**Рисунок 1. – Геоэлектрические модели залежей углеводородов**

Она представляет собой комбинирование моделей Москвичёва и Сейфуллина с учетом проведенных исследований.

По модели Москвичёва [1] 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 [6] приняты следующие факторы:

- Повышение удельного сопротивления среды над УВЗ (совпадает с положением Москвичева).

- Формирование в таких средах источников естественных электрических полей (у Москвичева 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:

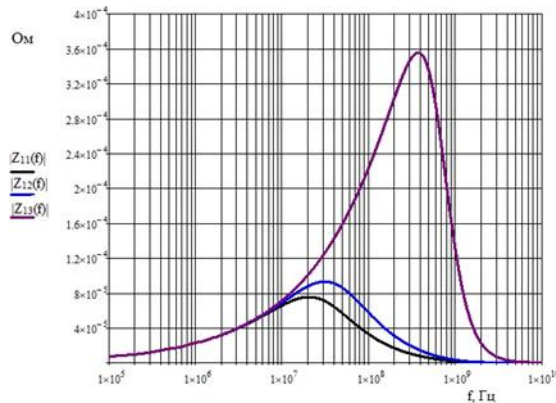
- взаимодействие модулированных ЭМВ с УВЗ.

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 [6].

Проведен анализ компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ в режиме АМ сигнала. Абсолютные значения для компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ  $Z_{11}$  приведены на рисунке 2. На частотах (10 – 400) МГц происходит резонансное увеличение данной компоненты поверхностного импеданса. Зондирование АС 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.

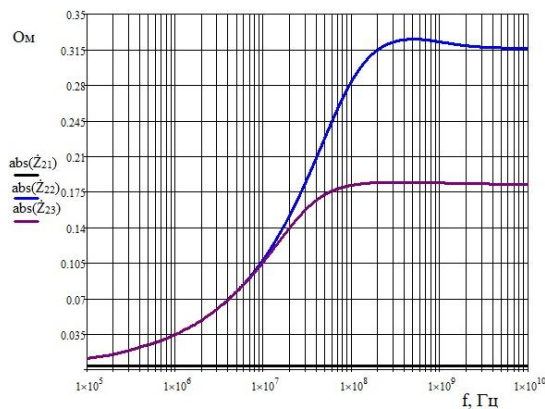


$|\dot{Z}_{11}(f)|$  – для  $k_m = 0.5$ ,  $\varepsilon_r = 5$ ,  $F = 10^4$  Гц;  
 $|\dot{Z}_{12}(f)|$  – для  $k_m = 0.5$ ,  $\varepsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц;  
 $|\dot{Z}_{13}(f)|$  – для  $k_m = 0.5$ ,  $\varepsilon_r = 15$ ,  $F = 10^4$  Гц

**Рисунок 2. – Зависимости абсолютной и фазовой составляющих поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{11}$  от частоты несущего колебания**

Дополнительно были проанализированы амплитудные составляющие компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ для  $|\dot{Z}_{21}(f_2)|$  (рис. 3) в режиме АМ сигнала. 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.

Процедура диагностики среды над УВЗ осуществляется по методике решения обратной задачи за счет набора конкретных значений расстояний и конкретизации электродинамических моделей УВЗ с учетом влажности слоев, климатических факторов и особенностей измерений сезонного характера.



$|\dot{Z}_{12}(f)|$  – для  $k_m = 0.5$ ,  $\varepsilon_r = 5$ ,  $F = 10^4$  Гц;  
 $|\dot{Z}_{22}(f)|$  – для  $k_m = 0.5$ ,  $\varepsilon_r = 10$ ,  $F = 10^4$  Гц;  
 $|\dot{Z}_{23}(f)|$  – для  $k_m = 0.5$ ,  $\varepsilon_r = 15$ ,  $F = 10^4$  Гц

**Рисунок 3. – Зависимости абсолютной и фазовой составляющих поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{12}$  от частоты несущего колебания**

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

– применение методов радиокомплексирования может осуществляться на основе адаптивной залежи углеводородов и коррекции модели по результатам экспериментальных исследований по методике Сейфуллина;

– в режиме АМ сигнала на частотах (10 – 400) МГц происходит резонансное увеличение компоненты поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{11}$ , на участке (1 МГц – 1 ГГц) происходит увеличение компоненты поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{12}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Moskvichew, V. N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V. N. Moskvichew // 9-th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
2. Effect of a powerful low-frequency signal on an anisotropic medium over hydrocarbon / V. F. Yanushkevich, D. A. Dauhiala, A. L. Adamovich [et al]. - doi:10.1088/1742-6596/1889/2/022059. – Text: electronic // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1889. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1889/2/022059/pdf/> (date of publication: 18 may 2021).
3. Хмелевской, В. К. Геофизические методы исследования: учеб. пособие для геологических специальностей вузов / В. К. Хмелевской, Ю. И. Горбачев, А. В. Калинин, М. Г. Попов, Н. И. Селиверстов, В. А. Шевнин // – Петропавловск-Камчатский : Изд-во КГПУ, 2004. – 227 с.
4. Янушкевич, В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В. Ф. Янушкевич. – Новополюцк, ПГУ, 2017. – 232с.
5. Holten, T. 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.
6. Сейфуллин, Р. С. Эффективность электроразведки при поисках залежей углеводородов на западе Украины / Р. С. Сейфуллин [и др.] // – В сб.: "Методика и практика геофизических исследований". – Львов, УкрНИГРИ. – 1981. – С. 101–103.