

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С  
ГЕОЛОГИЧЕСКИМ ПРОФИЛЕМ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ**

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

**Аннотация.** Проведено моделирование взаимодействия электромагнитных волн с геологическим профилем над углеводородами при применении зондирования в режиме импульсных сигналов. Исследованы характеристики геологического профиля над углеводородными залежами в зависимости от диэлектрической проницаемости, проводимости и количества гармоник спектра импульсного сигнала. Установлено, что фаза компонент для правой и левой поляризации электромагнитных волн увеличивается при росте диэлектрической проницаемости, особенно при высоких частотах импульсных сигналов. Определены закономерности влияния проводимости среды на фазовую составляющую компонент тензора диэлектрической проницаемости. Выявленные проявления аномальных эффектов расширяют сведения о характеристиках среды над залежами при воздействии импульсных электромагнитных волн и представляют практический интерес для поисковой геофизики. Полученные результаты могут быть использованы для электроразведки при создании аппаратуры обнаружения месторождений нефти и газа.

**Ключевые слова:** углеводородная залежь, импульсный сигнал, электромагнитные волны.

Актуальность внедрения методов обнаружения углеводородных залежей (УВЗ) и моделирования взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с геологическим профилем над углеводородами для установления оптимальных характеристик зондирующих сигналов постоянно возрастает [1–3]. Известны методы мониторинга проседания нефтяных месторождений с помощью SAR-интерферометрии L-диапазона [4]. Натурные исследования динамических смещений в зоне тектонического нарушения позволяют дифференцировать среды по своим свойствам [5]. Для поиска углеводородов применяются долговременный мониторинг разломов [6], дифференциальная SAR-интерферометрия [7], интерферометрия постоянного рассеивателя ASAR [8], обнаружение полупроницаемых фильтрационных барьеров [9].

В данной работе проведено моделирование взаимодействия ЭМВ с УВЗ при использовании импульсного сигнала с круговой частотой  $\omega$ , частотой несущего сигнала  $F_2$  и длительностью импульса  $\tau$  с составляющими тензора  $\dot{\epsilon}_1$ ,  $\dot{\epsilon}_2$ ,  $\dot{\epsilon}_3$  [3]:

$$\left. \begin{cases} \dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_r \cdot F \left( 1 + \frac{n\Omega_1}{\omega} \right) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{F \cdot \omega_{\Pi i}^2}{\omega} \cdot A - jF \left[ \frac{\omega_{\Pi i}^2}{\omega} \cdot v_i \cdot B + \frac{\sigma_r F}{\omega \epsilon_0} \right] \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2}{\omega} \cdot F \cdot \omega_{\Gamma i} \cdot C - 2j \frac{\omega_{\Pi i}^2}{\omega} \cdot F \cdot \omega_{\Gamma i} \cdot v_i \cdot D \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 = \sum_{i=1}^2 \left\{ F \left( 1 + \frac{n\Omega_1}{\omega} \right) \cdot \left[ \epsilon_r - \frac{\omega_{\Pi i}^2}{\omega} \cdot E \right] - j \left[ \frac{\omega_{\Pi i}^2}{\omega} \cdot F \cdot v_i \cdot G + \frac{\sigma_r F}{\omega \epsilon_0} \right] \right\} \end{cases} \right\}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость поверхности;  
 $\omega_{\Pi i}$  – частота Ленгмюра;  
 $\omega_{\Gamma i}$  – гиротропная частота;  
 $v_i$  – частота столкновения частиц;  
 $\sigma_r$  – проводимость поверхности;  
 $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  
 $\Omega_1$  – круговая частота;  
 $A, B, C, D, E, G$  – частотные соотношения;

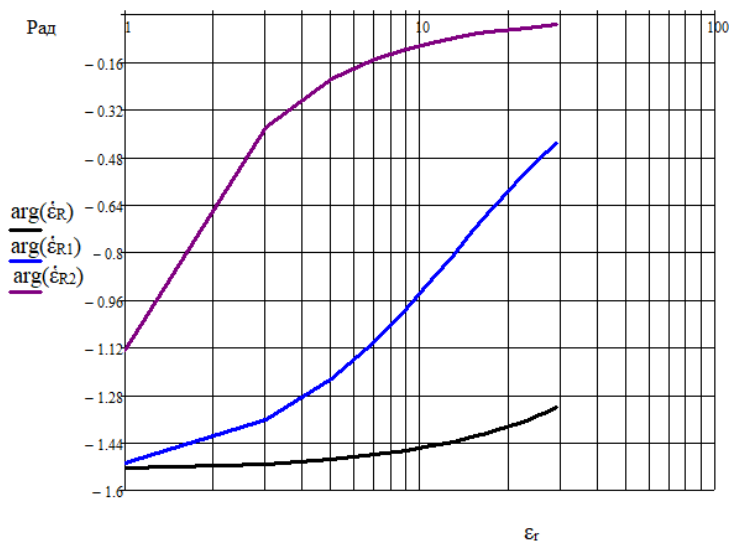
$$F = \frac{\tau}{T} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau)}{\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau},$$

где  $T$  – период;  
 $F_1$  – частота следования импульсов;  
 $n$  – количество гармоник.

Электроразведка основывается на проявлении аномальных явлений и расширении информации о характеристиках профиля над залежами и воздействие импульсных ЭМВ на анизотропную среду над УВЗ представляет практический интерес.

Проведено моделирование зависимостей фазовых составляющих суммарной компоненты тензора диэлектрической проницаемости от диэлектрической проницаемости наполнителя (рисунок 1). Установлено, что фаза данной составляющей тензора диэлектрической проницаемости наиболее подвержена влиянию значения диэлектрической проницаемости в диапазоне 1 – 10, когда наблюдается резкое увеличение фазы особенно при высоких частотах радиоимпульсных сигналов, например для  $f = 10^8$  Гц характерно такое увеличение (с приближением к нулю

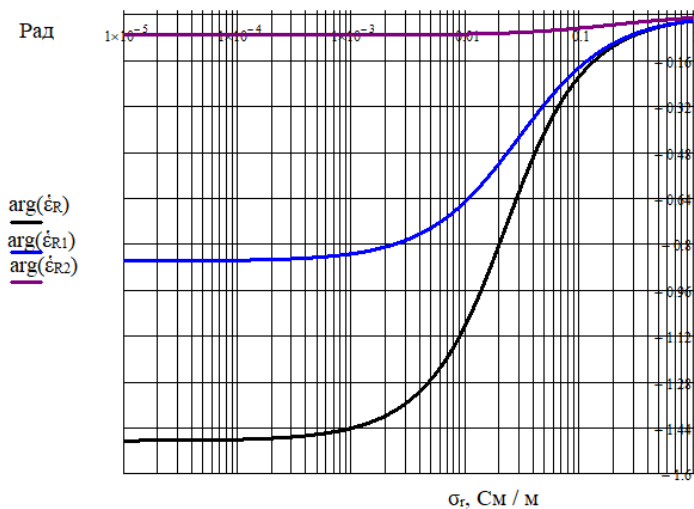
для  $\epsilon_r = 30$ ) на анализируемом участке диэлектрической проницаемости наполнителя пород над УВЗ.



$\arg(\dot{\epsilon}_R(\epsilon_r))$  – для  $F_2 = 10^6$  Гц;  
 $\arg(\dot{\epsilon}_{R1}(\epsilon_r))$  – для  $F_2 = 10^7$  Гц;  
 $\arg(\dot{\epsilon}_{R2}(\epsilon_r))$  – для  $F_2 = 10^8$  Гц

Рисунок 1. – Зависимости фазы суммарной компоненты для  $T = 5\tau$ ,  $n = 5$

Зависимости фазовых составляющих компонентов диэлектрической проницаемости от проводимости приведены на рисунке 2. Следует отметить, что фазовые зависимости для указанной компоненты под влиянием проводимости среды изменяются в диапазоне (0,001 – 1) См/м, особенно на частотах  $F_2 = (10^6 - 10^7)$  Гц.

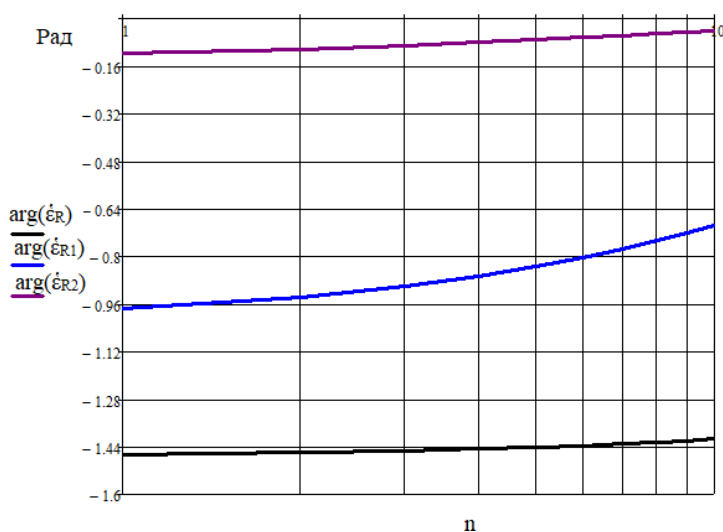


$\arg(\dot{\epsilon}_R(\sigma_r))$  – для  $F_2 = 10^6$  Гц,  $\epsilon_r = 10$ ;  
 $\arg(\dot{\epsilon}_{R1}(\sigma_r))$  – для  $F_2 = 10^7$  Гц,  $\epsilon_r = 10$ ;  
 $\arg(\dot{\epsilon}_{R2}(\sigma_r))$  – для  $F_2 = 10^8$  Гц,  $\epsilon_r = 10$

Рисунок 2. – Зависимости фазы суммарной компоненты для  $T = 2\tau$ ,  $n = 5$

Установлено, что фазовые характеристики (рисунок 3) комбинационной составляющей для тензора диэлектрической проницаемости ЭМВ с правой поляризацией возрастают с ростом количества гармоник спектра импульсного сигнала,

причем с увеличением частоты радиоимпульса наблюдается увеличение данной компоненты.



$\arg(\dot{\epsilon}_R(n))$  – для  $F_2 = 10^6$  Гц,  $\epsilon_r = 10$ ;  
 $\arg(\dot{\epsilon}_{R1}(n))$  – для  $F_2 = 10^6$  Гц,  $\epsilon_r = 10$ ;  
 $\arg(\dot{\epsilon}_{R2}(n))$  – для  $F_2 = 10^6$  Гц,  $\epsilon_r = 10$

Рисунок 3. – Зависимости фазы суммарной компоненты для  $T = 2\tau$ ,  $n = 5$

Проведенный анализ распространения ЭМВ в среде над углеводородами в режиме импульсных сигналов показал, что:

- фаза компоненты для правой поляризации ЭМВ (для левой поляризации ЭМВ характеристики совпадают) резко увеличивается при росте диэлектрической проницаемости, особенно при высоких частотах импульсных сигналов, например для  $F_2 = (10^7 - 10^8)$  Гц;

- фаза составляющей тензора диэлектрической проницаемости ЭМВ с правой поляризацией наиболее подвержена влиянию значения диэлектрической проницаемости в диапазоне 1 – 10, когда наблюдается резкое увеличение фазы особенно при высоких частотах импульсных сигналов;

- на фазовую составляющую компонентов диэлектрической проницаемости проводимость среды оказывает влияние в диапазоне (0,001 – 1) См/м;

- для выделения границ и идентификации УВЗ можно рекомендовать частоты радиоимпульса  $F_2 = (10^6 - 10^7)$  Гц, на которых фазовые зависимости изменяются для указанной компоненты под влиянием проводимости среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Янушкевич, В.Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В.Ф. Янушкевич // – Новополюцк, ПГУ, 2017. – 232 с.
2. Петров, К.Н. Метод монотонных функций и его применение к прогнозу залежей углеводородов / К.Н. Петров // Информационные процессы. – 2023. – Т. 23. – № 1. – С. 126–137.

3. Янушкевич В. Ф. Методы поиска и оконтуривания углеводородных залежей с использованием модулированных и радиоимпульсных сигналов / В. Ф. Янушкевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки, 2022. – № 11(39). – С. 89–98.
4. Wiesmann, A. Subsidence monitoring over oil fields with L-band SAR interferometry / A. Wiesmann [et al.] // Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '03. Proceedings. IEEE International. – 2003. – Vol. 3. – P. 1546–1548.
5. Sashourin, A.D. Field investigation of dynamic displacement in zone of tectonic breaking. / A.D. Sashourin [et al.]. Rock mechanics – a challenge for society: Proceedings of the ISRM regional symposium EUROK 2001. Espoo, Finland 3–7 June 2001/ Balkema 2001. – P. 157–162.
6. Stemberk, J. A tectonic pressure pulse and increased geodynamic activity recorded from the long-term monitoring of faults in Europe / J. Stemberk, B. Košťák, S. Cacoń // – Tectonophysics. – 2010. – Vol. 487. – P. 1–12.
7. Khakim, M.Y.N. Detection of localized surface uplift by differential SAR interferometry at the Hangingstone oil sand field / M.Y.N. Khakim, T. Takeshi, M. Toshifumi // Alberta, Canada. – Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of. – 2013. – Vol. PP, Is. 99. – P. 1–11.
8. Zhao, Q. Analysis of active ground subsidence zones in Guangzhou city using ASAR persistent scatterer interferometry. / Q. Zhao [et al.] – In Urban Remote Sensing Event, 2009 Joint. Shanghai. – 2011. – P. 1 – 5.
9. Karger, M. The early detection of semi-permeable filtration barriers by using SAR interferometry. / M. Karger – Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International. – P. 250–253.