

УДК 621.371:550.837.6

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ  
НА ЗАТУХАНИЕ РАДИОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ**

*канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрены вопросы взаимодействия радиоимпульсных сигналов с анизотропными средами над углеводородными залежами. Используется вертикальная поляризация электромагнитных волн. Изучен широкий диапазон используемых частот. Исследовано влияние диэлектрической проницаемости, удельной проводимости среды, частоты столкновения частиц на затухание радиоимпульсных сигналов. Даны рекомендации по использованию оптимальных характеристик зондирующих сигналов. Перестройка устройства дополняет функциональные возможности для поиска углеводородных залежей. На основе приведенных исследований могут быть разработаны методы георазведки углеводородов. Результаты исследований предложено использовать 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). Выбор метода электроразведки определяет методику проведения натуральных испытаний, точность определения границ и уровень идентификации углеводородных залежей (УВЗ). Современные методы электромагнитной разведки требуют надежной, достоверной базы уникальной информации об установленных на данный момент сведениях о свойствах УВЗ. Такие знания служат надежным инструментом при поиске, оконтуривании и идентификации залежей нефти и газа с помощью ЭММ [1–3].

Экспериментальное исследование и результаты анализа взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ представлены во многих работах. В статье [4] заложены классические принципы радиоимпульсного зондирования слоистых сред. В работе [5] были предложены новые решения к ближнепольной СВЧ-диагностике подповерхностных неоднородностей с субволновой разрешающей способностью, основанные на использовании импульсного зондирующего сигнала, в котором глубинную чувствительность определяет временная зависимость рассеянного импульса. Были предложены и апробированы в эксперименте методы томографии и голографии (определения формы) подповерхностных диэлектрических объектов, основанные на двумерном сканировании вдоль поверхности среды той же самой приемно-передающей системой, представляющей собой жестко связанные передатчик и приемник, что и в ранее опубликованных авторами методах многочастотной ближнепольной СВЧ-диагностики [6].

В работе [7] показано, что система уравнений классической электродинамики при анализе распространения плоской гармонической электромагнитной волны в устройствах радиоэлектроники с однородной анизотропной проводящей рабочей средой должна быть «полной», возможность исключения из рассмотрения дивергентных уравнений является частным случаем и в каждой конкретной ситуации должна быть обоснована. Особенности расчета элементов тензора для частного случая – использования силицена – показывает, что для каждого конкретного применения вида анизотропной среды возможны свои оригинальные решения [8].

Способ поиска УВЗ [9] позволяет обнаруживать месторождения нефти и газа по измерениям величины напряженности электрического поля отраженных радиоимпульсных сигналов на глубинах до 200 м. Исследование процессов распространения ЭМВ вблизи точки перехода диэлектрической проницаемости через нуль связано с аномальным поведением напряженности электрического поля, различными резонансными эффектами и может быть применено для поиска и идентификации углеводородных залежей [10].

Работы [11–15] позволяют расширить возможности электромагнитных методов георазведки. В статье [16] приведены исследования по влиянию искусственного подмагничивания на обнаружение УВЗ. В каждом реальном случае применения ЭММ нужно учитывать помеховую обстановку в районе проведения испытаний [17].

Целью настоящей работы является определение затухания радиоимпульсных сигналов в зависимости от характеристик анизотропной среды над углеводородами.

**Объекты и методы исследования.** Рассмотрим процесс взаимодействия ЭМВ с углеводородными залежами в режиме импульсного сигнала следующего вида:

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

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

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

$\omega_0$  – несущая частота радиоимпульса;

$\tau_u$  – длительность радиоимпульса.

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. Такая электромагнитная волна возбуждается с помощью переносного передатчика, перемещаемого вдоль исследуемого профиля.

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости для такого режима взаимодействия имеют следующий вид [11]:

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

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

$T$ ,  $F_1$  – период, частота импульса;

$n$  – номер гармоники;

$\Omega_1$  – круговая частота импульса,  $\Omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot F_1$ ;

$\epsilon_r$ ,  $\delta_r$  – диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость среды;

$\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;

$w_{ni}$  – плазменная частота;

$v_i$  – частота столкновения частиц;

$$\omega_{\Gamma i} - \text{гиротропная частота, } \omega_{\Gamma i} = \frac{q_e \mu_0 H_0}{m};$$

$q_e, m$  – заряд электрона, масса электрона;

$H_0$  – напряженность магнитного поля Земли,

$\mu_0$  – магнитная постоянная;

$i = 1$  для электронов,  $i = 2$  для ионов.

Постоянная распространения волны

$$\dot{\gamma}_2 = j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_2}. \quad (3)$$

Коэффициент затухания

$$\alpha_2 = \text{Im}(\dot{\gamma}_2). \quad (4)$$

**Результаты и их обсуждение.** Был проведен анализ затухания по формуле (4) для импульсного взаимодействия ЭМВ со средой, находящейся над углеводородной залежью. На рисунке 1 представлены результаты расчетов в зависимости от диэлектрической проницаемости наполнителя и частоты сигнала. Для исследования были выбраны параметры:  $n = 5$ ,  $\sigma_r = 0,5$  См/м,  $N_i = 10^{15} \text{ м}^{-3}$ . Как показал анализ результатов, с ростом частоты затухание возрастает. На более высоких частотах рост диэлектрической проницаемости среды также ведет к увеличению затухания ЭМВ.

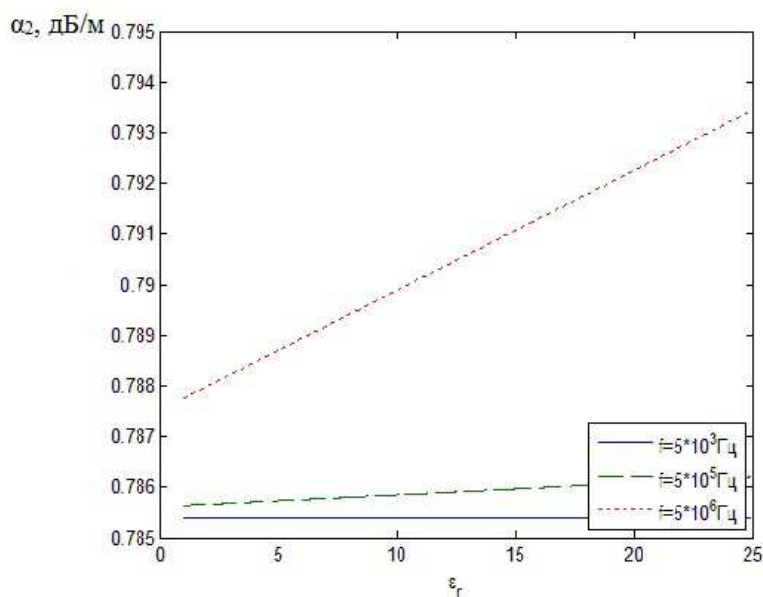


Рисунок 1. – Зависимости  $\alpha_2 = f(\epsilon_r)$

Электромагнитная волна возбуждается с помощью переносного передатчика, перемещаемого вдоль исследуемого профиля.

На рисунке 2 представлены результаты расчетов в зависимости от количества гармоник и частоты сигнала. Для исследования были выбраны следующие параметры:  $\epsilon_r = 15$ ,  $\sigma_r = 0,5$  См/м,  $N_i = 10^{15} \text{ м}^{-3}$ . Как видно из рисунка 2, с ростом частоты затухание возрастает, особенно при больших значениях номеров гармоник. Это объясняется увеличением ширины спектра. Следовательно, на более высоких частотах затухание ЭМВ существенно увеличивается. Так, на частоте  $5 \cdot 10^6$  Гц наблюдается рост затухания практически в 2 раза.

Зависимости от удельной проводимости среды и частоты сигнала показаны на рисунке 3. Для исследования были выбраны следующие параметры:  $\epsilon_r = 15$ ,  $n = 5$ ,  $N_i = 10^{15} \text{ м}^{-3}$ . Построенные графики на рисунке 3 демонстрируют, как с ростом частоты затухание возрастает. При значениях удельной про-

проводимости  $\sigma_r = (0-0,2)$  См/м затухание ЭМВ наибольшее; при дальнейшем росте этой величины затухание уменьшается и стабилизируется.

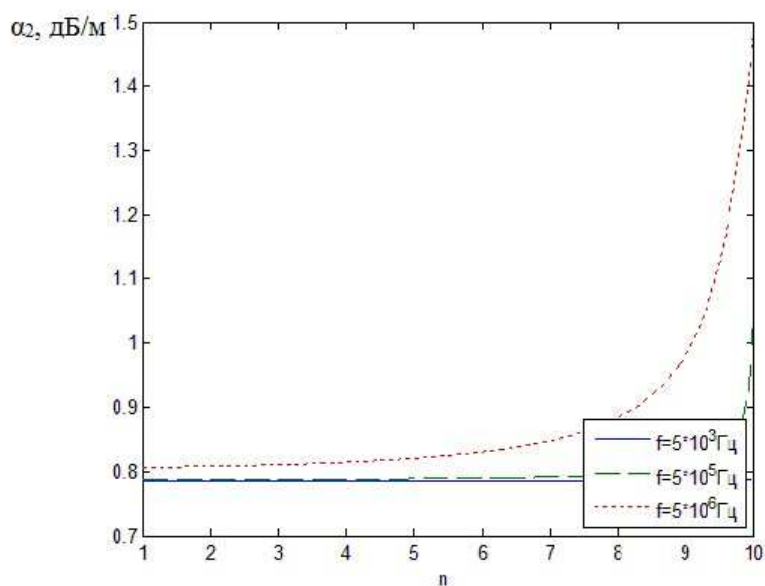


Рисунок 2. – Зависимости  $\alpha_2 = f(n)$

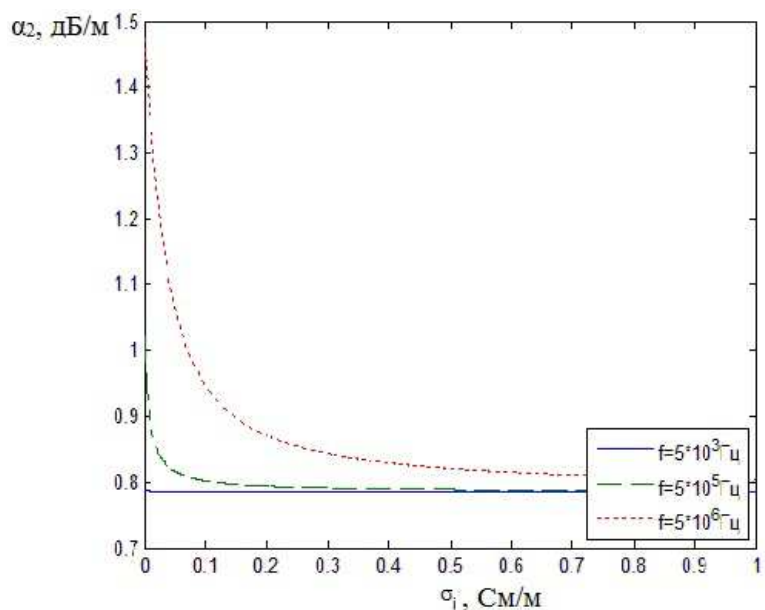


Рисунок 3. – Зависимости  $\alpha_2 = f(\sigma_i)$

На рисунке 4 представлены результаты расчетов в зависимости от частоты сигнала и частоты столкновения частиц. Для исследования были выбраны следующие параметры:  $\epsilon_r = 5$ ,  $\delta_r = 0,5$  См/м,  $N_i = 10^{15}$  м<sup>-3</sup>. Проанализировав результаты, показанные на рисунке 4, было выявлено, что с ростом частоты затухание возрастает, особенно при больших значениях частоты столкновения. Это объясняется увеличением сопротивления среды прохождению радиоимпульсных сигналов в изучаемых слоях.

Количественные проявления этих эффектов определяются физико-геологическими свойствами пород-коллекторов: гранулометрическим и минералогическим составом пород, структурно-текстурными особенностями скелета, характером пористости и проницаемости, видом цементирующего вещества и механическими свойствами скелета, количеством пластовой воды в порах и ее минерализацией и т.д.

Влажность исследуемых слоев определяет характер проводимости среды, что особенно различается в частотной области применяемых ЭМВ.

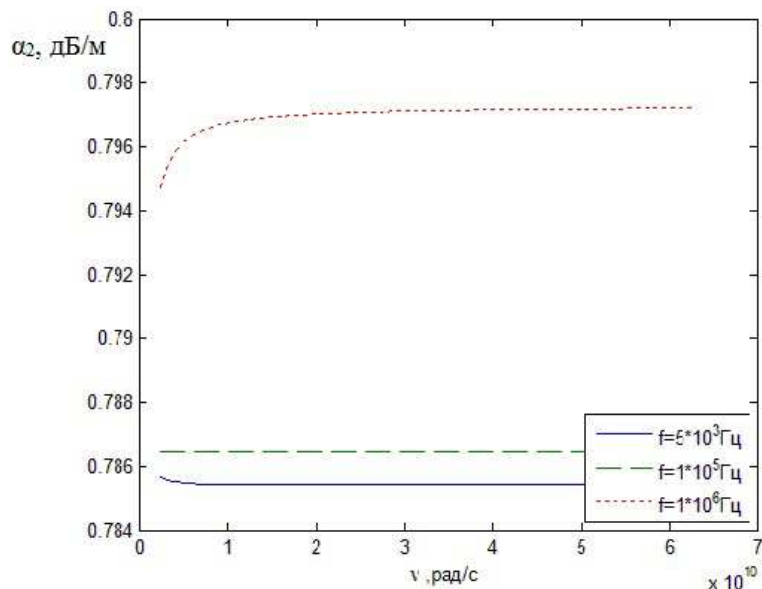


Рисунок 4. – Зависимости  $\alpha_2 = f(\nu)$

На рисунке 5 представлены результаты расчетов в зависимости от диэлектрической проницаемости наполнителя и номера гармоник. Для исследования были выбраны следующие параметры:  $f = 5 \cdot 10^3$  Гц,  $\sigma_r = 0,5$  См/м,  $N_i = 10^{15} \text{ м}^{-3}$ . Анализ графиков на рисунке 5, показал, что с ростом частоты затухание возрастает.

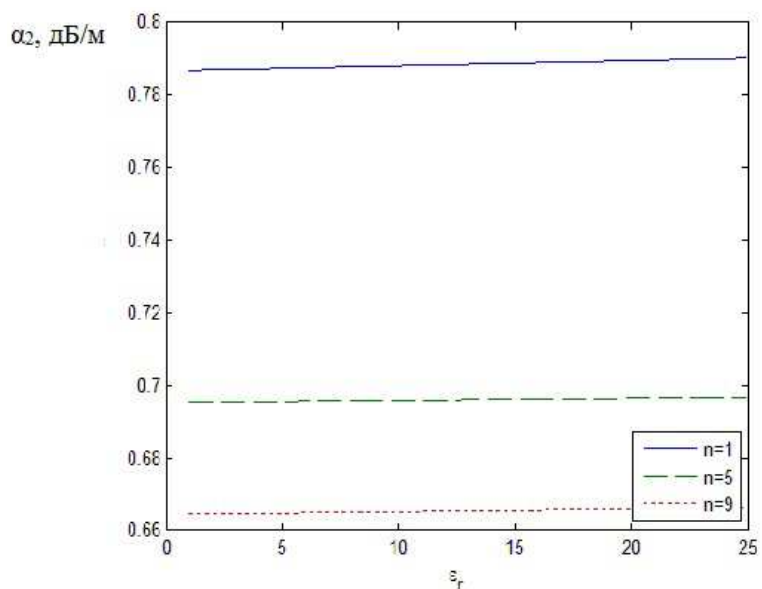
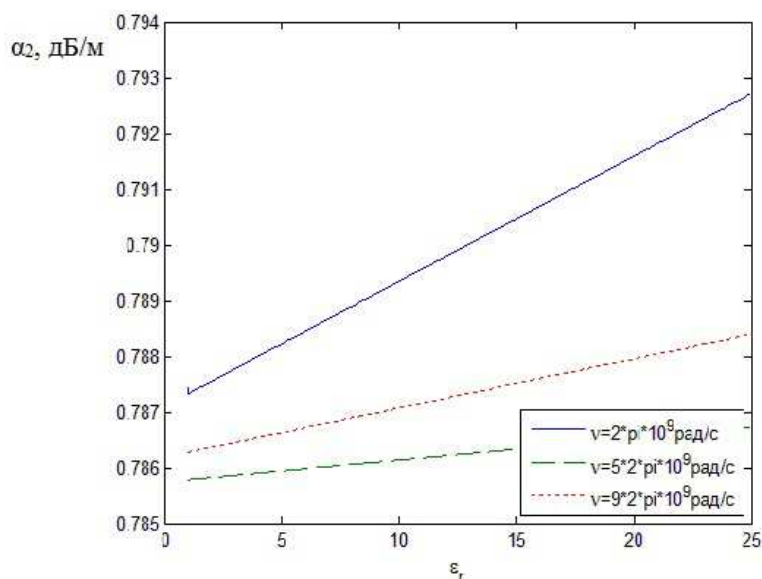


Рисунок 5. – Зависимости  $\alpha_2 = f(\epsilon_r)$

На рисунке 6 представлены результаты расчетов в зависимости от диэлектрической проницаемости и частоты столкновения частиц. Для исследования были выбраны следующие параметры:  $n = 5$ ,  $\sigma_r = 0,5$  См/м,  $N_i = 10^{15} \text{ м}^{-3}$ . Как показал анализ результатов, что с ростом диэлектрической проницаемости затухание возрастает, особенно при больших значениях частоты столкновения.

Рисунок 6. – Зависимости  $\alpha_2 = f(\epsilon_r)$ 

**Заключение.** Проведен анализ взаимодействия анизотропного слоя плазмopodobного типа с ЭМВ в режиме радиоимпульсных сигналов. Результаты исследования могут быть применены в поисковой геофизике. При этом следует отметить:

- затухание радиоимпульсных сигналов в среде над углеводородной залежью определено в широком диапазоне частот зондируемых сигналов, диэлектрических проницаемостей и удельных проводимостей сред;
- на более высоких частотах рост диэлектрической проницаемости среды ведет к увеличению затухания электромагнитных волн;
- с ростом частоты затухание возрастает, особенно при больших значениях номеров гармоник. Это объясняется увеличением ширины спектра.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Радиотехнические системы поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме двухчастотного взаимодействия / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Вестці НАН Беларусі. Сер. фіз. тэхн. – 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 среды над углеводородными залежами в режиме частотно-модулированных сигналов / Д.В. Гололобов, С.В. Калинин, В.Ф. Янушкевич // Вестці НАН Беларусі. Сер. фіз. тэхн. – 2010. – № 4. – С. 98–101.
4. Финкельштейн, М.И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М.И. Финкельштейн, В.А. Кутев, В.П. Золоторев. – М.: Недра, 1986. – 182 с.
5. Гайкович, К.П. Ближнепольная импульсная СВЧ-диагностика подповерхностных диэлектрических неоднородностей [Электронный ресурс] / К.П. Гайкович, Е.С. Максимович // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 2. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb16/4/text.pdf>. – Дата доступа: 22.08.2017.
6. Gaikovich, K.P. Inverse problem of near-field scattering in multilayer media / K.P. Gaikovich, P.K. Gaikovich // Inverse Problems. – 2010. – Vol. 26, № 12. – P. 125013.
7. Макаров, А.М. Об особенностях волновых процессов в устройствах радиоэлектроники с анизотропной рабочей средой / А.М. Макаров, Л.А. Лунёва, К.А. Макаров // Наука и образование. – 2016. – № 11. – С. 88–98.
8. Александров, Ю.М. Расчет элементов тензора комплексной диэлектрической проницаемости для анизотропных материалов / Ю.М. Александров, В.В. Яцышен // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 23–27.

9. 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.-техн. конф.*, СПб., 4 окт. 2016 г. / Информационный издательский учебно-научный центр «Стратегия будущего». – СПб., 2016. – Т. 1. – С. 107–111.
10. Васильев И. С., Козлов И. П. Распространение электромагнитной волны в плоскостойком диэлектрике вблизи нуля диэлектрической проницаемости [Электронный ресурс] / И.С. Васильев, И.П. Козлов // *Труды МАИ*. – 2010. – Вып. 41. – С. 1–6.
11. Взаимодействие радиоимпульса с анизотропной средой / Д.Л. Василенко [и др.] // *Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : сб. материалов IV Междунар. науч.-техн. конф.*, Новополюцк, 25–26 мая 2006 г. / *Полоцкий государственный университет*. – Новополюцк, 2006. – Т. 2. – С. 77–80.
12. Янушкевич, В.Ф. Моделирование двухчастотного зондирования углеводородных залежей / В.Ф. Янушкевич // *Современные проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : сб. материалов междунар. науч.-техн. семинара*, Новополюцк, 29–31 мая 2000 г. / *Полоцкий государственный университет*. – Новополюцк, 2000. – С. 205–208.
13. Цывис, Н. В. Ресурсосберегающие методы поиска залежей нефти и газа / Н. В. Цывис, В. Ф. Янушкевич // *Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической промышленности и производстве строительных материалов : материалы докл. междунар. науч.-техн. конф.*, Минск, 9–10 нояб. 2000 г. / *БГТУ*. – Минск, 2000. – С. 408 – 411.
14. Иванов, Д. Ю. Современные экологические технологии георазведки углеводородных залежей / Д. Ю. Иванов, Н. В. Цывис, В. Ф. Янушкевич // *Процессы и оборудование экологических производств : V традиц. науч.-техн. конф. стран СНГ*, Волгоград, 27–29 нояб. 2000 / *ВолгГТУ*. – Волгоград, 2000. – С. 10.
15. Цывис, Н. В. Радиотехнические системы обнаружения углеводородных залежей на основе двухчастотного взаимодействия / Н. В. Цывис, В. Ф. Янушкевич, Д. Ю. Иванов // *Состояние и проблемы измерений : 7-ая Всерос. науч.-техн. конф.*, М., 28–30 нояб. 2000 г. / *МГТУ им. Н.Э. Баумана*. – М., 2000. – С. 96–97.
16. Влияние наклона поля подмагничивания на электродинамические параметры среды над углеводородами / А. А. Кураев [и др.] // *Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : сб. материалов II междунар. науч.-техн. конф.*, Новополюцк, 15–17 мая 2002 г. / *Полоцкий государственный университет*. – Новополюцк, 2002. – Т. 1. – С. 263–267.
17. Янушкевич, В. Ф. Экранирование радиоэлектронных устройств и систем. Новые принципы проектирования антенн : учеб. пособие для аспирантов / В. Ф. Янушкевич, М. Е. Капралов, К. И. Кременя. – Вильнюс : Циклонас, 2016. – 156 с.

Поступила 31.08.2017

## INFLUENCE OF THE ANISOTROPIC ENVIRONMENT PARAMETERS ON HYDROCARBONS ON THE DAMPING OF RADIO-PULSE SIGNALS

V. YANUSHKEVICH

*The article deals with the interaction of radio impulse signals with anisotropic media over hydrocarbon deposits. Vertical polarization of electromagnetic waves is used. A wide range of frequencies is considered. The effect of the dielectric constant, the specific conductivity of the medium, the particle collision frequency on the attenuation of radio impulse signals was studied. Recommendations are given on the use of optimal characteristics of sounding signals. The possibility of rebuilding the device complements the functionality for searching hydrocarbon deposits. Based on the above studies, methods of geological prospecting of hydrocarbons can be developed. The results of the research can be used in search geophysics.*

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