

Матэматычнае мадэляванне, лікавыя метады і комплексы праграм

УДК 621.371:550.837.6

В. Ф. Янушкевич, С. В. Калинин, В. А. Богуш, И. В. Судько**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ЗАЛЕЖАМИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ**

Во введении указан объект исследования – воздействие частотно-модулированных сигналов на анизотропную среду над залежами нефти и газа, проведен анализ электромагнитных методов и технических средств для повышения точности и производительности выделения углеводородов. Целью исследования является реализация новых методов электроразведки на основе анализа процессов взаимодействия частотно-модулированных сигналов для получения дополнительных аномальных эффектов. Научная новизна состоит в анализе зондирования анизотропных сред над залежами нефти и газа на основе квазигидродинамического подхода частотно-модулированными сигналами. В основной части проведено моделирование компонент тензоров диэлектрической проницаемости среды над углеводородными залежами. Проведено исследование характеристик среды над скоплениями углеводородов для частотно-модулированных сигналов от частоты несущего колебания, индекса частотной модуляции, коэффициента отношения частот и проводимости диэлектрического наполнителя. Рекомендованы режимы поиска углеводородов на основе вариации характеристик зондирующих сигналов. Предложено внедрение различных методов и аппаратуры для повышения точности определения границ залежей углеводородов. Показаны способы повышения информативности электромагнитных методов георазведки. В заключении показано, что в режиме зондирования частотно-модулированными сигналами для принятых значений параметров среды следует выделить частотный диапазон высокочастотной составляющей (10 кГц – 30 МГц), где вещественная составляющая суммарной компоненты диэлектрической проницаемости среды является отрицательной, вещественная составляющая разностной компоненты электромагнитной волны переходит через нуль в диапазоне частот (8–30) МГц, что может послужить для поиска углеводородов, наблюдается рост фазовой составляющей на частотах 1 МГц – 1 ГГц, влияние проводимости среды на импедансные характеристики слоя над углеводородами дает качественную и количественную оценку при значениях проводимости диэлектрического наполнителя на отрезке (0,001–1) См/м. Область применения полученных результатов исследования – поисковая геофизика.

Ключевые слова: углеводородная залежь, электромагнитная волна, частотно-модулированный сигнал.

Введение. Актуальность усовершенствования существующих электромагнитных методов (ЭММ) георазведки обусловлена научным и практическим интересом по обеспечению экономик стран важнейшим источником энергии, каким являются углеводороды (нефть и газ) [1–3]. Совершенствование и разработка новых методов поиска углеводородных залежей (УВЗ) вызваны требованиями улучшения выделения границ и уровня идентификации

Янушкевич Виктор Францевич, канд. техн. наук, доц., доц. каф. энергетики и электроники ПГУ им. Евфросинии Полоцкой (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: ул. Блохина 30, 211440, г. Новополоцк, Беларусь; e-mail: v.yanushkevich@psu.by

Калинцев Сергей Викторович, ст. преподаватель каф. вычислительных систем и сетей ПГУ им. Евфросинии Полоцкой (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: ул. Стрелецкая, 4, 211440, г. Полоцк, Беларусь; e-mail: s.kalintsev@psu.by

Богуш Вадим Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, проф., ректор БГУИР (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск, Беларусь; e-mail: rector@bsuir.by

Судько Илья Вячеславович, студент факультета компьютерных наук и электроники ПГУ им. Евфросинии Полоцкой (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: ул. Блохина 30, 211440, г. Новополоцк, Беларусь; e-mail: i.v.sudko@students.psu.by

месторождений углеводородов [4]. Современное состояние науки и техники позволяет производить оценку возможностей использования высокоэффективных технологий поиска полезных ископаемых при освоении площадей с наличием углеводородных ресурсов на основе дифференциации анизотропных сред с применением для обнаружения УВЗ методов 3D-электроразведки с становлением полей в исследуемой среде [5]. Выбор методов ЭММ и построение электродинамических моделей сред, образующихся над скоплениями нефти и газа, реализуется в различных модифицированных способах и средствах при проведении вертикального зондирования при поиске углеводородов [6]. Осуществление мониторинга коллекторов и геотермальных исследований среды на основе универсальных способов является актуальным направлением в современной поисковой геофизике для решения поставленных задач электроразведки [7]. Акцент тенденций развития поисковой электроразведки направлен на решение задач внедрения эффективных методов георазведки с высоким уровнем точности и достоверности выделения месторождений УВЗ с использованием методов широкого спектра [8].

Активное внедрение ЭММ и технических средств для повышения точности и производительности выделения углеводородов определяется расширением функциональных зависимостей компонент диэлектрической проницаемости среды над залежами и проявления за счет этого аномальных эффектов [9]. Высокие показатели и совместное применение морских магнитотеллурических и гравиметрических данных измерений с учетом сейсмических ограничений актуальны в современных системах поиска полезных ископаемых [10]. Для разработки и модификации современных методов поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа используют установленные свойства геологического профиля местности [11; 12]. Новая российская спутниковая технология поиска местоположений нефти, газа и других полезных ископаемых и оценка возможностей использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых применяются при освоении углеводородных ресурсов [13]. Активное внедрение различных методов и аппаратурных средств для обнаружения углеводородов и достижение высоких показателей точности и идентификации возможно при поиске, оконтуривании залежей нефти и газа с достаточно хорошими характеристиками [14; 15].

Исследование влияния высокой температуры и пластовых давлений над УВЗ на электрохимические и электрофизические процессы и образование на границе с воздушным пространством промежуточной области с избытком свободных электронов, оказывающих воздействие на электродинамический отклик анизотропной среды, определяет методику проведения экспериментальных испытаний. Использование сложных амплитудно-частотно-модулированных сигналов и модификации способов поиска УВЗ на их базе построены на обнаружении месторождений углеводородов по регистрации амплитудных и фазовых компонент электромагнитных волн (ЭМВ) для исследуемого геологического участка местности [16]. Применение квазигидродинамического подхода и исследование компонент составляющих поверхностного импеданса анизотропной среды над УВЗ с учетом влияния на самый верхний слой от всех ниже расположенных слоев проведены в работе [17]. Активное внедрение методов исследования поверхностного импеданса и аппаратурных средств для обнаружения углеводородов основано на решении данных задач с высокой точностью обнаружения [18].

Анализ взаимодействия частотно-модулированных сигналов с анизотропной средой над УВЗ. Взаимодействие частотно-модулированных (ЧМ) сигналов с анизотропным наполнителем над скоплением углеводородов рассмотрено в работе [4]. Для реализации новых методов электроразведки представляют интерес процессы взаимодействия ЧМ сигналов на основе получения дополнительных режимов взаимодействия.

Рассмотрим воздействие на анизотропную среду ЧМ радиосигнала следующего вида:

$$e(t) = E_2 \cos(\omega_2 t + \beta \sin \omega_1 t), \quad (1)$$

где E_2 и ω_2 – соответственно амплитуда и частота несущего колебания; ω_1 – модулирующая частота, $\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_1}$ – индекс модуляции; $\Delta\omega$ – девиация частоты.

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды для такого режима имеют вид [4]

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r (1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_3}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} - j \left[\frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{\tilde{\omega}_3^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} \right] \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} - \frac{2j \tilde{\omega}_3 v_i \omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{[(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2] \omega_2} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r (1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_3}{\omega_2} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_3^2} - j \left[\frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_3^2 + v_i^2} \right] \right\}. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

В выражениях (2) фигурируют компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ $\dot{\epsilon}_1$, $\dot{\epsilon}_2$, $\dot{\epsilon}_3$; плазменная частота $\omega_{\Pi i}$; гиротропная частота $\omega_{\Gamma i}$; коэффициент отношения частот k_ω , частота столкновения частиц v_i ; относительная диэлектрическая проницаемость среды ϵ_r ; проводимость среды σ_r ; диэлектрическая постоянная ϵ_0 . Частотная составляющая, определяющая ЧМ режим, равна

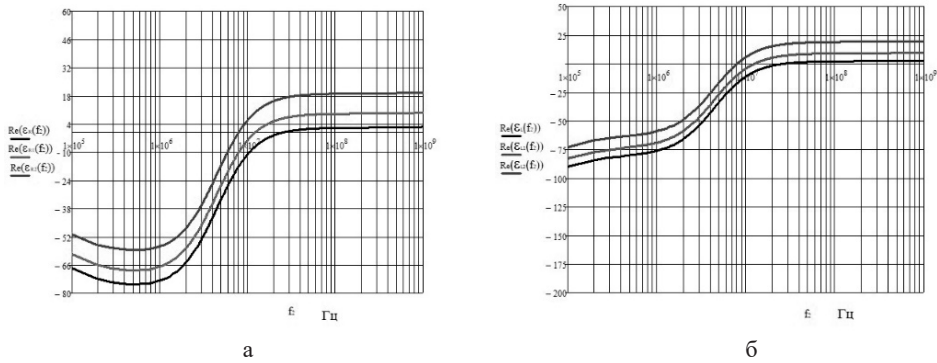
$$\tilde{\omega}_3 = \omega_2 [1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t]. \quad (3)$$

Методика исследований заключается в определении компонент диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями по формулам

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_R &= \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \dot{\epsilon}_R + j \text{Im} \dot{\epsilon}_R, \\ \dot{\epsilon}_L &= \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \dot{\epsilon}_L + j \text{Im} \dot{\epsilon}_L. \end{aligned} \quad (4)$$

Проводился анализ составляющих (4) диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для параметров среды над залежами углеводородов [1]: значения диэлектрической проницаемости вмещающих пород $\epsilon_r = (1 - 30)$ и электрической проводимости $\sigma_r = (10^{-5} - 1)$ См/м; концентрации частиц $N_e = N = (10^{16} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$, частота столкновения частиц $v_i = (2\pi \cdot 10^9)$ рад/с.

Результаты исследований. Зависимости вещественных составляющих компонентов тензора от частоты f_2 приведены на рисунке 1 (а – действительная часть суммарной компоненты, б – действительная составляющая разностной компоненты). Как видно из рисунка, на частоте $f_{2\Pi}$, соответствующей электронному плазменному резонансу, вещественная составляющая имеет точку перехода через нуль. Частота электронного плазменного резонанса соответствует (8–30) МГц, и с увеличением диэлектрической проницаемости она уменьшается. Таким образом, в данном режиме зондирования для принятых значений параметров среды следует выделить частотный диапазон высокочастотной составляющей (10 кГц – 30 МГц), где вещественная составляющая является отрицательной. Вещественная составляющая разностной компоненты переходит через нуль в диапазоне частот (8–30) МГц. Увеличение диэлектрической проницаемости среды смещает данную точку влево. В диапазоне низких частот данная компонента отрицательна и на частотах более 30 МГц постоянна. Следует отметить, что частота электронного плазменного резонанса может смещаться в область 100 МГц – 1 ГГц, так как значения составляющих тензора анизотропной среды над углеводородами зависят от концентрации частиц, которая, в свою очередь, определяется физико-химическими процессами в самой залежи, и условий залегания (значения давления и температуры), влияющих на электрические свойства вмещающих пород и сред над УВЗ.

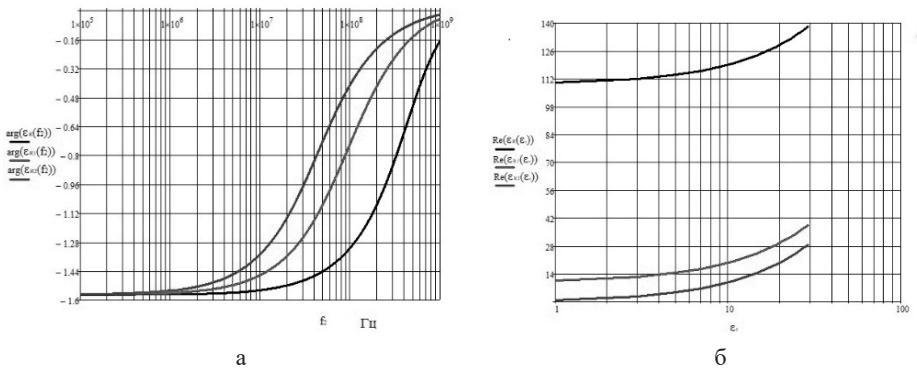


Пояснения: а – действительная часть суммарной компоненты; б – действительная составляющая разностной компоненты.

Рисунок 1 – Зависимости компонент тензора от частоты f_2

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\hat{\epsilon}_R(f_2)), \operatorname{Re}(\hat{\epsilon}_L(f_2)) & \text{ – для } F = 10^4 \text{ Гц, } \beta = 1, \\ \operatorname{Re}(\hat{\epsilon}_{R1}(f_2)), \operatorname{Re}(\hat{\epsilon}_{L1}(f_2)) & \text{ – для } F = 10^4 \text{ Гц, } \beta = 10, \\ \operatorname{Re}(\hat{\epsilon}_{R2}(f_2)), \operatorname{Re}(\hat{\epsilon}_{L2}(f_2)) & \text{ – для } F = 10^4 \text{ Гц, } \beta = 20. \end{aligned}$$

Зависимости фазовой и вещественной составляющих компонент тензора приведены на рисунке 2 (а – фазовая составляющая суммарной компоненты, б – действительная составляющая суммарной компоненты).

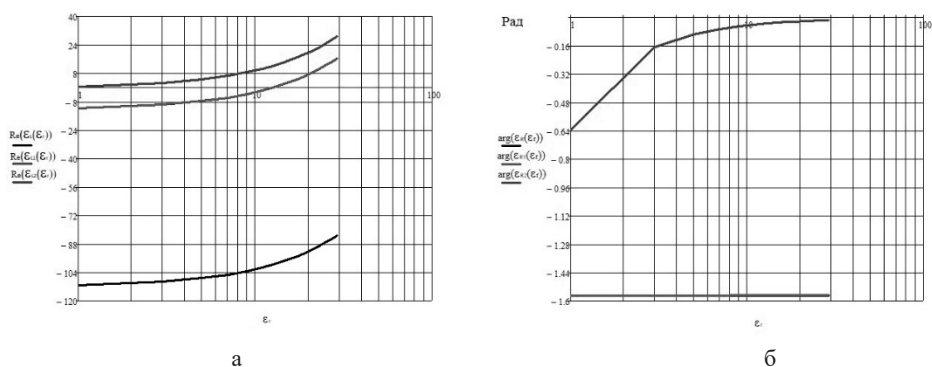


Пояснения: а – фазовая составляющая суммарной компоненты; б – действительная составляющая суммарной компоненты.

Рисунок 2 – Зависимости фазовой и вещественной составляющих компонент тензора

$$\begin{aligned} \arg(\hat{\epsilon}_R(f_2)), \operatorname{Re}(\hat{\epsilon}_R(\epsilon_r)) & \text{ – для } F = 10^4 \text{ Гц, } \beta = 1, \\ \arg(\hat{\epsilon}_{R1}(f_2)), \operatorname{Re}(\hat{\epsilon}_{R1}(\epsilon_r)) & \text{ – для } F = 10^4 \text{ Гц, } \beta = 10, \\ \arg(\hat{\epsilon}_{R2}(f_2)), \operatorname{Re}(\hat{\epsilon}_{R2}(\epsilon_r)) & \text{ – для } F = 10^4 \text{ Гц, } \beta = 20. \end{aligned}$$

Наблюдается рост фазовой составляющей на частотах 1 МГц – 1 ГГц. С увеличением значения диэлектрической проницаемости среды частота увеличения фазы смещается влево. Фазовые характеристики суммарной компоненты не меняются в диапазоне частот 10 кГц – 1 МГц и на участке 1 ГГц – 10 ГГц. Значения фазы суммарной компоненты с ростом диэлектрической проницаемости увеличиваются. Проведено моделирование зависимостей вещественной и фазовой составляющей компонент тензора, представленных на рисунке 3 (а – фазовая составляющая суммарной компоненты, б – действительная составляющая суммарной компоненты). Вещественные составляющие тензора диэлектрической проницаемости для ЭМВ с левой поляризацией увеличиваются с ростом диэлектрической проницаемости наполнителя среды над УВЗ. Установлено, что низкие значения частоты несущего колебания не влияют на фазовую компоненту рассматриваемой составляющей. Применение частоты несущего колебания $f = 10^9$ Гц расширяет информативность результатов моделирования.

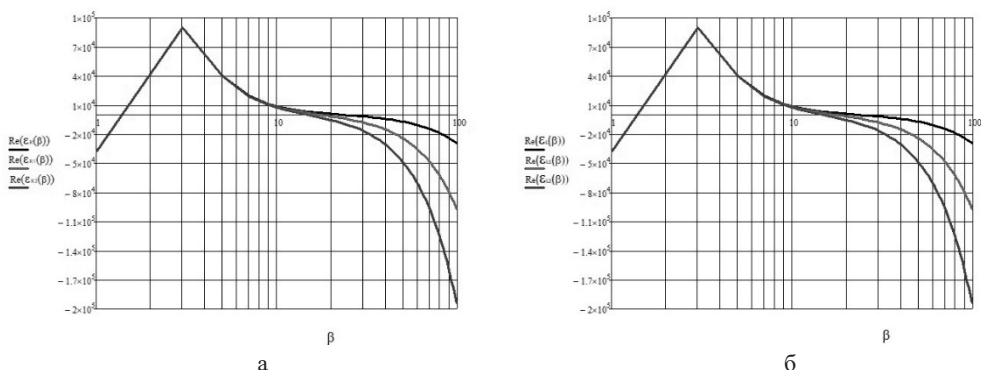


Пояснения: а – фазовая составляющая суммарной компоненты; б – действительная составляющая суммарной компоненты.

Рисунок 3 – Зависимости вещественной и фазовой составляющей компонент тензора

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\dot{\varepsilon}_L(\varepsilon_r)), \operatorname{arg}(\dot{\varepsilon}_R(\varepsilon_r)) & \text{ – для } f_2 = 10^4 \text{ Гц, } \beta = 1, \\ \operatorname{Re}(\dot{\varepsilon}_{L1}(\varepsilon_r)), \operatorname{arg}(\dot{\varepsilon}_{R1}(\varepsilon_r)) & \text{ – для } f_2 = 10^5 \text{ Гц, } \beta = 1, \\ \operatorname{Re}(\dot{\varepsilon}_{L2}(\varepsilon_r)), \operatorname{arg}(\dot{\varepsilon}_{R2}(\varepsilon_r)) & \text{ – для } f_2 = 10^9 \text{ Гц, } \beta = 1. \end{aligned}$$

Проведено моделирование зависимостей вещественных составляющих суммарной и разностной компонент тензора от индекса модуляции, представленных на рисунке 4 (а – действительная часть суммарной компоненты, б – действительная составляющая разностной компоненты). Установлено, что ЭМВ с правой и левой поляризациями имеют идентичные характеристики. Данная зависимость характеризуется точкой максимума при значении $\beta = 3$, точкой перехода через нуль для $\beta = (10-30)$. Влияние самой диэлектрической проницаемости наполнителя среды над УВЗ происходит при значениях индекса модуляции, больших 15. С ростом ε_r характеристика идет более круто вниз.



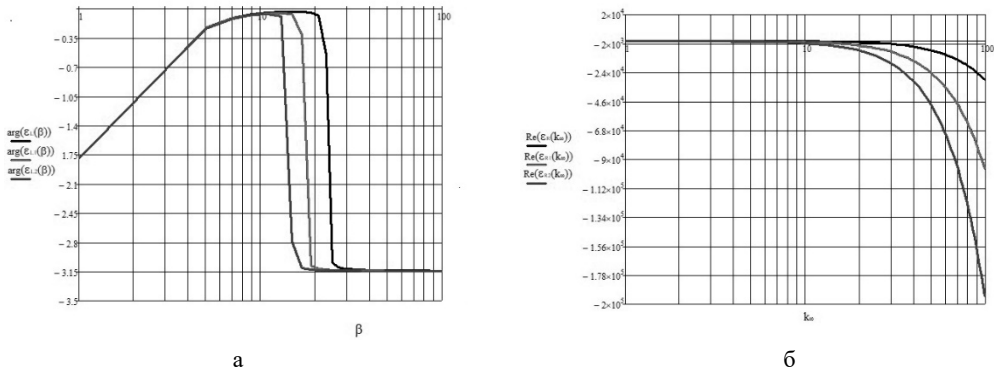
Пояснения: а – действительная часть суммарной компоненты; б – действительная составляющая разностной компоненты.

Рисунок 4 – Зависимости компонент тензора от индекса модуляции

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\dot{\varepsilon}_R(\beta)), \operatorname{Re}(\dot{\varepsilon}_L(\beta)) & \text{ – для } F = 10^4 \text{ Гц, } \varepsilon_r = 3, \\ \operatorname{Re}(\dot{\varepsilon}_{R1}(\beta)), \operatorname{Re}(\dot{\varepsilon}_{L1}(\beta)) & \text{ – для } F = 10^4 \text{ Гц, } \varepsilon_r = 10, \\ \operatorname{Re}(\dot{\varepsilon}_{R2}(\beta)), \operatorname{Re}(\dot{\varepsilon}_{L2}(\beta)) & \text{ – для } F = 10^4 \text{ Гц, } \varepsilon_r = 20. \end{aligned}$$

Зависимости фазовой и вещественной составляющих компонент тензора от параметров ЧМ сигналов приведены на рисунке 5 (а – фазовая составляющая тензора, б – вещественная часть тензора). Фазовая компонента ЭМВ с левой поляризацией возрастает с ростом β до 10–20. Процедура диагностики среды над УВЗ может осуществляться при индексах ЧМ на отрезке 10–30, когда происходит скачкообразное уменьшение фазы до $-3,15$ рад и дальше она стабильна. Информативность может быть дополнительно повышена за счет набора конкретных значений расстояний и конкретизации электродинамических моделей УВЗ с учетом влажности слоев, климатических факторов и особенностей измерений сезонного характера. Было установлено,

что вещественная компонента для правой поляризации ЭМВ резко уменьшается на отрезке коэффициентов отношения частот 10–100.

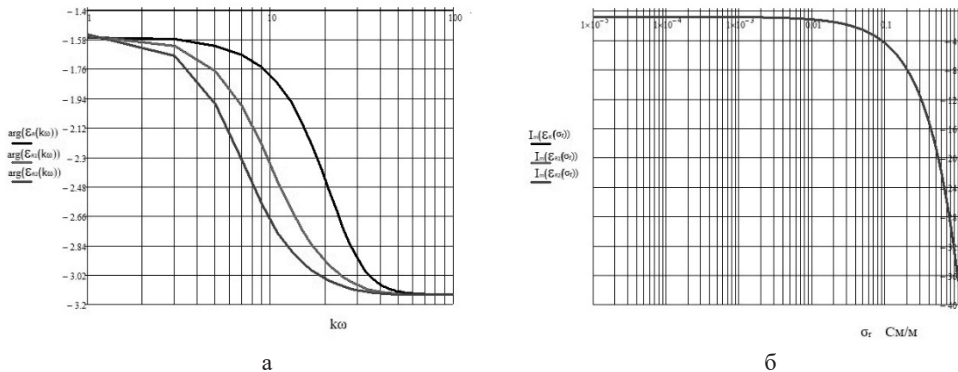


Пояснения: а – фазовая составляющая тензора; б – вещественная часть тензора.

Рисунок 5 – Зависимости фазовой и вещественной составляющих компонент тензора

$$\begin{aligned} & \arg(\hat{\epsilon}_L(\beta)), \operatorname{Re}(\hat{\epsilon}_R(k_\omega)) - \text{для } F = 10^4 \text{ Гц, } \epsilon_r = 3, \\ & \arg(\hat{\epsilon}_{L1}(\beta)), \operatorname{Re}(\hat{\epsilon}_{R1}(k_\omega)) - \text{для } F = 10^4 \text{ Гц, } \epsilon_r = 10, \\ & \arg(\hat{\epsilon}_{L2}(\beta)), \operatorname{Re}(\hat{\epsilon}_{R2}(k_\omega)) - \text{для } F = 10^4 \text{ Гц, } \epsilon_r = 20. \end{aligned}$$

Было проведено исследование зависимостей фазовой и мнимой составляющих компонент тензора для правой поляризации ЭМВ, представленное на рисунке 6 (а – фазовая составляющая тензора, б – мнимая часть тензора). Фаза подвержена наибольшему влиянию для значений коэффициента отношения частот на отрезке 2–40. С ростом диэлектрической проницаемости значение данного коэффициента уменьшается. Моделирование мнимой составляющей компоненты тензора показало, что все характеристики сливаются в одну для разных значений диэлектрической проницаемости среды над УВЗ. Влияние проводимости среды на импедансные характеристики слоя над УВЗ дают качественную и количественную оценку при значениях проводимости диэлектрического наполнителя на отрезке (0,001–1) См/м, когда мнимая составляющая резко уменьшается.



Пояснения: а – фазовая составляющая тензора; б – мнимая часть тензора.

Рисунок 6 – Зависимости фазовой и мнимой составляющих компонент тензора

$$\begin{aligned} & \arg(\hat{\epsilon}_R(k_\omega)), \operatorname{Im}(\hat{\epsilon}_R(\sigma_r)) - \text{для } F = 10^4 \text{ Гц, } \epsilon_r = 3, \\ & \arg(\hat{\epsilon}_{R1}(k_\omega)), \operatorname{Im}(\hat{\epsilon}_{R1}(\sigma_r)) - \text{для } F = 10^4 \text{ Гц, } \epsilon_r = 10, \\ & \arg(\hat{\epsilon}_{R2}(k_\omega)), \operatorname{Im}(\hat{\epsilon}_{R2}(\sigma_r)) - \text{для } F = 10^4 \text{ Гц, } \epsilon_r = 20. \end{aligned}$$

Зондирование анизотропных сред ЧМ сигналами в режимах с правой и левой круговыми поляризациями позволяет повысить производительность методов электроразведки, повысить информативность за счет получения дополнительных данных по исследуемому геологическому профилю местности и расширения функциональных зависимостей компонент тензоров диэлектрической проницаемости, зависящих от параметров сигналов.

Заключение. Проведенный анализ распространения ЭМВ в среде над углеводородами в режиме ЧМ сигналов показал следующее:

1. В данном режиме зондирования для принятых значений параметров среды следует выделить частотный диапазон высокочастотной составляющей (10 кГц – 30 МГц), где вещественная составляющая является отрицательной.
2. Вещественная составляющая разностной компоненты ЭМВ переходит через нуль в диапазоне частот (8–30) МГц, что может послужить для поиска углеводородов.
3. Наблюдается рост фазовой составляющей на частотах 1 МГц – 1 ГГц, и с увеличением значения диэлектрической проницаемости среды частота увеличения фазы смещается влево.
4. Влияние проводимости среды на импедансные характеристики слоя над УВЗ даст качественную и количественную оценку при значениях проводимости диэлектрического наполнителя на отрезке (0,001–1) См/м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic) / C. H. Henke [et al.] // Interpretatio. – 2020. – Vol. 8, No. 4. – P. 15–24.
3. *Гололобов, Д. В.* Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д. В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
4. *Янушкевич, В. Ф.* Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В. Ф. Янушкевич. – Новополоцк : ПГУ, 2017. – 232 с.
5. *Anderson, C.* An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source / C. Anderson, J. Mattsson // First Break. – 2010. – Vol. 28, issue 5. – P. 71–75.
6. *Helwig, S. L.* Vertical-vertical controlled-source electromagnetic instrumentation and acquisition / S. L. Helwig, W. Wood, B. Gloux // Geophysical Prospecting. – 2019. – Vol. 67, issue 6. – P. 1582–1594.
7. *Geldmacher, I.* A Fit-for-purpose electromagnetic System for Reservoir Monitoring and Geothermal Exploration / I. Geldmacher, K. Strack // GRC Transactions. – 2017. – Vol. 41. – P. 1649–1658.
8. *Holten, T.* Time-lapse CSEM reservoir monitoring of the Norne field with vertical dipoles / T. Holten, S. L. Helwig, Luo Xiaodong // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2016. – Vol. 35. – P. 971–975.
9. *Fraseri, A.* Self potential anomalies as possible indicators in search for oil and gas reservoirs / A. Fraseri // 57th EAGE conf. and exhib., Glasgow, May 29 – June 2, 1995. – Glasgow, UK : European Association of Geoscientists & Engineers, 1995. – Art. cp-90-00263, 8 p.
10. Joint inversion of marine magnetotelluric and gravity data incorporating seismic constraints: Preliminary results of sub-basalt imaging off the Faroe Shelf / M. D. Jegen [et al.] // Earth and Planetary Science Letters. – 2009. – Vol. 282, issue 1–4. – P. 47–55.
11. *Владов, М. Л.* Введение в георадиолокацию / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.
12. *Каратаев, Г. И.* Геофизические методы исследований / Г. И. Каратаев. – Минск : БГУ, 2008. – 147 с.
13. *Райлян, И. Г.* Новая российская спутниковая технология поиска местоположений нефти, газа и других полезных ископаемых / И. Г. Райлян // Нефть, газ и бизнес. – 2002. – № 6. – С. 20.
14. *Constable, S.* Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration / S. Constable // Geophysics. – 2010. – Vol. 75, issue 5. – P. 75A67–75A81.
15. *Губин, В. Н.* Космическое зондирование нефтеносных структур в Припятской нефтегазоносной области / В. Н. Губин // Земля Беларуси. – 2013. – № 1. – С. 40–44.
16. *Степулёнок, С. В.* Взаимодействие амплитудно-частотно-модулированных сигналов со средой над углеводородными залежами / С. В. Степулёнок, В. Ф. Янушкевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. – 2009. – № 9. – С. 103–108.
17. *Adamovskiy, E.* Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits / E. Adamovskiy, V. Yanushkevich // European and national dimension in research : materials of the 8th Junior researchers conf. : in 3 parts. – Navapolatsk : PSU, 2016. – Part 3. Technology. – P. 179–183.
18. *Гололобов, Д. В.* Импедансные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала / Д. В. Гололобов, В. Ф. Янушкевич, С. В. Калинин // Доклады БГУИР. – 2010. – № 6 (52). – С. 13–17.

“Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science”
Vol. 13, No. 2, 2023, pp. 30–38
© Yanka Kupala State University of Grodno, 2023

Electrodynamic response of anisotropic medium over hydrocarbon deposits to the impact of frequency-modulated signals

V. F. Yanushkevich ¹, S. V. Kalintsau ², V. A. Bogush ³, I. V. Sudko ⁴

¹ Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (Belarus)
Blokhina St., 30, 211440, Navapolatsk, Belarus; e-mail: v.yanushkevich@psu.by

² Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (Belarus)
Streletsкая St., 4, 211400, Polatsk, Belarus; e-mail: s.kalintsev@psu.by

³ Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Belarus)
P. Brovki St., 6, 220013, Minsk, Belarus; e-mail: rector@bsuir.by

⁴ Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (Belarus)
Blokhina St., 30, 211440, Navapolatsk, Belarus; e-mail: i.v.sudko@students.psu.by

Abstract. In the introduction, the object of research is indicated – the effect of frequency-modulated signals on an anisotropic medium over oil and gas deposits, an analysis of electromagnetic methods and technical means to improve the accuracy and productivity of hydrocarbon extraction is carried out. The aim of the study is the implementation of new methods of electrical exploration based on the analysis of the processes of interaction of frequency-modulated signals to obtain additional anomalous effects. The scientific novelty lies in the analysis of sounding of anisotropic media over oil and gas deposits based on the quasi-hydrodynamic approach with frequency-modulated signals. In the main part, modeling of the components of the tensors of the dielectric constant of the medium over hydrocarbon deposits was carried out. A study was made of the characteristics of the medium above hydrocarbon accumulations for frequency-modulated signals from the frequency of the carrier oscillation, the frequency-modulation index, the frequency ratio and the conductivity of the dielectric filler. Hydrocarbon search modes are recommended based on the variation in the characteristics of probing signals. It is proposed to introduce various methods and equipment to improve the accuracy of determining the boundaries of hydrocarbon deposits. Ways of increasing the information content of electromagnetic methods of geo-exploration are shown. In conclusion, it is shown that in the probing mode with frequency-modulated signals for the received values of the parameters of the medium, it is necessary to select the frequency range of the high-frequency component (10 kHz – 30 MHz), where the real component of the total component of the dielectric constant of the medium is negative, the real component of the difference component of the electromagnetic wave passes through zero in the frequency range (8–30) MHz, which can be used to search for hydrocarbons, an increase in the phase component at frequencies of 1 MHz – 1 GHz is observed, the effect of the medium conductivity on the impedance characteristics of the layer above hydrocarbons gives a qualitative and quantitative assessment at the values of the conductivity of the dielectric filler on the segment (0,001–1) Sm/m. The field of application of the obtained results of the study is prospecting geophysics.

Keywords: hydrocarbon deposits, electromagnetic wave, frequency-modulated signal.

References

1. Moskvichew V. N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line. *9th Microw. conf. NICON-91*, Rydzyna, 1991, vol. 1, pp. 240-244.
2. Henke C. H. [et al.]. Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic). *Interpretatio*, 2020, vol. 8, No. 4, pp. 15-24.
3. Gololobov D. V. Interaction of electromagnetic waves and hydrocarbon deposits [*Vzaimodeistvie elektromagnitnykh voln i uglevodorodnykh zalezhei*]. Minsk, 2009, 185 p.
4. Yanushkevich V. F. Electromagnetic methods for searching and identifying hydrocarbon deposits [*Elektromagnitnye metody poiska i identifikatsii uglevodorodnykh zalezhei*]. Navapolatsk, 2017, 232 p.
5. Anderson C., Mattsson J. An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source. *First Break*, 2010, vol. 28, issue 5, pp. 71-75.
6. Helwig S. L., Wood W., Gloux B. Vertical-vertical controlled-source electromagnetic instrumentation and acquisition. *Geophysical Prospecting*, 2019, vol. 67, issue 6, pp.1582-1594.
7. Geldmacher I., Strack K. A Fit-for-purpose electromagnetic System for Reservoir Monitoring and Geothermal Exploration. *GRC Transactions*, 2017, vol. 41, pp. 1649-1658.
8. Holten T., Helwig S., Luo Xiaodong. Time lapse CSEM reservoir monitoring of the Norne field with vertical dipoles. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2016, vol. 35, pp. 971-975.
9. Frasher A. Self potential anomalies as possible indicators in search for oil and gas reservoirs. *57th EAGE conf. and exhib.*, Glasgow, May 29 - June 2, 1995. Glasgow, UK, 1995, art. cp-90-00263, 8 p.

10. Jegen M. D. [et al.]. Joint inversion of marine magnetotelluric and gravity data incorporating seismic constraints: Preliminary results of sub-basalt imaging off the Faroe Shelf. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, vol. 282, issue 1-4, pp. 47-55.

11. Vladov M. L., Starovoitov A. V. Introduction to GPR [*Vvedenie v georadiolokatsiiu*]. Moscow, 2004, 153 p.

12. Karataev G. I. Geophysical research methods [*Geofizicheskie metody issledovani*]. Minsk, 2008, 147 p.

13. Railyan I. G. E. New Russian satellite technology for searching for the locations of oil, gas and other minerals [*Novaia rossiiskaia sputnikovaia tekhnologiia poiska mestopolozhenii nefii, gaza i drugikh poleznykh iskopaemykh*]. *Neft', gaz i biznes*, 2002, No. 6, p. 20.

14. Constable S. Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration. *Geophysics*, 2010, vol. 75, issue 5, pp. 75A67-75A81.

15. Gubin V. N. Space sounding of oil-bearing structures in the Pripyat oil and gas region [*Kosmicheskoe zondirovanie neftenosnykh struktur v Pripiatskoi neftegazonosnoi oblasti*]. *Zemlia Belarusi*, 2013, No. 1, pp. 40-44.

16. Stepulenok S. V., Yanushkevich V. F. Interaction of amplitude-frequency-modulated signals with the environment above hydrocarbon deposits [*Vzaimodeistvie amplitudno-chastotno-modulirovannykh signalov so sredoi nad uglevodo-rodnyimi zalezhami*]. *Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences*, 2009, No. 9, pp. 103-108.

17. Adamovskiy E, Yanushkevich V. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits. *European and national dimension in research : materials of the 8th Junior researchers conf.* : in 3 parts. Part 3. Technology. Navapolatsk, 2016, part 3, pp. 179-183.

18. Gololobov D. V., Yanushkevich V. F., Kalintsev S. V. Impedance boundary conditions for the environment above the hydrocarbon deposits in the amplitude-modulated signal mode [*Impedansnye granichnye usloviia anizotropnoi sredy dlia amplitudno-modulirovannogo signala*]. *Doklady BGUIR*, 2010, No. 6 (52), pp. 13-17.



Вниманию авторов!

В научном, производственно-практическом журнале
**«Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы.
 Серыя 6. Тэхніка»**

предлагаются следующие рубрики:

физика конденсированного состояния (технические науки); материаловедение и технология материалов; трение и износ в машинах; технология и оборудование механической и физико-технической обработки; математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки); нанотехнологии и наноматериалы; технология и переработка полимеров и композитов; процессы и аппараты пищевых производств; машины, агрегаты и процессы; строительные материалы и изделия; история науки и техники.