

УДК 621.371: 550.837.6

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ  
В АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ**

*канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ  
(Полоцкий государственный университет);  
Е.Ю. ЗАЯЦ*

*(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники)*

*Приведены результаты экспериментального взаимодействия электромагнитных волн в режиме радиоимпульсных сигналов со средой над углеводородными залежами. Теоретически определены резонансные частоты изменения коэффициента отражения от анизотропной среды над залежью в режиме радиоимпульсных сигналов для вертикальной и горизонтальной поляризаций электромагнитных волн. Проведено экспериментальное подтверждение резонансного поведения коэффициента отражения на частотах 93 МГц для вертикальной и 115 МГц для горизонтальной поляризаций электромагнитных волн в режиме радиоимпульсных сигналов. Предложен способ для определения характеристик среды над залежью при распространении электромагнитных волн с правой и левой круговыми поляризациями, что повышает информативность методов оконтуривания и выделения углеводородных залежей. Установлены значения модулирующей частоты для повышения уровня однозначного определения границ залежи. Применено комплексирование методов, направленных на определении углеводородных залежей, сочетание которых с глубинными методами приведет к экономическому выигрышу при повышении точности определения границ.*

**Ключевые слова:** радиоимпульсный сигнал, анизотропная среда, углеводородная залежь, коэффициент отражения.

**Введение.** Методы поиска и обнаружения углеводородных залежей (УВЗ) основаны на анализе электрофизических и электрохимических процессов в анизотропных средах (АС) над залежами углеводородов и оптимизации частотных, поляризационных, амплитудных, модуляционных и других параметров зондирующих сигналов с учетом специфических характеристик УВЗ. Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач заключается в усовершенствовании существующих электромагнитных методов георазведки и разработке новых методов поиска, идентификации месторождений нефти и газа (углеводородов), являющихся стратегическим видом полезных ископаемых. Сходство исследуемой среды над залежью нефти и газа с плазмоподобным образованием позволяет использовать для изучения взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ существующие решения при изучении плазмы и плазмоподобных сред. Установлено, что наиболее оптимальным для исследования сред над УВЗ является квазигидродинамический подход с использованием многочастичных электронно-ионных токов и феноменологически заданных частот столкновений ввиду отсутствия необходимости учета точных пространственно-временных перемещений частиц [1].

Результаты анализа взаимодействия ЭМВ с УВЗ и его экспериментального исследования представлены во многих работах. В статье [2] выведен тензор диэлектрической проницаемости анизотропной среды над залежью в режиме гармонических сигналов. Обнаружение углеводородов осуществляется с помощью радиоволновых измерительных комплексов [3] по изменению поверхностного импеданса среды над залежами [4, 5].

Точность определения границ УВЗ может быть улучшена на основе исследования сложных ионных соединений полупроводникового характера, образующихся над углеводородами [6], используя методы резонансного зондирования [7]. Результаты исследований в ближней зоне используются для обнаружения неоднородных сред [8], методы электрорезонансного зондирования [9] широко применяются на практике. Для реализации новых методов георазведки представляет интерес анализ процесса взаимодействия радиоимпульсных ЭМВ с АС, образующимися над залежами и скоплениями углеводородов. В работе [10] проведен анализ поверхностного импеданса среды над УВЗ с учетом влияния всех ниже расположенных слоев на верхний слой.

Основой многих методов георазведки углеводородов могут стать результаты исследования затухания радиоимпульсных сигналов в среде над залежью [11]. Способ поиска УВЗ [12] позволяет обнаруживать месторождения нефти и газа по измерениям величины напряженности электрического поля отраженных радиоимпульсных сигналов на глубинах до 200 м. Особенности методов и устройств поиска УВЗ приведены в работах [13–18]. Целью настоящей работы является качественное повышение уровня достоверности поиска и идентификации УВЗ обоснованием выбора характеристик ЭМВ при использовании радиоимпульсных сигналов, позволяющих измерять величины напряженности электрического поля отраженных сигналов на глубинах до 500 м.

В данной работе исследуется этап, который включает в себя определение границ АС над углеводородами по воздействию зондирующего радиоимпульсного сигнала на исследуемый геопрофиль. Он основывается на результатах определения коэффициента отражения для ЭМВ с вертикальной и горизонтальной поляризациями и коэффициента эллиптичности ЭМВ с правой и левой круговой поляризациями. Модификация импульсного метода с применением модуляции основана на определении резонансных частот по разработанной методике, что повысит уровень определения границ залежи. С целью достижения однозначного решения поставленных задач на практике при поиске УВЗ используют комплексирование методов. Новизна исследований, приведенных в данной статье заключается в том, что полученные результаты способствуют определению анизотропных сред по измерению отличий сигналов на основе полученных величин отраженных сигналов. Это позволит повысить производительность геологоразведочных работ.

#### Теоретическое обоснование взаимодействия АС над УВЗ с радиоимпульсными сигналами.

Качественное повышение уровня достоверности поиска и идентификации углеводородов достигается применением оптимальных режимов зондирования ЭМВ при взаимодействии импульсных сигналов со средой над УВЗ. Рассмотрим процесс взаимодействия ЭМВ с УВЗ в режиме импульсного сигнала вида

$$S(f) = \frac{U \cdot \tau_u}{2} \cdot \frac{\sin \frac{(\omega - \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}{\frac{(\omega - \omega_0) \cdot \tau_u}{2}} + \frac{\sin \frac{(\omega + \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}{\frac{(\omega + \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}, \quad (1)$$

где  $\frac{U \cdot \tau_u}{2} = 1$  – амплитуда,  $\tau_u$  – длительность радиоимпульса;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  – частота;

$\omega_0$  – несущая частота;

Процесс взаимодействия ЭМВ с локальным включением на трассе распространения радиоволн можно представить в виде режима наклонного падения плоской волны с вертикальной поляризацией в среде с параметрами  $\epsilon_0, \mu_0, \delta_0$  на безграничную поверхность с анизотропным импедансом. Данная ЭМВ возбуждается с помощью переносного передатчика, перемещаемого вдоль исследуемого профиля.

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ имеют вид [13]:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r \cdot F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} &\frac{F \cdot w_{ni}^2}{w} \cdot \frac{(w + n\Omega_1) \cdot [w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2 - v_i^2]}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ &- jF \left[ \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot v_i \cdot \frac{(w + n\Omega_1)^2 + v_i^2 + w_{\Gamma i}^2}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} + \frac{\delta_r F}{w\epsilon_0} \right] \end{aligned} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} &\frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot w_{\Gamma i} \cdot \frac{v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ &- 2j \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot w_{\Gamma i} \cdot v_i \cdot \frac{w + n\Omega_1}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} \end{aligned} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) \cdot \left[ \epsilon_r - \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot \frac{1}{(w + n\Omega_1)^2 + v_i^2} \right] - j \left[ \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot v_i \cdot \frac{1}{(w + n\Omega_1)^2 + v_i^2} + \frac{\delta_2 F}{w\epsilon_0} \right] \right\}. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

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

$T, F_1, n$  – период, частота импульса и номер гармоники,  $\Omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot F_1$ ,

$i = 1$  для электронов,  $i = 2$  для ионов;  
 $w_{\Gamma i}$  – гиротропная частота,

$$w_{\Gamma i} = \frac{q_i \mu_0 H_0}{m_i};$$

$w_{ni} = q_i \left( \frac{N_i}{m_i \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}$  – плазменная частота,

$\delta_r$  – удельная проводимость среды.

Представляет интерес анализ частотных характеристик комбинационных составляющих

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_R(\omega) &= \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \epsilon_R + j \text{Im} \epsilon_R \\ \dot{\epsilon}_L(\omega) &= \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \epsilon_L + j \text{Im} \epsilon_L. \end{aligned} \tag{3}$$

В выражениях (3) присутствуют элементы матрицы:

$$\dot{\epsilon} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_1 & -j\dot{\epsilon}_2 & 0 \\ j\dot{\epsilon}_2 & \dot{\epsilon}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_3 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

Информация о свойствах АС заложена в компонентах тензора (4)  $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$ , подлежащих исследованию в различных режимах взаимодействия среды с ЭМВ. Расчет компонентов тензоров диэлектрической проницаемости осуществлен на основании экспериментально полученных параметров среды над залежами углеводородов [2]: удельная электрическая проводимость  $\delta_r = 10^{-5}$  См/м; концентрация частиц  $N_e = N_n = (10^{15} - 10^{17}) \text{ м}^{-3}$ ; частота столкновения частиц  $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$  рад / с. Значение  $n$  выбрано равным 5. Диэлектрическая проницаемость среды исследовалась в диапазоне от 1 до 25. Методика исследований заключается в облучении исследуемого профиля электромагнитной волной на фиксированной частоте, приеме отраженного сигнала. Измеряют напряженность электрического поля отраженного сигнала в точках измерения исследуемого профиля и по аномальным значениям напряженности электрического поля отраженного сигнала определяют границу углеводородной залежи.

**Результаты исследований.** В данной работе были проведены экспериментальные исследования месторождений Могилевской области на основе определения резонансных частот взаимодействия, определенных по выражениям (2). На рисунке 1 приведено изменение коэффициента отражения для вертикальной (93 МГц) и горизонтальной поляризации (115 МГц) ЭМВ.

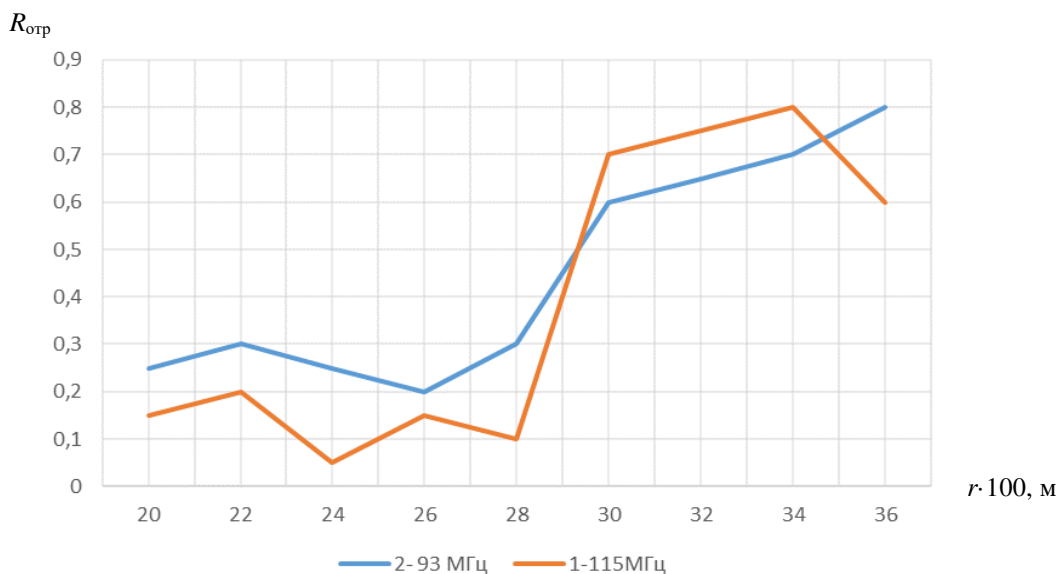


Рисунок 1. – Экспериментальная зависимость коэффициента отражения от расстояния вдоль геопрофиля на частотах 93 и 115 МГц

Установлено, что на границе залежи (пикет 29) происходит уменьшение коэффициента отражения. Для анализа искажений амплитудно-временных параметров импульсного сигнала используется модуляция (рисунок 2) и дополнительное усиление в усилителе мощности. Модификация импульсного метода с применением модуляции основана на определении резонансных частот по разработанной методике, а в качестве модулирующей нужно использовать частоту в диапазоне 1–10 МГц, соответствующую электронному циклотронному резонансу, что повысит уровень однозначного определения границ залежи. Экспериментальные исследования показывают, что применение частоты 2 МГц дает наибольшую точность измерений.

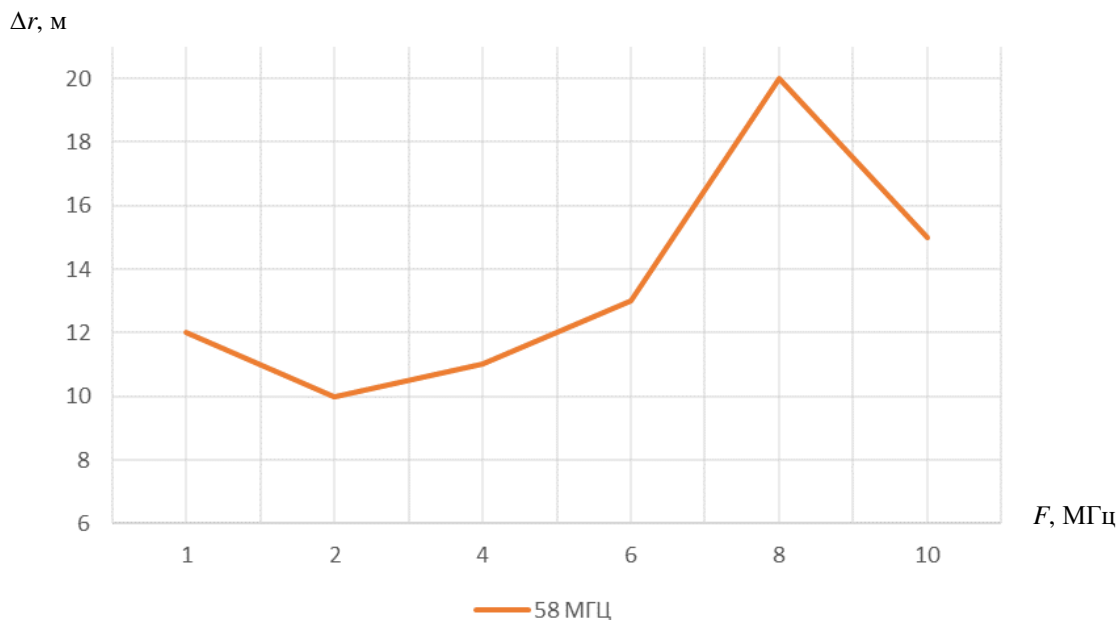


Рисунок 2. – Определение точности выделения границ в зависимости от модулирующей частоты

На рисунке 3 приведено изменение коэффициента эллиптичности для правой поляризации ЭМВ, причем на границе контура отмечено его уменьшение до величины 0,92.

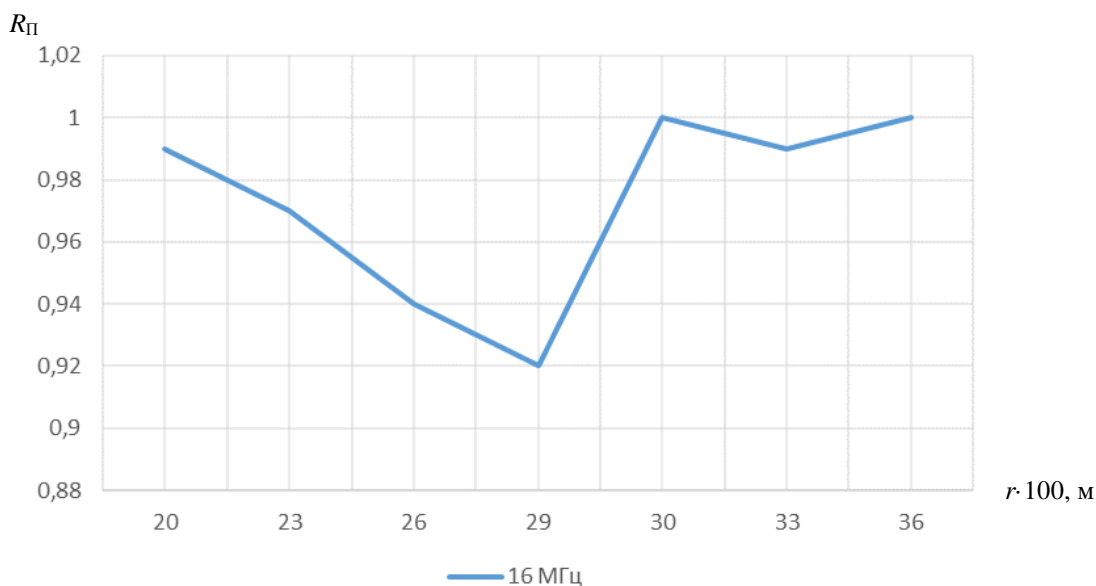


Рисунок 3. – Зависимость коэффициента эллиптичности для правой поляризации ЭМВ

На рисунке 4 приведено изменение коэффициента эллиптичности для левой поляризации ЭМВ, причем на границе контура отмечено его уменьшение до величины 0,96.

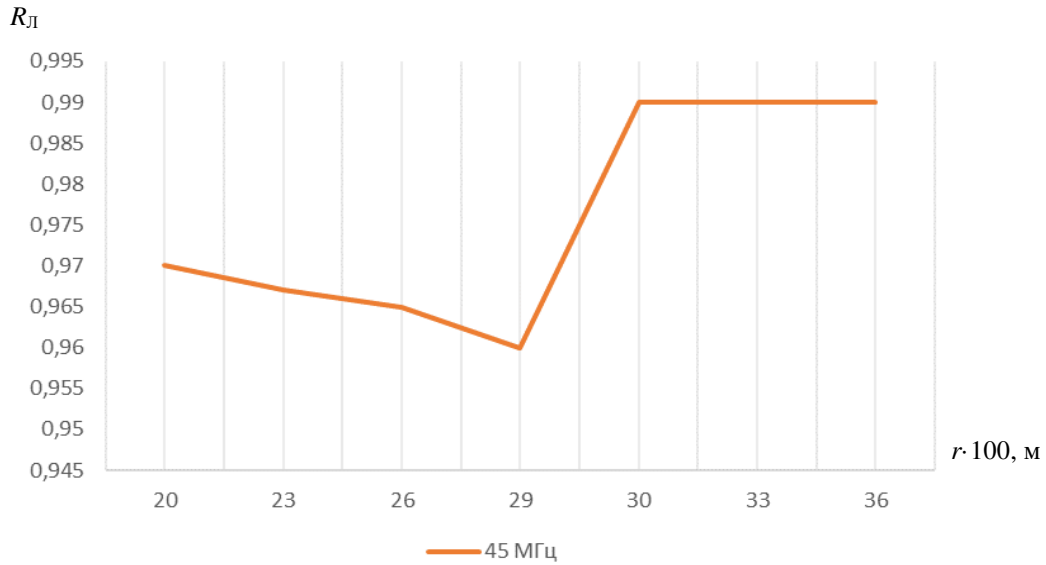


Рисунок 4. – Зависимость коэффициента эллиптичности для левой поляризации ЭМВ

Разработка и модификация методов электроразведки, а в частности, импульсных методов направлена на получение информации о физических полях, создаваемых исследуемой средой. Данная задача усложняется большой глубиной залегания изучаемых сред и отсутствием корректной геофизической информации. Еще одним из недостатков данного вида методов является многозначность полученных в ходе полевых работ данных, это связано в первую очередь с природой регистрации аномалий. В большинстве случаев измерения проводятся путем определения значений косвенных признаков наличия исследуемой среды.

С целью достижения однозначного решения поставленных задач на практике при поиске УВЗ используют комплексирование методов (комплекс геофизических методов) (рисунок 5). Выбор конкретного комплекса в первую очередь зависит от поставленных конкретных задач и необходимой точности измерений.

При выборе комплекса геофизических методов необходимо придерживаться определенных условий:

- следует опираться на разработанную в ходе решения инженерно-геологических задач физико-геологическую модель исследуемой среды. Физико-геологическая модель – это система абстрактных возмущающих сред вызываемых ими аномальных эффектов, аппроксимирующих геологический объект и с необходимой для моделирования детально отражающих его структуру, размеры, форму, петрофизические свойства и соответствующее им объемное распределение физических полей. На основе данной модели выбирается основной метод ведения поиска, данный метод должен быть относительно дешевым, мобильным, высокопроизводительным.

- на основе анализа поставленных задач оцениваются производительность и информативность каждого метода в отдельности и в комбинации, а также экономические затраты с целью выбора наиболее эффективного распределения средств и достижения высокого результата исследований.

В настоящее время почти все месторождения УВЗ, залегающие относительно на небольших глубинах, являются разработанными и введенными в эксплуатацию, поэтому комплексирование методов, направленных на определении границ, с глубинными методами являются экономически выгодными.

Применение импульсных сигналов в сочетании с гармоническими позволило бы повысить объективность и объемность полученных в ходе геофизических съемок результатов, что позволит уменьшить стоимость и увеличить производительность работ, а также уменьшить время интерпретации полученных данных. Преимуществами такого метода по сравнению с существующими аналогами являются:

- повышение точности определения границ залежи за счет получения отраженного импульсного сигнала от залежи;
- возможность вариации параметров импульсного сигнала, способствующей однозначности определения границ залежей;
- повышения разрешающей способности определения местоположения залежей за счет использования импульсного сигнала;
- повышение производительности работ (сокращение времени) поиска углеводородов;
- выбор конкретных частот при ведении разведки.

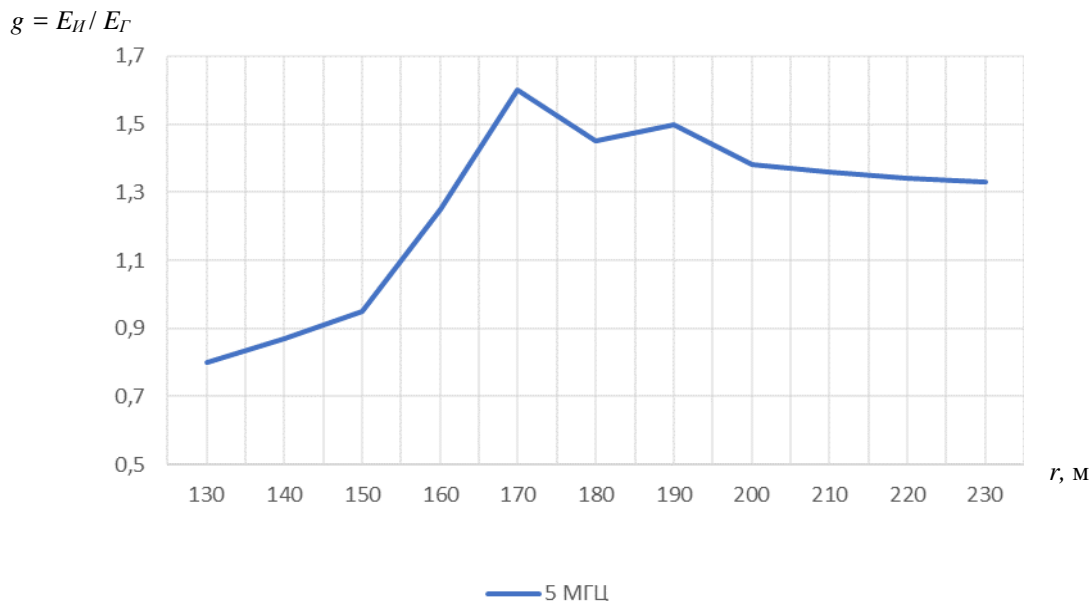


Рисунок 5. – Метод альтернативных частот с использованием гармонического сигнала

Если в качестве основного метода при проведении геофизической съемки использовать метод альтернативных частот с применением гармонического сигнала, а в качестве дополнительного выбрать импульсный метод поиска и оконтуривания УВЗ, то полученные данные будут отображать информацию о исследуемой среде с уточнением глубины залегания.

**Заключение.** Проведены экспериментальные исследования взаимодействия анизотропного слоя над углеводородами с ЭМВ в режиме радиоимпульсных сигналов. Результаты исследования могут быть использованы в поисковой геофизике. При этом следует отметить:

- резонансные изменения коэффициента отражения на частотах 93 МГц для вертикальной и 115 МГц для горизонтальной поляризации ЭМВ в режиме радиоимпульсных сигналов могут быть использованы для определения границ залежей;

- исследования могут быть применены для определения характеристик среды над залежью при распространении ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями, что повышает информативность методов оконтуривания и выделения УВЗ;

- качестве модулирующей нужно использовать частоту в диапазоне 1–10 МГц, соответствующей электронному циклотронному резонансу, что повысит уровень однозначного определения границ залежи;

- комплексирование методов, направленных на определении УВЗ, с глубинными методами приведет к экономическому выигрышу при повышении точности определения границ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
2. Москвичёв, В.Н. Исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью / В.Н. Москвичёв // Радиотехника и электроника. – Минск : Выш. шк., 1989. – Вып. 18. – С. 91–96.
3. Поиск и разведка углеводородов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.companypetroservice.com>. – Дата доступа: 10.01.2017.
4. Гололобов, Д.В. Поверхностный импеданс среды над углеводородными залежами в режиме частотно-модулированных сигналов / Д.В. Гололобов, С.В. Калинин, В.Ф. Янушкевич // Вестн НАН Беларуси. Серия физ.-техн. наук. – 2010. – № 4. – С. 98–101.
5. Гололобов, Д.В. Импедансные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала / Д.В. Гололобов, С.В. Калинин, В.Ф. Янушкевич // Докл. БГУИР. – Минск, 2010. – № 6 (52). – С. 13–17.
6. Asch, T. Mapping and monitoring electrical resistivity with surface and surface electrode arrays / T. Asch, Morrison // Geophysics. – 1989. – P. 235–244.
7. Moskvichew, V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V.N. Moskvichew // 9th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.

8. Gaikovich, K.P. Methods and Applications of Near-Field Subsurface Diagnostics / K.P. Gaikovich // 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, Romania, 18 Nov. 2018. – V. 1–4.
9. Levashov, S.P. Electric-resonance sounding method and its application for, geological-geophysical and engineering-geological investigations [Electric resource] / S.P. Levashov // 66nd EAGE Conference and Technical Exhibition, Paris, France, 7–10 June 2003. – 1 CD-ROM Abstracts volume.
10. Adamovskiy, E. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits / E. Adamovskiy, V. Yanushkevich // 8 Junior researchers conference European and national dimension in research : in 3 p. / PSU. – Novopolotsk, 2016. – P. 3 : Technology. – P. 179–183.
11. Взаимодействие электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов / В.Ф. Янушкевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2016. – № 12. – С. 45–50.
12. Иванова, К.И. Способ геоэлектроразведки углеводородной залежи с использованием радиоимпульсных сигналов. Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире / К.И. Иванова, В.Ф. Янушкевич // Материалы XV Международной НТК, СПб., 4 окт. 2016 г. – СПб., 2016. – Т. 1. – С. 107–111.
13. Гололобов, Д.В. Радиотехнические системы поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме двухчастотного взаимодействия / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Весці НАН Беларусі. Серия физ.-техн. навук. – 2002. – № 1. – С. 49–54.
14. Гололобов, Д.В. Поиск месторождений углеводородных залежей радиоволновым методом / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Приборы. Справочный журн. – М. : Научтехмаш, 1999. – № 10. – С. 25–27.
15. Янушкевич, В.Ф. Моделирование двухчастотного взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью / В.Ф. Янушкевич // Приборы. Справочный журн. – 1999. – № 10. – С. 27–29.
16. Гололобов, Д.В. Фазовые методы идентификации углеводородных залежей / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич, А.О. Рак // Инженерный вестник. – 2005. – № 1 (20). – С. 16–18.
17. Янушкевич, В.Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В.Ф. Янушкевич. – Новополоцк, ПГУ, 2017. – 232 с.
18. Янушкевич, В.Ф. Методы и устройства обнаружения электрически неоднородных сред / В.Ф. Янушкевич, Е.Ю. Заяц // LAP LAMBERT Academic Publishing RU. – Beau Bassin, Mauritius, 2017. – 141 с.

Поступила 12.02.2019

**DISTRIBUTION OF RADIO IMPULSE SIGNALS  
IN ANISOTROPIC ENVIRONMENTS ON HYDROCARBONS**

**V. YANUSHKEVICH, E. ZAYATS**

*The article presents the results of experimental interaction of electromagnetic waves in the mode of radio pulse signals with the medium above hydrocarbon deposits. The resonant frequencies of a change in the reflection coefficient from an anisotropic medium over a deposit in the mode of radio pulse signals for vertical and horizontal polarizations of electromagnetic waves are theoretically determined. Experimental confirmation of the resonant behavior of the reflection coefficient at 93 MHz for vertical and 115 MHz for the horizontal polarizations of electromagnetic waves in the radio pulse mode was carried out. Studies can be applied to determine the characteristics of the environment above the reservoir during the propagation of electromagnetic waves with right and left circular polarizations, which increases the informativeness of contouring methods and the allocation of hydrocarbon deposits. The values of the modulating frequency are set to increase the level of hydrocarbon deposits, unambiguous determination of the boundaries of the deposit. The complexing of methods aimed at determining, the combination of which with the deep-seated methods will lead to economic gains with an increase in the accuracy of determining the boundaries.*

**Keywords:** radio pulse signal, anisotropic medium, hydrocarbon deposit, reflection coefficient.