

УДК 621.371: 550.837.6

DOI 10.52928/2070-1624-2023-40-1-65-71

**ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВЫХ МЕТОДОВ ПОИСКА УГЛЕВОДОРОДОВ
НА ОСНОВЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ***канд. техн. наук, доц. В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

Исследованы характеристики анизотропной среды над углеводородами при применении фазовых методов на основе амплитудно-модулированных сигналов. Проведены экспериментальные исследования фазовых характеристик поверхностного импеданса в режиме амплитудно-модулированных сигналов. Проанализированы две составляющие поверхностного импеданса для указанного режима. Проведено исследование влияния режимов зондирующих сигналов на характеристики анизотропной среды над залежами на основе двухканальной схемы измерений. Предложен метод регистрации границ углеводородных залежей (УВЗ), основанный на использовании фазовых методов поиска и идентификации УВЗ в режиме амплитудно-модулированных сигналов. Результаты исследований могут быть использованы при разработке радиотехнических систем поиска и оконтуривания залежей нефти и газа и их применении для поисковой геофизики.

Ключевые слова: анизотропная среда, углеводородная залежь, амплитудно-модулированный сигнал.

Введение. Актуальность повышения эффективности электромагнитных методов (ЭММ) и устройств для поиска и оконтуривания скоплений нефти и газа (углеводородов) основывается на расширении зависимостей характеристик анизотропной среды над УВЗ от режимов воздействующих сигналов [1–3]. Выбор ЭММ и методики проведения экспериментальных испытаний основывается на анализе электрохимических и электрофизических процессов в образованных над УВЗ анизотропных средах. При помощи сейсморазведки изучается глубинное строение Земли, выделяются месторождения полезных ископаемых (в основном нефти и газа), решаются задачи гидрогеологии и инженерной геологии, проводится сейсмическое микрорайонирование [4]. Внедрение методов и аппаратуры для поиска и оконтуривания УВЗ основано на методиках высокоэффективного, научно-обоснованного прогнозирования, оконтуривания и освоения продуктивных зон [5]. Использование частотно-модулированных сигналов с определением амплитудных и фазовых составляющих поверхностного импеданса геологического участка местности возможно при поиске, оконтуривании залежей углеводородов [6]. Геофизические исследования скважин – это комплекс методов, которые используются для изучения горных пород и контроля технического состояния буровых. По назначению делятся на две группы: методы каротажа и скважинной геофизики [7]. Аппаратура для мониторинга пластов и геотермальной разведки состоит из системы, совмещающей регистрацию микросейсмических и электромагнитных данных в одном блоке [8]. Контроль за разработкой нефтяных и газовых месторождений включает в себя комплекс геофизических исследований в действующих скважинах, размещенных в пределах эксплуатируемой залежи для изучения процесса вытеснения нефти в пласте и закономерностей перемещения водонефтяного, газонефтяного и газовойдяного контактов [9]. Активное внедрение различных методов и аппаратуры для поиска и оконтуривания УВЗ базируется на исследовании взаимодействия окружающей среды и кристаллического скелета, образованного в анизотропной среде над УВЗ и пронизанного проводящими включениями и электролитом с наличием минералов с электронной проводимостью [10].

Используя процесс, который включает технику-экономическое обоснование с оценкой полевого шума и тщательной проверкой параметров сбора данных до начала съемки, сбор широкополосных массивов данных и расширенную обработку, можно преодолеть серьезные проблемы с шумом в районе съемки [11]. В статье [12] описаны необходимые инструменты и процедуры сбора данных, которые сильно отличаются от других электромагнитных методов с контролируемым источником. Для повышения точности и достоверности определения границ УВЗ следует рекомендовать радиокомплексирование указанных выше ЭММ [13]. Многопараметровая аэрозондировка может быть использована в поисковой геофизике [14]. Комплексный подход к морской электромагнитной съемке с использованием буксируемой косы и источника способствует достижению хороших характеристик обнаружения углеводородов [15].

Цель работы заключается в разработке и совершенствовании ЭММ поиска и оконтуривания углеводородов на основе применения амплитудно-модулированных сигналов [16].

Фазовый метод поиска углеводородов. Применение фазовых характеристик для исследования свойств среды над углеводородами находит широкое применение при разработке современных ЭММ [17]. В качестве исследуемых характеристик УВЗ взяты импедансные граничные условия. Величина поверхностного импеданса позволяет проводить оценку характеристик антенн, что может быть использовано для идентификации залежей полезных ископаемых.

Рассмотрим воздействие на анизотропную среду над углеводородами радиосигнала тональной амплитудной модуляции вида

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

где E – амплитуда несущего колебания;

k_m – коэффициент амплитудной модуляции;

$\Omega = 2\pi F$, $\omega = 2\pi f$ – соответственно модулирующая и несущая частоты.

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости для двухчастичного потока определяются следующим образом [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_r + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} + j \left[\frac{\epsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega(1 + k_m \cos \Omega t)} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega (v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} \right] \right\}; \\ \dot{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} - \frac{2j v_i \omega_{\Pi i} \omega_{\Gamma i}}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_3 = \epsilon_r + \sum_{i=1}^2 \left\{ \omega_{\Pi i}^2 \frac{1}{v_i^2 + \omega^2} + j \left[\frac{\epsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega(1 + k_m \cos \Omega t)} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega} \frac{1}{\omega^2 + v_i^2} \right] \right\}. \end{array} \right.$$

Режим амплитудной модуляции характеризуют составляющие $\dot{\epsilon}_1$, $\dot{\epsilon}_2$, $\dot{\epsilon}_3$; плазменная частота $\omega_{\Pi i}$; гиротропная частота $\omega_{\Gamma i}$; частота столкновения частиц v_i ; относительная диэлектрическая проницаемость среды ϵ_r ; проводимость среды σ_r ; диэлектрическая постоянная ϵ_0 .

Компоненты поверхностного импеданса определяются по формулам

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} &= -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L}} (\sqrt{\dot{\epsilon}_R} - \sqrt{\dot{\epsilon}_L}); \\ \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} &= \frac{1}{2\sqrt{\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L}} (\sqrt{\dot{\epsilon}_R} + \sqrt{\dot{\epsilon}_L}). \end{aligned} \quad (1)$$

В выражениях (1) фигурируют комбинационные составляющие

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_R &= \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \dot{\epsilon}_R + j \text{Im} \dot{\epsilon}_R; \\ \dot{\epsilon}_L &= \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \dot{\epsilon}_L + j \text{Im} \dot{\epsilon}_L. \end{aligned}$$

Таким образом, анализ сводится к отдельному исследованию амплитудных и фазовых характеристик поверхностного импеданса. Представим выражения (1) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} &= |Z_{11}| \cdot e^{j\varphi Z_{11}} = |Z_{22}| \cdot e^{j\varphi Z_{22}}; \\ \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} &= |Z_{12}| \cdot e^{j\varphi Z_{12}} = |Z_{21}| \cdot e^{j\varphi Z_{21}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Результаты исследований. Проводилось исследование фазовых характеристик (2). Применялись микрополосковая антенна с частотной характеристикой коэффициента стоячей волны (КСВ) (рисунок 1) и плоские логарифмические спиральные антенны с частотной характеристикой КСВ (рисунок 2). Частотная характеристика КСВ плоской логарифмической спиральной антенны 2-го канала отличается не более, чем на 5% по сравнению с характеристикой антенны 1-го канала.

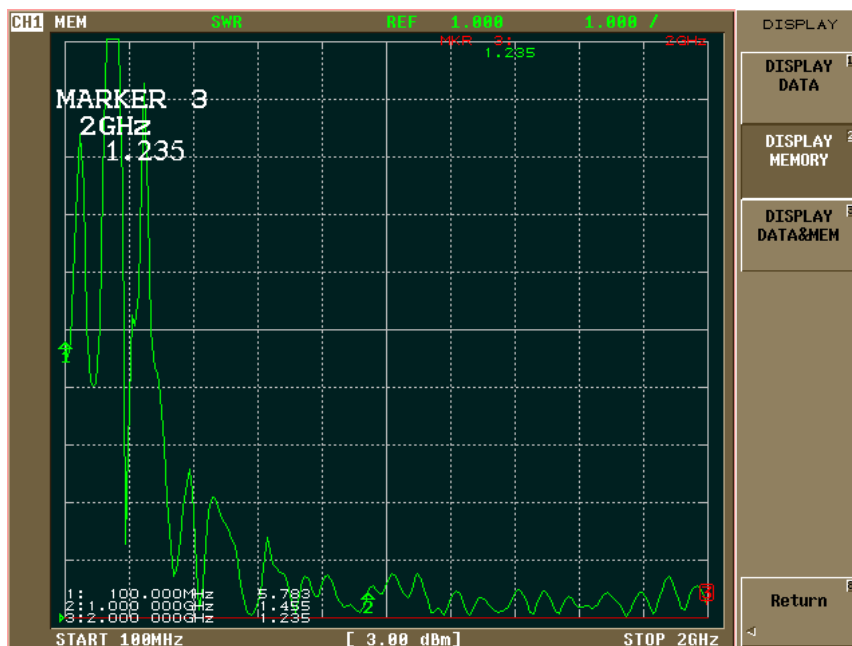


Рисунок 1. – КСВ микрополосковой антенны

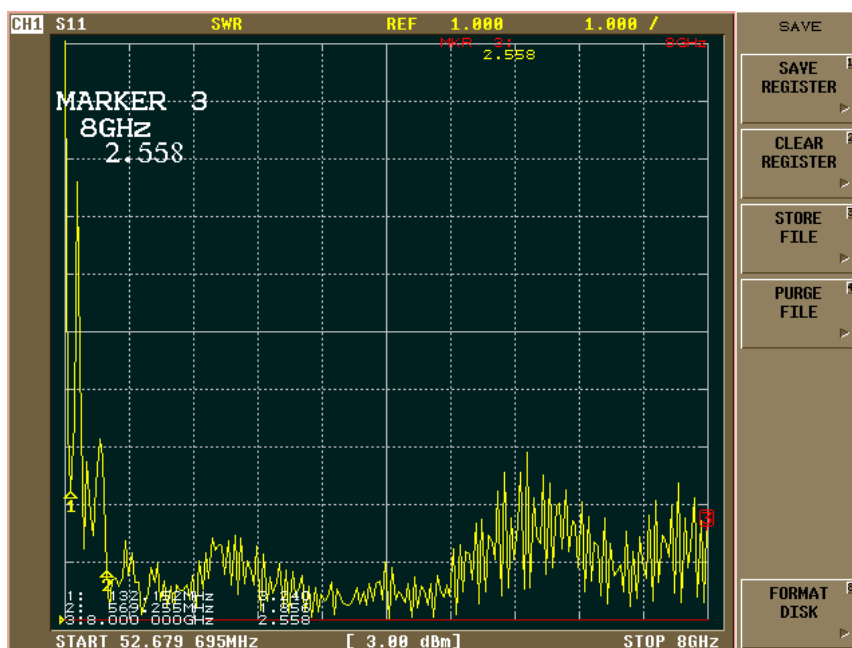


Рисунок 2. – КСВ плоской логарифмической спиральной антенны 1 канала

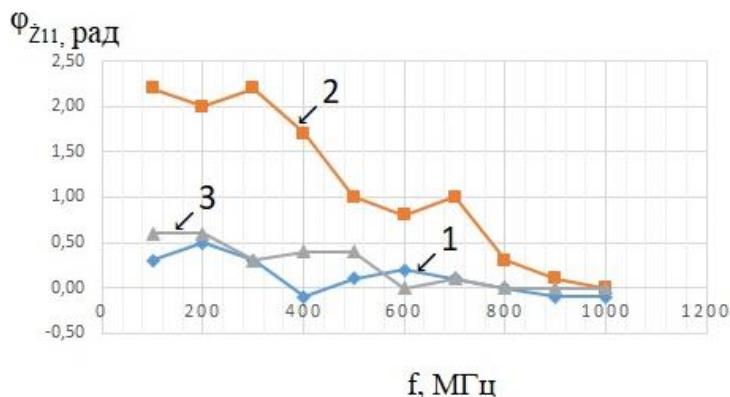
Предлагаемый способ был опробован на Геологическом и Мармовичском месторождениях УВЗ Гомельской области.

Измерения проводились в частотном диапазоне на несущих частотах 0,1...1 ГГц при использовании частоты модуляции $F = 10...100$ МГц с коэффициентами амплитудно-модулированного сигнала в диапазоне 0,2...0,9. Высоту подъема антенны выбирали из соображений проведения измерений (на расстоянии 1 м от поверхности земли).

Точки измерения выбирались следующим образом: обе точки измерения фазы находятся вне УВЗ; одна точка измерения фазы находится над УВЗ, вторая точка измерения фазы – вне УВЗ; обе точки измерения фазы находятся над УВЗ.

Когда только одна точка измерения фазы (рисунок 3) находится на границе залежи (пикет 250 для Мармовичского месторождения УВЗ), происходит уменьшение фазовой составляющей Z_{11} от величины 2,2 рад

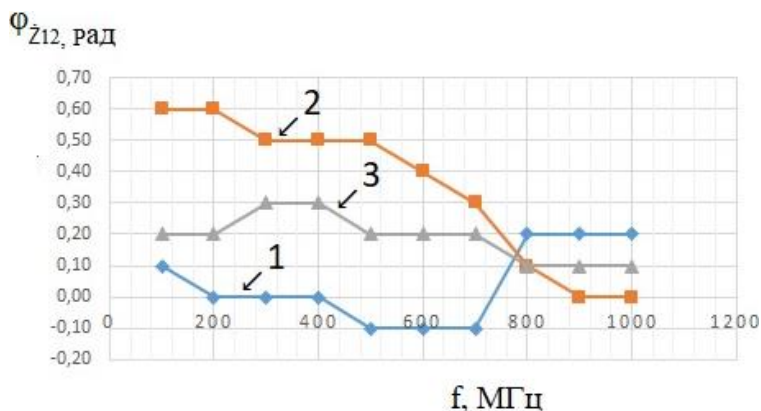
(частота $f = 100$ МГц) до величины 0,3 рад (частота $f = 800$ МГц) и до 0 рад (частота $f = 1000$ МГц) с увеличением фазы до величины 2,2 рад (частота $f = 300$ МГц). По аномальным значениям фазовой составляющей \dot{Z}_{11} определяли границу УВЗ. В случае расположения обеих точек измерения фазы вне УВЗ наблюдаются отличия фазы в 2 каналах измерения с максимумом 0,5 рад (частота $f = 200$ МГц). В ситуации расположения обеих точек измерения фазы над УВЗ наблюдаются отличия фазы в 2 каналах измерения с максимумами 0,6 рад (частота $f = 100$ МГц) и 0,6 рад (частота $f = 200$ МГц).



1 – обе точки вне УВЗ; 2 – одна точка над УВЗ, вторая точка вне УВЗ; 3 – обе точки над УВЗ

Рисунок 3. – Экспериментальные зависимости фазовой составляющей \dot{Z}_{11} для Мармовичского месторождения

При размещении только одной точки измерения фазы (рисунок 4) на границе залежи (пикет 250 для Мармовичского месторождения УВЗ) происходит уменьшение фазовой составляющей \dot{Z}_{12} от величины 0,6 рад (частоты $f = 100 - 200$ МГц) до 0 рад (частоты $f = 900 - 1000$ МГц). По аномальным значениям фазовой составляющей \dot{Z}_{12} определяли границу УВЗ. В случае расположения обеих точек измерения фазы вне УВЗ наблюдаются отличия фазы в 2 каналах измерения с максимумом 0,2 рад (частоты $f = 800 - 1000$ МГц). В ситуации расположения обеих точек измерения фазы над УВЗ наблюдаются отличия фазы в 2 каналах измерения с максимумом 0,3 рад (частоты $f = 300, 400$ МГц).

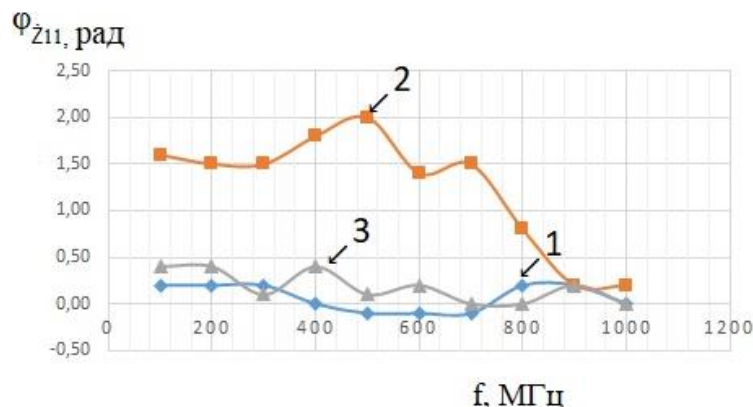


1 – обе точки вне УВЗ; 2 – одна точка над УВЗ, вторая точка вне УВЗ; 3 – обе точки над УВЗ

Рисунок 4. – Экспериментальные зависимости фазовой составляющей \dot{Z}_{12} для Мармовичского месторождения

В случае нахождения только одной точки измерения фазы (рисунок 5) на границе залежи (пикет 200 для Геологического месторождения УВЗ) происходит уменьшение фазовой составляющей \dot{Z}_{11} от величины 1,6 рад (частота $f = 100$ МГц) до 0,2 рад (частоты $f = 900 - 1000$ МГц) с увеличением фазы до величины 1,8 рад (частота $f = 400$ МГц), до величины 2,0 рад (частота $f = 500$ МГц). По аномальным

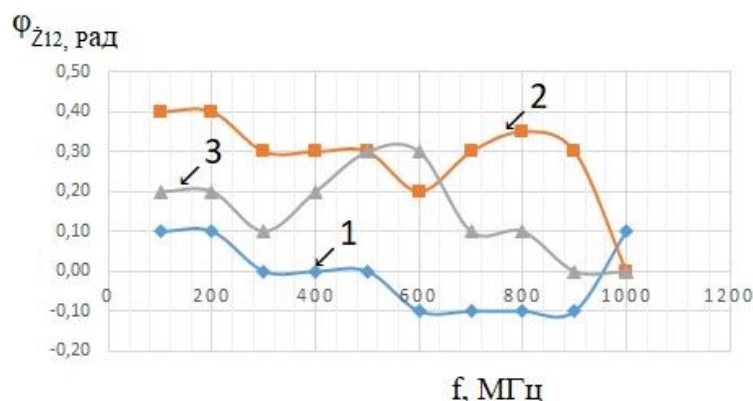
значениям фазовой составляющей \dot{Z}_{11} определяли границу УВЗ. В случае расположения обеих точек измерения фазы вне УВЗ наблюдаются отличия фазы в 2 каналах измерения с максимумом 0,2 рад (частоты $f = 100, 200, 300, 800, 900$ МГц). В ситуации расположения обеих точек измерения фазы над УВЗ наблюдаются отличия фазы в 2 каналах измерения с максимумом 0,4 рад (частоты $f = 100, 200, 400$ МГц).



1 – обе точки вне УВЗ; 2 – одна точка над УВЗ, вторая точка вне УВЗ; 3 – обе точки над УВЗ

Рисунок 5. – Экспериментальные зависимости фазовой составляющей \dot{Z}_{11} для Геологического месторождения

Наличие только одной точки измерения фазы (рисунок 6) на границе залежи (пикет 200 для Геологического месторождения УВЗ) приводит к уменьшению фазовой составляющей \dot{Z}_{12} от величины 0,4 рад (частоты $f = 100 - 200$ МГц), величины 0,35 рад (частота $f = 800$ МГц) до величины 0 рад (частота $f = 1000$ МГц). По аномальным значениям фазовой составляющей \dot{Z}_{12} определяли границу УВЗ. В случае расположения обеих точек измерения фазы вне УВЗ наблюдаются отличия фазы с наличием как отрицательных, так и положительных разностей фаз. В ситуации расположения обеих точек измерения фазы над УВЗ наблюдаются отличия фазы в 2 каналах измерения с максимумом 0,3 рад (частоты $f = 500, 600$ МГц).



1 – обе точки вне УВЗ, 2 – одна точка над УВЗ, вторая точка вне УВЗ, 3 – обе точки над УВЗ

Рисунок 6. – Экспериментальные зависимости фазовой составляющей \dot{Z}_{12} для Геологического месторождения

Данные исследования могут быть скорректированы с учетом данных по современной геодинамике и нефтегазоносности, экспериментальных исследований динамики смещений в разломных зонах, оценки влияния разломов на геологические особенности залежей и продуктивность коллекторов газовых месторождений, тепловой аэрокосмической съемки, геотермических критериев нефтегазоносности недр, особенностей исследования чувствительности морских данных CSEM для мониторинга продуктивности пласта [15].

Результаты исследований могут быть использованы при разработке радиотехнических систем для оптимизации методов поиска и оконтуривания залежей нефти и газа.

Заключение. Проведенный анализ ЭММ при распространении электро-магнитных волн в среде над углеводородами показал следующее:

- предложен метод регистрации границ углеводородных залежей, основанный на использовании фазовых методов поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме амплитудно-модулированных сигналов на несущих частотах $0,1 \dots 1$ ГГц с частотами модуляции $F = 10 \dots 100$ МГц и коэффициентами амплитудной модуляции в диапазоне $0,2 \dots 0,9$;
- достигнуто повышение разрешающей способности определения местоположения залежей за счет измерения двух составляющих поверхностного импеданса;
- обеспечивается повышение производительности геологоразведочных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moskvichew V. N. Interraction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line // 9th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
2. Yanushkevich V. F., Dauhiala D. A., Adamovich A. L. et al. Effect of a powerful low-frequency signal on an anisotropic medium over hydrocarbon // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 1889. – DOI: [10.1088/1742-6596/1889/2/022059](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/2/022059).
3. Yanushkevich V. F., Dauhiala D. A., Adamovich A. L. et al. Interaction of two-frequency electromagnetic waves with anisotropic media over hydrocarbon accumulation // J. Phys.: Conf. Ser. – 2022. – Vol. 2373. – DOI: [10.1088/1742-6596/2373/5/052016](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/5/052016).
4. Сейсмические методы при разведке полезных ископаемых и планировании горных работ – Введение / А. Малехмир [и др.] // Геофизика. – 2012. – DOI: [10.1190/2012-0724-SPSEIN.1](https://doi.org/10.1190/2012-0724-SPSEIN.1).
5. Янушкевич, В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В. Ф. Янушкевич. – Новополоцк: ПГУ, 2017. – 232 с.
6. Yanushkevich V. F., Dauhiala D. A., Maladzechkina T. V. et al. Characteristics of anisotropic media over hydrocarbons in the mode of frequency-modulated signals. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2022. – Vol. 2373. – DOI: [10.1088/1742-6596/2373/5/052026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/5/052026).
7. Шайдуллин Р. Р., Воронков С. Е. Поиск перспективных на углеводороды объектов с использованием методов ГИС на примере отложений Саргаевского горизонта // Междунар. журн. гуманитарных и естественных наук. – 2022. – № 4-1 (67). – P. 66–73. – DOI: [10.24412/2500-1000-2022-4-1-66-73](https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-4-1-66-73).
8. Geldmacher I., Strack K. A Fit-for-purpose electromagnetic System for Reservoir Monitoring and Geothermal Exploration // GRC Transactions. – 2017. – Vol. 41. – P. 1649–1658.
9. Косков В. Н. Геофизические исследования скважин: учеб. пособие. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т. – 2004. – 122 с.
10. Гололобов Д. В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. – Минск: Бестпринт, 2009. – 185 с.
11. Henke C. H., Krieger M., Strack K. et al. Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic). // Interpretatio. – 2020. – Vol. 8., iss. 4. – P. 15–24.
12. Helwig S. L., Wood W., Gloux B. Vertical–vertical controlled-source electromagnetic instrumentation and acquisition // Geophysical Prospecting. – 2019. – Vol. 67, iss. 6. – P. 1582–1594. – DOI: [10.1111/1365-2478.12771](https://doi.org/10.1111/1365-2478.12771).
13. Гололобов, Д. В. Радиокомплексирование методов электромагнитной разведки при поиске залежей углеводородов / Д. В. Гололобов // Доклады БГУИР. – 2008. – № 8(38). – С. 30–36.
14. Барышников, И. А. Многопараметровая аэроаэрозондировка методом СДВР при аэрогеофизических исследованиях на нефтяных объектах Татарии / И. А. Барышников, А. Ю. Татарский // Электромагнитные исследования с контролируемыми источниками : тез. докл. междунар. геофиз. конф., СПб., 24–31 мая 1996 г. / ВИРГ – Рудгеофизика ; редкол.: А. А. Петров [и др.]. – СПб., 1996. – С. 39–40.
15. Anderson C., Mattsson J. An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source // First Break. – 2010. – Vol. 28, iss. 5. – P. 71–75.
16. Гололобов Д. В., Янушкевич В. Ф., Калинин С. В. Импедансные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала // Доклады БГУИР. – 2010. – № 6(52). – С. 13–17.
17. Гололобов Д. В., Орлова О. В., Янушкевич В. Ф. Влияние параметров амплитудно-модулированного воздействия на фазовые составляющие поверхностного импеданса анизотропной среды плазмopodobного типа // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – Новополоцк, 2010. – № 9. – С. 98–101.

REFERENCES

1. Moskvichew, V. N. (1991). Interraction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line, *9th Microw. Conf. NICON – 91: Vol. 1*, (240–244). Rydzyna.
2. Yanushkevich, V. F., Dauhiala, D. A., Adamovich, A. L., Abramanka, S. N., & Bogush, V. A. (2021). Effect of a powerful low-frequency signal on an anisotropic medium over hydrocarbon. *J. Phys.: Conf. Ser.*, (1889). DOI: [10.1088/1742-6596/1889/2/022059](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/2/022059).
3. Yanushkevich, V. F., Dauhiala, D. A., Adamovich, A. L., Abramanka, S. N., & Kalintsau, S. V. (2022). Interaction of two-frequency electromagnetic waves with anisotropic media over hydrocarbon accumulation. *J. Phys.: Conf. Ser.*, (2373). DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2373/5/052016>.
4. Malekhir, A., Urosevich, M., Bellefler, G., Dzhukhlin C., & Milkerait, B. (2012). Seismicheskie metody pri razvedke poleznykh iskopaemykh i planirovanii gornyykh rabot – Vvedenie [Seismic methods in mineral exploration and mine planning]. *Geofizika*. DOI: [10.1190/2012-0724-SPSEIN.1](https://doi.org/10.1190/2012-0724-SPSEIN.1).

5. Yanushkevich, V. F. (2017). *Elektromagnitnye metody poiska i identifikatsii uglevodorodnykh zalezhei [Electromagnetic methods for searching and identifying hydrocarbon deposits]*. Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
6. Yanushkevich, V. F., Dauhiala, D. A., Maladzechkina, T. V., Kalintsau, S. V., & Bogush, V. A. (2022). Characteristics of anisotropic media over hydrocarbons in the mode of frequency-modulated signals. *J. Phys.: Conf. Ser.*, (2373). DOI: [10.1088/1742-6596/2373/5/052026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/5/052026).
7. Shaidullin, R. R., & Voronkov, S. E. (2022). Poisk perspektivnykh na uglevodorody ob'ektov s ispol'zovaniem metodov GIS na primere otlozhenii Sargaevskogo gorizonta [Search for objects promising for hydrocarbons using well logging methods on the example of deposits of the Sargaev horizon]. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk [International J. of Humanities and Natural Sciences]*, 4-1(67), 66–73. DOI: [10.24412/2500-1000-2022-4-1-66-73](https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-4-1-66-73).
8. Geldmacher, I., & Strack, K. (2017). A Fit-for-purpose electromagnetic System for Reservoir Monitoring and Geothermal Exploration. *GRC Transactions*, (41), 1649–1658.
9. Koskov, V. N. (2004). *Geofizicheskie issledovaniya skvazhin*. Perm: Perm. gos. tekhn. un-t. (In Russ.).
10. Gololobov, D. V. (2009). *Vzaimodeistvie elektromagnitnykh voln i uglevodorodnykh zalezhei*. Minsk: Bestprint. (In Russ.).
11. Henke, C. H., Krieger, M., Strack, K., & Zerilli, A. (2020). Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic). *Interpretatio*, 8(4), 15–24.
12. Helwig, S. L., Wood, W., & Gloux B. (2019). Vertical-vertical controlled-source electromagnetic instrumentation and acquisition. *Geophysical Prospecting*, 67(6), 1582–1594. DOI: [10.1111/1365-2478.12771](https://doi.org/10.1111/1365-2478.12771).
13. Gololobov, D. V. (2008). Radiokompleksirovanie metodov elektromagnitnoi razvedki pri poiske zalezhei uglevodorodov [Radiocomplexation of the electromagnetic geological methods for exploration of hydrocarbon objects]. *Doklady BGUIR*, 8(38), 30–36. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Baryshnikov, I. A., & Tatarskii, A. Yu. (1996). Mnogoparametrovaya aerorazvedka metodom SDVR pri aerogeofizicheskikh issledovaniyakh na neftyanykh ob'ektakh Tatarii [Multi-parameter aerial survey using the SDVR method in airborne geophysical studies at oil facilities in Tataria]. In A. A. Petrov [et al.] (Eds.) *Elektromagnitnye issledovaniya s kontroli-ruemyimi istochnikami [Electromagnetic research with controlled sources]* (39–40). St. Petersburg: VIRG – Rudgeofizika. (In Russ.).
15. Anderson, C., & Mattsson, J. (2010). An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source. *First Break*, 28(5), 71–75.
16. Gololobov, D. V., Yanushkevich, V. F., & Kalintsev, S. V. (2010). Impedansnye granichnye usloviya anizotropnoi sredy dlya amplitudno-modulirovannogo signala [Impedance boundary conditions for the environment above the hydrocarbon deposits in the amplitude-modulated signal mode]. *Doklady BGUIR*, 6(52), 13–17. (In Russ., abstr. in Engl.).
17. Gololobov, D. V., Orlova, O. V., & Yanushkevich, V. F. (2010). Vliyanie parametrov amplitudno-modulirovannogo vozdeistviya na fazovye sostavlyayushchie poverkhnostnogo impedansa anizotropnoi sredy plazmopodobnogo tipa [Influence of the amplitude-modulated effect parameters on the phase components of the surface impedance of an anisotropic plasma-like medium]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (9), 98–101. (In Russ., abstr. in Engl.).

Послупила 23.02.2023

APPLICATION OF PHASE METHODS TO SEARCH FOR HYDROCARBONS BASED ON AMPLITUDE-MODULATED SIGNALS

V. YANUSHKEVICH
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The characteristics of an anisotropic medium over hydrocarbons are studied using phase methods based on amplitude-modulated signals. Experimental studies of the phase characteristics of the surface impedance in the mode of amplitude-modulated signals have been carried out. Two components of the surface impedance are analyzed for this mode. A study was made of the influence of probing signal modes on the characteristics of an anisotropic medium over deposits based on a two-channel measurement scheme. A method for registering the boundaries of hydrocarbon deposits is proposed, based on the use of phase methods for searching and identifying hydrocarbon deposits (HCW) in the mode of amplitude-modulated signals. The research results can be used in the development of radio engineering systems for searching and delineating oil and gas deposits and their application for exploration geophysics.

Keywords: *anisotropic environment, hydrocarbon reservoir, amplitude-modulated signal.*