

УДК 621.371:550.837.6

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
С АНИЗОТРОПНЫМИ СРЕДАМИ НАД УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ЗАЛЕЖАМИ
В РЕЖИМЕ РАДИОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ**

*канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, К.И. КРЕМЕНЯ, М.М. ИВАНОВ,
канд. техн. наук, доц. Т.В. МОЛОДЕЧКИНА
(Полоцкий государственный университет)*

Рассмотрены вопросы взаимодействия радиоимпульсных сигналов с анизотропными средами над углеводородными залежами. Используется вертикальная поляризация электромагнитных волн. Рассмотрен широкий диапазон частот. Вариация характеристик зондирующих сигналов позволяет повысить информативность поиска. Даны рекомендации по использованию оптимальных характеристик зондирующих сигналов. Полученные зависимости свидетельствуют о следующем: большие глубины залегания углеводородов требуют применения для зондирования радиоимпульсных сигналов большей длительности. Возможность перенастройки устройства дополняет функциональные возможности для поиска углеводородных залежей. На основе приведенных исследований могут быть разработаны методы радиокомплексирования для георазведки углеводородов. Результаты исследований могут быть использованы в поисковой геофизике.

Ключевые слова: электромагнитная волна, анизотропная среда, углеводородные залежи.

Введение. Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач заключается в усовершенствовании существующих электромагнитных методов (ЭММ) георазведки и разработке новых методов поиска, идентификации месторождений нефти и газа (углеводородов), являющихся стратегическим видом полезных ископаемых и определяющих широкий спектр глобальных экологических вопросов современного общества [1]. Исследование режимов взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с углеводородными залежами (УВЗ) может быть использовано в поисковой геофизике для повышения точности и уровня достоверности ЭММ обнаружения залежей нефти и газа. Результаты анализа взаимодействия ЭМВ с УВЗ и его экспериментального исследования представлены во многих работах, например [2–5]. Вместе с тем для реализации новых ЭММ представляет интерес анализ процесса взаимодействия радиоимпульсных ЭМВ с анизотропными средами (АС), образующихся над залежами и скоплениями углеводородов.

Использование зондирующих сигналов с вариацией частот позволяет проводить точные оценки трансформации отдельных спектральных составляющих и интерпретировать всевозможные нелинейные эффекты при взаимодействии ЭМВ с АС [5].

Объекты и методы исследования. Представим реальную залежь углеводородов (рис. 1) в виде среды 4, погруженной в среду с потерями (среда 2), имеющей границу раздела ОХ с воздушным пространством (среда 1) [2]. Залежь находится на глубине ΔZ от границы раздела сред 1-2 и имеет мощность Z_1 и протяженность X_1 .

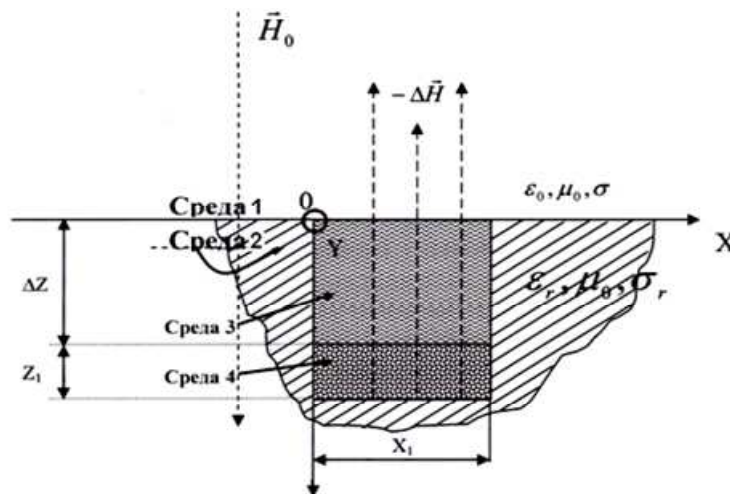


Рисунок 1. – Модель разреза геологического профиля над УВЗ

Под действием высоких температур и пластового давления над залежью углеводородов происходят электрохимические процессы, приводящие к образованию на границе с воздушным пространством промежуточной области (среда 3), характеризующейся избытком свободных электронов.

Современные методы поиска и обнаружения УВЗ требуют повышения степени достоверности результатов электроразведки. Исследование процесса воздействия импульсной ЭМВ на АС представляет теоретический и практический интерес, связанный с поиском новых и модернизацией действующих ЭММ. Метод основан на использовании периодической последовательности импульсных сигналов. Период повторения сигналов выбирается из условия обеспечения однозначного диапазона измерения дальности (расстояния до исследуемого слоя). В приемнике осуществляется обработка либо самих сигналов, либо их огибающих, полученных после детектирования.

Рассмотрим взаимодействие анизотропной среды над УВЗ с радиоимпульсным сигналом (рис. 2), спектр которого рассчитывается по формуле

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

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

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – частота радиоимпульса, рад/с;

τ_u – длительность импульса, с.

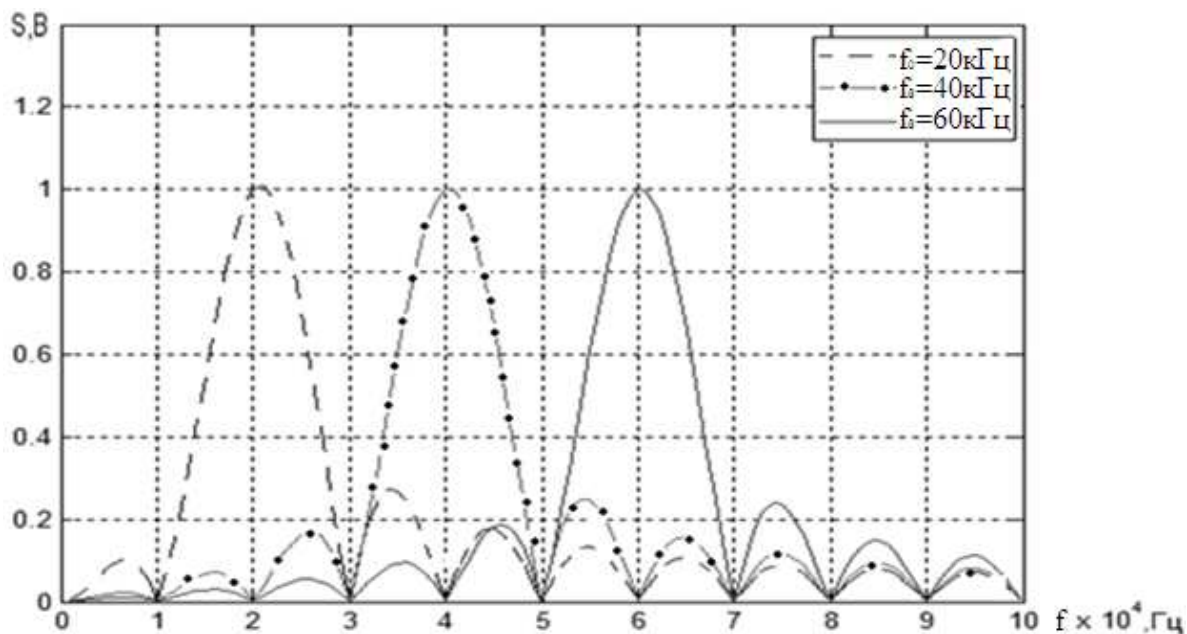


Рисунок 2. – Зависимость спектра зондирующего радиоимпульсного сигнала от частоты

Спектр отраженного радиоимпульса

$$\dot{S}_0 = (1 - \dot{R}_{1-2})^2 \cdot \dot{R}_{2-3} \cdot e^{-2\alpha h} \cdot \dot{S}(f). \quad (2)$$

Примем амплитуду нормально падающей ЭМВ за условную единицу $\dot{E}_n = 1$. На практике же значение напряженности поля будет определяться реализуемой радиотехнической системой для поиска, к которой предъявляются требования при решении конкретной геоинформационной задачи.

С учетом принятого значения падающей ЭМВ комплексная амплитуда волны, отраженной от границы сред 1-2, определяется коэффициентом отражения от верхней границы \dot{R}_{1-2} как [6]

$$E_{1-2} = \dot{E}_n \cdot \dot{R}_{1-2} = \dot{R}_{1-2}, \quad (3)$$

а коэффициент отражения определяется волновыми сопротивлениями сопряженных сред:

$$\dot{R}_{1-2} = \frac{\dot{Z}_{\text{BX}} - \dot{Z}_1}{\dot{Z}_{\text{BX}} + \dot{Z}_1}, \quad (4)$$

где $Z_1 = 377 \text{ Ом}$ – волновое сопротивление воздуха (среды 1).

$$\dot{R}_{2-3} = \frac{\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2}{\dot{Z}_3 + \dot{Z}_2}, \quad (5)$$

где \dot{Z}_2 – волновое сопротивление второго слоя; Ом;

\dot{Z}_3 – волновое сопротивление третьего слоя, Ом.

Входной импеданс на верхней границе второго слоя:

$$\dot{Z}_{\text{BX}} = \frac{(\dot{Z}_3 + \dot{Z}_2) + (\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2) \cdot e^{-2\dot{\gamma}_2 h}}{(\dot{Z}_3 + \dot{Z}_2) - (\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2) \cdot e^{-2\dot{\gamma}_2 h}} \cdot \dot{Z}_2, \quad (6)$$

где $\dot{\gamma}_2$ – постоянная распространения волны.

Волновые сопротивления второго и третьего слоев определяются следующим образом:

$$\dot{Z}_2 = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \mu_2}{\dot{\epsilon}_2 \cdot \epsilon_0}}, \quad (7)$$

$$\dot{Z}_3 = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \mu_3}{\dot{\epsilon}_3 \cdot \epsilon_0}}, \quad (8)$$

где $\dot{\epsilon}_3$ – относительная диэлектрическая проницаемость третьего слоя, $\dot{\epsilon}_3 = 2,5$;

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}$;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$;

$\mu_2 = \mu_3 = 1$.

Постоянная распространения волны вычисляется по формуле

$$\dot{\gamma}_2 = j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \cdot \sqrt{\dot{\epsilon}_2}, \quad (9)$$

где c – скорость света, м/с.

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость 2-го слоя

$$\dot{\epsilon}_2 = \epsilon_r - j \cdot \frac{\sigma_r}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0} - \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{ni}}{V_i^2 + \omega^2} \cdot \left[1 + j \cdot \frac{V_i}{\omega} \right] \right\}, \quad (10)$$

где $\epsilon_r = 10$ – относительная диэлектрическая проницаемость наполнителя слоя 2 без учета анизотропных свойств;

$\sigma_r = 10^{-2} \text{ См/м}$ – удельная проводимость слоя 2;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – частота ЭМВ, рад/с;

ω_{ni} – плазменная частота, рад/с;

V_i – частота столкновения частиц, рад/с;

$i = e$ – электроны;

$i = u$ – ионы.

$$\omega_{ni} = g_i \cdot \left(\frac{N_i}{m_i \cdot \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

где $g_e = g_u = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$;

$N_e = N_u = 10^{16} \text{ м}^{-3}$;

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг};$$

$$m_u = 5 \cdot 10^{-4} \cdot m_e.$$

$$V_u = \frac{V_e}{\left(\frac{m_u}{m_e}\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (12)$$

где $V_e = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$, рад/с.

Фазовая скорость распространения волны:

$$v_\phi = \frac{c}{\text{Re}(\sqrt{\hat{\epsilon}_2 \cdot \mu_2})}, \quad (13)$$

Коэффициент затухания:

$$\alpha_2 = \text{Im}(\hat{\gamma}_2). \quad (14)$$

Расчет спектральных характеристик радиоимпульсных сигналов производится на основании экспериментально полученных параметров среды над залежами углеводородов [7–9]. Исследование УВЗ проводится в достаточно широком диапазоне радиочастот, охватывающем СДВ, ДВ, СВ, КВ и УКВ волны. Это требует знаний свойств сред для используемых методов поиска полезных ископаемых. На практике разработчики радиотехнических систем поиска УВЗ сталкиваются с проблемой точного знания характеристик промежуточных сред, находящихся над залежами.

Зондирование исследуемых сред опирается на многочисленные справочные данные, которые в настоящее время накоплены и систематизированы в основном по результатам лабораторных измерений и электроразведки на постоянном токе [10]. Для измерений на переменном токе получаемых систематизированных данных бывает недостаточно. В таких случаях либо приходится проводить дополнительные вспомогательные исследования либо пользоваться приближенными коэффициентами перехода, определенными относительно постоянного тока и используемой частоты зондирования [10]. При исследовании взаимодействия импульсных сигналов со средой над углеводородами удобно пользоваться таким понятием, как радиопортрет УВЗ – совокупность признаков, связанных со статическим и/или динамическим изменением характеристик электромагнитных полей, присущих данной геологической неоднородности и ее электродинамическим параметрам [7].

Результаты и их обсуждение. Проведен анализ зависимостей амплитуды радиоимпульса от несущей частоты f_0 при частоте импульсов f_n , равной 10 кГц для различных глубин h . Рисунок 3 представлен в логарифмическом масштабе, т.к. значение амплитуды отраженного импульса $S_{отр}$ очень мало.

При сравнении спектра прямого импульса со спектром отраженного видно, что после отражения несущая частота не сместилась и спектр не изменил свою форму. Из рисунка 3 видно, что при увеличении частоты радиоимпульса уменьшается амплитуда, из формул (2), (9), (14) – при возрастании частоты увеличивается коэффициент распространения волны γ_2 вследствие чего увеличивается коэффициент затухания α . Кроме того, с увеличением глубины амплитуда отраженного радиоимпульса резко уменьшается и шаг уменьшения амплитуды с увеличением частоты становится больше.

Построение радиотехнических систем поиска и выделения УВЗ, находящихся на больших глубинах залегания, связано с огромными трудностями, определяемыми большим разбросом проводимостей исследуемых поверхностей. Был проведен соответствующий анализ, результаты которого отражены в таблице.

Таблица. – Затухание ЭМВ для различных участков земной поверхности

σ_r , См/м	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
F , Гц	$136 \cdot 10^3$	$136 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$
ϵ_r	3	10	3	10	20
α , дБ/м	$1,107 \cdot 10^{-2}$	$9,975 \cdot 10^{-3}$	$2,297 \cdot 10^{-2}$	$9,92 \cdot 10^{-2}$	$9,068 \cdot 10^{-2}$

Таким образом, при затухании ЭМВ 100 дБ параметры из второго столбца таблицы обеспечивают проникновение сигнала на глубину 520 м, а параметры из шестого столбца – на глубину 63,4 м.

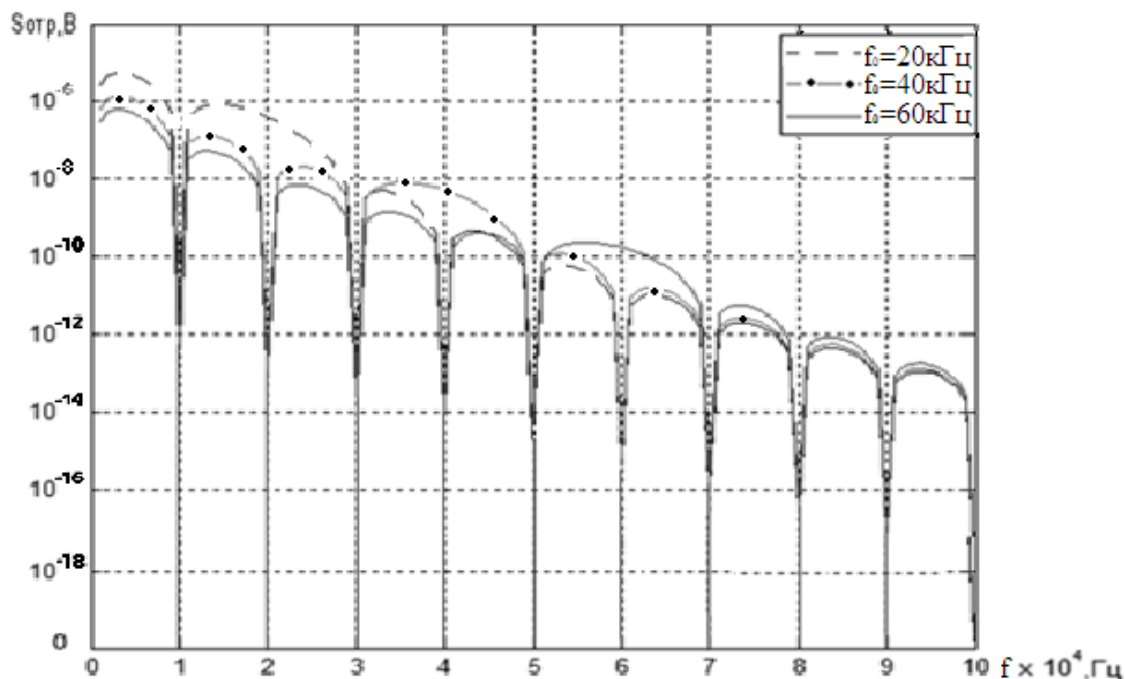


Рисунок 3. – Зависимость спектра отраженного радиоимпульсного сигнала от частоты на глубине залегания $h = 1000$ м

Проведенный анализ показал, что амплитуда радиоимпульса для различных глубин h имеет частотную зависимость. Сравнение режимов радиоимпульсного распространения ЭМВ выявило различия в исследуемых характеристиках.

Заключение. Полученные зависимости свидетельствуют о следующем: большие глубины углеводородных залежей требуют применения для зондирования радиоимпульсных сигналов большей длительности. Учитывая данные приведенной нами таблицы, можно рекомендовать для повышения информативности электромагнитных методов разведки нефти и газа и обеспечения требуемой глубинности обнаружения применение необходимой длительности радиоимпульсных сигналов. Возможность перестройки устройства георазведки с одного режима на другой при наличии залежи дополняет функциональные возможности для поиска углеводородов. Результаты исследований могут быть применены для разработки радиотехнических систем ближней и дальней радиолокации, для повышения точности и уровня достоверности методов георазведки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д. В. Радиотехнические системы поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме двухчастотного взаимодействия / Д. В. Гололобов, В. Ф. Янушкевич // Весці НАН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 1. – С. 49–54.
2. 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. – Rydzyna, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
3. Гололобов, Д. В. Поверхностный импеданс углеводородной залежи в режиме двухчастотного взаимодействия / Д. В. Гололобов, Н. В. Цывис, В. Ф. Янушкевич // Изв. Беларус. инж. акад. – 2001. – № 1(11). – С. 101–104.
4. Гололобов, Д. В. Поверхностный импеданс среды над углеводородными залежами в режиме частотно-модулированных сигналов / Д. В. Гололобов, С. В. Калинин, В. Ф. Янушкевич // Весці НАН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 4. – С. 98–101.
5. Москвичев, В. Н. Исследование взаимодействий электромагнитных волн с углеводородной залежью / В. Н. Москвичев // Радиотехника и электроника. – 1988. – Вып. 18. – С. 91–96.

6. Финкельштейн, М. И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М. И. Финкельштейн, В. А. Кутев, В. П. Золоторев. – М. : Недра, 1986. – 182 с.
7. Гололобов, Д. В. Радиолокационный портрет углеводородной залежи / Д. В. Гололобов // Электромагнитные исследования с контролируемыми источниками : тез. докл. междунар. геодез. конф., Санкт-Петербург, 27–31 мая 1996 г. / ВИГР-Рудгеофизика ; редкол.: А.А. Петров [и др.]. – СПб., 1996. – С. 42–43.
8. Норман, Дж. Хайн. Технология, разведка и добыча нефти / Дж. Хайн Норман. – М. : Олимп-Бизгис, 2010. – 752 с.
9. Hordt, A. Analysis of time-lapse TEM data for nuclearground gas storage monitoring / A. Hordt, K. Vozoff // 60th EAGE Goth and Tech Exhit., Leipzig, Germany, 8–12 June 1998 / Leipzig, 1998. – P. 10–16.
10. Владов, М. Л. Введение в георадиолокацию / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.

Поступила 05.09.2016

INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES WITH ANISOTROPIC ENVIRONMENTS OVER HYDROCARBONIC DEPOSITS IN THE MODE OF RADIO PULSE SIGNALS

V. YANUSHKEVICH, K. KREMENYA, M. IVANOV, T. MALADZECHKINA

The paper deals with the interaction of the signal with radiopulse anisotropic media on the hydrocarbon deposits. Used vertical polarization of electromagnetic waves. A wide range of frequencies used. Variation characteristics of probing signals allows to increase the information content of the search. Recommendations for the use of the optimal characteristics of probing signals. The dependences obtained indicate the following: a large depth of hydrocarbons require for sensing radiopulse signals longer duration. The possibility of restructuring complements the functionality of the device to search for hydrocarbon deposits. On the basis of the given research can be developed radiokompleksirovaniya methods for geological exploration of hydrocarbons. research results can be used in the search geophysics.

Keywords: *electromagnetic wave, anisotropic medium, hydrocarbon deposits.*