

УДК 621.371:550.837.6

## ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОЛЯ ПОДМАГНИЧИВАНИЯ И ИЗМЕНЕНИЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СРЕДЫ НАД ЗАЛЕЖЬЮ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ

Д.В. ГОЛОЛОБОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 24 марта 2009

Исследовано влияние величины и наклона геомагнитного поля, а также изменения магнитной проницаемости наполнителя на резонансное взаимодействие среды над залежью углеводородов и гармонической электромагнитной волны. Показано, что незначительные вариации этих параметров приводят к существенным изменениям резонансных частот взаимодействия волны и анизотропного образования над залежью.

*Ключевые слова:* углеводородная залежь, магнитное поле, магнитная проницаемость, комбинационный элемент тензора диэлектрической проницаемости.

### Введение

Оценка процесса взаимодействия электромагнитной волны (ЭМВ) с анизотропной средой над углеводородной залежью (УВЗ) при наклоненном магнитном поле Земли, имеющем фиксированное значение, исследована в [1]. Вместе с тем в зависимости от места расположения на поверхности Земли значение магнитного поля изменяется. Например, величина магнитной индукции в г. Минске отличается от индукции в г. Бресте на 900 нТл и растет с приближением к границам России.

Кроме того, остается не исследованным вопрос о влиянии магнитной проницаемости среды над залежами углеводородов, тогда как установлено, что магнитная восприимчивость в контуре над УВЗ может меняться в пределах  $\chi_m = (4 - 6) \cdot 10^{-3}$  [2]. Изменение магнитной проницаемости среды над УВЗ обусловлено накоплением минералов, обладающих свойствами магнетиков, за счет сульфидной минерализации, карбонатизации и других процессов в среде над залежью. Содержание таких минералов в среде над залежами может достигать 10–12%, а увеличение содержания магнетита в среде на 1% обеспечивает приращение магнитной восприимчивости  $\chi_m$  на  $(4 - 5) \cdot 10^{-4}$ .

Изменение магнитных параметров оказывает существенное влияние при регистрации аномалий электромагнитного поля. Для оценки возможности регистрации аномалий магнитной напряженности поля слабонаправленной антенной проведем следующие расчеты. Пусть напряжение на входе антенны составляет  $U_a = 1,5$  В при известном ее активном сопротивлении  $R_a = 200$  Ом. Тогда действующая активная мощность антенны составляет  $P_a = U_a^2 / 2R_a = 5,5$  мВт. Если коэффициент усиления антенны составляет 2, а КПД равен 50%, то коэффициент направленного действия антенны  $G = 4$ . В этом случае несложно определить напряженность электрического поля на удалении от источника в 10 м —  $E_m = \sqrt{60P_a G} / r = 0,11$  В/м. Магнитная напряженность поля в воздухе с характеристическим сопротивлением  $Z_0 = 377$  Ом определяется как

$H_m = E_m / Z_0 = 3 \cdot 10^{-4}$  А/м. Магнитная индукция, создаваемая антенной  $B_m = H_m \mu_0 = 3,7 \cdot 10^{-10}$  Тл=0,37 нТл. Для г. Минска  $B_0$  составляет 48600 нТл или магнитная напряженность поля 38,7 А/м. Характерные для УВЗ аномалии магнитной индукции составляют 10–15 нТл [3] или магнитной напряженности поля 8–12 мА/м. Таким образом, электромагнитное поле, создаваемое антенной, столь незначительно, что не является существенным фактором для измерительной антенны.

Существенным в данном практическом примере является демонстрация возможности регистрации тончайших изменений свойств среды и величины поля подмагничивания, накладывающихся на процесс взаимодействия ЭМВ и исследуемой подстилающей среды.

### Постановка задачи

Пусть на границу раздела двух сред, характеризуемых электродинамическими параметрами воздушного пространства —  $\epsilon_0, \mu_1$  и подстилающей среды —  $\epsilon_r, \mu_1, \sigma_r$ , падает под произвольным углом  $\theta_n$  относительно внешней нормали  $\vec{n}$  гармоническая ЭМВ с напряженностью поля (рис. 1)

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_m \exp[j(\omega t - \vec{k}r)], \quad (1)$$

где  $\omega$  — частота ЭМВ;  $\vec{k}, \vec{r}$  — комплексное волновое число и обобщенная пространственная координата.

Магнитное поле Земли  $\vec{H}_0$  в общем случае ориентировано в пространстве произвольно относительно нормали  $\vec{n}$  (углы  $\theta$  и  $\alpha$ ).

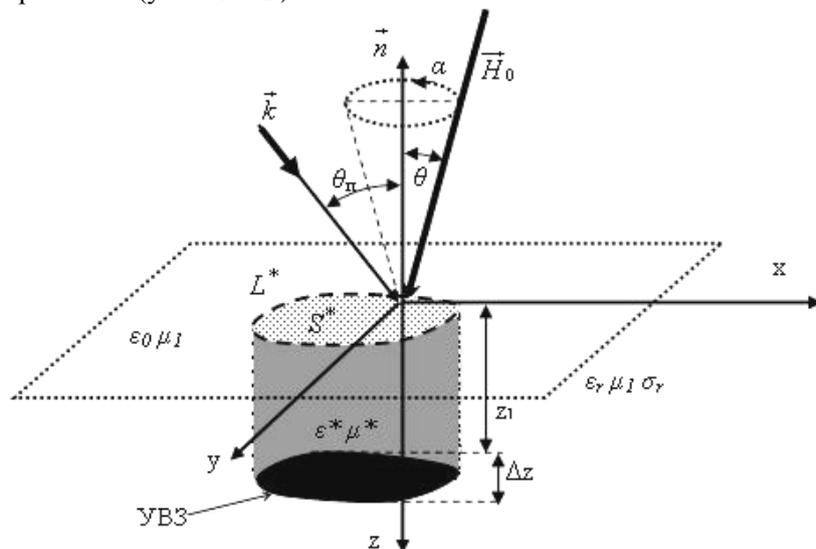


Рис. 1. Взаимодействие ЭМВ с УВЗ

Нижнее полупространство содержит включение — УВЗ мощностью (толщиной)  $\Delta z$ , находящееся на удалении  $z_1$  от границы раздела сред. Над УВЗ возникает поток заряженных частиц, направленный к границе раздела сред, который создает анизотропную среду (АС) с параметрами  $\epsilon^*, \mu^*$  на границе раздела (на рис. 1 контур  $L^*$  показан пунктирной линией). Эта среда характеризуется тензором диэлектрической проницаемости, содержащим в общем случае девять компонентов, зависящих от частоты действующей ЭМВ, концентраций  $N_i$ , частот столкновений  $\nu_i$  частиц, электродинамических параметров наполнителя среды над УВЗ — комплексной диэлектрической  $\epsilon_r, \sigma_r$  и магнитной проницаемости  $\mu^*$  и поля подмагничивания  $H_0(\theta, \alpha)$ .

## Методика оценки резонансного взаимодействия АС и ЭМВ

По методике оценки резонансного взаимодействия среды над УВЗ с ЭМВ, предложенной в работе [4], заключающейся в анализе частотных характеристик комбинационных элементов тензора (КЭТ) диэлектрической проницаемости вида:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_R(j\omega) &= \dot{\epsilon}_1(j\omega) + \dot{\epsilon}_2(j\omega) = \text{Re}\epsilon_R - j\text{Im}\epsilon_R, \\ \dot{\epsilon}_L(j\omega) &= \dot{\epsilon}_1(j\omega) - \dot{\epsilon}_2(j\omega) = \text{Re}\epsilon_L - j\text{Im}\epsilon_L.\end{aligned}\quad (2)$$

Проведем анализ влияния величины поля подмагничивания на резонансное поведение процесса взаимодействия ЭМВ и АС при его произвольной ориентации относительно границы раздела воздушной и исследуемой сред. Для этого используем критерий (1) при вариации частоты и величины магнитной напряженности  $H_0$ :

$$\dot{\epsilon}_R(f, H_0) = \text{Re}\epsilon_R(f, H_0) - j\text{Im}\epsilon_R(f, H_0).\quad (3)$$

Для оценки резонансного взаимодействия ЭМВ и АС при изменении магнитной проницаемости и наклона геомагнитного поля используем зависимость

$$\dot{\epsilon}_R(f, \mu, \theta, \alpha) = \text{Re}\epsilon_R(f, \mu, \theta, \alpha) - j\text{Im}\epsilon_R(f, \mu, \theta, \alpha).\quad (4)$$

### Влияние величины напряженности магнитного поля на процесс взаимодействия АС и ЭМВ

На рис. 2 приведена зависимость КЭТ от величины напряженности магнитного поля в диапазоне частот 200 кГц–10 МГц. При изменениях величины поля подмагничивания от 0 до 300 А/м, пороговая величина  $H_{0п}$ , составляет 18,65 А/м (рис. 2,а). Эта величина характеризует начало резонансного взаимодействия с АС над УВЗ для частот 0,1–200 кГц. На этом же графике следует выделить точку 10 А/м, при которой значение КЭТ остается неизменным. Начиная с частоты 1 МГц необходимо увеличивать величину магнитного поля для резонансного проведения ЭМВ.

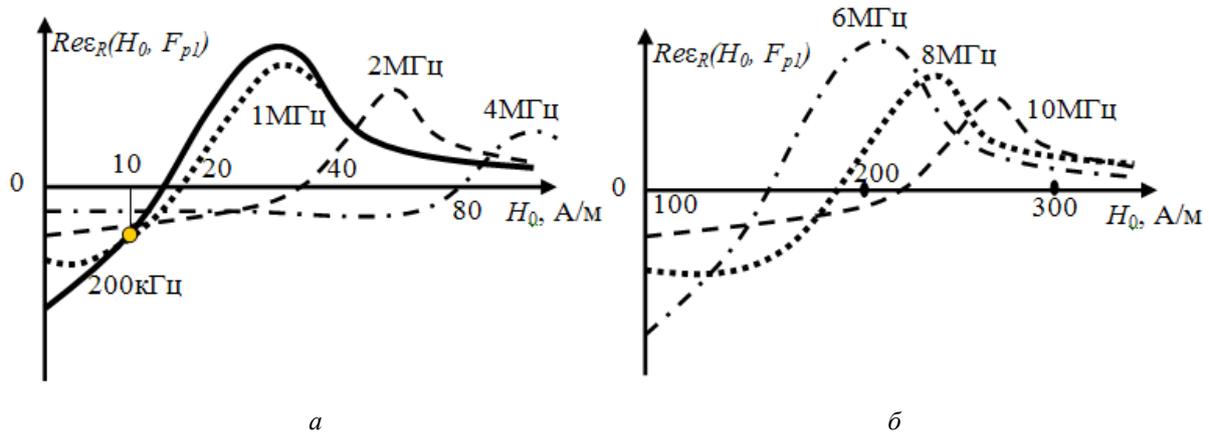


Рис. 2. Частотная зависимость КЭТ от величины поля подмагничивания при различных резонансных частотах: а — 200 кГц...4 МГц; б — 6–10 МГц

Для уточнения характера поведения резонанса от величины магнитного поля проведены численные исследования на отрезке частот 6–10 МГц (рис. 2,б). При этом установлена линейная зависимость циклотронного электронного резонанса  $F_{p1}$  от величины поля подмагничивания  $H_0$ . Это указывает на то, что, с одной стороны, можно проводить идентификацию среды по резонансной частоте, а с другой стороны определять по ней уровень подмагничивания  $H_0$ . Заметим, что при росте резонансной частоты наблюдается снижение максимального значения КЭТ по экспоненциальному закону.

Изменения величины поля подмагничивания не оказывают влияния на электронный циклотронный резонанс, составляющий 898 МГц.

### Влияние изменения магнитной проницаемости наполнителя среды над УВЗ на процесс взаимодействия

На рис. 3,а приведена частотная зависимость КЭТ при увеличении магнитной проницаемости наполнителя ( $\mu_1$  соответствует магнитной проницаемости вакуума). Как видно из рисунка увеличение относительной проницаемости до  $\mu_4=5$  приводит к увеличению частоты  $F_{p1}$  резонансного взаимодействия среды над УВЗ и ЭМВ. На частотных характеристиках отмечается изменение формы кривой КЭТ.

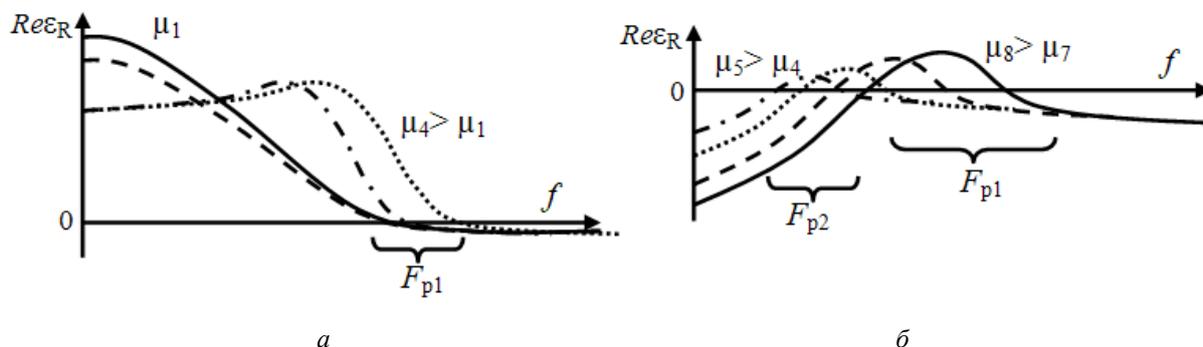


Рис. 3. Трансформация частотной зависимости КЭТ при вариации магнитной проницаемости наполнителя: а — 1–5; б — 6–10

Дальнейшее увеличение относительной магнитной проницаемости приводит к смещению резонансной частоты  $F_{p1}$  в область более высоких частот, а также проявляется дополнительный "ближний" к электронному ионному резонансу переход КЭТ через 0, соответствующий дополнительному резонансу взаимодействия электромагнитной волны и анизотропной среды ( $F_{p2}$  на рис. 3,б). При этом на электронный плазменный резонанс изменение магнитной напряженности оказывает несущественное влияние.

Когда магнитная проницаемость существенно увеличивается по сравнению с проницаемостью воздуха, резонансы перемещаются в область больших частот, раздваиваются и становятся явно выраженными (рис. 4). При относительно больших магнитных проницаемостях поведение резонансов соответствует эффекту продольного феррорезонанса (рис. 4,б).

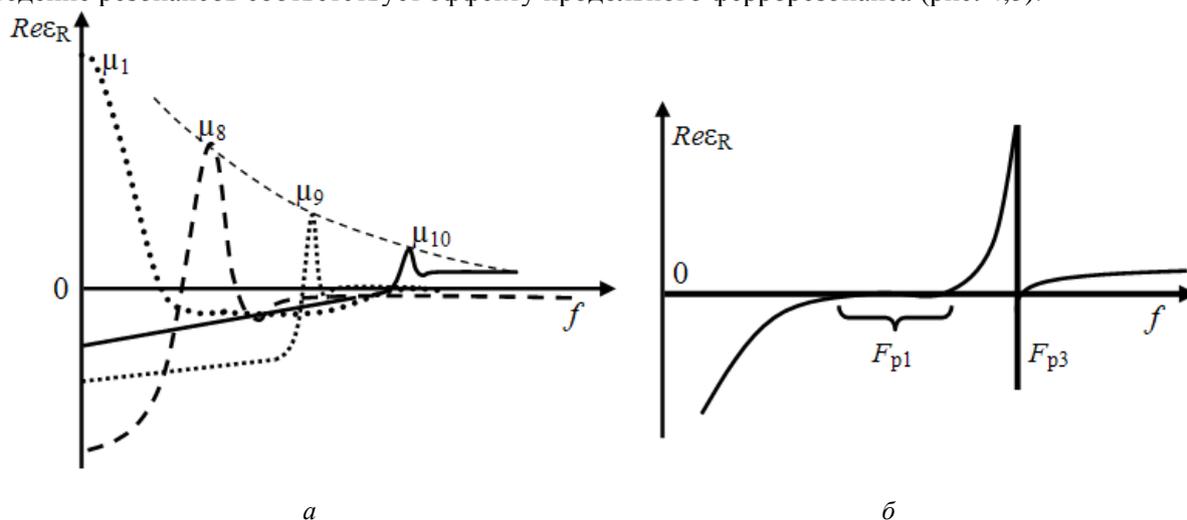


Рис. 4. Эволюция частотной зависимости КЭТ при больших магнитных проницаемостях наполнителя: а — для  $10^{-7}$ – $10^{-4}$ ; б — уточненная для  $10^{-4}$

Полученные результаты могут быть применены при решении задач распространения электромагнитных волн над магнитодиэлектрическими средами, проявляющими анизотропию магнитных параметров.

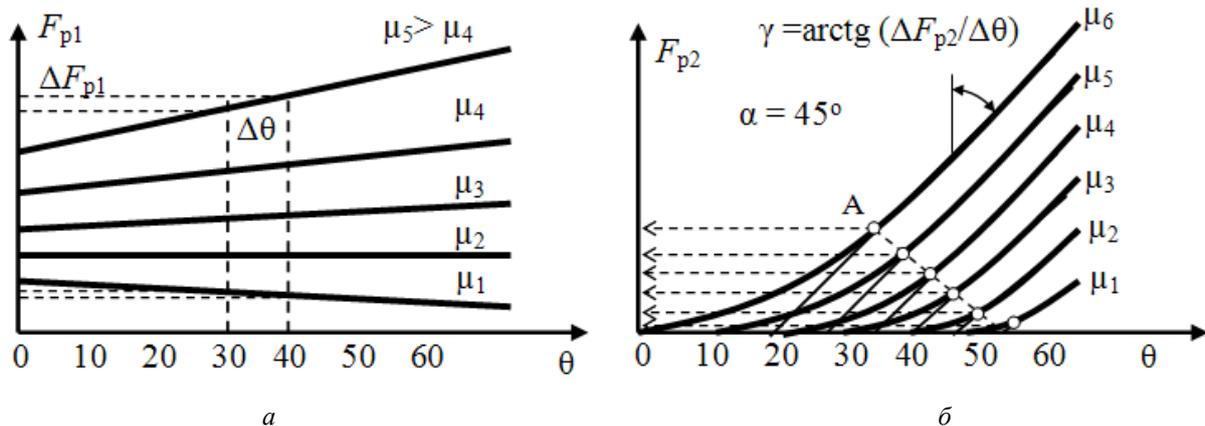


Рис. 5. Зависимость резонансных частот от меридианального угла при увеличении магнитной проницаемости наполнителя среды над УВЗ: *a* — электронный циклотронный; *б* — нижегибридный

На рис. 5, *a* приведена зависимость электронного циклотронного резонанса взаимодействия ЭМВ и АС при изменении меридианального угла наклона геомагнитного поля и магнитной проницаемости наполнителя, когда азимутальный угол остается постоянным ( $\alpha=45^\circ$ ). Как видно, если  $\mu^*$  не отличается от магнитной проницаемости воздуха, то при увеличении угла наклона  $\theta$  резонансная частота убывает с крутизной 10 кГц/град. Увеличение абсолютной магнитной проницаемости на порядок приводит к незначительной крутизне характеристики (1 кГц/град). Дальнейшее увеличение  $\mu$  сопровождается увеличением крутизны характеристики. При относительной магнитной проницаемости 8,5 крутизна составляет  $s=\Delta F_{p1}/\Delta\theta=42$  кГц/град.

Зависимость нижегибридного резонанса взаимодействия ЭМВ и АС от меридианального угла наклона геомагнитного поля и магнитной проницаемости наполнителя, когда азимутальный угол остается постоянным, содержит начальный квадратичный и линейный участок (рис. 5, *б*). При аппроксимации полученных кривых ломаной линией оказывается, что точки излома (набор точек А на рис. 5, *б*) имеют линейный характер при изменении  $\mu$ . Заметим, что угол наклона линейного участка характеристики соответствует азимутальному углу  $\alpha$ .

### Результаты и их обсуждение

Проведенные численные исследования процесса взаимодействия ЭМВ и АС, возникающей над УВЗ при вариациях величины поля подмагничивания и магнитной проницаемости наполнителя среды с анизотропными свойствами, показали следующие результаты.

Увеличение значения поля подмагничивания в выбранной модели анизотропного образования при воздействии гармонической ЭМВ приводит к смещению циклотронного электронного резонанса в область больших частот. На электронный плазменный резонанс изменение магнитной напряженности оказывает несущественное влияние.

Незначительное увеличение относительной проницаемости приводит к увеличению частоты циклотронного электронного резонанса. Существенное увеличение магнитной проницаемости приводит к смещению этого резонанса в область более высоких частот, а также проявлению дополнительного — нижегибридного резонанса. При относительно больших магнитных проницаемостях поведение частотной зависимости напоминает магнитную характеристику проницаемости, соответствующую эффекту продольного феррорезонанса.

Установлено влияние меридианального угла магнитного поля на степень взаимодействия ЭМВ и АС над УВЗ. При увеличении этого угла частота изменяется с фиксированной крутизной, зависящей от магнитной проницаемости наполнителя.

Нелинейный характер зависимости нижегибридного резонанса взаимодействия ЭМВ и АС от меридианального угла наклона геомагнитного поля аппроксимируется квадратичным и линейным участками. Пороговое значение частоты, разделяющего эти участки и угол наклона линейного участка, определяется азимутальным углом наклона магнитного поля.

Полученные результаты должны учитываться при реализации методов электромагнитной разведки УВЗ.

## **INFLUENCE OF MAGNETIZATION FIELD SIZE AND CHANGES OF MAGNETIC PERMEABILITY OF ENVIRONMENT ABOVE A HYDROCARBON DEPOSIT ON INTERACTION WITH THE ELECTROMAGNETIC WAVE**

D.V. GOLOLOBOV

### **Abstract**

Influence of size and inclination of geomagnetic field and change of magnetic permeability of filler on resonant interaction of environment above a hydrocarbon deposit and a harmonious electromagnetic wave is investigated. It is shown that insignificant variations of these parameters lead to essential changes of resonant frequencies of interaction of a wave and anisotropic formation above a deposit.

### **Литература**

1. *Гололобов Д.В.* // Докл. БГУИР. 2008. № 1. С. 54–64.
2. *Гололобов Д.В.* // Докл. БГУИР. 2008. №6. С. 90–95.
3. *Розенберг В.Н.* // Разведочная геофизика. 1991. № 112. С. 35.
4. *Гололобов Д.В., Москвичев В.Н.* // Радиотехника и электроника. Минск. 1994. Вып. 22. С. 69–74.