

УДК 621.371: 550.837.6

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СИГНАЛОВ С НЕОДНОРОДНЫМИ ПРИРОДНЫМИ ОБРАЗОВАНИЯМИ

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

*(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники)*

*Приведены результаты взаимодействия гармонического, двухчастотного, модулированного сигналов с неоднородными природными образованиями. Рассчитаны амплитудный и фазовый спектры для двухчастотного, амплитудно-модулированного, частотно-модулированного и радиоимпульсного сигналов. Установлены закономерности изменения амплитуды и уровня боковых лепестков в спектре отраженного сигнала. Даны рекомендации по применению различных режимов взаимодействия сигналов с неоднородными природными образованиями. Приведено обоснование комплексного использования методов поиска и идентификации углеводородных залежей.*

**Ключевые слова:** *радиоимпульсный сигнал, анизотропная среда, углеводородная залежь, амплитудный и фазовый спектр.*

**Введение.** В георазведке углеводородных залежей (УВЗ) вопросы поиска и обнаружения имеют первостепенное значение [1–4]. Существующие геофизические методы, направленные на выделение углеводородных залежей, обладают рядом недостатков – высокая стоимость, сложность выполнения работ, недостаточная эффективность. Поиск новых решений лежит в области сокращения времени аттестации исследуемой поверхности и улучшения качественных показателей эффективности.

Разработка новых методов импульсной электроразведки на основе трансформации спектральных характеристик отраженного сигнала направлена на повышение точности определения границ залежи, возможность повышения глубинности методов поиска УВЗ, улучшение разрешающей способности определения местоположения залежей.

Взаимодействие гармонических сигналов, включая модулированные, со средой над УВЗ достаточно полно исследовано, применение же импульсного сигнала для решения задач поиска и оконтуривания залежей на основе взаимодействия импульсного сигнала с неоднородной средой не имеет теоретического обоснования.

### **Взаимодействие различных типов сигналов с неоднородными природными образованиями.**

В качестве исследуемого выступает образование над углеводородной залежью (УВЗ) – неоднородное природное образование (НПО). Неоднородное природное образование – это разновидность анизотропных сред с наличием свободных носителей электрического заряда, создающих при своем движении в неоднородности электрические и магнитные поля, которые искажают внешние поля и влияют на характер движения самих носителей заряда.

Анизотропное образование – образование, физические свойства (диэлектрическая, магнитная проницаемости) которого зависят от направления электрического, магнитного полей.

С целью обоснования целесообразности применения импульсного сигнала при поиске и идентификации НПО проведено моделирование процесса взаимодействия с ним гармонического, модулированного и импульсного сигнала. Кроме того, был проанализирован тензор диэлектрической проницаемости данных видов сигналов при взаимодействии с НПО [5, 6].

Спектральная характеристика отраженной волны при воздействии НПО на зондирующий сигнал оценивается выражением

$$S_{\text{отпр}} = S(\omega) \cdot R_i(\omega) \cdot \exp(j(\varphi(\omega)) + \varphi_i) = S_{\text{отпр}}(\omega) \cdot j\varphi_{\text{отпр}}(\omega),$$

где  $S(\omega)$  – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) зондирующего сигнала;

$S_{\text{отпр}}(\omega)$  – АЧХ отраженного сигнала;

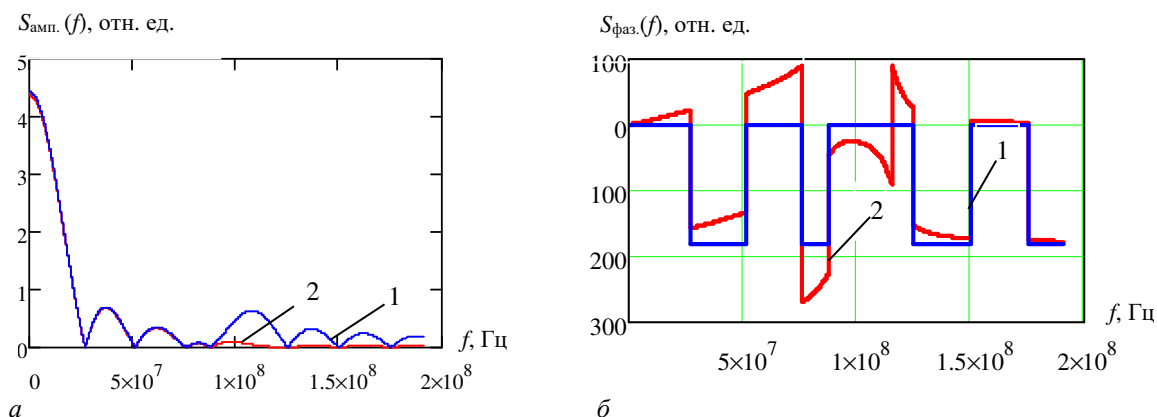
$R_i(\omega)$  – коэффициент отражения;

$\varphi(\omega)$  – фазочастотная характеристика (ФЧХ) зондирующего сигнала;

$\varphi_{\text{отпр}}(\omega)$  – ФЧХ отраженного сигнала.

Установлено, что при взаимодействии гармонического сигнала амплитудный и фазовый спектр трансформируется минимально, следовательно, применение гармонических методов, основанных на

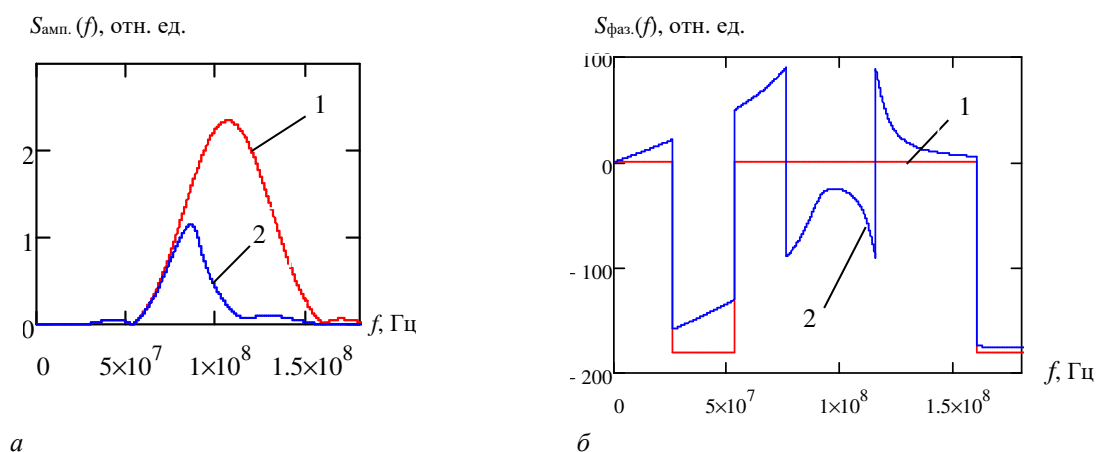
изменении спектральных характеристик отраженной волны, для поиска НПО нецелесообразно. Однако при рассмотрении бигармонического сигнала в режиме мощного низкочастотного (НЧ) и высокочастотного (ВЧ) сигнала показало значительное изменение фазового и минимальное амплитудного спектров (рисунок 1).



**Рисунок 1. – Расчетная зависимость амплитудного (а) и фазового спектра (б):**  
**1 – зондирующего бигармонического НЧ-сигнала; 2 – отраженного бигармонического НЧ-сигнала от НПО**

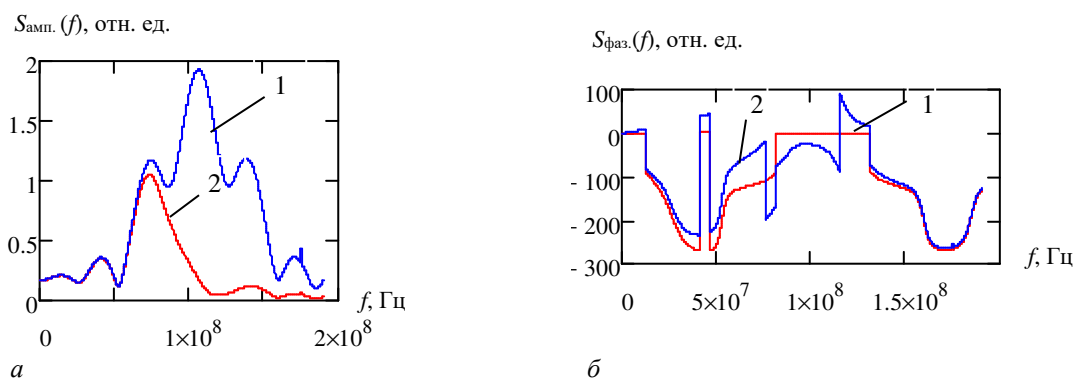
При исследовании тензора диэлектрической проницаемости [7, 8] также можно сказать об отличии однотонального и двутонального режимов взаимодействия с НПО, а именно присутствие в выражениях для тензора величины  $\tilde{\omega}_1, \omega_2, k_E, k_\omega$ , которые определяют параметры этих сигналов. Использование двухчастотных сигналов позволяет повысить информативность методов поиска. Основная гармоника радиоимпульса имеет не нулевую частоту, а частоту заполнения  $f_0$ . А его ширина определяется длительностью радиоимпульса. Амплитудный спектр отраженного сигнала характеризуется изменением уровня максимума и искажением боковых лепестков [9]. Вместе с тем существенно отличаются компоненты тензора диэлектрической проницаемости между режимом мощного НЧ- и ВЧ-сигнала [10].

При взаимодействии амплитудно-модулированного (АМ) сигнала (рисунок 2) наблюдаются изменения амплитуды и уровня боковых лепестков в амплитудном спектре, а в фазовом спектре существует провал в диапазоне частот  $8 \cdot 10^7 - 1,2 \cdot 10^8$  Гц до  $-90^\circ$ . В тензоре диэлектрической проницаемости характерным является зависимость его компонентов от коэффициента амплитудной модуляции  $k_m$ , а также от модулирующей  $\Omega$  и несущей  $\omega$  частот АМ-сигнала [11–13].



**Рисунок 2. – Расчетная зависимость амплитудного (а) и фазового спектра (б):**  
**1 – зондирующего АМ-сигнала; 2 – отраженного АМ-сигнала от НПО**

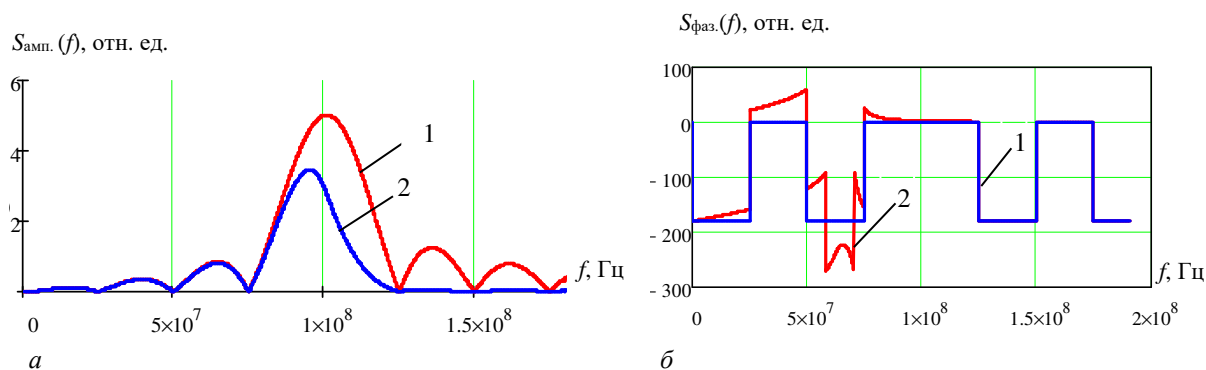
При взаимодействии с частотно-модулированным (ЧМ) сигналом (рисунок 3) амплитудный спектр отраженного сигнала характеризуется уменьшением амплитуды и изменением уровня боковых лепестков.



**Рисунок 3. – Расчетная зависимость амплитудного (а) и фазового спектра (б):  
1 – зондирующего ЧМ-сигнала; 2 – отраженного ЧМ-сигнала от ЭНПС**

Как и при амплитудно-модулированном сигнале на фазовом спектре появляется резкий скачок фазы в интервале от  $8 \cdot 10^7$  Гц до  $1 \cdot 10^8$  Гц. Для ЧМ-сигнала мнимые части компонентов  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_3$  зависят от параметра частоты.

При рассмотрении импульсного сигнала проведено моделирование процесса взаимодействия ЭМВ в режиме видеоимпульса и радиоимпульса (рисунок 4). При изучении в режиме видеоимпульса установлено, что компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды над электрически неоднородной природной средой при различном соотношении амплитуд и частот имеют существенные отличия. Так, для режима видеоимпульса существенен вклад параметров частоты  $F_1$  в мнимые составляющие  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_3$ .



**Рисунок 4. – Расчетная зависимость амплитудного (а) и фазового спектра (б)  
1 – зондирующего радиоимпульса, 2 – отраженного радиоимпульса от НПО**

Основная гармоника радиоимпульса имеет не нулевую частоту, а частоту заполнения  $f_0$ . А его ширина определяется длительностью радиоимпульса. Амплитудный спектр отраженного сигнала характеризуется изменением уровня максимума и искажением боковых лепестков.

Фазовый спектр имеет ступенчатую форму, максимально фаза искажается в диапазоне  $5 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^8$  Гц с резкими изменениями от  $-260^\circ$  до  $40^\circ$ . Компоненты тензора диэлектрической проницаемости содержат информацию об отклике исследуемой среды на взаимодействие радиоимпульса. Отличием радиоимпульса от видеоимпульса является присутствие частоты  $\omega$  в мнимых составляющих  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_3$  [14].

**Разработка комплексного подхода в обнаружении природных неоднородных образований.** Выбор метода электроразведки определяет методику проведения натурных испытаний, точность определения границ и уровень идентификации НПО. Современные методы электромагнитной разведки требуют комплексного подхода для организации геологоразведочных работ. Разработка требований к электромагнитным методам при поиске, оконтуривании и идентификации залежей нефти и газа – важнейшая задача радиокомплексирования. Оптимизация характеристик зондирующих сигналов и радиотехнических систем поиска будет способствовать успешному решению задач георазведки. Метод использования модулированных сигналов обладает хорошими характеристиками. Методика измерений основана на

расширении функциональных зависимостей компонентов тензоров от режимов модуляции, что позволяет повысить информативность разрабатываемых способов поиска УВЗ. Применение режима мощного низкочастотного сигнала предоставляет большие возможности для методов радиокомплексирования, поскольку вариация диэлектрической проницаемости осуществляется в более широком диапазоне по сравнению с режимом мощного высокочастотного сигнала. Использование радиоимпульсного метода зондирования УВЗ позволяет повысить точность определения границ и однозначность выявления скопленных углеводородов при использовании эффекта нелинейного взаимодействия сигналов в условиях анизотропии. Предлагаемый метод дает возможность выбора конкретных частот при ведении разведки, позволяет существенно снизить массу и габариты устройств геоэлектроразведки. При этом достигается повышение мобильности устройств разведки, сопровождающееся повышением производительности работ при поисках углеводородов. Для разработки методов поиска важную роль играет выбор физических моделей углеводородов, рассматривающих физико-химические процессы в самой залежи и в околозалежном пространстве, влияние углеводородов на электрические свойства вмещающих пород над УВЗ, состав кристаллического скелета и термодинамические условия залегания (давление и температура).

Количественные проявления этих процессов зависят от физико-геологических свойств пород-коллекторов: гранулометрического и минералогического состава пород, структурно-текстурных особенностей скелета, характера пористости и проницаемости, вида цементирующего вещества и механических свойств скелета, количества пластовой воды в порах и ее минерализации и т.д., что предполагает конкретизацию электродинамических моделей УВЗ для повышения эффективности комплексного применения методов георазведки.

**Заключение.** Проведено сравнение параметров различных сигналов (гармонического, двухчастотного, модулированного) при взаимодействии с электрически неоднородной природной средой. Установлено, что применение бигармонических сигналов в методах, основанных на изменении амплитудного спектра отраженного сигнала, для поиска НПО нецелесообразно. Однако в фазовых методах бигармонический сигнал в режиме мощного низкочастотного и высокочастотного сигнала могут применяться из-за значительного изменения фазового спектра. При взаимодействии АМ-сигнала и ЧМ-сигнала с НПО наблюдались изменения амплитуды и уровня боковых лепестков в амплитудном спектре, а в фазовом спектре отмечены провалы, что позволит применять амплитудно-модулированные и частотно-модулированные сигналы в методах по выделению УВЗ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Норман, Д.Х. Технология, разведка и добыча нефти / Дж. Хайн Норман. – М. : Олимп-Бизгис, 2010. – 752 с.
2. Hordt, A. Analysis of time-lapse TEM data for nuclearground gas storage monitoring / A. Hordt, K. Vozoff // 60<sup>th</sup> EAGE Goth and Tech Exhit., Leipzig, Germany, 8–12 June 1998. – Leipzig, 1998. – P. 10–16.
3. Korephanov, V. Magnetotelluric sounding at sea bottom methodology and instrumentation / V. Korephanov, F. Dudkin // 61<sup>th</sup> EAGE Conf. and techn. Exil., Helsinki, Finland, 1–4 may 1999. – Helsinki, 1999. – P. 143.
4. Янушкевич, В.Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В.Ф. Янушкевич. – Новополоцк : ПГУ, 2017. – 232 с.
5. Заяц, Е.Ю. Глубинность исследований при импульсном методе поиска и оконтуривания УВЗ / Е.Ю. Заяц, В.Ф. Янушкевич // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций. РТ-2015 : материалы 11-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф., Севастополь, Украина, 16–20 нояб. 2015 г. – Севастополь, 2015. – С. 34.
6. Заяц, Е.Ю. Расчет минимально измеряемой толщины слоя для импульсного метода поиска и оконтуривания УВЗ / Е.Ю. Заяц, В.Ф. Янушкевич, С.В. Калинин // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций. РТ-2015 : материалы 11-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф., Севастополь, Украина, 16–20 ноябр. 2015 г. – Севастополь, 2015. – С. 36.
7. Гололобов, Д.В. Поверхностный импеданс анизотропной среды при двухчастотном взаимодействии ЭМВ / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Известия Белорусской инженерной академии. – 2001. – № 11(1). – С. 101–104.
8. Отражательные характеристики среды над углеводородной залежью при двухчастотном взаимодействии / Д.В. Гололобов [и др.] // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 2004 / Полоц. гос. ун-т, 2004. – Т. 2. – С. 226–229.
9. Гололобов, Д.В. Радиотехнические системы поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме двухчастотного взаимодействия / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 1. – С. 49–54.

10. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / под ред. Д.В. Гололобова. – Минск : Бестпринт, 2009. – С. 50–121.
11. Гололобов, Д.В. Анатомическое и экспериментальное исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородными залежами / Д.В. Гололобов, В.Н. Москвичев, Ю.Н. Стадник // Геология нефти и газа. – 1995. – № 3. – С. 26–30.
12. Гололобов, Д.В. Взаимодействие АМ-сигнала с углеводородной залежью / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Современные проблемы радиотехники, электроники и связи : тез. докл. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию радио, Минск, 1995 г. / Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 1995. – С. 6–7.
13. Заяц, Е.Ю. Воздействие модулированных сигналов на углеводородную залежь / Е.Ю. Заяц, В.Ф. Янушкевич, С.В. Калинин // Докл. БГУИР. – 2015. – № 3 (89). – С. 112–116.
14. Взаимодействие радиоимпульса с анизотропной средой / Д.Л. Василенко [и др.] // Современные проблемы проектирования и производства РЭС : тез. докл. 4-й Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 2006 г. / Полоцк. гос. ун-т. – Новополоцк, 2006. – Т. 2. – С. 77–80.
15. Никитин, А. А. Комплексирование геофизических методов : учебник для вузов / А.А. Никитин, В.К. Хмелевской. – Тверь : ГЕРС, 2004. – 294 с.

Поступила 22.03.2019

#### THE INTERACTION OF VARIOUS TYPES OF SIGNALS WITH HETEROGENEOUS NATURAL FORMATIONS

V. YANUSHKEVICH, E. ZAYATS

*The article presents the results of harmonic, two-frequency, modulated signal interaction with heterogeneous natural formations. The amplitude and phase spectra were calculated for two-frequency, amplitude-modulated, frequency-modulated, and radio-pulse signals. The laws of variation of the amplitude and level of side lobes in the spectrum of the reflected signal are established. Recommendations on the use of various modes of interaction of signals with heterogeneous natural formations are given. The rationale for the integrated use of methods for the search and identification of hydrocarbon deposits is given.*

**Keywords:** radio pulse signal, anisotropic medium, hydrocarbon deposit, amplitude and phase spectrum.