

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 550.837.75:553.98
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-250-256>

Поступила в редакцию 15.12.2016
Received 15.12.2016

В. Ф. Янушкевич, К. И. Иванова, М. М. Иванов

Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С АНИЗОТРОПНЫМИ СРЕДАМИ НАД УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ЗАЛЕЖАМИ В РЕЖИМЕ ВИДЕОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Аннотация. Приводится моделирование взаимодействия электромагнитных волн в режиме видеоимпульсных сигналов со средой над углеводородными залежами. Осуществлен анализ спектров отраженных видеоимпульсных сигналов от среды над углеводородами. Исследование распространения радиоволн над углеводородами проводится в рамках квазигидродинамического приближения. Выбор частот видеоимпульсных сигналов обусловлен определением характеристик сред над залежами на больших глубинах по сравнению поверхностью Земли. Спектр отраженных сигналов от анизотропной среды над углеводородной залежью в режиме видеоимпульсных сигналов может быть использован для определения электродинамических характеристик среды над залежью в широком диапазоне частот зондируемых сигналов, диэлектрических проницаемостей и удельных проводимостей сред. Возможность перестройки устройства георазведки с одного режима на другой (регулировка длительности импульса) при наличии залежи дополняет функциональные возможности для поиска углеводородных залежей. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородов могут быть усовершенствованы за счет получения информации об объектах по нескольким информационным каналам, что позволяет с достаточно высоким уровнем достоверности выделять их границы на фоне подстилающей среды. Определены глубины залегания, разрешающая способность в исследуемом диапазоне частот. Результаты исследований могут быть использованы для разработки новых электромагнитных методов поиска углеводородных залежей.

Ключевые слова: видеоимпульсный сигнал, анизотропная среда, углеводородная залежь, длительность импульса

Для цитирования. Янушкевич, В. Ф. Моделирование взаимодействия электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме видеоимпульсных сигналов / В. Ф. Янушкевич, К. И. Иванова, М. М. Иванов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 250–256. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-250-256>

V. F. Yanyshkevich, K. I. Ivanova, M. M. Ivanov

Polotsk State University, Novopolotsk, Belarus

SIMULATION OF INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES WITH ANISOTROPIC MEDIA UNDER HYDROCARBON DEPOSITS IN THE MODE OF VIDEO-PULSE SIGNALS

Abstract. The article presents the simulation of the interaction of electromagnetic waves in the mode of video pulse signals with the medium over hydrocarbon deposits. The analysis of the spectra of reflected video pulse signals from the medium over hydrocarbons is carried out. A study of the propagation of radio waves over hydrocarbons is carried out within the framework of a quasihydrodynamic approximation. The choice of the frequencies of video pulse signals is due to the determination of media characteristics over deposits at great depths compared to the surface of the earth. The spectrum of reflected signals from an anisotropic medium above a hydrocarbon deposit in the mode of video pulse signals can be used to determine the electrodynamic characteristics of the medium over the deposit over a wide range of frequencies of probed signals, dielectric permittivities and conductivity of media. The ability to reconfigure a geo-prospecting device from one mode to another (pulse width adjustment) in the presence of a deposit complements the functionality to search for hydrocarbon deposits. Electromagnetic methods for the search for and identification of hydrocarbons can be improved by obtaining information about objects through several information channels, which allows them to be identified with a sufficiently high level of reliability on the background of the underlying environment. The depths of occurrence, the resolving power in the investigated frequency range are determined. The results of the research can be used to develop new electromagnetic methods for the search for hydrocarbon deposits.

Keywords: pulse signal, anisotropic medium, a hydrocarbon reservoir, pulse width

For citation. Yanyshkevich V. F., Ivanova K. I., Ivanov M. M. Simulation of interaction of electromagnetic waves with anisotropic media under hydrocarbon deposits in the mode of video-pulse signals. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 250–256 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-250-256>

Введение. Вопросы поиска, выделения и оконтуривания анизотропных сред плазмopodobного типа представляют интерес во многих областях науки и техники. Одним из приоритетных направлений является георазведка углеводородных залежей (УВЗ). Подобие многих процессов, происходящих над месторождениями нефти и газа, со свойствами анизотропных сред (АС) позволяет использовать теоретические и практические наработки в области исследования плазмы и плазмopodobных сред при разработке современных электромагнитных методов (ЭММ) георазведки углеводородов [1].

Результаты анализа взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ и его экспериментального исследования представлены во многих работах, например [2–5]. Вместе с тем для реализации новых ЭММ представляет теоретический и практический интерес анализ процесса взаимодействия импульсных ЭМВ с АС, образующимися над залежами и скоплениями углеводородов [6–9].

Исследование распространения радиоволн (РВ) над УВЗ проводится в рамках квазигидродинамического приближения, так как учет постоянного магнитного поля, взаимодействия частиц в широких пределах изменения параметров АС делает весьма громоздким последующий анализ взаимодействия со средой на основе кинетического и гидродинамического рассмотрения [5, 10].

Цель работы заключается в обосновании выбора характеристик ЭМВ для разработки методов и аппаратных средств при видеоимпульсном взаимодействии со средой над УВЗ для качественного повышения уровня достоверности поиска и выделения залежей углеводородов.

Объекты и методы исследования. Модель многослойной среды включает слой 2 толщиной h с плоскими границами раздела, имеющий относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_2 , расположенный между полубесконечными средами 1 и 3 с относительными диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_1 = 1$ и ϵ_3 (рис. 1).

Спектр зондирующего видеоимпульса (рис. 2) рассчитывается по формуле

$$S(f) = \frac{\sin(\pi f \tau_{\text{и}})}{\pi f \tau_{\text{и}}}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса, f – частота.

Спектр отраженного видеоимпульса от нижней границы слоя h определяется выражением

$$\dot{S}_{\text{отр}} = (1 - \dot{R}_{1-2})^2 \dot{R}_{2-3} e^{-2\alpha_2 h} \dot{S}(f). \quad (2)$$

Примем амплитуду нормально падающей ЭМВ за условную единицу $\dot{E}_{\text{П}} = 1$. 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 [11]

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

а коэффициент отражения – волновыми сопротивлениями сопряженных сред:

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

где $\dot{Z}_1 = 377$ Ом – волновое сопротивление воздуха (среды 1).

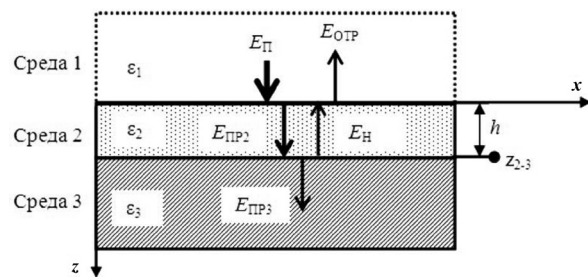


Рис. 1. Отражения электромагнитной волны в фрагменте слоистой среды

Fig. 1. Reflections of an electromagnetic wave in layered media fragment

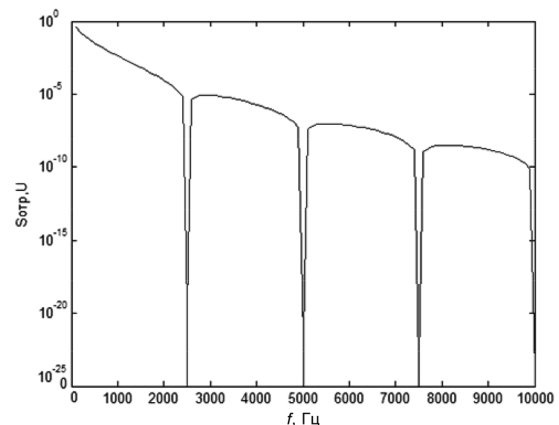


Рис. 2. Спектр зондирующего видеоимпульса

Fig. 2. Spectrum of sounding video impulse

Коэффициент отражения от 3-го слоя равен

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

где \dot{Z}_2 – волновое сопротивление 2-го слоя, \dot{Z}_3 – волновое сопротивление 3-го слоя.

Входной импеданс на верхней границе 2-го слоя представим как

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

где $\dot{\gamma}_2$ – постоянная распространения волны во 2-м слое, характеризующая затухание и коэффициент фазы ЭМВ.

Волновое сопротивление 2-го и 3-го слоев определяются следующим образом:

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

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

где $\dot{\epsilon}_3 = 2,5$ – относительная диэлектрическая проницаемость 3-го слоя (слой нефти), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ом/м.

Относительные магнитные проницаемости (считаем, что среды немагнитные) $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$.

Постоянная распространения волны равна

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

Определим комплексную относительную диэлектрическую проницаемость 2-го слоя:

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

где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость наполнителя 2-го слоя без учета анизотропных свойств, $\sigma_r = 10^{-2}$ См/м – удельная проводимость 2-го слоя, $\omega = 2\pi f$ – частота ЭМВ, ω_{ni} – плазменная частота, V_i – частота столкновения частиц.

Частота столкновения ионов для среды над УВЗ определяется по следующей формуле:

$$V_u = \frac{V_e}{\left(\frac{m_u}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (11)$$

где $V_e = 2\pi \cdot 10^9$ рад/с – частота столкновения электронов, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона, $m_u = 5 \cdot 10^{-4} \cdot m_e$ – масса иона.

Плазменная частота определяется выражением

$$\omega_{ni} = g_i \left(\frac{N_i}{m_i \cdot \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

в котором $i = 1 = e$ – электроны, $i = 2 = u$ – ионы, $g_e = g_u = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – величина зарядов электрона и иона, $N_e = N_u = 10^{16}$ м⁻³ – концентрация частиц.

Фазовая скорость распространения волны равна

$$v = \frac{c}{\operatorname{Re}(\sqrt{\epsilon_2 \mu_2})}, \quad (13)$$

где c – скорость света.

Коэффициент затухания ЭМВ в слое h может быть определен по следующей формуле:

$$\alpha_2 = \operatorname{Im}(\dot{\gamma}_2). \quad (14)$$

Данный коэффициент входит в экспоненту выражения (2) и является сложной функцией характеристик среды над УВЗ, определяемой выражениями (9) и (10).

Результаты и их обсуждение. Проведен анализ зависимостей амплитуды видеоимпульса от частоты f при длительности импульса $\tau_u = 1$ мс для различных глубин h . Рис. 3, $a-c$ представлены в логарифмическом масштабе, так как значение амплитуды отраженного импульса $S_{\text{отр}}$ очень мало. Как видно из рис. 3, при увеличении частоты видеоимпульса уменьшается амплитуда. Формулы (1), (8), (14) показывают, что при возрастании частоты увеличивается коэффициент распространения волны γ_2 , вследствие чего увеличивается коэффициент затухания α , что ведет к уменьшению амплитуды отраженного видеоимпульса.

Также с увеличением глубины амплитуда отраженного видеоимпульса резко уменьшается и шаг уменьшения амплитуды с увеличением частоты становится больше.

При уменьшении длительности видеоимпульса затухание ЭМВ возрастает: приведенные на рис. 4 зависимости амплитуды видеоимпульса от глубины h и частоты f при $f_u = 25 \cdot 10^2$ Гц свидетельствуют об этом.

При разработке аппаратуры для поиска и выделения УВЗ приходится сталкиваться с проблемами обеспечения требуемых затуханий ЭМВ и разрешающей способности по глубине обнаружения. Минимально измеряемая толщина слоя определяется минимально измеряемым ин-

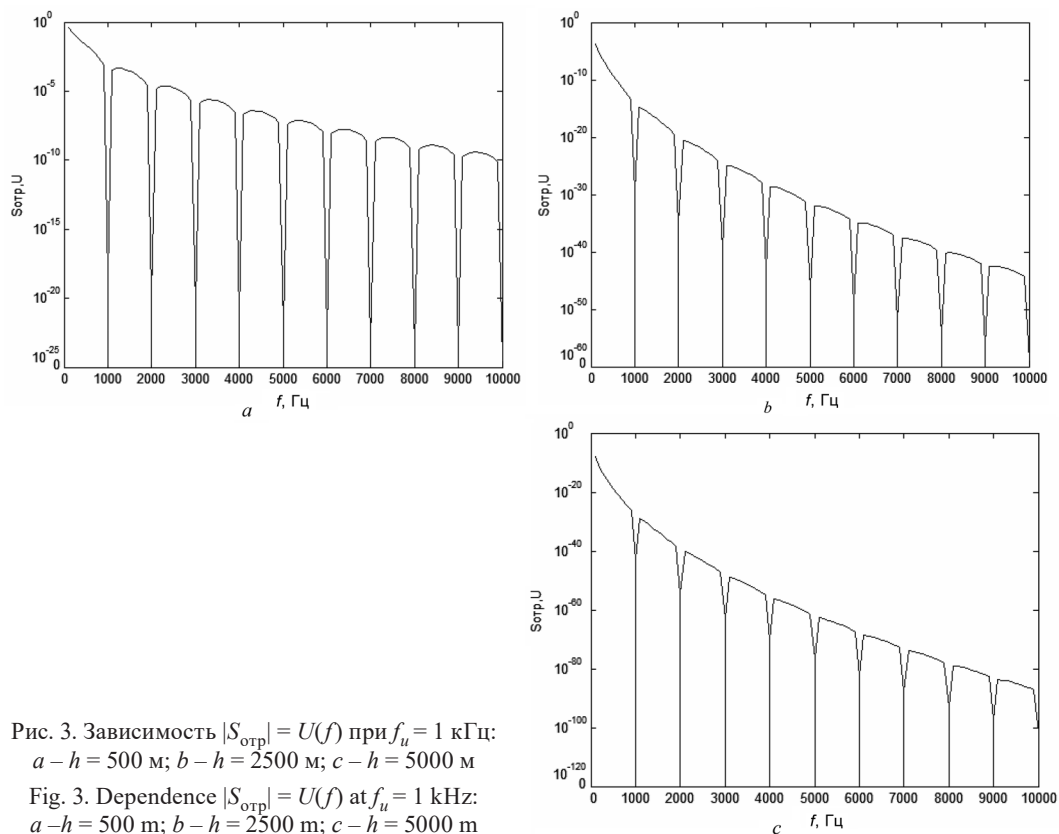


Рис. 3. Зависимость $|S_{\text{отр}}| = U(f)$ при $f_u = 1$ кГц:
 $a - h = 500$ м; $b - h = 2500$ м; $c - h = 5000$ м
 Fig. 3. Dependence $|S_{\text{отр}}| = U(f)$ at $f_u = 1$ kHz:
 $a - h = 500$ m; $b - h = 2500$ m; $c - h = 5000$ m

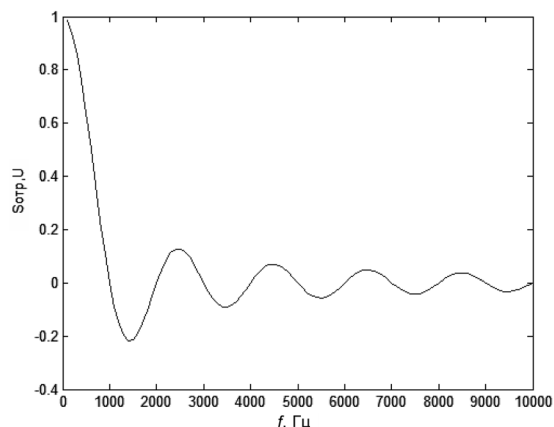


Рис. 4. Зависимость $|S_{отр}| = U(f_u)$: $h = 500$ м, $f_u = 2,5$ кГц

Fig. 4. Dependence $|S_{отр}| = U(f_u)$: $h = 500$ m, $f_u = 2,5$ kHz

тервалом Δt_{min} , который согласно критерию Рэлея формируется длительностью радиоимпульсов на половинном уровне от минимальной амплитуды, то есть $\Delta t_{min} = \tau_{0,5}$ и, следовательно,

$$h_{min} = \frac{v\tau_{0,5}}{2}. \quad (15)$$

Результаты проведенного анализа отражены в таблице.

Таким образом, при затухании ЭМВ 100 дБ параметры второй строки таблицы обеспечивают проникновение сигнала на глубины 396,82 и 5803 м при разрешающей способности 49,9 и 3160 м соответственно. Данные третьей и четвертой строк свидетельствуют о низкой глубине зондирования.

Характеристики ЭМВ для различных участков земной поверхности Characteristics of an electromagnetic wave for different parts of the earth's surface

Исследуемая среда	σ_r , См/м	f , Гц	ϵ_r	h_{min} , м	h , м
Глинистая почва сухая	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^6$	10	49,9	396,82
		$1 \cdot 10^3$		3160	5803
Глинистая почва влажная	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^6$	3	14,27	250,6
Песчаная почва влажная	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^6$	10	26,33	58,07

Заключение. Проведенный анализ показал, что амплитуда видеоимпульса для различных глубин h имеет частотную зависимость. Сравнение режимов видеоимпульсного РРВ выявило различия в исследуемых характеристиках. Полученные зависимости свидетельствуют о следующем: большие глубины залегания УВЗ требуют применения для зондирования видеоимпульсных сигналов большей длительности. Для обнаружения углеводородных залежей на территории Республики Беларусь (глубины залегания 2000–5000 м) можно рекомендовать для повышения информативности ЭММ разведки нефти и газа применение зондирующих сигналов с частотой 100 кГц. Различие участков земной поверхности по диэлектрической проницаемости, удельной проводимости, структуре слоев требует от устройства георазведки запаса по излучаемой мощности в пределах 20–50 % для перекрытия по величине возможного затухания сигналов. Допустимость перестройки устройства георазведки с одного режима на другой (регулировка длительности импульса) при наличии залежи дополняет функциональные возможности для поиска УВЗ. Результаты исследований могут быть применены для разработки радиотехнических систем ближней и дальней радиолокации, для повышения точности и уровня достоверности методов георазведки.

Список использованных источников

1. 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. – Rydzyna, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
2. Гололобов, Д. В. Радиотехнические системы поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме двухчастотного взаимодействия / Д. В. Гололобов, В. Ф. Янушкевич // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 1. – С. 49–54.
3. Гололобов, Д. В. Поверхностный импеданс углеводородной залежи в режиме двухчастотного взаимодействия / Д. В. Гололобов, К. В. Цывис, В. Ф. Янушкевич // Изв. Белорус. инженер. акад. – 2001. – № 1 (11). – С. 101–104.
4. Гололобов, Д. В. Поверхностный импеданс углеводородной залежи в режиме частотно-модулированных сигналов / Д. В. Гололобов, С. В. Калинин, В. Ф. Янушкевич // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 4. – С. 98–101.

5. Москвичев, В. Н. Исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью / В. Н. Москвичев // Радиотехника и электроника: Респ. межведомств. сб. – Минск: Выш. шк., 1989. – Вып. 18. – С. 91–96.
6. 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 parts. – Novopolotsk: PSU, 2016. – Part 3: Technology. – P. 179–183.
7. Взаимодействие электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов / В. Ф. Янушкевич [и др.] // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. Физика. – 2016. – № 12. – С. 45–50.
8. Иванова, К. И. Способ геоэлектроразведки углеводородной залежи с использованием радиоимпульсных сигналов / К. И. Иванова, В. Ф. Янушкевич // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире: материалы XV междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 4 окт. 2016 г.: в 2 т. / Федеральная служба по надзору в сфере связи, информ. технологий и массовых коммуникаций; редкол.: А. В. Воронцов [и др.]. – СПб., 2016. – Т. 1. – С. 107–111.
9. Грибик, Я. Г. Признаки проявления современной аккумуляции углеводородов в условиях Припятского прогиба / Я. Г. Грибик // Потенциал добычи горючих ископаемых в Беларуси и прогноз его реализации в первой половине XXI века: материалы междунар. науч.-практ. конф. (25–27 мая 2011 г.) / [гл. ред. В. Н. Бескопыйный]. – Гомель: Полеспечать, 2012. – С. 275–280.
10. Shkarofsky, I. P. New representations of dielectric tensor elements in magnetized plasma / I. P. Shkarofsky // J. Plasma Phys. – 1986. – Vol. 35, iss. 2. – P. 319–331. <https://doi.org/10.1017/S0022377800011363>
11. Финкельштейн, М. И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М. И. Финкельштейн, В. А. Кутев, В. П. Золоторев. – М.: Недра, 1986. – 182 с.

References

1. Moskvichew V. N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line. *9th Microwave Conference "NICON-91", Rydzyna, May 20–22, 1991*. Rydzyna, 1991, vol. 1, pp. 240–244.
2. Gololobov D. V., Yanushkevich V. F. Radio search and identification systems for hydrocarbon deposits in two-frequency interaction mode. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2002, no. 1, pp. 49–54 (in Russian).
3. Gololobov D. V., Tsyivis K. V., Yanushkevich V. F. Surface impedance of the hydrocarbon deposit interaction in a two-frequency mode. *Izvestiya Belorusskoy inzhenernoy akademii* [Proceedings of the Belarusian Engineering Academy], 2001, no. 1 (11), pp. 101–104 (in Russian).
4. Gololobov D. V., Yanushkevich V. F., Kalintsev S. V. Surface impedance of the medium above the hydrocarbon deposits in frequency mode-modulated signals. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2010, no. 4, pp. 98–101 (in Russian).
5. Moskvichew V. N. Investigation of the interaction of electromagnetic waves with a hydrocarbon deposit. *Radiotekhnika i elektronika. Resp. mezhved. sb.* [Radio Engineering and Electronics: Republican interdepartmental collection]. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1989, iss. 18, pp. 91–96 (in Russian).
6. Adamovskiy E., Yanushkevich V. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits. *8 Junior Researchers Conference European and National Dimension in Research. Part 3. Technology*. Novopolotsk, Polotsk State University, 2016, pp. 179–183.
7. Yanushkevich V. F., Kremeny K. I., Ivanov M. M., Maladzechkina T. V. Interaction of electromagnetic waves with anisotropic environments over hydrocarbon deposits in the mode of radio pulse signals. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Fundamentalnyie nauki. Fizika* [Proceedings of the Polotsk State University. Fundamental Sciences. Physics], 2016, no. 12, pp. 45–50 (in Russian).
8. Ivanova K. I., Yanushkevich V. F. Geoelectrical exploration method of hydrocarbon deposits using radio pulse signals. *Materialy XV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Fundamentalnyie i prikladnyie issledovaniya v sovremennoy mire"*, Sankt-Peterburg, 4 okt. 2016 g. T. 1 [Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference "Fundamental and applied research in the modern world", Saint-Petersburg, 4 October 2016. Vol. 1]. Saint Petersburg, 2016, pp. 107–111 (in Russian).
9. Gribik Ya. G. Signs of manifestation of the modern accumulation of hydrocarbons in the conditions of the Pripyat Trough. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Potentsial dobyichi goryuchih iskopaemykh v Belarusi i prognoz ego realizatsii v pervoy polovine XXI veka"* [Proceedings of the international scientific-practical conference "The potential of mining of fossil fuels in Belarus and the forecast of its implementation in the first half of the 21st century"]. Gomel, Polespechat' Publ., 2012, pp. 275–280 (in Russian).
10. Shkarofsky I. P. New representations of dielectric tensor elements in magnetized plasma. *Journal of Plasma Physics*, 1986, vol. 35, iss. 2, pp. 319–331. <https://doi.org/10.1017/S0022377800011363>
11. Finkelshteyn M. I., Kutev V. A., Zolotarev V. P. *The use of radar subsurface sounding in engineering geology*. Moscow, Nedra Publ., 1986. 182 p. (in Russian).

Информация об авторах

Янушкевич Виктор Францевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: yanushkevich-09@mail.ru

Иванова Карина Игоревна – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры радиоэлектроники, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: kamejiia@mail.ru

Иванов Михаил Михайлович – магистр технических наук, ассистент кафедры радиоэлектроники, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: misha.iwanow@mail.ru

Information about the authors

Viktor F. Yanushkevich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor of the Department of Radio Electronics, Polotsk State University (29, Blohin Str., 211440, Novopolotsk, Vitebsk Region, Republic of Belarus). E-mail: yanushkevich-09@mail.ru

Karina I. Ivanova – Master of Engineering, Senior Lecturer of the Department of Radio Electronics, Polotsk State University (29, Blohin Str., 211440, Novopolotsk, Vitebsk Region, Republic of Belarus). E-mail: kamejiia@mail.ru

Mihail Mihaylovich Ivanov – Master of Engineering, Assistant of the Department of Radio Electronics, Polotsk State University (29, Blohin Str., 211440, Novopolotsk, Vitebsk Region, Republic of Belarus). E-mail: misha.iwanow@mail.ru