

ISSN 2071-2227

E-ISSN 2223-2362



# НАУКОВИЙ ВІСНИК

Національного  
гірничого  
університету

2

2012

Головний редактор –

Г.Г. Півняк

Заступники

головного редактора –

О.С. Бешта, П.І. Пілов, О.М. Шашенко

Відповідальний секретар –

Т.В. Барна

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:  
(Україна)

А.Д. Алексеев, І.В. Багрова, С.Є. Блохін, В.І. Бондаренко, А.Ф. Булат, Б.С. Бусигін, Б.В. Виноградов, О.С. Галушко, В.І. Голінько, А.І. Горова, С.С. Гребьонкін, Б.А. Грядущий, І.Л. Гуменик, Р.П. Дідик, А.О. Задоя, Є.П. Захаров, М.О. Ільяшов, Г.О. Козлакова, Є.В. Кочура, О.М. Кузьменко, В.В. Лукінов, Л.В. Новикова, Ю.Є. Петруня, В.Ф. Приходченко, В.В. Приходько, В.Ю. Пушкін, В.В. Радченко, Т.Б. Решетілова, А.М. Росенко, І.О. Садовенко, В.О. Салов, В.І. Самуся, В.В. Слесарєв, В.В. Ткачов, К.Ф. Тяпкін, В.П. Франчук, Ю.М. Халімендик, Ю.Т. Хоменко, Л.Н. Ширін, Ф.П. Шкрабець

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ  
РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

М.Д. Венедиктов (*Московський технічний університет зв'язку та інформатики, РФ*); Р. Вюрзлін (*Есслінгенський університет прикладних наук, ФРН*); Г. Грулер (*Ройтлінгенський університет, ФРН*); К. Дребенштедт (*Технічний університет „Фрайберзька гірнична академія“, ФРН*); Ю. Дубінська (*Головний інститут гірничої справи, Республіка Польща*); А. Земба (*Краківська гірничо-металургійна академія, Республіка Польща*); В.В. Кармазин (*Московський державний гірничий університет, РФ*); Б.А. Картозія (*Московський державний гірничий університет, РФ*); Є. Кіцкі (*Науково-технічний університет „Краківська гірничо-металургійна академія“, Республіка Польща*); А.В. Корчак (*Московський державний гірничий університет, РФ*); Т. Майхерчик (*Науково-технічний університет „Краківська гірничо-металургійна академія“, Республіка Польща*); Н. Нойбергер (*Есслінгенський університет прикладних наук, ФРН*); С. Прусек (*Головний інститут гірничої справи, Республіка Польща*); Л.О. Пучков (*Московський державний гірничий університет, РФ*); Б. Ракішев (*Казахський національний технічний університет, Республіка Казахстан*); Р. Сінггал (*Університет Калгарі, Канада*); О. Стovas (*Норвезький університет природничих наук та технології, Королівство Норвегія*); С.Г. Страданченко (*Південно-Російський державний технічний університет, РФ*); Д. Стургул (*Університет Аделаїди, Австралійський Союз*); А. Тайдусь (*Науково-технічний університет „Краківська гірничо-металургійна академія“, Республіка Польща*); Я. Таліандер (*Університет Заходу, Королівство Швеція*); С. Форліч (*Вроцлавська вища банківська школа, Республіка Польща*); В. Чарнецкі (*Есслінгенський університет прикладних наук, ФРН*); М. Шмідт (*Бранденбурзький технічний університет, ФРН*)

Журнал зареєстровано в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Index Copernicus International, реферується у реферативному журналі ВІНІТІ РАН, Росія.

Передплата здійснюється в поштових відділеннях України за „Каталогом періодичних видань“ (передплатний індекс: 89166) і в передплатних агентствах „Укрінформнаука“ (індекс: 10107) та „Ідея“ (індекс: 17736).

Комп'ютерна верстка К.О. Кислова. Коректор М.Т. Сисун.

Журнал підписано до друку за рекомендацією вченої ради Державного вищого навчального закладу „Національний гірничий університет“ (протокол №3 від 27.03.2012 року)

Журнал зареєстровано

у Міністерстві юстиції України. Реєстраційний номер КВ № 17742-6592ПР від 27.04.2011. Наклад 400 прим. Зам. №3.

Підписано до друку 12.04.2012. Формат 60x90/8. Ум. друк. арк. 20. Папір офсетний.

Засновник та видавець

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ. „Свідоцтво суб'єкта видавничої справи“ ДК №1842 від 11.06.2004

Адреса видавця та редакції:

49000, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19, корпус 4, к. 34  
Тел.: (056) 373 08 47, e-mail: nv.ngu@ukr.net, www.nvngu.in.ua

Виготовлення:

ПП КФ „Герда“. 49000, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 60.  
„Свідоцтво суб'єкта видавничої справи“ ДК №397 від 03.04.2001



State Higher Educational Institution  
"National Mining University"

# SCIENTIFIC BULLETIN

of National  
Mining University

Scientific and technical journal

No 2 (128) • 2012

Bi-Monthly statement • Founded in September 1998

Geology

Mining

Solid-state physics, mineral processing

Geotechnical and mining mechanical engineering,  
machine building

Electrical complexes and systems

Power supply technologies

Environmental safety, labour protection

Information technologies,  
systems analysis and administration

Economy and management

---

Dnipropetrovsk

2012

УДК 550.83

А.И. Ингеров<sup>1</sup>, канд. геол.-мин. наук,  
И.А. Ингеров<sup>2</sup>,  
А.Л. Лозовой<sup>3</sup>, канд. геол.-мин. наук, доцент,  
Я.В. Мендрий<sup>3</sup>

1 – Компания “Phoenix Geophysics” Ltd., г. Торонто, Канада  
2 – Компания “Advanced Geophysical Operations and Services”  
Inc., г. Торонто, Канада  
3 – Государственное высшее учебное заведение  
„Национальный горный университет“, г. Днепропетровск,  
Украина, e-mail: lozovoy\_dp\_ua@mail.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АМПЛИТУДНЫХ И ФАЗОВЫХ КРИВЫХ ИНДУКЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С ЕСТЕСТВЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КАРТИРОВАНИЯ

A.I. Ingerov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Geol.-Min.),  
I.A. Ingerov<sup>2</sup>,  
A.L. Lozovoy<sup>3</sup>, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Assoc. Prof.,  
Ya.V. Mendriy<sup>3</sup>

1 – “Phoenix Geophysics” Ltd., Toronto, Canada  
2 – “Advanced Geophysical Operations and Services” Inc.,  
Toronto, Canada  
3 – State Higher Educational Institution “National Mining Univer-  
sity”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: lozovoy\_dp\_ua@mail.ru

## APPLICATION OF AMPLITUDE AND PHASE CURVES RECEIVED BY INDUCTION SOUNDING WITH NATURAL SOURCES FOR THE PURPOSE OF MAPPING

**Цель.** Использование интерференционных экстремумов стандартных (амплитудных и фазовых) кривых электромагнитных зондирований с естественными источниками в целях картирования опорных высокоомных геоэлектрических горизонтов.

**Методика.** На основании результатов одномерного и двумерного физико-математического моделирования изучалось поведение координат интерференционных экстремумов амплитудных и фазовых кривых в зависимости от изменения параметров геоэлектрического разреза. Для устранения статического смещения уровня кривых, обусловленного влиянием приповерхностных неоднородностей разреза, привлекались данные электрического каротажа и сейсморазведки.

**Результаты.** Установлены эмпирические зависимости для определения параметров геоэлектрического разреза по наблюдаемым периодам интерференционных экстремумов амплитудных и фазовых кривых магнитотеллурического зондирования.

**Научная новизна.** Абсциссы интерференционных экстремумов стандартных кривых индукционных зондирований с естественными источниками тесно связаны с параметрами геоэлектрического разреза.

**Практическая значимость.** Методика может быть использована при экспресс-интерпретации практических данных электромагнитных зондирований для изучения морфологии целевых горизонтов на месторождениях нефти и газа.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, индукционное зондирование, амплитудные и фазовые кривые, кажущееся сопротивление, годограф электромагнитной волны

С широкомасштабным внедрением в практику магнитотеллурического зондирования (МТЗ) аппаратуры пятого поколения [1], резко возросла производительность полевых работ и точность получаемых материалов. В комплексе с развитием компьютерной техники и созданием новых программ обработки и инверсии данных, это создает новые возможности в решении самых различных геологических задач. Существенным сдерживающим фактором при этом является статическое смещение уровня амплитудных кривых. Ниже, на основании анализа двухслойных

кривых МИЗЕИ с высокоомным основанием, предлагается методика использования особых точек амплитудных и фазовых кривых МТЗ для контроля поведения кровли высокоомного горизонта.

Для двухслойных кривых с высокоомным опорным горизонтом на амплитудной кривой, построенной в билогарифмической системе координат  $(\sqrt{T}, \rho_T)$ , распространенной в странах бывшего СССР, наблюдаются: левая горизонтальная асимптота, значение  $\rho_T$  для которой равно  $\rho_1$ . Эта асимптота продолжается небольшим пологим максимумом, переходящим в более яркий минимум. Далее следует восходящая ветвь, которая плавно переходит в правую горизонтальную

асимптоту. Значение кажущегося сопротивления на которой равно  $\rho_2$ . Крутизна восходящей ветви зависит от отношения сопротивления двух слоев  $\rho_2/\rho_1$ . При больших значениях отношения  $\rho_2/\rho_1$  (более 1000) восходящая ветвь составляет с осью абсцисс угол в  $63^\circ 26'$  ( $S$ -асимптоты). Уравнение данной асимптоты в координатах  $(\sqrt{T}, \rho_T)$  имеет вид [2]

$$\rho_T = (356 \cdot \frac{\sqrt{T}}{S})^2. \quad (1)$$

Данная асимптота отсекает на линии  $\rho_T = 1$  точку на периоде  $T_s$ , связанную с суммарной продольной проводимостью надпорного слоя  $S$  соотношением

$$S = 356 \cdot \sqrt{T_s}. \quad (2)$$

Пологий малоамплитудный максимум и более четко выраженный минимум перед восходящей ветвью амплитудной кривой, рассмотренные выше, являются интерференционными экстремумами. Они связаны с взаимодействием прямой плоской волны, падающей на земную поверхность, и волны, отраженной от контрастных границ в геоэлектрическом разрезе. Этим свойством индукционные зондирования отличаются от геометрических, где подобные эффекты отсутствуют. Первый из индукционных экстремумов ( $a_1$  на рис. 1,  $a$ ) – относительно слабый. Это свидетельствует о том, что на периоде  $T_1$  прямая и отраженная волны находятся в фазе и их взаимодействие приводит к увеличению суммарного сигнала. Второй экстремум – более яркий минимум ( $a_2$  на рис. 1,  $a$ ), предшествующий восходящей ветви, отражает тот факт, что на этом периоде две волны находятся в противофазе. Координаты этого минимума использовались для вычисления глубины залегания кровли высокоомного горизонта [2, 3]. На более длинных периодах заметных интерференционных явлений не наблюдается, так как длина волны превышает мощность первого слоя.

Амплитудная и фазовая кривые связаны между собой соотношением Гильберта [3]. То есть фазовая кривая является логарифмической производной амплитудной кривой. Она более выразительно и с некоторым опережением отражает характерные особенности формы амплитудной кривой. Для двухслойного разреза фазовая кривая имеет левую горизонтальную асимптоту  $-45^\circ$  и два интерференционных экстремума – пологий минимум ( $f_1$  на рис. 1,  $b$ ) и более четкий максимум ( $f_2$  на рис. 1,  $b$ ), длинную и крутую нисходящую ветвь, пологий минимум ( $f_3$  на рис. 1,  $b$ ). Этот минимум соответствует максимальному градиенту амплитудной кривой, за которым следует очень плавная восходящая ветвь, стремящаяся к горизонтальной асимптоте  $-45^\circ$ . Крутизна нисходящей ветви и координаты последующего минимума, как будет показано ниже, зависят от отношения сопротивлений второго и первого слоя ( $\rho_2/\rho_1$ ), а также от суммарной продольной проводимости первого слоя ( $S_1$ ).

Трехслойная амплитудная кривая, кроме перечисленных экстремумов, имеет в правой части максимум ( $a_3$  на рис. 1,  $c$ ), связанный с началом существенного

влияния на ход кривой положения границы и величины удельного сопротивления третьего (низкоомного) слоя. За максимумом следует нисходящая ветвь, крутизна и длина которой определяются, в основном, соотношением сопротивлений третьего и второго слоев. При больших значениях  $\rho_2/\rho_3$  угол падения ниспадающей ветви стремится к  $-63^\circ 26'$ . Эта ниспадающая ветвь получила название  $H$ -асимптоты, уравнение которой имеет вид

$$\rho_T = (\frac{H}{356 \cdot \sqrt{T}})^2. \quad (3)$$

Соответственно, асимптота  $H$  отсекает на горизонтальной линии  $\rho_T = 1$  точку, абсцисса которой ( $T_H$ ) связана с мощностью надпорной толщи ( $h_1 + h_2$ ) выражением

$$h_1 + h_2 = 356 \cdot \sqrt{T_H}. \quad (4)$$

За ниспадающей ветвью следует правая горизонтальная асимптота, значение сопротивления которой равно  $\rho_3$ . Следует отметить, что, в отличие от первых двух экстремумов амплитудной кривой, максимум, связанный с наличием третьего низкоомного слоя, не является интерференционным. Его координаты тесно связаны с положением границы  $h_1 + h_2$  и соотношением сопротивлений второго и третьего слоев (4).

На рис. 1, описанные выше кривые, приведены как функции периода  $T$ , т.е. в системах координат  $(T, \rho_T)$  и  $(T, \varphi_T)$  соответственно. Подобная система изображения кривых принята в западных странах и при возросшей точности определения кривых, а также детальности их описания, имеет явное преимущество. Здесь кривые более вытянуты по горизонтальной оси, асимптоты  $S$  и  $H$  приобретают наклон  $45^\circ$ , а формулы (1)–(4) приобретают вид

$$\rho_T = (356 \cdot \frac{T}{S})^2; \quad (5)$$

$$S = 356 \cdot T_s;$$

$$\rho_T = (\frac{H}{356 \cdot T})^2;$$

$$h_1 + h_2 = 356 \cdot T_H.$$

Использование асимптот  $S$  и  $H$  удобный инструмент для оценки суммарных параметров разреза. Однако проведение данных асимптот для конкретных кривых носит неоднозначный характер. Поэтому более привлекательным выглядит для более точной оценки параметров геоэлектрического разреза использование координат особых точек, то есть точек легко опознаваемых на практических кривых МИЗЕИ. Исследуем, как меняется положение этих точек при изменении параметров геоэлектрического разреза.

На рис. 2  $a, b$  показано изменение амплитудных и фазовых кривых МИЗЕИ, соответственно, при последовательном увеличении  $h_1$ . В этом случае изменяются как величина  $H$ , так и величина  $S = H/\rho$ . Как амплитудные, так и фазовые кривые, не изменяя формы, сдвигаются вправо по оси  $T$  пропорцио-

нально изменению  $H \times S$ . То есть ординаты экстремумов  $a_1, a_2, f_1, f_2, f_3$  не изменяются, в то время как

их абсциссы изменяются пропорционально величине  $H \times S$ .

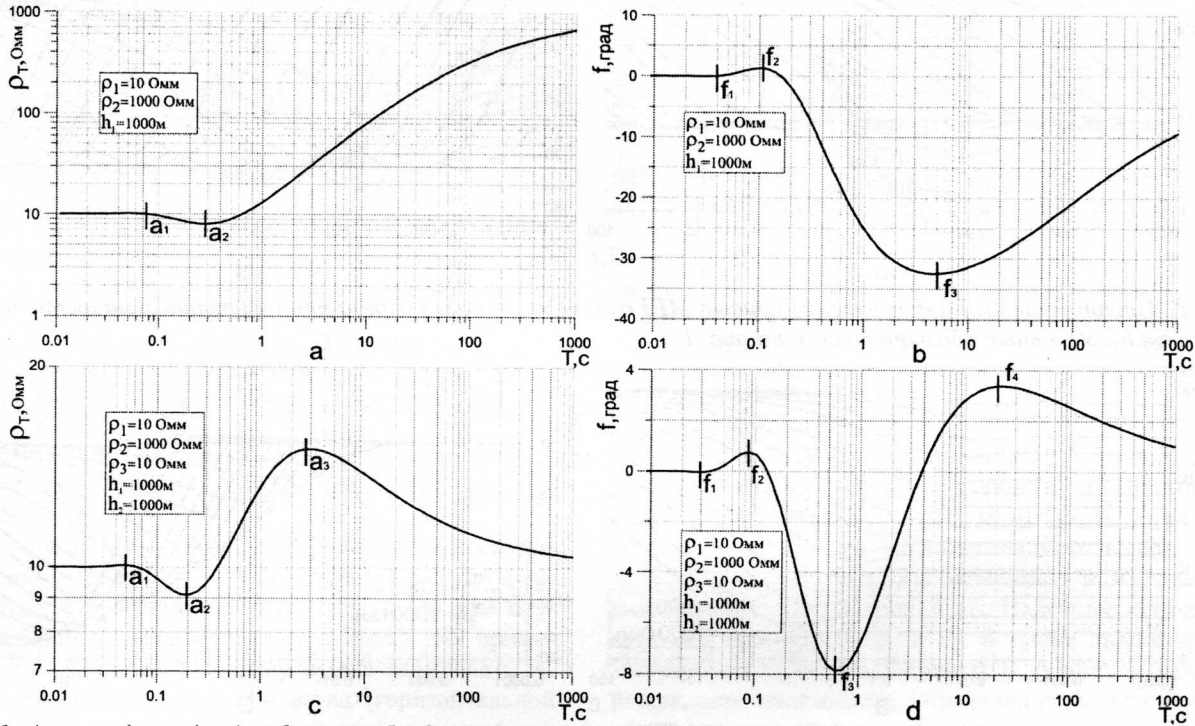


Рис. 1. Амплитудные (а, с) и фазовые (b, d) кривые МТЗ для двухслойного (а, b) и трехслойного (с, d) разрезов как функции периода:  $\rho_T, f$  и  $T$  – соответственно, амплитуда, фаза и период регистрации электромагнитной волны

При уменьшении величины  $\rho_1$ , амплитудные кривые сдвигаются вправо по оси  $T$ , пропорционально  $H \times S$ , и вниз по оси  $\rho_T$ , пропорционально значению  $\rho_1$ . При этом форма кривых существенно изменяется в области интерференционных экстремумов, а фазовые кривые существенно изменяют форму в несколько более широкой области периодов. Здесь существенно меняется положение и экстремума  $f_3$  (рис. 3). Причем очевидным фактом является то, что чем больше отношение  $\rho_2$  к  $\rho_1$ , тем более ярко проявляются интерференционные экстремумы, а также крутизна нисходящей ветви и координаты минимума на фазовой кривой (рис. 3, б).

Авторами установлена следующая связь абсциссы интерференционного минимума ( $a_2$ ) амплитудных кривых с параметрами двухслойного разреза

$$h_1 = \sqrt{0,035 \cdot 10^7 T_{a_2} \cdot \rho_1} \quad (6)$$

Выражение (6) может быть преобразовано к виду

$$h_1 \cdot S_1 = 0,035 \cdot 10^7 \cdot T_{a_2} \quad (7)$$

Формула (7) по своей структуре подобна формуле для определения эхо-глубины по сейсмическим данным [4]

$$h/V = \frac{t_0}{2},$$

где  $V$  – скорость распространения упругой волны;  $h$  – глубина до отражающей границы;  $t_0$  – удвоенное время пробега по нормали к отражающей границе.

Таким образом  $h_1$  в (7) – глубина залегания границы, а  $S_1$  – величина, обратная скорости распространения электромагнитной волны. Период  $T_{a_2}$  играет роль времени прихода волны, то есть, чем больше  $\rho_1$  и  $S_1$ , тем большим будет период  $T$ , на котором наблюдается экстремум.

Подобным образом с параметрами двухслойного разреза связан и интерференционный максимум

$$h_1 = \sqrt{0,191 \cdot 10^7 T_{a_1} \cdot \rho_1} \quad (8)$$

Следует отметить, что современный уровень развития аппаратуры МИЗЕИ позволяет проследить данный слабовыраженный экстремум на реальных кривых.

Для фазовых кривых связь абсцисс интерференционных экстремумов  $f_1, f_2$  с параметрами разреза имеет вид

$$h_1 = \sqrt{0,317 \cdot 10^7 T_{f_1} \cdot \rho_1} \quad (9)$$

$$h_1 = \sqrt{0,0979 \cdot 10^7 T_{f_2} \cdot \rho_1} \quad (10)$$

Таким образом по абсциссам интерференционных экстремумов может быть установлена величина произведения мощности надпорной толщи на ее суммарную продольную проводимость. Для отдельного их определения нужна дополнительная информация, которая может быть извлечена как из самих кривых МИЗЕИ, так и из других данных (электрокаротаж, сейсморазведка). Хотя формулы (7) и (8) – (10) подобны сейсмическим, следует подчеркнуть и существенное различие.

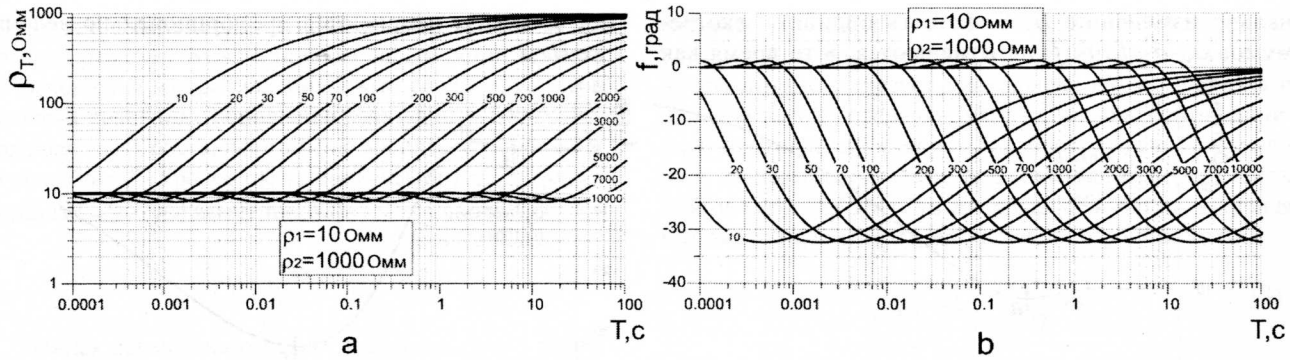


Рис. 2. Амплитудные (а) и фазовые (б) кривые МТЗ для двухслойного разреза при изменении мощности первого слоя  $h_1$ . Условные обозначения см. на рис. 1

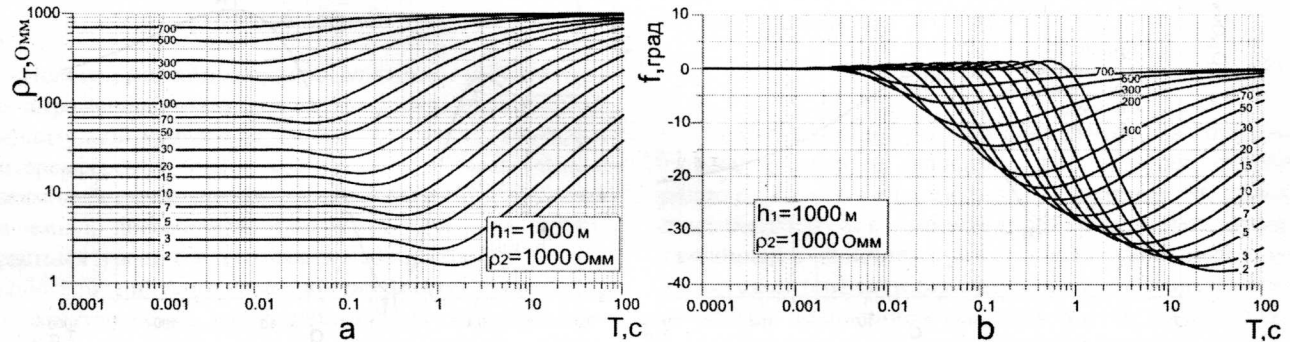


Рис. 3. Амплитудные (а) и фазовые (б) кривые МТЗ для двухслойного разреза при изменении сопротивления первого слоя  $\rho_1$ . Условные обозначения см. на рис. 1

Скорость распространения в земле электромагнитного поля значительно выше скорости распространения упругих волн и пропорциональна частоте колебаний. Наблюдается существенное затухание поля с глубиной, причем затухание пропорционально частоте поля и обратно пропорционально удельному электрическому сопротивлению пород. При работах в частотной области реально измеряется не чистый отклик среды на электромагнитное воздействие, а результат интерференции этого отклика с первичным полем. Таким образом, интерференционные экстремумы несут информацию о запаздывании на период или половину периода отраженной волны по отношению к первичному сигналу.

На рис. 4 показано изменение формы и уровня двухслойных кривых при изменении величины сопротивления основания ( $\rho_2$ ). Следует заметить, что при этом параметры первого слоя остаются закрепленными, то есть величины  $h_1$ ,  $\rho_1$  и  $S$  постоянны. Обращает на себя внимание то, что на амплитудных кривых (рис. 4, а) меняются только ординаты экстремумов и наклон восходящей ветви, в то время как абсциссы первых двух экстремумов остаются постоянными.

Таким образом ординаты экстремумов амплитудной и фазовой кривых зависят только от соотношения сопротивлений  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Отношение ординат первого экстремума амплитудной кривой ко второму прямо пропорционально отношению значений  $\rho_2/\rho_1$ . Эта зависимость может быть выражена уравнением

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \exp\left(16,39 \cdot \left(\frac{A_{a1}}{A_{a2}} - 1\right)\right),$$

где  $A_{a1}$  и  $A_{a2}$  – ординаты первого и второго экстремумов амплитудной кривой соответственно.

Аналогичную зависимость, только в более яркой форме, демонстрируют и фазовые кривые

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \exp(0,126 \cdot (A_{f2} - A_{f1}) + 0,44)^2.$$

Более сложная ситуация наблюдается с третьим фазовым экстремумом. С увеличением значений  $\rho_2$  изменяется не только его амплитуда, но, по мере роста этой величины, сдвигается вправо по оси периодов и его абсцисса. Т.е. положение третьего экстремума на оси периодов зависит от всех параметров двухслойного разреза. Эта зависимость может быть представлена соотношением

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \exp\left(9,3197 - 0,000216 \cdot \frac{H_1 \rho_1}{T_{f3}}\right).$$

Таким образом по координатам экстремумов амплитудных и фазовых кривых зондирований для двухслойного разреза и асимптотам амплитудных кривых могут быть определены все параметра двухслойного разреза. Точность таких расчетов определяется точностью определения координат экстремумов.

