

УДК 550.837.75:553.98

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ В РЕЖИМЕ ДВУХЧАСТОТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

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

Демонстрируются результаты моделирования взаимодействия электромагнитных волн в режиме двухчастотного сигнала с анизотропной средой над углеводородной залежью. Представлена модель залежей нефти и газа. Приведен тензор диэлектрической проницаемости среды над углеводородными залежами в режиме двухчастотного сигнала. Исследовано поведение компонентов тензора в зависимости от вариации частоты столкновений электронов с тяжелыми частицами. Представлены результаты расчетов частот, на которых диэлектрическая проницаемость среды обращается в ноль. Проведенное моделирование способствует оптимизации радиотехнических систем для поиска и оконтуривания границ залежей. Результаты исследований могут быть использованы в области геофизики, радиолокации.

**Введение.** В геологии и геофизике проведение экспериментальных исследований залежей полезных ископаемых сопряжено с определенными проблемами, связанными с пространственным размещением объекта испытаний и организации, проводящей исследования. Проведение опытов в полевых условиях связано с материальными, финансовыми и транспортными проблемами.

Проведение физического моделирования в геофизике связано с большими трудностями, так как прежде всего нарушается геометрическое подобие натурального объекта и модели. Объем породы, исследуемой в лабораторных условиях, не соответствует ее объему в природных условиях залегания, который изучается геофизическими методами в скважинных вариантах и особенно методами полевой геофизики. Сложность физического моделирования горных пород заключается также в том, что в природных условиях исследуемый объект не является изолированной системой и занимает определенное пространственное положение среди других пород, обладающих иными геофизическими характеристиками, и находится с ними в физико-химическом и термодинамическом взаимодействии. При извлечении породы с той или иной глубины с конкретными термодинамическими условиями на поверхность (в атмосферные условия) нарушается внутренняя структура горной породы, что оказывает значительное влияние на её геофизические характеристики. Нарушение первоначальной структуры породы связано с образованием в ней дополнительной трещиноватости, усыханием и растрескиванием глинистого цемента, изменением порового объема породы за счет обратимых и необратимых деформаций скелета и т.п. И тем не менее для изучения основных закономерностей поиска полезных ископаемых используется моделирование физических процессов.

**Теоретический анализ.** В данной работе проводится моделирование процессов в анизотропных средах (АС), образующихся над залежами полезных ископаемых, физические процессы в которых аналогичны процессам в плазмоподобных средах. Особенно актуальны данные исследования для поиска и оконтуривания АС, образующихся над местонахождением нефти и газа (углеводородов). Модель углеводородной залежи (УВЗ) представлена на рисунке 1 [1].

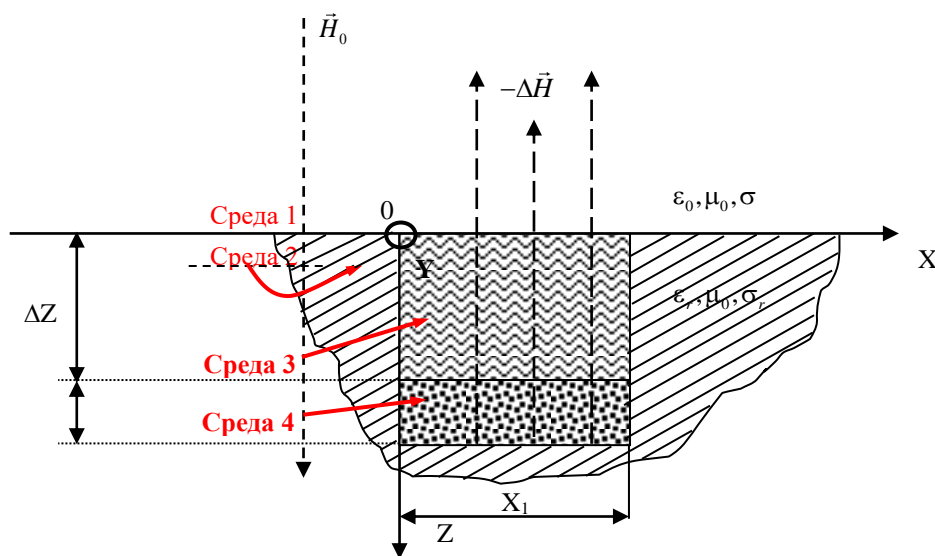


Рис. 1. Модель разреза геологического профиля над углеводородной залежью

Окружающее углеводороды пространство (среда 1) находится в химическом, физическом и термодинамическом равновесии с контуром вмещающих пород (среда 2). Это обстоятельство выполняется для среды вне контура залежи нефти и газа. Вмещающие породы в этой области содержат твердый кристаллический скелет пород, пронизанный электролитом верхних растворов солей и проводящими включениями за счет минералов с электронной проводимостью. Над УВЗ (среда 4) под воздействием высоких температур и пластового давления происходят поляризационные процессы, и на границе контакта с окружающей углеводороды средой 2 образуется промежуточная область (среда 3), характеризующаяся избытком свободных электронов, преобладанием восстановительных процессов, связанных с переходом химических элементов осадочных пород в низковалентное состояние. Данные процессы приводят к появлению геомагнитной аномалии  $\Delta \vec{H}$  над залежью, в результате среда над углеводородами принимает характер АС. Применение колебаний сложной формы для определения границ и идентификации УВЗ позволяет повысить точность и достоверность геологоразведочных работ.

Современные электромагнитные методы (ЭММ) поиска предполагают наличие хорошей теоретической базы анализа взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) со средой над УВЗ, позволяющей осуществлять качественную и количественную оценку электродинамических параметров сред, что лежит в основе оптимизации амплитудно-временных параметров сигналов, используемых для поиска и оконтуривания границ УВЗ [2].

Применение в геофизике ЭММ с использованием двухчастотных сигналов [3; 4] позволяет повысить чувствительность аппаратуры и производительность поиска залежей нефти и газа.

Проведем анализ взаимодействия ЭМВ со средой над УВЗ при использовании двухчастотного сигнала вида

$$\vec{e}(t) = \vec{e}_1(t) + \vec{e}_2(t) = E_1 \cos \omega_1 t + E_2 \cos \omega_2 t, \quad (1)$$

где  $E_1, E_2, \omega_1, \omega_2$  соответственно амплитуды и частоты двух ЭМВ.

Тензор диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для данного вида взаимодействия имеет вид [3]:

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

Здесь  $\epsilon_r, \sigma_r$  – соответственно диэлектрическая проницаемость и проводимость среды над УВЗ:

$$\tilde{\omega}_1 = \omega_2 \cdot [k_\omega + k_E^2 + k_E \cdot (1 - k_\omega) \cdot \cos \alpha t]; \quad (3)$$

$$k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad (4)$$

$$k_E = \frac{E_2}{E_1}, \quad (5)$$

где  $\alpha = \omega_2 - \omega_1$ ;  $\omega_{ni}, \omega_{ri}$  – плазменная и гиротропная частоты;  $v_i$  – частоты столкновений частиц;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума.

**Результаты и их обсуждение.** Рассмотрим влияние на параметры тензора диэлектрической проницаемости среды на УВЗ частоты столкновений электрона с тяжелыми частицами, которая для реальных местонахождений углеводородов лежит в диапазоне  $(0,3...1,5) \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}$ .

Каждую из компонент тензора можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_1 &= \epsilon'_1 - j\epsilon''_1; \\ \dot{\epsilon}_2 &= \epsilon'_2 - j\epsilon''_2; \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon'_3 - j\epsilon''_3,\end{aligned}\tag{6}$$

где  $\epsilon'_1, \epsilon'_2, \epsilon'_3$  – диэлектрические проницаемости;  $\epsilon''_1, \epsilon''_2, \epsilon''_3$  – диэлектрические потери для каждой из составляющих.

Анализ составляющих тензора диэлектрической проницаемости по всем трем координатным осям позволяет повысить информативность ЭММ поиска УВЗ. Моделирование характера физических процессов в АС приводит к оптимизации характеристик ЭМВ, распространяющихся над залежью. Учет поведения как вещественных, так и мнимых частей тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ позволяет определить характер импеданса.

Зависимости вещественных частей диэлектрической проницаемости среды над УВЗ приведены на рисунках 2 и 3.

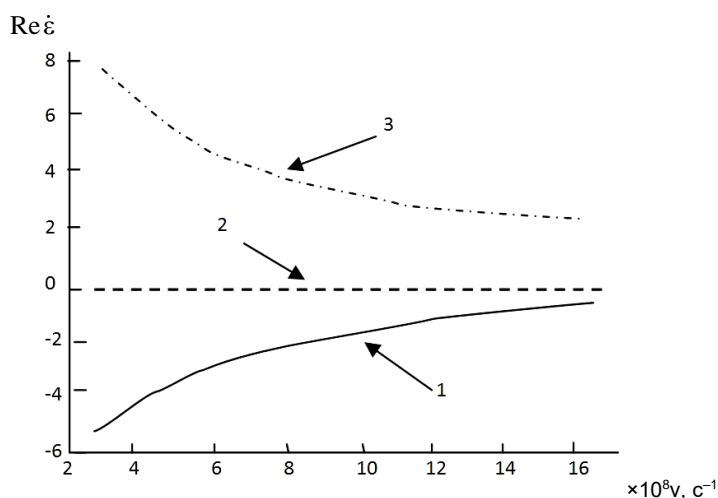


Рис. 2. Зависимость вещественных частей диэлектрической проницаемости от частоты столкновений при  $k_0 = 0,01$ :

1 – для  $\epsilon'_1$ ; 2 – для  $\epsilon'_2$ ; 3 – для  $\epsilon'_3$

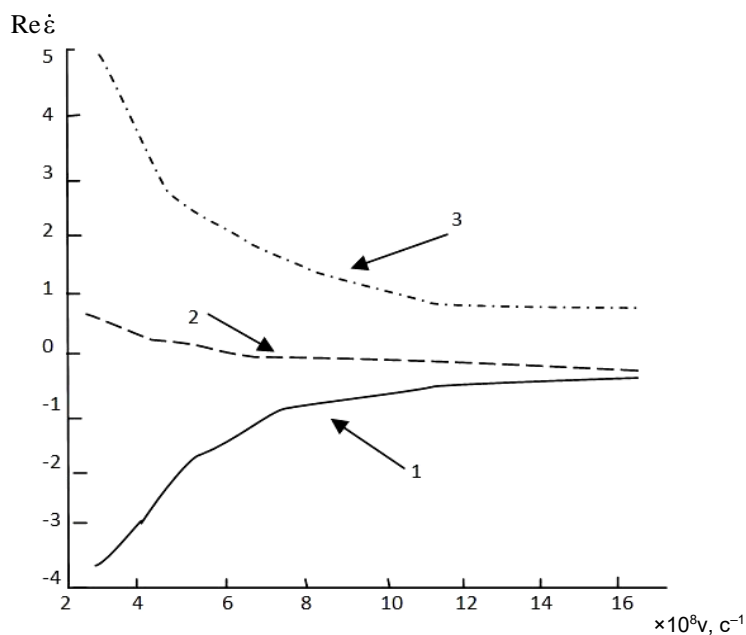


Рис. 3. Зависимость вещественных частей диэлектрической проницаемости от частоты столкновений при  $k_0 = 0,005$ :

1 – для  $\epsilon'_1$ ; 2 – для  $\epsilon'_2$ ; 3 – для  $\epsilon'_3$

Как видно из полученных зависимостей, составляющая тензора  $\epsilon'_1$  увеличивается с ростом частоты столкновений, причем при высоких значениях  $\nu$  величина  $\epsilon'_1$  стремится к нулю.

Вариация параметра  $k_\omega$  оказывает влияние на модуляцию вещественной части диэлектрической проницаемости.

На поведение соответствующего тензора  $\epsilon_2$  частота столкновений практически не влияет. Значение  $\epsilon'_2 \approx 0$  на всем отрезке исследуемых величин  $\nu$ , за исключением низких величин частоты столкновений, где наблюдается небольшая модуляция данной характеристики. Составляющая тензора  $\epsilon'_3$  уменьшается с ростом частоты столкновений. Изменение параметра  $k_\omega$  оказывает влияние на диэлектрическую проницаемость.

Зависимости мнимых частей диэлектрической проницаемости приведены на рисунках 4 и 5.

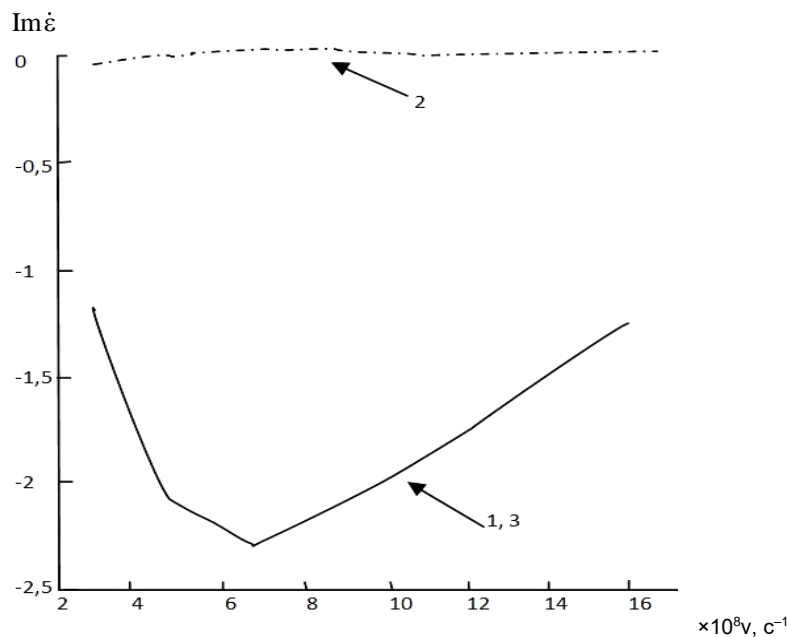


Рис. 4. Зависимость мнимых частей диэлектрической проницаемости от частоты столкновений при  $k_\omega = 0,01$ :

1 – для  $\epsilon''_1$ ; 2 – для  $\epsilon''_2$ ; 3 – для  $\epsilon''_3$

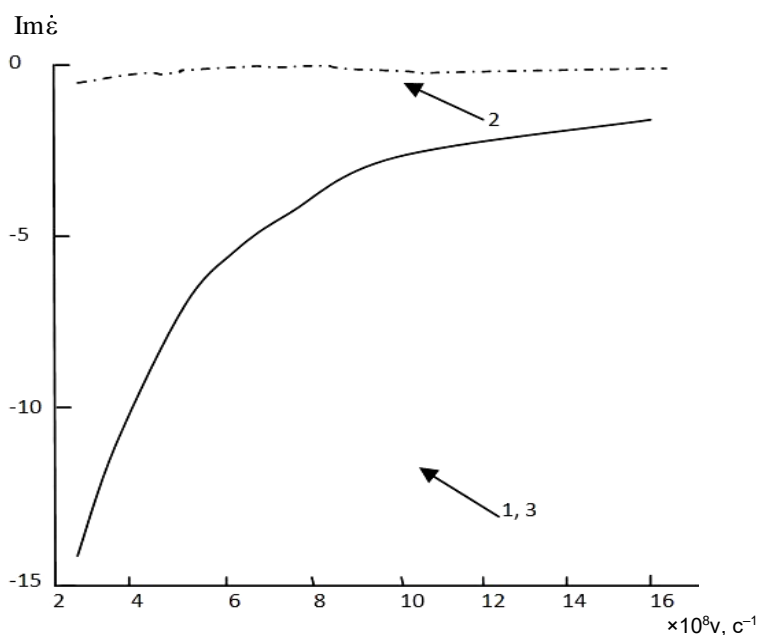


Рис. 5. Зависимость мнимых частей диэлектрической проницаемости от частоты столкновений при  $k_\omega = 0,05$ :

1 – для  $\epsilon''_1$ ; 2 – для  $\epsilon''_2$ ; 3 – для  $\epsilon''_3$

Численные исследования составляющих тензора диэлектрической проницаемости для единичного коэффициента ионизации

$$k_u = \frac{N_u}{N_e}, \quad (7)$$

где  $N_u$  и  $N_e$  – концентрации ионов и электронов, определяющих плазменную частоту АС,

$$\omega_{ni} = g \sqrt{\frac{N_i}{m\varepsilon_0}} \quad (8)$$

свидетельствуют о наличии резонансных свойств среды над залежью.

В формуле (8)  $g$  и  $m$  – соответственно заряд и масса частиц.

Как видно из рисунков 4, 5, для  $\varepsilon_1''$  и  $\varepsilon_3''$  характерны точки экстремума, соответствующие минимуму этих величин при частоте столкновения  $\nu \approx 0,7 \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}$  и  $k_\omega = 0,01$ . Для  $\varepsilon_2''$  при  $k_\omega = 0,01$  свойственно плавное увеличение с ростом величины  $\nu$ . При  $k_\omega = 0,05$  для всех трех величин  $\varepsilon_1'', \varepsilon_2''$  и  $\varepsilon_3''$  наблюдается их плавное увеличение с ростом частоты столкновений. Для обоих случаев (при  $k_\omega = 0,01$  и при  $k_\omega = 0,05$ ) зависимости  $\varepsilon_1''$  и  $\varepsilon_3''$  от величины  $\nu$  имеют близкие по величине значения и сливаются в один график.

С точки зрения электродинамики представляет большой интерес определение частот, на которых выполняются условия  $\text{Re} \dot{\varepsilon}_R = 0$ , где  $\dot{\varepsilon}_R = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2$ .

Результаты анализа представлены в таблице.

Значения частот, удовлетворяющих условию  $\text{Re} \dot{\varepsilon}_R = 0$

Параметр $k_\omega$	Параметр $k_E$	Значение частоты $f_{2n}$ , Гц	Значение частоты $f_{2g}$ , Гц
0,05	$10^{-1}$	$0,98 \cdot 10^7$	$1,15 \cdot 10^9$
0,05	$10^{-3}$	$1,88 \cdot 10^7$	$2,25 \cdot 10^9$
0,05	$10^{-6}$	$1,92 \cdot 10^7$	$2,31 \cdot 10^9$
0,02	$10^{-1}$	$1,00 \cdot 10^7$	$1,18 \cdot 10^9$
0,02	$10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^7$	$2,33 \cdot 10^9$
0,02	$10^{-6}$	$2,00 \cdot 10^7$	$2,35 \cdot 10^9$
0,01	$10^{-1}$	$1,10 \cdot 10^7$	$2,08 \cdot 10^9$
0,01	$10^{-3}$	$8,86 \cdot 10^7$	$0,95 \cdot 10^9$
0,01	$10^{-6}$	$9,02 \cdot 10^7$	$1,85 \cdot 10^9$

Частота  $f_{2n}$  соответствует меньшему значению частоты, при которой действительная часть  $\varepsilon_R$  равняется нулю, а  $f_{2g}$  – большему.

Результаты моделирования свидетельствуют об изменении резонансных свойств среды над УВЗ при вариации характеристик зондирующей ЭМВ.

Использование радиоэлектронной аппаратуры с возможностью контролирования параметров  $k_\omega$  и  $k_E$  позволяет повысить информативность методов поиска. Качественная и количественная оценка электродинамических характеристик сред дает возможность оптимизации параметров сигналов для зондирования углеводородов. При более низких параметрах  $k_E$  и  $k_\omega$  частоты перехода смещаются вправо по частотной оси.

**Заключение.** Проведено моделирование физических процессов среды над УВЗ в режиме двух-частотного сигнала. Рассмотрено влияние частоты столкновений частиц на компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды над углеводородами. Приведены оптимальные значения частот зондирующего сигнала, на которых эффект от взаимодействия проявляется наиболее интенсивно.

Проведенный теоретический анализ позволил дать рекомендации по использованию наиболее эффективных соотношений между параметрами ЭМВ с точки зрения оптимального обнаружения.

Результаты исследований в целом могут быть использованы в области радиолокации, поисковой геофизике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Москвичев, В.Н. Исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью / В.Н. Москвичев // Радиотехника и электроника. – Минск: Выш. шк., 1989. – Вып. 18. – С. 91 – 96.
2. Фролов, А.Д. Поиски нефтегазовых месторождений радиоволновыми методами / А.Д. Фролов, В.Д. Озеров // Региональная разведка и промысловая геофизика. – М.: ВИЭМС, 1969. – № 19. – С. 32.
3. 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. навук. – 2002. – № 1. – С. 49 – 54.
4. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск: Бестпринт, 2009. – 186 с.

Поступила 04.01.2013

#### MODELLING OF PHYSICAL PROCESSES IN THE ANISOTROPIC MEDIUM IN THE MODE OF TWO-FREQUENCY INTERACTION

V. YANUSHKEVICH

*Results of modelling of the interaction of electromagnetic waves in the mode of a two-frequency signal with anisotropic medium over hydrocarbon deposit are presented. The model of oil and gas deposits is shown. Tensor of dielectric conductivity of medium over hydrocarbon deposits in the mode of two-frequency signal is given. Conduct of the components of the tensor depending on the variation of the collision rate of electrons with heavy particles is studied. Best values of frequencies of a probing signal on which the effect from interaction is shown most intensively are given. As a result of the carried-out theoretical analysis recommendations about the usage of the most efficient ratios between parameters of electromagnetic waves from the point of view of optimum detection can be made. Results of the research can be used in the field of radiolocation, search geophysics.*