

УДК 621.371:550.837.6

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАДИОКОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОИСКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ ПРИРОДНЫХ СРЕД

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

Рассмотрены вопросы комплексного использования электромагнитных методов поиска электрически неоднородных природных сред. В качестве примера такой среды выбрана анизотропная среда над углеводородной залежью. Проведен анализ двухчастотного взаимодействия электромагнитных волн со средой над углеводородными залежами. Получение информации об объектах не по одному или двум информативным каналам, а по большему их числу позволяет с достаточно высоким уровнем достоверности выделять их границы на фоне подстилающей среды. Даны рекомендации по использованию оптимальных характеристик зондирующих сигналов. Проанализированы способы модификации устройства, позволяющие дополнить функциональные возможности для поиска углеводородных залежей.

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

Введение. Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач заключается в модернизации существующих электромагнитных методов (ЭММ) георазведки и разработке новых методов поиска, идентификации электрически неоднородных сред. Одной из разновидностей таких сред являются месторождения нефти и газа (углеводородов), являющиеся стратегическим видом полезных ископаемых и определяющие 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, экспериментальное исследование и интерпретация полученных исследований представлены во многих работах, например [2–5]. Вместе с тем для реализации новых ЭММ представляет интерес анализ процесса комплексного использования существующих методов взаимодействия ЭМВ с анизотропными средами (АС), образующимися над залежами и скоплениями углеводородов [7–11].

Использование зондирующих сигналов с вариацией частот позволяет проводить точные оценки характеристик электрически неоднородных природных сред [5].

Объекты и методы исследования. Представим реальную залежь углеводородов (рисунок 1) в виде слоя, погруженного в среду с потерями, как проекцию контура залежи на «дневную поверхность» [12]. Залежь находится в природной ловушке, включающей любое естественное или искусственное скопление нефти и/или газа.

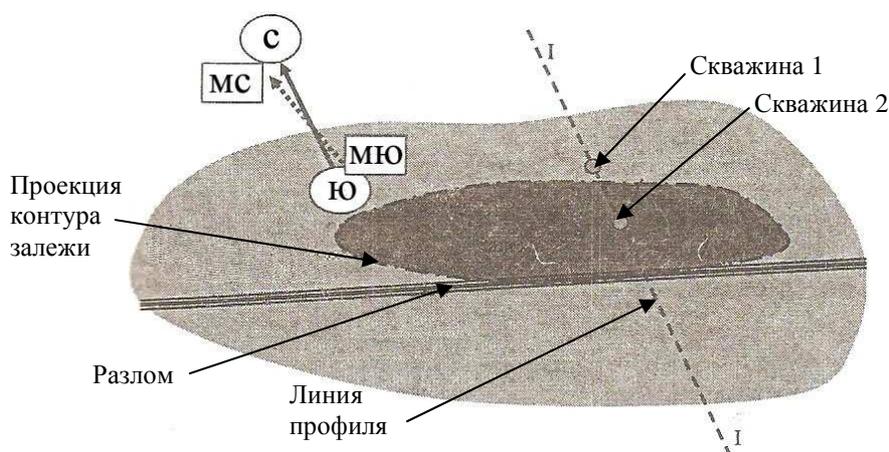


Рисунок 1. – Фрагменты участка земной поверхности с углеводородной залежью

На рисунке 1 показаны две скважины, одна из которых находится над залежью, линия профиля, проходящая через скважины и разлом, граничащий с УВЗ. На схеме показаны направления полюсов Земли юг – север («ю», «с» соответственно) и южного и северного магнитных полюсов («мю», «мс» соответственно).

Различные методы и способы электроразведки обладают своими преимуществами и недостатками, которые порой могут быть применены в ограниченных объемах или условиях ввиду разнообразия сред, расположенных над залежами, отличия глубин залегания, разнообразия в помеховой и растительной обстановках в местах исследований, степени насыщенности месторождений, формы ловушек и т. д. [9–12].

В связи с этим весьма уместен термин «радиопортрет УВЗ» [1], под которым понимается отображение совокупности признаков, связанных со статическим и/или динамическим изменением характеристик электромагнитного поля, присущих данной геологической неоднородности и ее электродинамическим параметрам. В настоящее время предпочтение отдается методам комплексирования для поиска и идентификации УВЗ [1].

Анализ возможностей объединения методов электроразведки позволяет оптимизировать построение РТС для повышения уровня точности и достоверности поиска и идентификации УВЗ.

Основой методов комплексирования служат следующие факторы:

1. Оптимальный выбор зондирующих сигналов:

$$S_1, S_2, \dots, S_m = f(t_3, \lambda_n, \vec{p}), \quad (1)$$

где t_3 – время;

λ_n – пространственная структура;

\vec{p} – поляризационная структура.

Для электроразведки следует принять ЭМВ, на которых эффект взаимодействия с залежами нефти и газа будет выражен наиболее сильно. К таким зондирующим сигналам относятся следующие составляющие частотного спектра:

- (100 – 200) Гц – ионно-циклотронный резонанс;
- (10²–10⁴) Гц – электронно-циклотронный резонанс;
- (10⁶–10⁷) Гц – ионно-плазменный резонанс;
- (1·10⁹–2·10⁹) Гц – электронно-плазменный резонанс.

2. Применение методов электроразведки, которые позволяют наиболее контрастно выделять собственные электродинамические параметры среды над залежами нефти и газа:

$$\xi_v = f(\epsilon, \mu, \sigma) \rightarrow \epsilon, \sigma = f(N_e, N_n, v_i), \quad \mu = f(\vec{I}), \quad (2)$$

где ξ_v – обобщенный параметр среды;

ϵ, μ – относительная диэлектрическая, относительная магнитная проницаемости сред соответственно;

σ – удельная электропроводимость;

N_e, N_n, v_i – концентрации электронов, ионов, частоты столкновения частиц;

(\vec{I}) – намагниченность среды.

3. Получение нужной информации об исследуемом объекте с учетом влияния действующих радиостанций и источников помех [13]:

$$Z(t, \lambda, \vec{p}) = X_\alpha(t, \lambda_n^x, \vec{p}_n^x) + Y_\beta(\lambda_n^y < t >, \vec{p}_n^y), \quad (3)$$

где $X_\alpha(t, \lambda_n^x, \vec{p}_n^x)$ – совокупность α полезных станций;

$Y_\beta(\lambda_n^y < t >, \vec{p}_n^y)$ – совокупность β источников помех.

4. Анализ сложной электромагнитной картины при проведении измерений с учетом условий РРВ и модуляционных эффектов смеси электромагнитных сигналов.

$$F(S, Z) = M_1 \cdot S_m [\lambda_n \cdot (G, R), \vec{p}(G, R)] + M_2 \cdot X_\alpha \left[\lambda_n^x(G, R), \vec{p}_n^x(G, R) \right] + Y_\beta \left[\lambda_n^y(G, R, t), \vec{p}_n^y(G, R, t) \right], \quad (4)$$

где R – обобщенный параметр, учитывающий условие РРВ;

M_1, M_2 – коэффициенты, характеризующие мультипликативные помехи.

Таким образом, радиокомплексирование позволяет получать информацию об объектах не по одному или двум информационным каналам, а по большему их числу, что позволяет с достаточно высоким уровнем достоверности выделять его границы на фоне подстилающей среды.

Следует отметить высокую эффективность использования радиоволновых регистрирующих комплексов МРК1, МРК2, МРК1У, РВРК-3, разработанных компанией по поиску и оконтуриванию залежей углеводородов «ПетроСервис» [14].

Исходя из этого рассмотрим процесс взаимодействия ЭМВ с УВЗ в режиме бигармонического сигнала вида

$$\bar{e}(t) = \bar{e}_1(t) + \bar{e}_2(t) = E_1 \cos \omega_1 t + E_2 \cos \omega_2 t, \quad (5)$$

где E_1, E_2 – амплитуды первой и второй ЭМВ;

ω_1, ω_2 – частоты первой и второй ЭМВ.

Введем коэффициенты отношения амплитуд двух волн и их частот:

$$\begin{cases} k_E = \frac{E_2}{E_1}, \\ k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2} \end{cases} \quad (6)$$

и рассмотрим взаимодействие сложного сигнала (5) с различными соотношениями параметров формируемых ЭМВ с анизотропным образованием.

Координатное разложение напряженности электрического поля с учетом (6) позволяет записать компоненты тензора диэлектрической проницаемости для двухчастичного потока в виде системы уравнений (7):

$$\begin{cases} \hat{\epsilon}_1 = \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} - \right. \\ \left. - j \left[\frac{-\epsilon_r k_E (1 - k_\omega) \sin \alpha t}{1 + k_E \cos \alpha t} + \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Gamma i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{\tilde{\omega}_1^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} \right] \right\}, \\ \hat{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} - \frac{2j\tilde{\omega}_1 v_i \omega_{\Gamma i}^2 \omega_{\Gamma i}}{[(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2] \omega_2} \right\}, \\ \hat{\epsilon}_3 = \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_1^2} - j \left[\frac{-\epsilon_r k_E (1 - k_\omega) \sin \alpha t}{1 + k_E \cos \alpha t} + \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Gamma i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_1^2 + v_i^2} \right] \right\}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\hat{\epsilon}_1, \hat{\epsilon}_2, \hat{\epsilon}_3$ – компоненты тензора;

$\tilde{\omega}_1$ – частотная составляющая, $\tilde{\omega}_1 = \omega_2 [k_\omega + k_E^2 + k_E (1 - k_\omega) \cos \alpha t]$;

α – разность частот двух ЭМВ, $\alpha = \omega_2 - \omega_1 = \omega_2 (1 - k_\omega)$;

ϵ_r – диэлектрическая проницаемость среды;

σ_r – удельная проводимость среды;

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;

$\omega_{\Gamma i}$ – плазменная частота;

v_i – частота столкновения частиц;

$\omega_{\Gamma i}$ – гиротропная частота, вычисляемая по формуле

$$\omega_{\Gamma i} = \frac{q_e \mu_0 H_0}{m},$$

q_e – заряд электрона;

μ_0 – магнитная постоянная;
 H_0 – напряженность магнитного поля Земли;
 m – масса электрона.

Система уравнений (7) содержит информацию об отклике исследуемой среды на воздействие двухчастотного сигнала (5).

Результаты и их обсуждение. Был проведен анализ двухчастотного взаимодействия для правой поляризации ЭМВ со средой над УВЗ по методу радиокомплексирования с целью получения информации об объектах по двум информационным каналам на основе определения приращения диэлектрической проницаемости

$$\Delta\epsilon_R = \text{Re}\epsilon_{R_1} - \text{Re}\epsilon_{R_2},$$

где $\text{Re}\epsilon_{R_1}$ – вещественная часть диэлектрической проницаемости среды над УВЗ при $k_E = 10^{-1}$;

$\text{Re}\epsilon_{R_2}$ – вещественная часть диэлектрической проницаемости среды над УВЗ при заданных k_E (рисунки 2, 3).

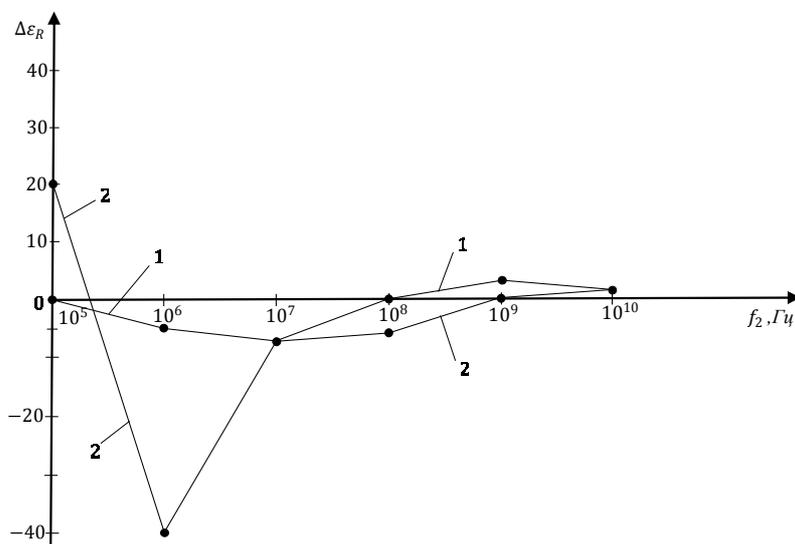


Рисунок 2. – Частотные зависимости диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для правой поляризации ЭМВ: 1 – для $k_E = 10^{-3}$; 2 – для $k_E = 10^{-6}$

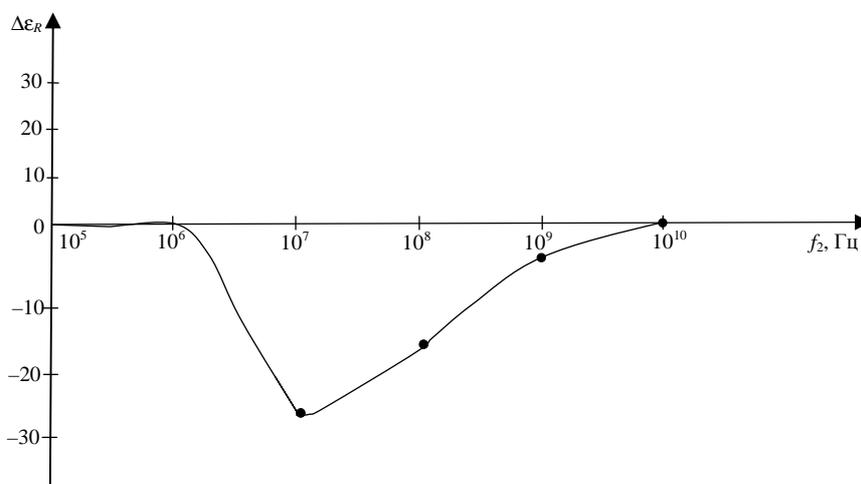


Рисунок 3. – Частотные зависимости диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для правой поляризации ЭМВ для $k_E = 10$

Также был проведен анализ приращения диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для левой поляризации ЭМВ:

$$\Delta\epsilon_i = \text{Re}\epsilon_{i_1} - \text{Re}\epsilon_{i_2},$$

где $\text{Re}\epsilon_{i_1}$ – вещественная часть диэлектрической проницаемости среды над УВЗ при $k_E = 10^{-1}$;

$\text{Re}\epsilon_{i_2}$ – вещественная часть диэлектрической проницаемости среды над УВЗ при заданных k_E (рисунки 4 и 5).

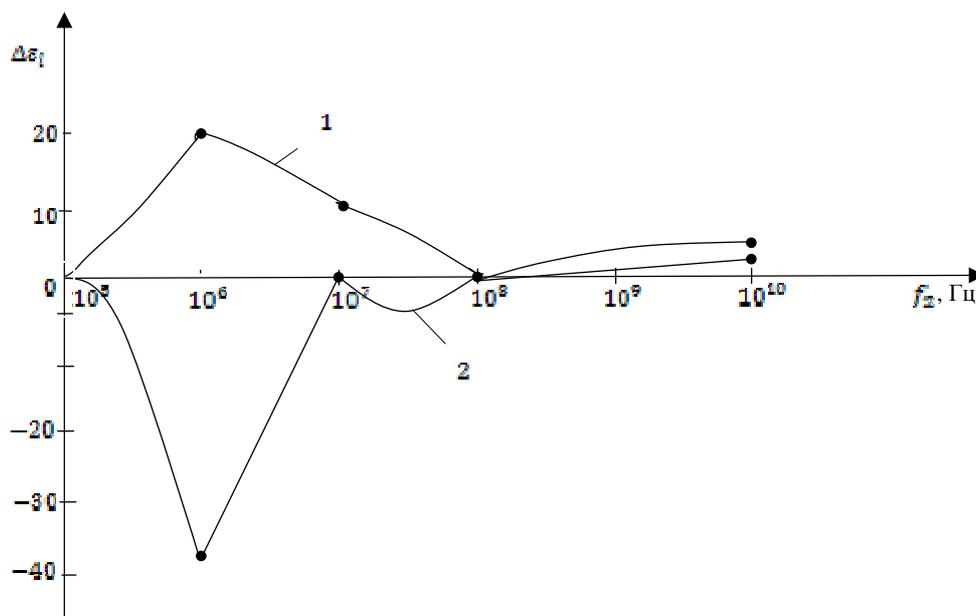


Рисунок 4. – Частотные зависимости диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для правой поляризации ЭМВ: 1 – для $k_E = 10^{-1}$; 2 – для $k_E = 10^{-2}$

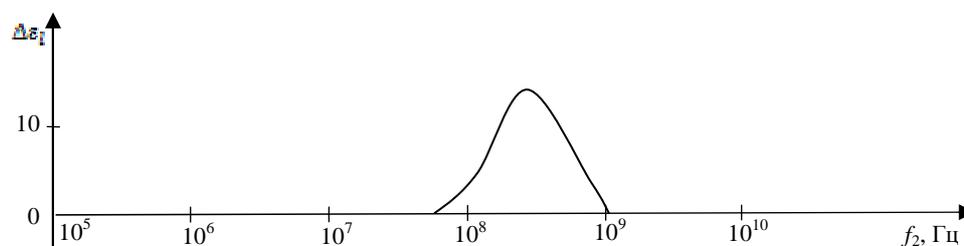
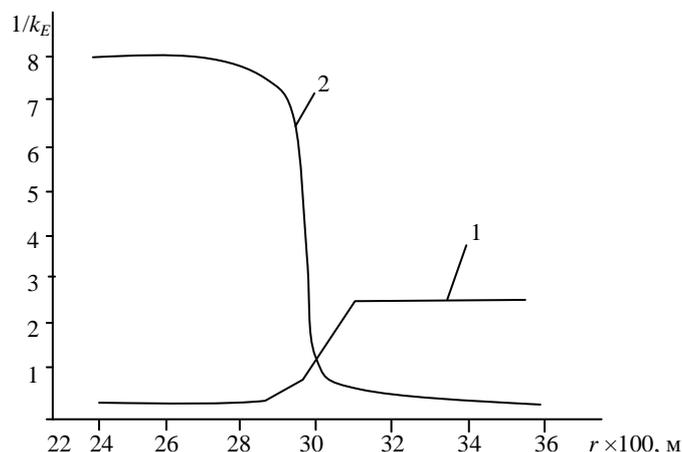


Рисунок 5. – Частотные зависимости диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для правой поляризации ЭМВ для $k_E = 10$

Проведенный анализ показал, что диэлектрическая проницаемость среды над УВЗ имеет частотную зависимость, которую можно использовать для поиска электрически неоднородных сред. Возможно применение двух режимов взаимодействия на основе двухчастотного зондирования. Применение режима мощного низкочастотного сигнала представляет большие возможности для методов радиокомплексирования, поскольку вариация диэлектрической проницаемости осуществляется в более широком диапазоне (см. рисунок 2) по сравнению с режимом мощного высокочастотного сигнала (см. рисунок 3). Для $k_E = 10^{-2}$ приращение диэлектрической проницаемости при использовании волн с правой поляризацией отрицательно, за исключением участка частот выше 10^8 Гц, где происходят небольшие положительные изменения указанной выше величины. Для $k_E = 10^{-6}$ наблюдаются положительные участки изменения диэлектрической проницаемости ($1 \cdot 10^5 - 1,3 \cdot 10^5$ Гц и $1 \cdot 10^8 - 1,3 \cdot 10^{10}$ Гц). На частоте второй ЭМВ f_2 , равной $1 \cdot 10^6$ Гц, существует ярко выраженный минимум приращения диэлектрической проницаемости. В режи-

ме мощного высокочастотного сигнала наблюдаются нулевые и отрицательные изменения диэлектрической проницаемости. Для $k_E = 10^{-1}$, а также с большими значениями отношения амплитуд сигналов при применении волн левой поляризации характерны положительные приращения диэлектрической проницаемости. Использование режимов зондирования с меньшими отношениями амплитуд ведет к отрицательным приращениям диэлектрической проницаемости среды.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на частотах $f_1 = 2$ МГц и $f_2 = 16$ МГц, представлены на рисунке 6.



1 – при размещении излучателей на анизотропном включении;
2 – при размещении излучателя вне контура анизотропии

Рисунок 6. – Экспериментальные характеристики двухчастотного взаимодействия ЭМВ с УВЗ

На границе залежи (пикет 27) происходит уменьшение отношения амплитуд сигналов при размещении излучателя вне контура анизотропии и небольшой рост этого соотношения при размещении излучателей на анизотропном включении.

Заключение. Проведен анализ двухчастотного взаимодействия электромагнитных волн со средой над углеводородными залежами. Получение информации об объектах не по одному или двум информационным каналам, а по большему их числу позволяет с достаточно высоким уровнем достоверности выделять их границы на фоне подстилающей среды. Перенастройка устройства георазведки с одного режима на другой 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.

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. – 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. – 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 // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз. тэхн. 2010. – № 4. – С. 98–101.
4. Москвичев, В.Н. Исследование взаимодействий электромагнитных волн с углеводородной залежью / В.Н. Москвичев // Радиотехника и электроника. – 1988. – Вып. 18. – С. 91–96.
5. Финкельштейн, М.И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М.И. Финкельштейн, В.А. Кутев, В.П. Золоторев. – М.: Недра, 1986. – 182 с.
6. Гололобов, Д.В. Радиолокационный портрет углеводородной залежи / Д.В. Гололобов // Электромагнитные исследования с контролируемыми источниками: тез. докл. Междунар. геодез. конф., СПб., 27–31 мая 1996 г. / ВИГР. – Рудгеофизика: А.А. Петров [и др.]. – СПб., 1996. – С. 42–43.

7. Гололобов, Д.В. Влияние параметров амплитудно-модулированного воздействия на фазовые составляющие поверхностного импеданса анизотропной среды плазмopodobного типа / Д.В. Гололобов, О.В. Орлова, В.Ф. Янушкевич // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2010. – № 9. – С. 98–101.
8. Степуленок, С.В. Взаимодействие амплитудно-частотно-моделированных сигналов со средой над углеводородными залежами / С.В. Степуленок, В.Ф. Янушкевич // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2009. – № 9. – С. 103–108.
9. Гололобов, Д.В. Фазовые методы идентификации углеводородных залежей / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич, А.О. Рак // Инженерный вестн. – 2005. – № 1(20). – С.16–18.
10. Янушкевич, В.Ф. Зондирование анизотропных сред двухчастотными и модулированными сигналами / В.Ф. Янушкевич // Полоцкий гос. ун-т. – Минск. – 8 с. – Деп. в ГУ «БелИСА» 12.06.97 г. - № Д 199713 // Рефератив. сб. непубликуемых работ. – 1997. – Вып. 5. – С. 11.
11. Гололобов, Д.В. Электродинамические параметры подводных источников в поле поверхностной электромагнитной волны / Д.В. Гололобов, В.Н. Москвичев, Г.П. Турук, В.Ф. Янушкевич // Тез. докл. 35 Всероссийской межвузовской НТК. – Владивосток, 1992. – Т. 1, ч. 1. – С. 59–62.
12. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск, Бестпринт, 2009. – С. 185.
13. 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.
14. Поиск и разведка углеводородов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// www. companypetroservice.com](http://www.companypetroservice.com) // . – Дата доступа: 10.01.2017.

Поступила 15.02.2017

APPLICATION OF SEARCH FOR RADIOKOMPLEKSIROVANIYA ELECTRICAL INHOMOGENEITIES OF THE NATURAL ENVIRONMENT

V. YANUSHKEVICH

The article discusses the integrated use of electromagnetic methods to search for electrically inhomogeneous natural environments. As an example of such a medium is selected anisotropic Wed da over hydrocarbon deposits. The current search methods have ample opportunities for optimization. Variation characteristics of probing signals can improve search-descriptiveness. The analysis of the two-frequency electromagnetic waves interaction with the environment of hydrocarbon deposits. Getting information about objects not on one or two channels, in-formational, and in greater number allows a sufficiently high level of confidence to allocate their borders against the background of the underlying medium. Recommendations for the use of the optimal characteristics of probing signals. The possibility of restructuring the device complements the functional-WIDE possibility to search for hydrocarbon deposits. On the basis of the given research can be developed radiokompleksirovaniya methods for geological exploration of hydrocarbons. The research results can be used in the search geophysics.

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