

УДК 621.371: 550.837.6

DOI 10.52928/2070-1624-2025-45-2-33-38

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТРАСТА ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ В РЕЖИМЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

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

Проведено исследование контраста отражательных характеристик анизотропной среды над углеводородами в режиме амплитудно-модулированных сигналов. Моделирование проводилось для экспериментально полученных характеристик вмещающих пород над месторождениями нефти и газа. Установлены закономерности изменения контраста отражательных характеристик при вариации углов падения электромагнитных волн на исследуемый профиль местности и частоты модуляции несущего колебания для расширения режимов тестирования при организации геологоразведочных работ. Отмечено, что при продольном распространении амплитудно-модулированных сигналов вдоль контура поверхности геопрофиля возможно использование частоты несущего сигнала и частоты модуляции, на которых существует частота среза частотной характеристики радиотехнической системы для поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа. Установлены частоты несущего сигнала и модуляции, для которых контраст отражательных характеристик среды над углеводородами минимален в режиме продольного распространения электромагнитных волн вдоль исследуемой поверхности залежей. Полученные результаты моделирования взаимодействия амплитудно-модулированных сигналов со средами над углеводородами могут быть применены в поисковой геофизике для разработки методов обнаружения месторождений нефти и газа.

Ключевые слова: углеводородная залежь, коэффициент отражения, амплитудно-модулированный сигнал, контраст.

Введение. Актуальность применения различных режимов взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с анизотропными средами (АС) над углеводородами вызвана расширением режимов тестирования данных сред и, следовательно, развитием методов поиска и обнаружения углеводородных залежей (УВЗ) [1; 2]. При этом применяются методы исследований углеводородов и твердых полезных ископаемых, отражающие процессы в области физики Земли, включая решение поисковых задач для региональной, поисково-картировочной и разведочной геофизики [3]. Используются методы измерения сопротивления слоев сред с подключением скважинных электродов, которые являются более чувствительными по сравнению с поверхностными измерениями [4]. Численные характеристики для поля вызванной поляризации с применением параметров анализируемой модели Cole-Cole на базе дифференциально-нормированного метода электроразведки используются в методах по определению наличия залежей углеводородов [5].

Проводятся исследования по применению радиокомплексирования методов электроразведки [6]. Система нестационарного электромагнитного поля с малым петлевым источником выгодна для разработки компактных автономных приборов, которые хорошо подходят для подводной съемки [7]. Методы вызванной поляризации находят широкое применение при поисковых работах на нефтеперспективных площадях [8]. Крупномасштабная трехмерная (3D) геофизическая визуализация с контролируемым источником (CSEM) в настоящее время привлекает значительное внимание для картирования электропроводности потенциальных морских нефтегазовых резервуаров [9]. Применяются различные источники формирования ЭМВ, например, нестационарный генератор электрического поля с применением диполя в проводящей среде [10].

Электросопротивление пласта, определяемое по данным электромагнитной съемки, может обеспечить более точную оценку общей объемной доли гидрата, чем данные сейсморазведки и каротажа скважин [11]. Широко используются различные виды мониторинга углеводородов, например, для электроразведки карбонатных коллекторов методом 4D [12]. Методы электроразведки и технологии их применения актуальны во многих практических задачах [13; 14]. Режимы зондирования АС над УВЗ амплитудно-модулированными сигналами применяются для анализа фазовых характеристик поверхностного импеданса среды [15].

Методика исследований. Целью данной работы является исследование контраста отражательных характеристик АС над углеводородами в режиме амплитудно-модулированных сигналов вида

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

где E – амплитуда несущего сигнала;
 k_m – коэффициент амплитудной модуляции;
 $\Omega = 2\pi F$, $\omega = 2\pi f$ – соответственно модулирующая и несущая частоты.

Методика проводимых исследований основана на определении контраста коэффициента отражения в точках геопрофиля над залежью УВЗ и в тестовой точке, находящейся вне контура зоны углеводородов:

$$\Delta R = 20 \lg |\dot{R}_p - \dot{R}_{BB}|, \quad (2)$$

где $\dot{R}_p$ – коэффициент отражения сигнала в тестовой точке;

$\dot{R}_{BB}$ – коэффициент отражения волны над залежью углеводородов.

Расчет отражательных характеристик среды для различных сигналов зондирующих ЭМВ с учетом физико-химических процессов в залежах позволяет дифференцировать типы углеводородов с высокой точностью и достоверностью.

Значение коэффициента отражения ЭМВ в тестовой точке с диэлектрической проницаемостью $\dot{\epsilon}_p$ и проводимостью среды σ_p для сигнала с вертикальной поляризацией рассчитывается по формуле

$$\dot{R}_p = \frac{\dot{\epsilon}_p \sin \theta - \sqrt{\dot{\epsilon}_p - \cos^2 \theta}}{\dot{\epsilon}_p \sin \theta + \sqrt{\dot{\epsilon}_p - \cos^2 \theta}} = R_p \exp j\varphi_p, \quad (3)$$

где $\dot{\epsilon}_p = \epsilon_p - j \frac{\sigma_p}{\omega \epsilon_0}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость среды,

$$\begin{aligned} \dot{R}_{BB} &= \frac{\dot{a}_1 \cos \theta + \dot{a}_3 (\cos^2 \theta - 1)}{\dot{a}_2 \cos \theta + \dot{a}_4 (\cos^2 \theta + 1)} = |R_{BB}| \cdot \exp(j\varphi_{BB}); \\ \dot{a}_{1,2} &= \sqrt{\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L} \mp 1, \\ \dot{a}_3 &= \sqrt{\dot{\epsilon}_R} + \sqrt{\dot{\epsilon}_L}, \\ \dot{a}_4 &= \dot{\epsilon}_R + 2\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L + \dot{\epsilon}_L. \end{aligned} \quad (4)$$

Моделирование проводилось для диэлектрической проницаемости наполнителя сред $\epsilon_r = 1 - 30$, электрической проводимости $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, частоты столкновения частиц $\nu = 2\pi \cdot 10^9$ рад/с, коэффициента амплитудной модуляции $k_m = 0,5$, концентрации частиц $N_e = N_i = 10^{16}$ м⁻³. Угол падения волны θ варьировался в пределах от 0° до 90°.

Результаты исследований. Зависимости контраста отражательных характеристик для $\cos \theta = 0$ и частоты модуляции $F = 10^4$ Гц приведены на рисунке 1. Было установлено, что контраст отражательных характеристик не зависит от значений диэлектрической проницаемости наполнителя сред. Однако это не означает, что данный метод приемлем для дифференциации любых сред, поскольку данные зависимости получены на основании выражений (3) с использованием значений компонентов тензора диэлектрической проницаемости АС, полученных в работе [6]. Следовательно, такой метод обоснован только для исследования контраста отражательных характеристик АС над углеводородами. Характерно увеличение контраста с большей крутизной характеристики для более низких значений частоты несущего сигнала ($f = (1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^6)$ Гц). В диапазоне частот $f = (1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^8)$ Гц контраст отражательных характеристик увеличивается с меньшей крутизной характеристики. Происходит уменьшение величин исследуемой характеристики при использовании значений частоты несущего сигнала $f = (1 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9)$ Гц. На отрезке частот $f(1 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{10})$ Гц вариации контраста отражательных характеристик АС над углеводородами незначительны.

Зависимости контраста отражательных характеристик для $\cos \theta = 0,8$ и частоты модуляции $F = 10^4$ Гц приведены на рисунке 2. Закономерности поведения данной характеристики подобны зависимостям контраста отражательных характеристик для $\cos \theta = 0$ и частоты модуляции $F = 10^4$ Гц за исключением численных значений и меньшего контраста при использовании значений частоты несущего сигнала $f = (1 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9)$ Гц.

Рисунок 1. – Контраст отражательных характеристик для $\cos\theta = 0$ и частоты модуляции $F = 10^4$ Гц

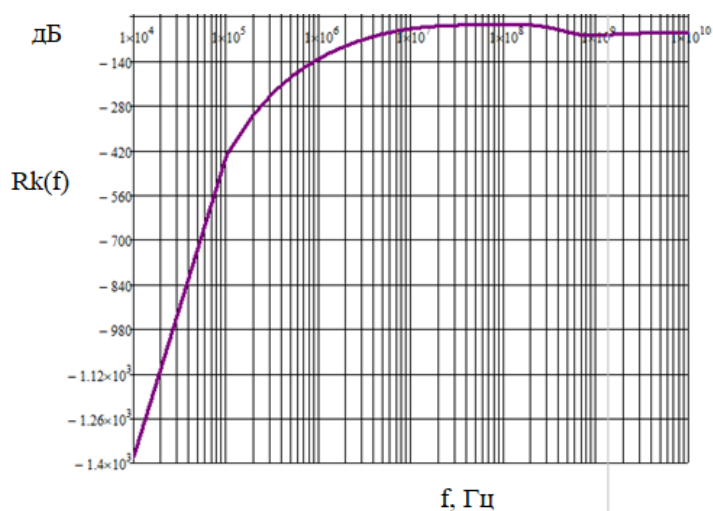
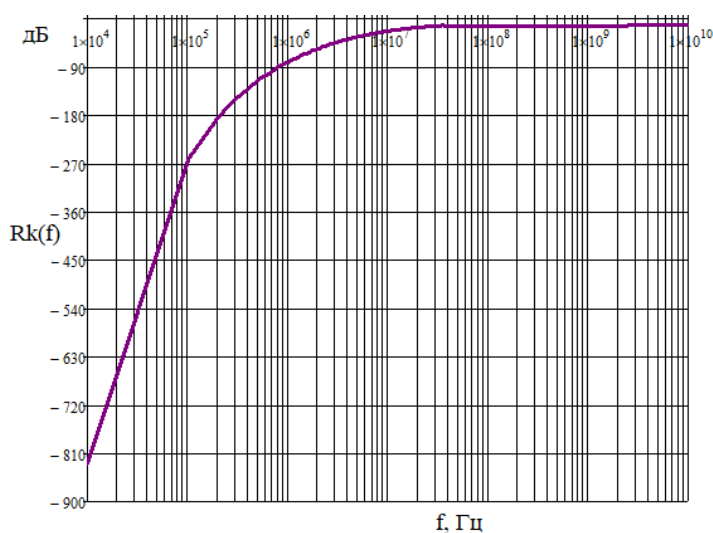
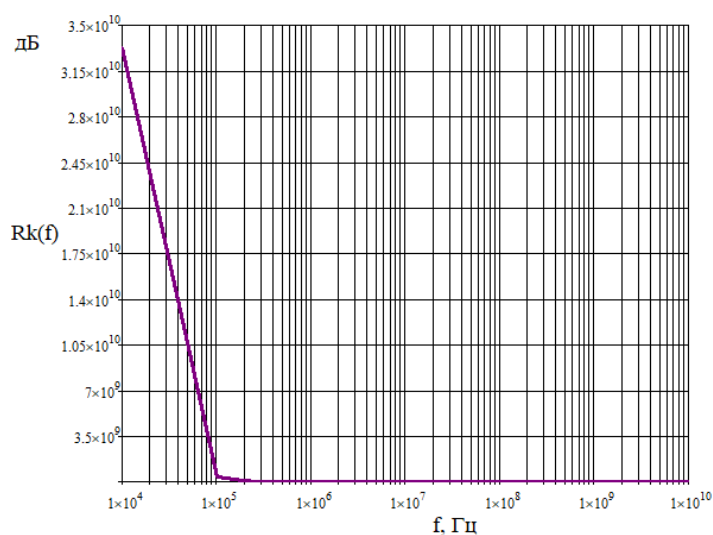


Рисунок 2. – Контраст отражательных характеристик для $\cos\theta = 0,8$ и частоты модуляции $F = 10^4$ Гц



Зависимости контраста отражательных характеристик для $\cos\theta = 1$ и частоты модуляции $F = 10^4$ Гц приведены на рисунке 3, для $\cos\theta = 0$ и частоты модуляции $F = 10^5$ Гц – на рисунке 4, для $\cos\theta = 0,8$ и частоты модуляции $F = 10^5$ Гц – на рисунке 5, для $\cos\theta = 1$ и частоты модуляции $F = 10^5$ Гц – на рисунке 6.

Рисунок 3. – Контраст отражательных характеристик для $\cos\theta = 1$ и частоты модуляции $F = 10^4$ Гц



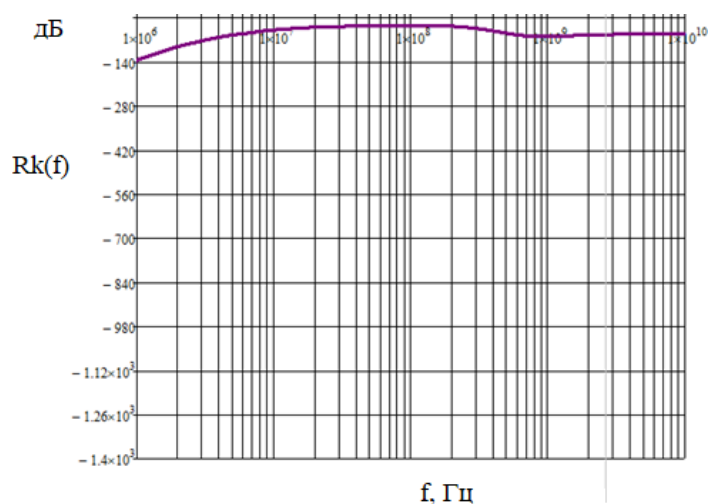


Рисунок 4. – Контраст отражательных характеристик для $\cos \theta = 0$ и частоты модуляции $F = 10^5$ Гц

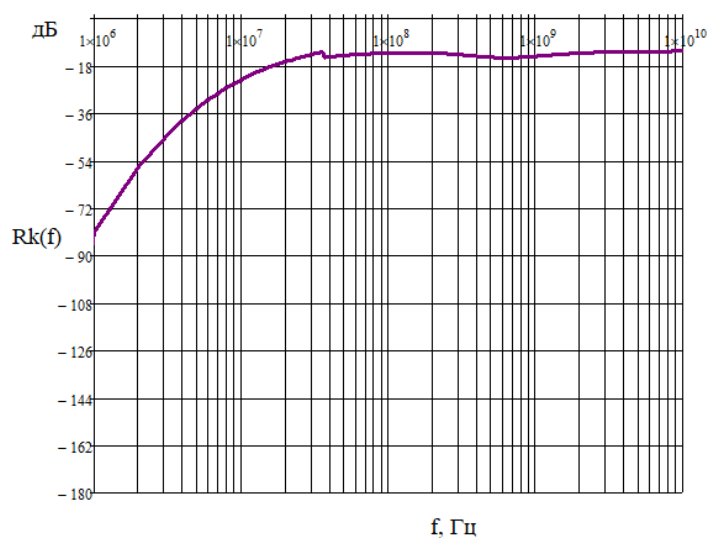


Рисунок 5. – Контраст отражательных характеристик для $\cos \theta = 0,8$ и частоты модуляции $F = 10^5$ Гц

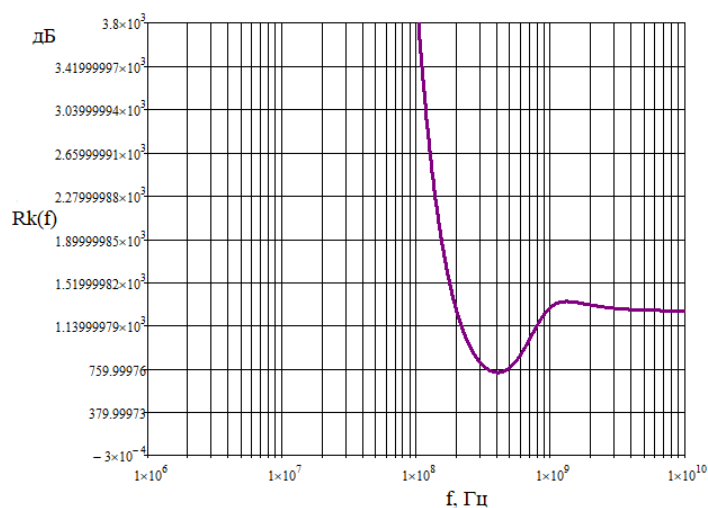


Рисунок 6. – Контраст отражательных характеристик для $\cos \theta = 1$ и частоты модуляции $F = 10^5$ Гц

Следует отметить, что использование режима $\cos \theta = 1$ (т. е. значение угла $\theta = 0^\circ$, что соответствует продольному распространению ЭМВ вдоль поверхности) и частоты модуляции $F = 10^4$ Гц приводит к принципиально иному характеру поведения контраста отражательных характеристик среды над УВЗ. Наиболее существенные изменения происходят в диапазоне частот несущего колебания $f = (1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^6)$ Гц. Контраст

отражательных характеристик уменьшается с ростом частоты. В остальном диапазоне исследуемых частот не проявляются изменения отражательных свойств геопрофиля местности. Частоту $f = 10^5$ Гц следует рассматривать как частоту среза исследуемой частотной характеристики радиотехнической системы, используемой для поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа. Следует отметить, что наличие такой частоты ведет к применению полученных результатов на практике.

Закономерности поведения контраста отражательных характеристик для $\cos \theta = 0,8$ и частоты модуляции $F = 10^5$ Гц подобны зависимостям контраста отражательных характеристик для $\cos \theta = 0$ и частоты модуляции $F = 10^5$ Гц за исключением численных значений. Моделирование взаимодействия ЭМВ со средами над углеводородами для $\cos \theta = 1$ и частоты модуляции $F = 10^5$ Гц (т. е. для продольного распространения сигнала вдоль поверхности) показало, что в этом режиме наиболее целесообразно применение диапазона несущих частот $f = (1 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9)$ Гц. Контраст отражательных характеристик уменьшается с большой крутизной характеристики в диапазоне частот $f = (1 \cdot 10^8 - 4 \cdot 10^8)$ Гц. Частота зондирования $4 \cdot 10^8$ Гц характеризуется минимальной величиной контраста отражательных характеристик среды над УВЗ. При дальнейшем увеличении частоты несущего сигнала происходит увеличение значений исследуемой характеристики и практически стабилизация контраста отражательных характеристик для диапазона несущих частот $f = (3 \cdot 10^9 - 10 \cdot 10^9)$ Гц.

Полученные результаты могут быть применены для решения задач поиска углеводородов методом электроразведки, основанном на контрасте отражательных характеристик АС над залежами, с целью фиксации границ полезных ископаемых. При этом исследуемую зону предполагаемой залежи углеводородов облучают ЭМВ с вертикальной поляризацией в режиме амплитудно-модулированных сигналов в диапазоне частот несущего колебания $f = (1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^9)$ Гц в точках, расположенных как в области предполагаемой залежи, так и в тестовой точке, находящейся вне ее контура, в каждой точке измерений принимают отраженную волну, определяют коэффициент отражения, по аномальной величине контраста отражательных характеристик между указанными точками измерений устанавливают границы залежей полезных ископаемых. К отличительным признакам данного способа по сравнению с аналогичными можно отнести новые режимы облучения ЭМВ и приема сигнала, иные параметры для измерительных сигналов в используемых диапазонах частот. Благодаря этим признакам повышается точность определения границ УВЗ. Угол падения ЭМВ можно выбирать в пределах $\theta = (0^\circ - 90^\circ)$.

Заключение. Проведенные исследования контраста отражательных характеристик АС над углеводородами в режиме амплитудно-модулированных сигналов показали следующее:

- вариация углов падения ЭМВ на исследуемый профиль местности расширяет режимы тестирования при организации геологоразведочных работ;
- при продольном распространении ЭМВ вдоль поверхности частоту несущего сигнала $f = 10^5$ Гц (частота модуляции $F = 10^4$ Гц) следует рассматривать как частоту среза исследуемой частотной характеристики радиотехнической системы, используемой для поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа;
- контраст отражательных характеристик среды над УВЗ минимален при частоте зондирования $4 \cdot 10^8$ Гц для режима продольного распространения ЭМВ вдоль поверхности и частоты модуляции $F = 10^5$ Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буддо И. В., Поспеев А. В. Прецизионная инверсия данных ЗСБ при поисках нефти и газа на юге Сибирской платформы // Иркутск: ИГУ. – 2019. – 149 с.
2. Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method / Q. Sun, H. Tan, W. Wan et al. // Appl. Sci. – 2024. – Vol. 14, iss. 4. – Art. ID 1560. – DOI: [10.3390/app14041560](https://doi.org/10.3390/app14041560).
3. Токарева М. Г. Одна из реализаций решения задачи ВП на примере реальной геофизической среды // Труды 5-й междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного машиностроения». – Новосибирск, 2000. – Т. 3. – С. 52–55.
4. Asch T., Morrison H. F. Mapping and monitoring electrical resistivity with surface and subsurface electrode arrays // Geophysics. – 1989. – Vol. 54, iss. 2. – P. 235–244.
5. Легейдо П. Ю. Дифференциально-нормированные методы геоэлектроразведки / Под ред. М. М. Мандельбаума. – Иркутск, 1996. – 145 с.
6. Янушкевич В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей. – Новополюк, ПГУ, 2017. – 232 с.
7. Jang H., Kim H. J., Nam M. J. Transient Electromagnetic Responses with Induced Polarization Effects of Deep-Sea Hydrothermal Deposits // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2016. – Vol. 54. – P. 7272–7278.

8. Моисеев В. С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. – Новосибирск: Наука, 2002. – 135 с.
9. Massively parallel electrical-conductivity imaging of hydrocarbons using the IBM Blue Gene/L supercomputer IBM / M. Commer, G. A. Newman, J. J. Carazzone et al. // Journal of Research and Development. – 2008. – Vol. 52, iss. 1. – P. 93–103.
10. Kaufman A. A. The transient field electrical dipole source on a conducting medium. – New York, 1988. – P. 50.
11. Weitemeyer K. A. First results from a marine controlled-source electromagnetic survey to detect gas hydrates offshore Oregon // Geophysical Research Letters. – 2006. – Vol. 33, iss. 3. – Art. ID L03304.
12. Мониторинг фронта завода карбонатных коллекторов нижнего кембрия методом 4D электроразведки / Д. А. Бурдаков, В. Н. Сибилев, О. В. Токарева и др. // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 9. – С. 30–34.
13. Прогнозирование трещиноватых флюидонасыщенных резервуаров в траппах по данным электроразведки ЗСБ / А. И. Ильин и др. // ГеоБайкал 2018: материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф. (11–17 авг. 2018 г.) / ЭАГЕ. – 2018. – С. 1–6.
14. Мисюркеева Н. В. Результаты применения электромагнитных исследований 3D ЗСБ и мЗСБ в условиях Арктической зоны Западной Сибири // Геомодель 2017: материалы 19-й науч.-практ. конф. по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (11–14 сентября 2017 г.) / ЭАГЕ. – 2017. – С. 1–6.
15. Гололобов Д. В., Орлова О. В., Янушкевич В. Ф. Влияние параметров амплитудно-модулированного воздействия на фазовые составляющие поверхностного импеданса анизотропной среды плазмоподобного типа // Вестн. Полц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 98–101.

Поступила 07.10.2025

**DETERMINATION OF THE CONTRAST OF REFLECTIVE CHARACTERISTICS
OF ANISOTROPIC MEDIA OVER HYDROCARBONS
IN THE MODE OF AMPLITUDE-MODULATED SIGNAL**

M. IZOITKO, V. YANUSHKEVICH, D. DOVGYALO, K. IVANOVA, D. SIVATSKY
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

A study of the reflectivity contrast of an anisotropic medium above hydrocarbons was conducted using amplitude-modulated signals. Modeling was performed for experimentally obtained characteristics of host rocks above oil and gas fields. Patterns of change in the reflectivity contrast with variations in the angles of incidence of electromagnetic waves on the studied terrain profile and the modulation frequency of the carrier oscillation were established to expand the testing modes in organizing geological exploration work. It was noted that during longitudinal propagation of amplitude-modulated signals along the contour of the geoprofile surface, it is possible to use the carrier signal frequency and modulation frequency, at which the cutoff frequency of the frequency response of the radio-technical system exists for the search and delineation of oil and gas fields. Frequencies of the carrier signal and modulation were determined for which the contrast of the reflectivity of the medium above hydrocarbons is minimal in the mode of longitudinal propagation of electromagnetic waves along the studied deposit surface. The obtained results of modeling the interaction of amplitude-modulated signals with environments above hydrocarbons can be applied in exploration geophysics to develop methods for detecting oil and gas deposits.

Keywords: *hydrocarbon deposit, reflection coefficient, amplitude-modulated signal, contrast.*