

УДК 550.83

А.И. Ингеров¹, канд. геол.-мин. наук,
И.А. Ингеров²,
А.Л. Лозовой³, канд. геол.-мин. наук, доцент,
Я.В. Мендрий³

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. Ingerov¹, Cand. Sci. (Geol.-Min.),
I.A. Ingerov²,
A.L. Lozovoy³, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Assoc. Prof.,
Ya.V. Mendriy³

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 двухмерного 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}, ρ_T) , распространенной в странах бывшего СССР, наблюдаются: левая горизонтальная асимптота, значение ρ_T для которой равно ρ_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 ρ_2 . Крутизна восходящей ветви зависит от отношения сопротивления двух слоев ρ_2/ρ_1 . При больших значениях отношения ρ_2/ρ_1 (более 1000) восходящая ветвь составляет с осью абсцисс угол в $63^\circ 26'$ (S -асимптота). Уравнение данной асимптоты в координатах (\sqrt{T}, ρ_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° 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° . Крутизна нисходящей ветви и координаты последующего минимума, как будет показано ниже, зависят от отношения сопротивлений второго и первого слоя (ρ_2/ρ_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 ρ_2/ρ_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 ρ_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, ρ_T) и (T, φ_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° , а формулы (1)–(4) приобретают вид

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

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

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

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 $H \times S$.

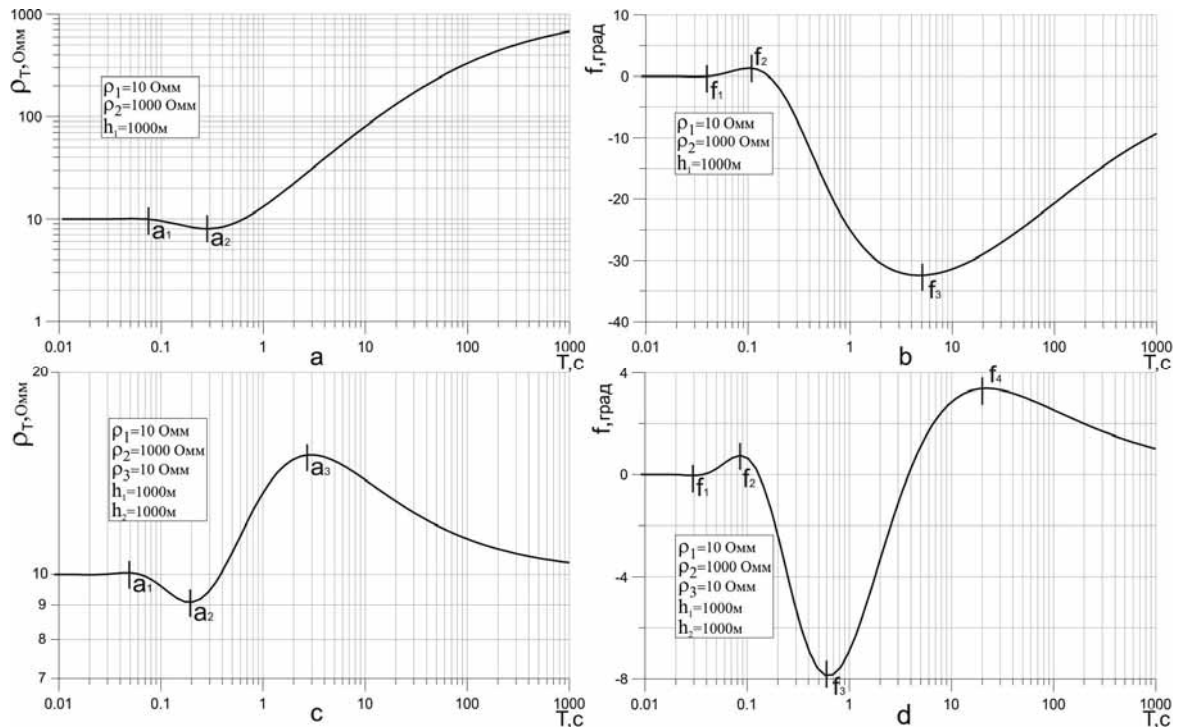


Рис. 1. Амплитудные (а, с) и фазовые (b, d) кривые МТЗ для двухслойного (а, b) и трехслойного (с, d) разрезов как функции периода: ρ_T, f и T – соответственно, амплитуда, фаза и период регистрации электромагнитной волны

При уменьшении величины ρ_1 , амплитудные кривые сдвигаются вправо по оси T , пропорционально $H \times S$, и вниз по оси ρ_T , пропорционально значению ρ_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 ρ_2 к ρ_1 , тем более ярко проявляются интерференционные экстремумы, а также крутизна нисходящей ветви и координаты минимума на фазовой кривой (рис. 3, b).

Таким образом h_1 в (7) – глубина залегания границы, а S_1 – величина, обратная скорости распространения электромагнитной волны. Период T_{a2} играет роль времени прихода волны, то есть, чем больше ρ_1 и S_1 , тем большим будет период T , на котором наблюдается экстремум.

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

Подобным образом с параметрами двухслойного разреза связан и интерференционный максимум

$$h_1 = \sqrt{0,035 \cdot 10^7 T_{a2} \cdot \rho_1} \quad (6)$$

$$h_1 = \sqrt{0,191 \cdot 10^7 T_{a1} \cdot \rho_1} \quad (8)$$

Выражение (6) может быть преобразовано к виду

$$h_1 \cdot S_1 = 0,035 \cdot 10^7 \cdot T_{a2} \quad (7)$$

$$h_1 = \sqrt{0,317 \cdot 10^7 T_{f1} \cdot \rho_1} \quad (9)$$

$$h_1 = \sqrt{0,0979 \cdot 10^7 T_{f2} \cdot \rho_1} \quad (10)$$

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

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

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 (электрокартаж, сейсморазведка). Хотя формулы (7) и (8) – (10) подобны сейсмическим, следует подчеркнуть и существенное различие.

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

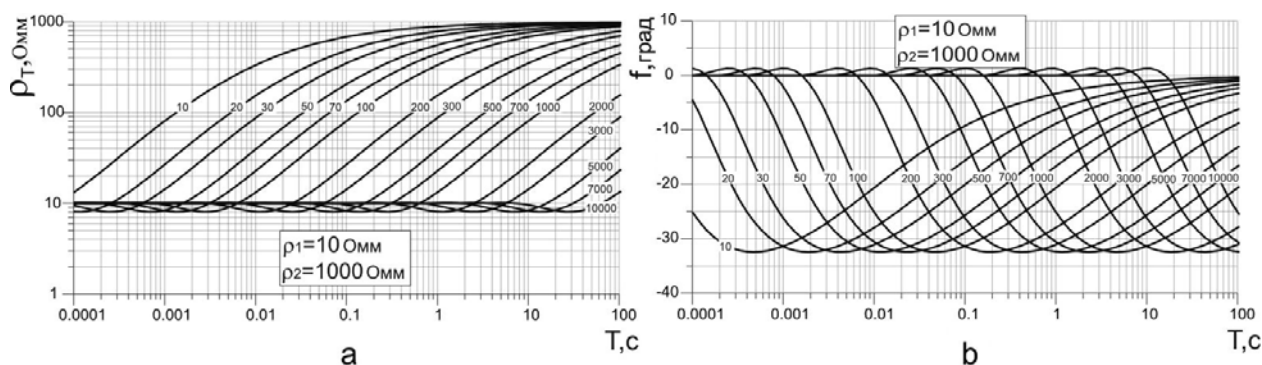


Рис. 2. Амплитудные (а) и фазовые (б) кривые МТЗ для двухслойного разреза при изменении мощности первого слоя h_1 . Условные обозначения см. на рис. 1

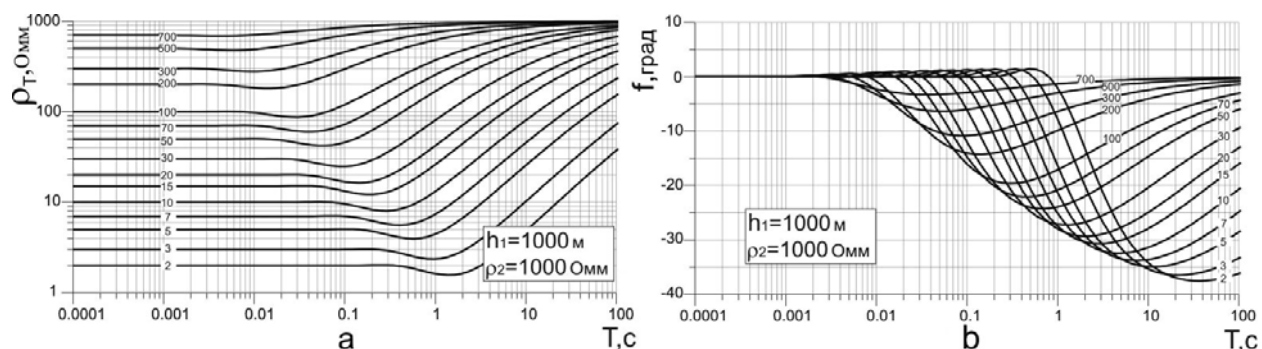


Рис. 3. Амплитудные (а) и фазовые (б) кривые МТЗ для двухслойного разреза при изменении сопротивления первого слоя ρ_1 . Условные обозначения см. на рис. 1

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 (ρ_2). Следует заметить, что при этом параметры первого слоя остаются закрепленными, то есть величины h_1 , ρ_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 ρ_1 и ρ_2 . Отношение ординат первого экстремума амплитудной кривой ко второму прямо пропорционально отношению значений ρ_2/ρ_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 ρ_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.

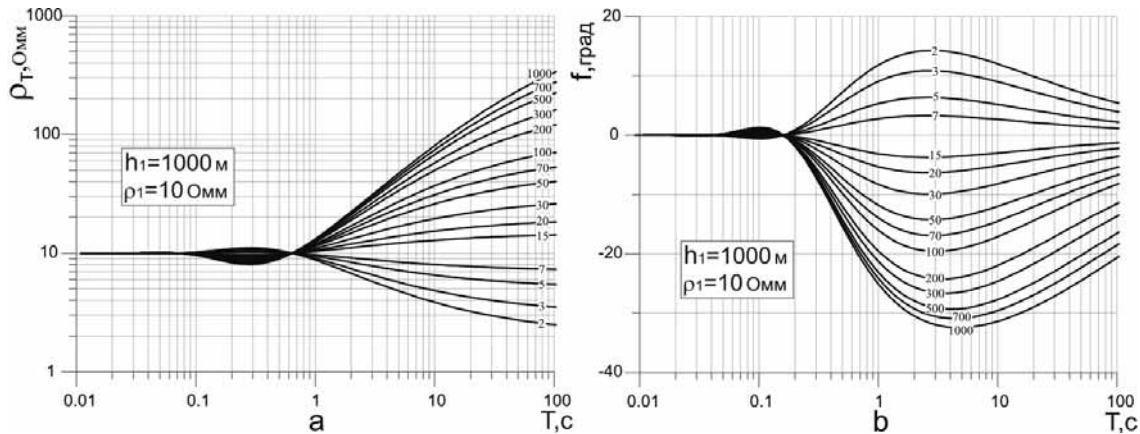


Рис. 4. Амплитудные (а) и фазовые (б) кривые МТЗ для двухслойного разреза при изменении сопротивления основания ρ_2 . Условные обозначения см. на рис. 1

В свете вышесказанного, методику картирования высокоомной границы можно представить в следующем виде.

1. Определить суммарную продольную проводимость надпорной толщи S по асимптотической формуле (5). Следует отметить, что далеко не во всех случаях соблюдаются необходимые условия для применения этой формулы. Поэтому лучше определять ρ_1 . Это можно сделать по левой ветви (горизонтальной асимптоте) или ординате минимума амплитудной кривой. Однако, оба этих способа не отличаются точ-

ностью из-за статического эффекта и(или) многослойности разреза над опорным горизонтом. Принципиально эта статическая ошибка может быть устранена по данным электрокаротажа или сейсморазведки.

2. Точно зафиксировать значение T в экстремуме амплитудной кривой (рис. 1, а). Надежнее использовать оба экстремума a_1 и a_2 , а также аналогичные экстремумы на фазовых кривых f_1, f_2 (рис. 1, б). Для повышения надежности определения h_1 его можно вычислять как среднее из значений, полученных по формулам для всех экстремумов (6) и (8)–(10).

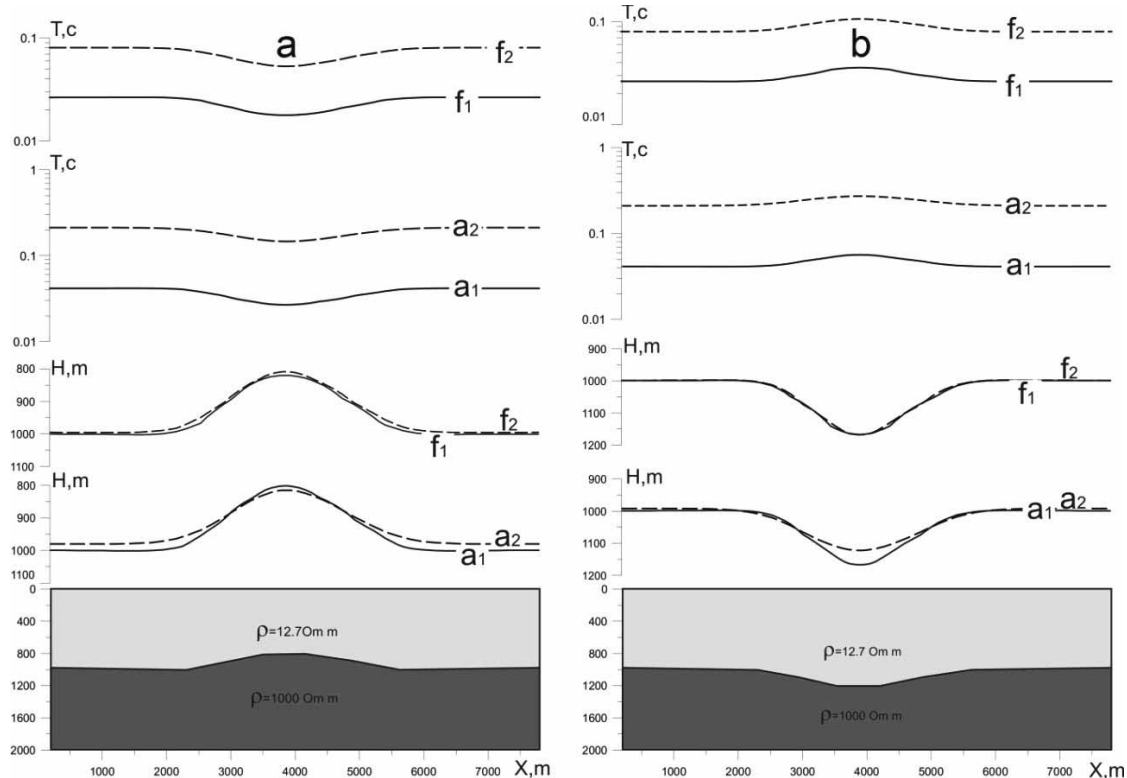


Рис. 5. Годографы характерных точек поперечной компоненты электромагнитного поля и результаты определения мощности надпорной толщи над антиклинальной (а) и синклиальной (б) структурами

Так как точность определения h_1 в конечном счете определяется точностью определения координат особых точек на амплитудных и фазовых кривых зондирования, представляется логичным прибегнуть к

трансформациям, позволяющим подчеркнуть эти особые точки. Аналогичные меры нужны и для повышения точности оценки ординат экстремумов с целью определения отношения сопротивлений слоев.

Для иллюстрации возможностей предлагаемой методики картирования высокоомной границы были рассчитаны амплитудные и фазовые кривые в точках профиля МТЗ над антиклинальной и синклиальной структурами (рис. 5) с помощью программы двумерного моделирования. На этом же рисунке показано поведение экстремумов амплитудных и фазовых кривых в системе координат: координата точки на профиле X и период T соответствующего экстремума (своеобразные годографы электромагнитной волны). А также результаты восстановления поведения исследуемой границы в системе координат X и глубины H до исследуемой границы. Для двухслойной среды $H = h_1$.

Относительная погрешность восстановления границы по высокочастотным экстремумам несколько меньше (2 %), чем по низкочастотным (3 %). Однако следует помнить, что на реальных полевых материалах последние выражены ярче, а, следовательно, имеют лучшее соотношение сигнал-помеха.

В заключение отметим следующее.

1. Абсциссы экстремумов амплитудных и фазовых кривых индукционных зондирований с естественными источниками тесно связаны с параметрами геоэлектрического разреза. Вид этой связи подобен связям с параметрами среды упругих отраженных волн.

2. По абсциссам характерных точек амплитудных и фазовых кривых может быть детально восстановлена поверхность высокоомного горизонта.

Детальная электроразведка в 2-D или 3-D вариантах может служить альтернативой сейсморазведке при восстановлении структурного плана в труднодоступных районах или в условиях сложного сейсмического разреза.

Список литературы / References

1. Аппаратура V5 System 2000 и возможность изучения магнитотеллурических полей по методике с одиночной станцией на полях действующих угольных шахт в Украине / Лозовой А.Л., Ингеров А.И., Мазуренко Р.В., Плотников Е.А. // Науковий вісник НГУ. – Днепропетровск, 2007. – №1. – С. 40–43.

Lozovoy, A.L., Ingerov, A.I., Mazurenko, R.V. and Plotnikov, Ye.A. (2007), "V5 System 2000 equipment and possibility of implementation of magnetotelluric fields study method with the single station on the fields of operating coal mines in Ukraine", *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no. 1, pp. 40–43.

2. Матвеев Б.К. Электроразведка: Учебн. для вузов. / Матвеев Б.К. – М.: Недра, 1990. – 368 с.

Matveyev, B.K. (1990), *Elektrozvedka* [Electrical Prospecting] higher school textbook, Nedra, Moscow, Russia

3. Бердичевский М.Н. Модели и методы магнитотеллурики / Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. – М.: Научный мир, 2009. – 680 с.

Berdichevskiy, M.N. and Dmitriyev, V.I. (2009), *Modeli i metody magnitotelluriki* [Models and Methods of Magnetotellurics], Nauchnyy mir, Moscow, Russia

4. Гурвич И.И. Сейсмическая разведка. Изд. 3-е. / Гурвич И.И. – М.: Недра – 408 с.

Gurvich, I.I. *Seysmicheskaya razvedka* [Seismic Prospecting], 3rd Edition, Nedra, Moscow, Russia

Мета. Використання інтерференційних екстремумів стандартних (амплітудних і фазових) кривих індукційних зондувань з природними джерелами у цілях картування опорних високоомних геоелектричних горизонтів.

Методика. На підставі результатів одновимірного і двовимірного фізико-математичного моделювання вивчалася поведінка координат інтерференційних екстремумів амплітудних і фазових кривих залежно від зміни параметрів геоелектричного розрізу. Для усунення статичного зміщення рівня кривих, обумовленого впливом приповерхневих неоднорідностей розрізу, залучалися дані електричного каротажу і сейсморозвідки.

Результати. Встановлені емпіричні залежності для визначення параметрів геоелектричних розрізів за спостережуваними періодами інтерференційних екстремумів амплітудних і фазових кривих магніто-телуричного зондування.

Наукова новизна. Абсциси інтерференційних екстремумів стандартних кривих індукційних зондувань з природними джерелами тісно пов'язані з параметрами геоелектричного розрізу.

Практична значущість. Методика може бути використана при експрес-інтерпретації практичних даних електромагнітних зондувань для вивчення морфології цільових горизонтів на родовищах нафти і газу.

Ключові слова: електромагнітне поле, індукційне зондування, амплітудні і фазові криві, уявний опір, годограф електромагнітної хвилі

Purpose. Application of standard curves (amplitude and phase curves) of interference extremum received by induction sounding with natural sources for the purpose of mapping of geoelectrical horizons of high resistivity.

Methodology. On the basis of the results of 1D and 2D physical and mathematical modelling of the behaviour of amplitude and phase curves interference extremums depending on the change of parameters of geoelectrical section was studied. For the removal of static displacement of curves caused by near-surface heterogeneity, the electric logging and seismic data were used additionally.

Findings. Empiric dependences for determination of parameters of geoelectrical section on observed periods of amplitude and phase curves interference extremums of magnetotelluric data were established.

Originality. The abscissas of standard curves interference extremums of the induction soundings with natural sources are closely associated with the parameters of geoelectrical section.

Practical value. The method can be used for express-interpretation of the electromagnetic data in order to study the target horizon morphology within oil and gas fields.

Keywords: electromagnetic field, induction sounding, amplitude and phase curves, apparent resistivity, hodograph curve of electromagnetic wave

Рекомендовано до публікації докт. геол. наук М.М. Довбнічем. Дата надходження рукопису 09.09.11.