

УДК 621.371: 550.837.6

DOI 10.52928/2070-1624-2025-44-1-70-76

УЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ В РЕЖИМЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С АНИЗОТРОПНЫМИ СРЕДАМИ

канд. техн. наук, доц. В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ,
К. И. ИВАНОВА, О. А. КИЗИНА, Д. С. СИВАЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Проведено исследование влияния концентрации частиц на электродинамические характеристики анизотропных сред в режиме низкочастотного взаимодействия электромагнитных волн. Исследованы характеристики горных пород над углеводородами с учетом требований многофакторного анализа. Установлены диапазоны концентраций электронов и ионов с различными степенями влияния на изменение вещественных и фазовых компонентов тензора для правой и левой поляризации электромагнитных волн. Отмечено, что использование широкого спектра частот зондирующих сигналов расширяет возможности для повышения эффективности проведения геологоразведочных работ. Полученные результаты математического моделирования взаимодействия могут быть использованы для поисковой геофизики с целью обнаружения месторождений нефти и газа.

Ключевые слова: углеводородная залежь, концентрация частиц, тензор, поляризация, частота.

Введение. В настоящее время поисковая геофизика основывается на усовершенствовании известных и разработке новых электромагнитных методов (ЭММ) георазведки углеводородных залежей (УВЗ) с учетом свойств горных пород и физико-химических процессов, проходящих в земной поверхности и в анизотропных средах (АС), окружающих углеводороды [1; 2]. Приводится алгоритм, учитывающий двойные ограничения как во временном, так и в пространственном измерениях, а также демонстрирующий стабильность и осуществимость, высокую производительность при инвертировании данных мониторинга для различных уровней шума [3]. Все большее внимание уделяется комплексным подходам к проведению георазведки и интерпретации полученных данных [4]. Мониторинг изменений в геометрии углеводородного резервуара и свойств поровой жидкости, происходящих в процессе добычи, играет ключевую роль в оценке эффективности извлечения и количественном анализе оставшихся запасов [5].

Приводятся результаты 1D и 3D прямого, а также 1D и 2D обратного моделирования с контролируемым источником электромагнитных полей (CSEM) на известном объекте на шельфе Западной Африки с целью продемонстрировать технологию, разработать методологию анализа и лучше понять ее ограничения [6]. Геохимические данные показывают повышенные концентрации метана в поверхностных отложениях, сопутствующие быстрому снижению концентраций сульфата, что указывает на повышенный поток метана и его окисление в сочетании с восстановлением сульфата у основания обращенного к суше хребта [7]. Метод георазведки требует обеспечения теоретических основ поисков и выделения нефти и газа [8]. В работах [9; 10] рассмотрены различные режимы взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с АС над углеводородами.

Методы полевой геофизики и методики проведения геологоразведочных работ приведены в работах [11; 12]. Гравиразведка и магниторазведка [13] имеют определенные ограничения к применению. Математическое моделирование позволяет установить требования к аппаратуре для проведения натурных испытаний [14; 15].

Актуальность совершенствования и разработки методов поиска и идентификации УВЗ обусловлена задачей обеспечения экономик государств стратегическим сырьем – углеводородами, что стимулирует непрерывное развитие технологий георазведки месторождений нефти и газа. Работы в этом направлении ведутся крупнейшими мировыми компаниями, которые уделяют особое внимание сокращению сроков и затрат на геологоразведочные испытания, а также повышению точности определения границ залежей углеводородов.

Методика исследований. Целью данной работы является проведение математического моделирования в режиме низкочастотного (НЧ) взаимодействия ЭМВ с АС с учетом концентрации частиц для бигармонического сигнала вида

$$\vec{e}(t) = \vec{e}_1(t) + \vec{e}_2(t) = E_1 \cos \omega_1 t + E_2 \cos \omega_2 t, \quad (1)$$

где $E_1, E_2, \omega_1 = 2\pi f_1, \omega_2 = 2\pi f_2$ соответственно амплитуды и частоты двух сигналов.

Для расчетов использованы компоненты тензора $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$; гиротропная частота $\omega_{Гi}$; частота столкновительных процессов ν_i ; относительная диэлектрическая проницаемость АС ϵ_r ; проводимость среды σ_r ; диэлектрическая постоянная ϵ_0 ; коэффициенты отношения амплитуд и частот k_E и k_ω .

Составляющие тензора диэлектрической проницаемости среды для режима НЧ-сигнала приведены в [9]. Концентрации электронов и ионов N_e и N_i фигурируют в выражении для плазменной частоты

$$\omega_{Пе,i} = q_{e,i} \left(\frac{N_{e,i}}{m_{e,i} \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где $q_{e,i}$ – заряд электрона (иона);
 $m_{e,i}$ – масса электрона (иона).

Методика исследований состоит в анализе компонент тензора диэлектрической проницаемости среды над углеводородами

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_R(N_{e,i}) &= \dot{\epsilon}_1(N_{e,i}) + \dot{\epsilon}_2(N_{e,i}) = \text{Re} \dot{\epsilon}_R(N_{e,i}) + j \text{Im} \dot{\epsilon}_R(N_{e,i}); \\ \dot{\epsilon}_L(N_{e,i}) &= \dot{\epsilon}_1(N_{e,i}) - \dot{\epsilon}_2(N_{e,i}) = \text{Re} \dot{\epsilon}_L(N_{e,i}) + j \text{Im} \dot{\epsilon}_L(N_{e,i}) \end{aligned} \quad (3)$$

для следующих параметров среды над залежами углеводородов [9]: значения диэлектрической проницаемости вмещающих пород $\epsilon_r = 1 - 30$ и электрической проводимости $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-5} - 1 \text{ См/м}$; концентрации частиц $N_e = N_i = (10^{16} - 10^{20}) \text{ м}^{-3}$, частота столкновения частиц $\nu = 1 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{10} \text{ рад/с}$.

Соотношение концентраций частиц показывает коэффициент ионизации

$$k_i = \frac{N_i}{N_e}. \quad (4)$$

Исследования выражений (3) в настоящее время получили широкое распространение (например, в работах [9; 10]). Методы разведки показали высокую эффективность. Вместе с тем сложность проходящих в окружающей углеводороды среде процессов, различие условий залегания горных пород, их структурного построения, диэлектрической проницаемости, электрической проводимости и других электрических и геологических характеристик требуют всестороннего учета вышеперечисленных факторов. Существующие модели УВЗ используют влияние миграции углеводородов на АС над залежами. Воздействие ЭМВ на вмещающие породы описывается режимами как однорезонансного, так и многорезонансного взаимодействия.

Таким образом, исследование физико-химических процессов в среде над залежами требует многофакторного анализа. В данной работе акцент сделан на вариацию концентрации электронов и ионов. Это позволяет проследить динамику изменения составляющих тензора (3).

Результаты исследований. Зависимости вещественной компоненты тензора (3) для правой поляризации ЭМВ для высокочастотных составляющих $f_2 = (1 \cdot 10^6, 3 \cdot 10^6, 5 \cdot 10^6) \text{ Гц}$ приведены на рисунке 1. Коэффициент ионизации (4) выбирался равным 1. При моделировании использовались значения: диэлектрическая проницаемость вмещающих пород $\epsilon_r = 10$, электрическая проводимость $\sigma_r = 10^{-3} \text{ См/м}$, частота столкновения частиц $\nu = 2\pi \cdot 10^9 \text{ рад/с}$, коэффициенты отношения амплитуд и частот $k_E = 10^{-1}$, $k_\omega = 10^{-6}$. Характерно увеличение вещественной компоненты для более низких значений частоты f_2 . Влияние концентраций частиц можно учесть разделением их исследуемого диапазона на три участка. Отрезок $N_e = N_i = (10^{16} - 10^{17}) \text{ м}^{-3}$ характеризуется несущественным изменением $\text{Re} \dot{\epsilon}_R$. Значения вещественной компоненты тензора в диапазоне $N_e = N_i = (10^{17} - 10^{19}) \text{ м}^{-3}$ увеличиваются с большей крутизной характеристики. На отрезке $N_e = N_i = (10^{19} - 10^{20}) \text{ м}^{-3}$ происходят наиболее существенные изменения $\text{Re} \dot{\epsilon}_R$.

Зависимости вещественной компоненты тензора (3) для правой поляризации ЭМВ для высокочастотных составляющих $f_2 = (1 \cdot 10^9, 3 \cdot 10^9, 5 \cdot 10^9) \text{ Гц}$ приведены на рисунке 2. Закономерности поведения данных характеристик аналогичны зависимостям, приведенным на рисунке 1, за исключением численных значений. Например, отличие значений $\text{Re} \dot{\epsilon}_R$ на частотах f_2 , равных $1 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ и $1 \cdot 10^9 \text{ Гц}$, составляет 10^3 .

Таким образом, учет вариации концентраций частиц с использованием широкого спектра частот зондирующих сигналов (в данном случае $f_2 = (1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^{10})$ Гц) расширяет возможности для повышения эффективности проведения геологоразведочных работ. Дополнительную информацию можно получить, изменяя коэффициент ионизации (4). Поскольку концентрации электронов и ионов N_e и N_i (2) определяют значения плазменной частоты, то при воздействии ЭМВ на вмещающие породы возможен спектральный анализ на частотах многорезонансного взаимодействия.

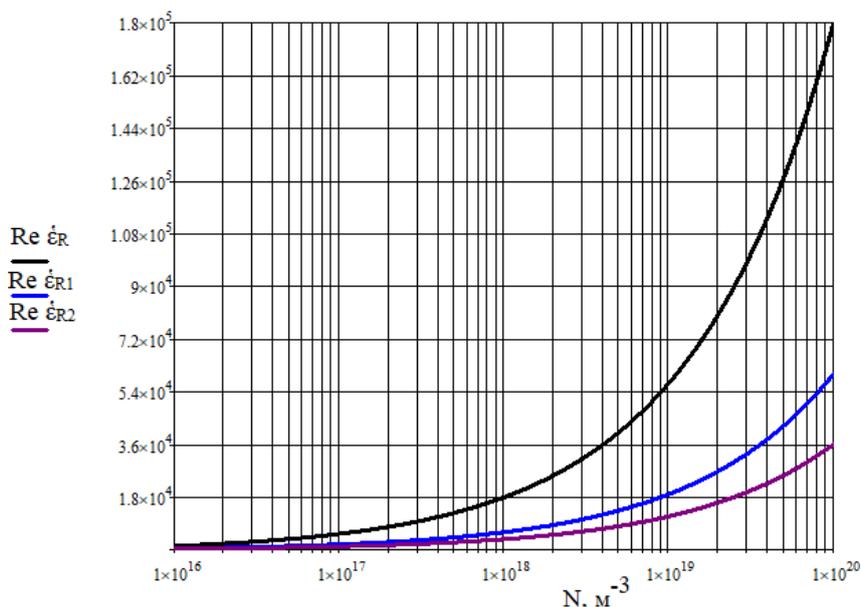


Рисунок 1. – Зависимости $\text{Re } \hat{\epsilon}_R$ – для $f_2 = 1 \cdot 10^6$ Гц; $\text{Re } \hat{\epsilon}_{R1}$ – для $f_2 = 3 \cdot 10^6$ Гц;
 $\text{Re } \hat{\epsilon}_{R2}$ – для $f_2 = 5 \cdot 10^6$ Гц

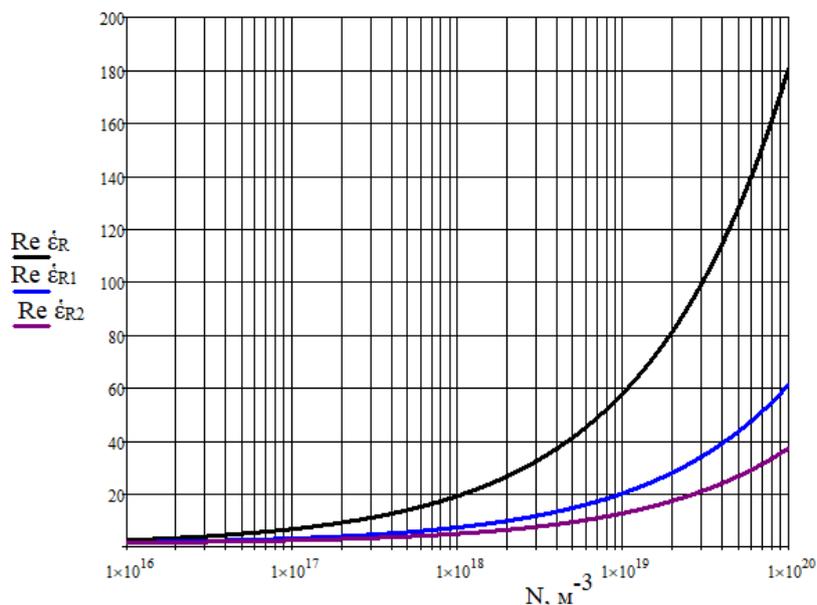


Рисунок 2. – Зависимости $\text{Re } \hat{\epsilon}_R$ – для $f_2 = 1 \cdot 10^9$ Гц; $\text{Re } \hat{\epsilon}_{R1}$ – для $f_2 = 3 \cdot 10^9$ Гц;
 $\text{Re } \hat{\epsilon}_{R2}$ – для $f_2 = 5 \cdot 10^9$ Гц

Зависимости вещественной компоненты тензора (3) для левой поляризации ЭМВ (рисунки 3, 4) получены путем моделирования характеристик, аналогичных тем, что применяются для правой поляризации ЭМВ.

Следует отметить, что для данной компоненты влияние концентраций частиц также можно учесть путем разделения их исследуемого диапазона на три участка; при этом наблюдается уменьшение $\text{Re} \dot{\epsilon}_L$ с ростом значений $N_{e,i}$. Характерно увеличение вещественной компоненты для более высоких значений частоты f_2 в отличие от результатов, показанных на рисунках 1, 2. Отличия значений вещественной компоненты тензора для левой поляризации ЭМВ для различных частот f_2 такие же, как и для вещественной компоненты тензора для правой поляризации ЭМВ. Также нужно отметить, что значения для данной компоненты отрицательные, а для $\text{Re} \dot{\epsilon}_R$ – положительные.

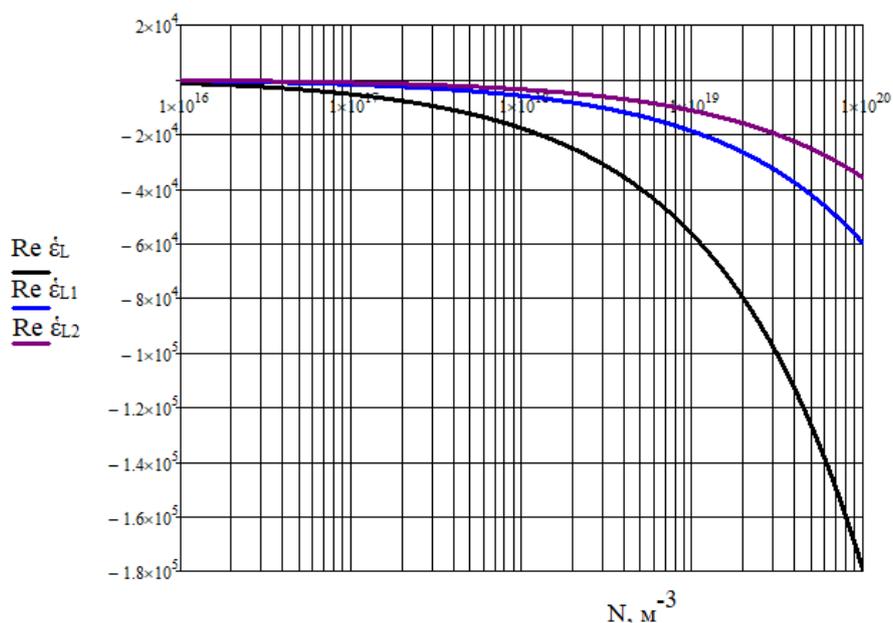


Рисунок 3. – Зависимости $\text{Re} \dot{\epsilon}_L$ – для $f_2 = 1 \cdot 10^6$ Гц; $\text{Re} \dot{\epsilon}_{L1}$ – для $f_2 = 3 \cdot 10^6$ Гц;
 $\text{Re} \dot{\epsilon}_{L2}$ – для $f_2 = 5 \cdot 10^6$ Гц

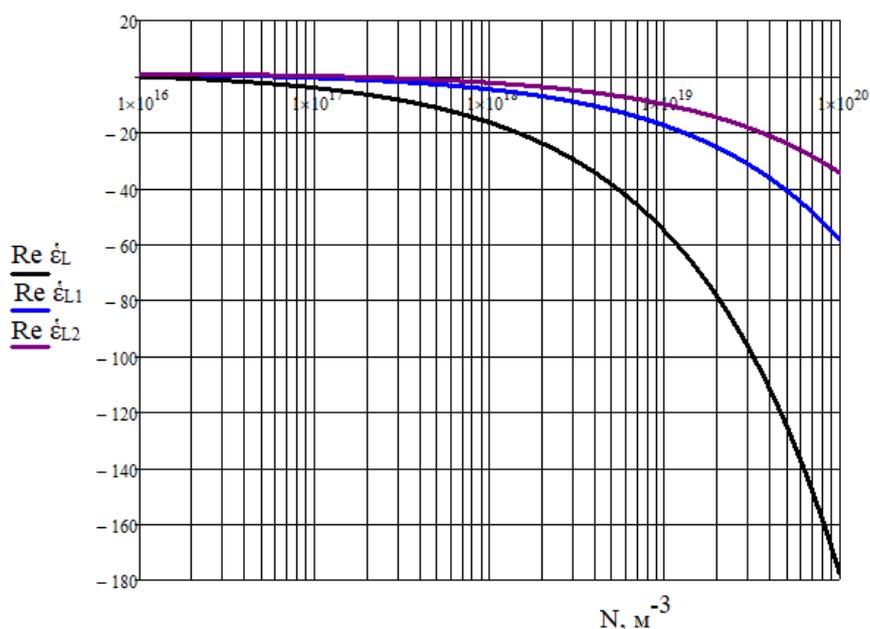


Рисунок 3. – Зависимости $\text{Re} \dot{\epsilon}_L$ – для $f_2 = 1 \cdot 10^9$ Гц; $\text{Re} \dot{\epsilon}_{L1}$ – для $f_2 = 3 \cdot 10^9$ Гц;
 $\text{Re} \dot{\epsilon}_{L2}$ – для $f_2 = 5 \cdot 10^9$ Гц

Установлено, что фазовые характеристики тензора для правой поляризации ЭМВ (рисунок 5) имеют тенденцию к уменьшению с ростом значений N_{ei} , а фазовые характеристики тензора для левой поляризации ЭМВ (рисунок 6) – к увеличению.

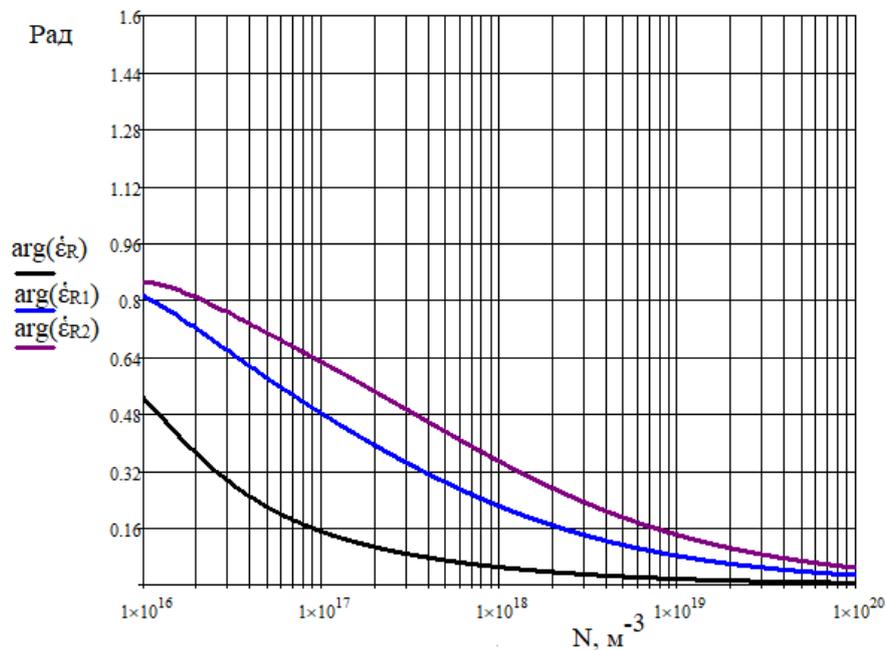


Рисунок 5. – Зависимости $\arg \dot{\epsilon}_R$ – для $f_2 = 1 \cdot 10^9$ Гц; $\arg \dot{\epsilon}_{R1}$ – для $f_2 = 3 \cdot 10^9$ Гц;
 $\arg \dot{\epsilon}_{R2}$ – для $f_2 = 5 \cdot 10^9$ Гц

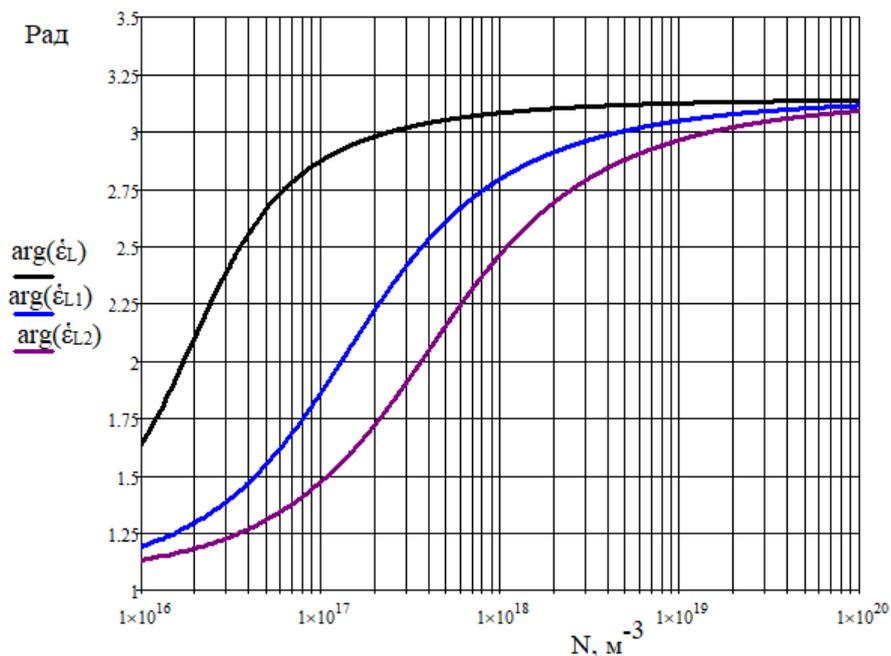


Рисунок 6. – Зависимости $\arg \dot{\epsilon}_L$ – для $f_2 = 1 \cdot 10^9$ Гц; $\arg \dot{\epsilon}_{L1}$ – для $f_2 = 3 \cdot 10^9$ Гц;
 $\arg \dot{\epsilon}_{L2}$ – для $f_2 = 5 \cdot 10^9$ Гц

Зависимости фазовых характеристик тензора приведены для высокочастотных составляющих $f_2 = (1 \cdot 10^9, 3 \cdot 10^9, 5 \cdot 10^9)$ Гц, поскольку на высоких частотах изменения фазы наиболее контрастны.

Влияние концентраций частиц также можно учесть, разделив их исследуемый диапазон на три участка. Однако закономерности изменения фазовых характеристик с ростом значений $N_{e,i}$ в данном случае другие. Отрезок $N_e = N_i = (10^{16} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$ характеризуется наиболее существенным уменьшением $\arg \dot{\epsilon}_R$ и ростом $\arg \dot{\epsilon}_L$. В диапазоне концентраций $N_e = N_i = (10^{18} - 10^{19}) \text{ м}^{-3}$ значения фазовых компонент тензора изменяются с меньшей крутизной характеристик. На отрезке $N_e = N_i = (10^{19} - 10^{20}) \text{ м}^{-3}$ происходят менее существенные вариации $\arg \dot{\epsilon}_R$ и $\arg \dot{\epsilon}_L$.

Заключение. Проведенное математическое моделирование взаимодействия ЭМВ с АС в режиме НЧ-сигналов показало следующее:

- учет вариации концентраций частиц с использованием широкого спектра частот зондирующих сигналов (в данном случае $f_2 = (1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^{10}) \text{ Гц}$) расширяет возможности для повышения эффективности проведения геологоразведочных работ;
- диапазон концентраций $N_e = N_i = (10^{19} - 10^{20}) \text{ м}^{-3}$ оказывает более существенное влияние на изменение вещественных компонент тензора для левой и правой поляризации ЭМВ, а диапазон концентраций $N_e = N_i = (10^{16} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$ – на изменение фазовых компонент тензора для левой и правой поляризации ЭМВ.

Работа выполнена в рамках договора БРФФИ № Т23-074 от 02 мая 2023 г. «Разработка и исследование методов поиска и идентификации углеводородных залежей с применением модулированных сигналов на основе алгоритмов цифровой обработки сигналов и вейвлет-преобразования».

ЛИТЕРАТУРА

1. Физика горных пород / Л. Я. Ерофеев, Г. С. Вахромеев, В. С. Зинченко и др. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 520 с.
2. Номоконова Г. Г. Физика Земли. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 105 с.
3. Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method / Q. Sun, H. Tan, W. Wan et al. // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, iss. 14. – Art. ID 1560. – DOI: [10.3390/app14041560](https://doi.org/10.3390/app14041560).
4. Никитин А. А., Булычев А. А. Комплексный анализ и комплексная интерпретация геофизических полей. – М.: ВНИИГеосистем, 2015. – 94 с.
5. Orange, A., K. Key, and S. Constable. The feasibility of reservoir monitoring using time-lapse marine CSEM // *Geophysics*. – 2009. – Vol. 74, iss. 2. – P. F21–F29. – DOI: [10.1190/1.3059600](https://doi.org/10.1190/1.3059600).
6. Price, A. 1D, 2D, and 3D modeling and inversion of 3D CSEM data offshore West Africa / A. Price, P. Turpin, M. Erbetta et al. // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – 2008. – Vol. 27, iss. 1. – P. 639–643. – DOI: [10.1190/1.3063732](https://doi.org/10.1190/1.3063732).
7. Preliminary interpretation of electromagnetic, heat flow, seismic, and geochemical data for gas hydrate distribution across the Porangahau Ridge, New Zealand / K. Schwalenberg, W. Wood, I. Pecher [et al.] // *Marine Geology*. – 2010. – Vol. 272, iss. 1–4. – P. 89–98. – DOI: [10.1016/j.margeo.2009.10.024](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.10.024).
8. Теоретические основы поисков и разведки нефти и газа: в 2-х кн. / А. А. Бакиров, Э. А. Бакиров, Г. А. Габриэлянц и др.; под ред. Э. А. Бакирова и В. Ю. Керимова. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Издательский дом «Недра», 2012. – Кн. 2: Методика поисков и разведки скоплений нефти и газа. – 416 с.
9. Янушкевич В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей. – Новополоцк, ПГУ, 2017. – 232 с.
10. Взаимодействие электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов / В. Ф. Янушкевич, К. И. Кременя, М. М. Иванов и др. // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки*. – 2016. – № 12. – С. 45–50.
11. Воскресенский Ю. Н. Полевая геофизика. – М.: Издательский дом «Недра», 2010. – 479 с.
12. Гусев Е. В. Методы полевой геофизики. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 216 с.
13. Серкеров, С. А. Гравиразведка и магниторазведка. Основные понятия, термины, определения. – М.: Недр – Бизнесцентр, 2006. – 479 с.
14. Соловейчик Ю. Г. Математическое моделирование на базе метода конечных элементов трехмерных электрических полей в задачах электроразведки // *Физика Земли*. – 1997. – № 9. – С. 67–71.
15. Соловейчик Ю. Г. МКЭ-моделирование трехмерных нестационарных электромагнитных полей // *Физика Земли*. – 1998. – № 10. – С. 78–84.

REFERENCES

1. Erofeev, L. Ya., Vakhromeev, G. S., Zinchenko, V. S., & Nomokonova, G. G. (2006). *Fizika gornykh porod*. Tomsk: Publ. TPU. (In Russ.).
2. Nomokonova, G. G. *Fizika Zemli*. (2007). Tomsk: Publ. TPU. (In Russ.).
3. Sun, Q., Tan, H., Wan, W., & Hu, Q. (2024). Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method. *Applied Sciences*, 14(4), 1560. DOI: [10.3390/app14041560](https://doi.org/10.3390/app14041560).

4. Nikitin, A. A., & Bulychev, A. A. (2015). *Kompleksnyi analiz i kompleksnaya interpretatsiya geofizicheskikh polei*. Moscow: VNIgeosistem (In Russ.).
5. Orange, A., K. Key, and S. Constable. The feasibility of reservoir monitoring using time-lapse marine CSEM (2009). *Geophysics*, 74(2), F21–F29. DOI: [10.1190/1.3059600](https://doi.org/10.1190/1.3059600).
6. Price, A., Turpin, P., Erbetta, M., Watts, D. & Cairns, G. (2008). 1D, 2D and 3D modeling and inversion of 3D CSEM data offshore West Africa. *Seg Technical Program Expanded Abstracts*, 27(1), 639–643. DOI: [10.1190/1.3063732](https://doi.org/10.1190/1.3063732).
7. Schwalenberg, K., Wood, W., Pecher, I., Hamdan, L., Henrys, S., Jegen, M., & Coffin, R. (2010). Preliminary interpretation of electromagnetic, heat flow, seismic, and geochemical data for gas hydrate distribution across the Porangahau Ridge, New Zealand. *Marine Geology*, 272(1–4), 89–98. DOI: [10.1016/j.margeo.2009.10.024](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.10.024).
8. Bakirov, A. A., Bakirov, E. A. (Ed.), Gabrielyants, G. A., Kerimov, V. Yu. (Ed.), & Mstislavskaya, L. P. (2012). *Teoreticheskie osnovy poiskov i razvedki nefiti i gaza: v 2 kn. Kn. 2: Metodika poiskov i razvedki skoplenii nefiti i gaza*. Moscow: Publ. «Nedra». (In Russ.).
9. Yanushkevich, V. F. (2017). *Elektromagnitnye metody poiska i identifikatsii uglevodorodnykh zalezhei*. Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
10. Yanushkevich, V. F., Kremeny, K. I., Ivanov, M. M., & Molodechkina, T. V. (2016). Vzaimodeistvie elektromagnitnykh voln s anizotropnymi sredami nad uglevodorodnymi zalezhami v rezhime radioimpul'snykh signalov [Interaction of Electromagnetic Waves With Anisotropic Environments over Hydrocarbonic Deposits in the Mode of Radio Pulse Signals]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (12), 45–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Voskresenskii, Yu. N. (2010). *Polevaya geofizika [Field Geophysics Exploraiton]*. Moscow: Publ. «Nedra». (In Russ.).
12. Gusev, E. V. (2012). *Metody polevoi geofiziki*. Tomsk: Publ. TPU. (In Russ.).
13. Serkerov, S. A. (2006). *Gravirazvedka i magnitorazvedka. Osnovnye ponyatiya, terminy, opredeleniya*. Moscow: Nedra – Biznestsentr. (In Russ.).
14. Soloveichik, Yu. G. (1997). Matematicheskoe modelirovanie na baze metoda konechnykh elementov trekhmernykh elektricheskikh polei v zadachakh elektrorazvedki. *Fizika Zemli*, (9), 67–71. (In Russ.).
15. Soloveichik, Yu. G. (1998). MKE-modelirovanie trekhmernykh nestatsionarnykh elektromagnitnykh polei. *Fizika Zemli*, (10), 78–84. (In Russ.).

Поступила 17.02.2025

ACCOUNTING FOR PARTICLE CONCENTRATION IN THE MODE OF LOW-FREQUENCY INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES WITH ANISOTROPIC MEDIA

V. YANUSHKEVICH, K. IVANOVA, O. KIZINA, D. SIVATSKY
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The influence of particle concentration on electrodynamic characteristics of anisotropic media in the mode of low-frequency interaction of electromagnetic waves has been studied. The characteristics of rocks above hydrocarbons have been studied taking into account the requirements of multifactor analysis. The ranges of electron and ion concentrations with different degrees of influence on the change in the material and phase components of the tensor for the right and left polarizations of electromagnetic waves have been established. It has been noted that the use of a wide range of frequencies of probing signals expands the possibilities for increasing the efficiency of geological exploration. The obtained results of mathematical modeling of interaction can be used for exploration geophysics in order to detect oil and gas deposits.

Keywords: hydrocarbon deposit, hydrocarbon deposit, particle concentration, tensor, polarization, frequency.