

УДК 550.83

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

1 – Компания “Phoenix Geophysics Limited” по Восточной Европе и Центральной Азии, 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

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ КРИВЫЕ ИНДУКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С ЕСТЕСТВЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПРИ РЕШЕНИИ СТРУКТУРНЫХ ЗАДАЧ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ

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

1 – “Phoenix Geophysics Limited” of Eastern Europe and Central Asia, Toronto, Canada
2 – “Advanced Geophysical Operations and Services Inc.” of Eastern Europe and Central Asia, Toronto, Canada
3 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: lozovoy_dp_ua@mail.ru

DIFFERENTIAL CURVES OF INDUCTION ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS WITH NATURAL SOURCES FOR STRUCTURAL MAPPING IN OIL AND GAS GEOLOGY

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.

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

Результаты. Предложена методика использования в целях картирования двух видов конечно-разностных дифференциальных параметров для амплитудных и фазовых кривых МТЗ. Конечно-разностные дифференциальные кривые позволяют повысить однозначность определения абсцисс особых точек и, как следствие, при высоком качестве полевых данных повысить точность определения положения геоэлектрических границ в разрезе до 2–3%. Представление данных МТЗ в виде псевдовременных разрезов является удобным элементом, наглядно демонстрирующим изменение морфологии геоэлектрических границ.

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, что позволяет уменьшить затраты на дорогостоящие сейсмические исследования.

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

Введение. Амплитудные (кажущегося электрического сопротивления) и фазовые кривые индукционных электромагнитных зондирований с естественными источниками несут богатую информацию о поведении геологических границ в земле, а также об изменении электрических свойств горизонтов между этими границами. При решении задач нефтегазовой гео-

логии ведущим методом таких зондирований является метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Извлечение информации из кривых электромагнитных зондирований осуществляется путем решения обратных задач электрометрии в одномерном (1D), двухмерном (2D) и трехмерном (3D) вариантах. Решение обратных задач с помощью программ инверсии связано с рядом трудностей. К ним относятся свойства самих программ инверсии, а также статическое смещение уровня амплитудных

кривых. Такое смещение уровня получило название *Shift*- или *S*-эффекта.

Отдельные контрастные границы геоэлектрических горизонтов отмечаются на кривых зондирований интерференционными экстремумами. Замечательным фактом является то обстоятельство, что период этих экстремумов зависит от произведения мощности пород (h), залегающих над данной границей, на суммарную продольную проводимость этих пород (S). Таким образом, отслеживая изменение значения периода экстремума по профилю, можно судить о морфологии границы. Формализация этого процесса представляет практический интерес.

Для повышения надежности восстановления рельефа границ контрастных горизонтов желательное увеличение контрастности и числа экстремальных (характерных) точек на кривых зондирований, которые могут быть надежно определены по полевым данным. Эта задача, по мнению авторов, может быть решена переходом от традиционных кривых МТЗ к их производным.

Изложение основного материала. Дифференциальные кривые индукционных зондирований. В работе [1] была предложена методика картирования высокоомного опорного горизонта по данным магнито-теллурического зондирования с использованием интерференционных экстремумов амплитудных и фазовых кривых поперечной компоненты естественного электромагнитного поля. Она предполагает определение суммарной продольной проводимости S по асимптотической формуле либо удельного электрического сопротивления надпорной толщи ρ_1 . Результаты опробования методики на 2D модели антиклинальной структуры показали вполне приемлемую, с практической точки зрения, точность. Таким образом, для внедрения этой технологии в практику производственных организаций требуется формализация процесса определения периодов экстремумов, для чего желательное повысить их контрастность, а, следовательно, и точность определения. Для реализации последнего возможны два основных подхода.

В математическом анализе алгоритмы определения особых точек функций, заданных аналитическими функциями, давно разработаны и основаны на дифференцировании функций. Такой подход на современном уровне точности получения амплитудных и фазовых кривых вполне применим при описании амплитудных и фазовых кривых кубическими сплайнами с последующим их дифференцированием.

Второй путь – это использование конечно-разностных кривых. Авторы считают целесообразным начать с вычисления дифференциального параметра, внедренного Куликовым А.В. в практику работ фазового метода вызванной поляризации и, позднее, широко применяемого как в методе вызванной поляризации (ВП), так и при частотных электромагнитных зондированиях (ЧЭЗ) с контролируемым источником [2]. Данный параметр основан на вычислении нормированной на частоту разности фаз между первой и третьей гармоникой регистрируемого

сигнала, при этом результивная разность относится к нижней частоте

$$\Delta\varphi = \frac{\omega_3\varphi_1 - \omega_1\varphi_3}{\omega_3 - \omega_1} = \frac{\omega_1(3\varphi_1 - \varphi_3)}{2\omega_1} = \frac{3\varphi_1 - \varphi_3}{2}. \quad (1)$$

Физический смысл конечно-разностного параметра дифференциального параметра заключается в том, что данный параметр представляет собой сумму наблюдаемой функции и ее производной по частоте

$$\Delta\varphi = \varphi - \frac{\partial\varphi}{\partial\omega}. \quad (2)$$

Использование экстремумов этого параметра оказалось особенно эффективным при интерпретации данных ЧЭЗ. Подобный параметр целесообразно вычислять и для амплитудных кривых

$$\Delta\rho = \frac{3\rho_1 - \rho_3}{2}. \quad (3)$$

На рис. 1 совместно приведены стандартные и дифференциальные амплитудные и фазовые кривые, рассчитанные по формулам (1)–(3) для двухслойной (a, b) и трехслой (c, d) сред.

Как видно на рис. 1, процесс вычисления конечно-разностных параметров принципиально не меняет форму кривых. Соответствующие дифференциальные кривые наследуют все характерные особенности амплитудных и фазовых кривых зондирования, рассмотренные в [1], однако имеют и характерные особенности:

- кривые сдвинуты в область малых периодов (высоких частот), что является благоприятным моментом, так как позволяет принципиально повысить производительность полевых работ за счет уменьшения времени регистрации;

- на дифференциальных кривых экстремумы значительно контрастнее и их координаты могут быть определены с большей точностью;

- дифференциальные кривые не смещены по уровню относительно стандартных кривых, только имеют более ярко выраженные экстремумы;

- дифференциальные кривые становятся короче со стороны высоких частот, что затрудняет определение важного параметра среды – удельного сопротивления первого слоя, однако при использовании современной широкодиапазонной аппаратуры данный недостаток не является существенным;

- амплитудные дифференциальные кривые не подвержены главному недостатку традиционных кривых – *S*-эффекту.

Резюмируя сказанное, отметим, что дифференциальные кривые являются более удобным объектом интерпретации, чем стандартно используемые амплитудные и фазовые.

Связь координат экстремумов дифференциальных кривых с параметрами разреза. Аналогично стандартным кривым, положение интерференционных экстремумов дифференциальных кривых отражает строение геоэлектрического разреза.

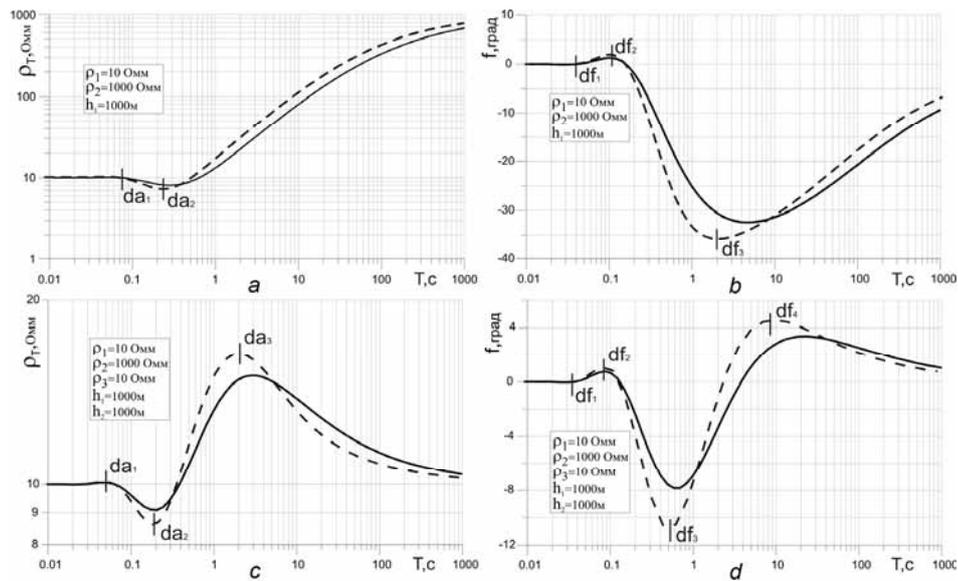


Рис. 1. Стандартные (сплошные) и дифференциальные (пунктирные) амплитудные (а, с) и фазовые (b, d) кривые МТЗ для двухслойного (а, b) и трехслойного (с, d) разрезов, как функции периода электромагнитной волны: ρ_T, f и T – соответственно, амплитуда, фаза и период регистрации электромагнитной волны

Абсциссы (T) интерференционных экстремумов дифференциальной кривой кажущегося сопротивления (da_1 и da_2) связаны с мощностью и проводимостью надпорной толщи следующими эмпирическими соотношениями

$$h_1 S_1 = 0,191 \cdot 10^7 T_{da1}; \quad (4)$$

$$h_1 S_1 = 0,0396 \cdot 10^7 T_{da2}. \quad (5)$$

Для интерференционных экстремумов дифференциальной фазовой кривой (df_1 и df_2) формулы (4)–(5) преобразуются к следующему виду

$$h_1 S_1 = 0,315 \cdot 10^7 T_{df1}; \quad (6)$$

$$h_1 S_1 = 0,0988 \cdot 10^7 T_{df2}. \quad (7)$$

Таким образом технология интерпретации дифференциальных кривых по абсциссам интерференционных экстремумов аналогична той, что применяется для наблюдаемых (стандартных) кривых [1], только она позволяет более точно определять абсциссы интерференционных экстремумов. Однако при этом сохраняется та же проблема: мы можем довольно точно определить произведение суммарной мощности слоя на его суммарную продольную проводимость (4)–(7), хотя нас интересует раздельное определение этих двух параметров. Зачастую это приходится выполнять при отсутствии априорных данных и по амплитудным кривым смещенным по уровню S -эффектом. Выходом из данной ситуации может быть вычисление дифференциально-нормированных кривых МТЗ.

Дифференциально-нормированные кривые МТЗ.

Первый опыт вычисления таких кривых был приведен в работе [3], где вычислялась трансформанта, аналогичная коэффициенту отражения упругих волн для анализа

амплитудных кривых МТЗ в случае контрастного горизонтально-неоднородного разреза и сильного влияния S -эффекта. Авторы работы эту трансформанту назвали „коэффициент расслоенности геоэлектрического разреза“ и обозначили буквой k . Не претендуя на первенство, мы считаем, что более правильно называть эту величину дифференциально нормированным параметром, оставив при этом неизменным обозначение параметра. Параметры ka и kf , для случаев амплитудной и фазовой кривых МТЗ соответственно, определяются формулами

$$ka = \frac{2(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_2 + \rho_1}; \quad (8)$$

$$kf = \frac{2(\varphi_2 - \varphi_1)}{\varphi_2 + \varphi_1}. \quad (9)$$

На рис. 2 приведены частотные характеристики величин ka и kf (дифференциально нормированные амплитудные и фазовые кривые), рассчитанных по формулам (8)–(9), на фоне дифференциальных амплитудных и фазовых кривых МТЗ для двухслойного и трехслойного разрезов. Очевидно, что экстремумы k еще более компактны по частоте, контрастнее выражены по амплитуде, чем, рассмотренные выше, дифференциальные кривые. Еще одним преимуществом безразмерного параметра k является тот факт, что он имеет средний уровень, равный нулю. Дифференциально-нормированные амплитудные кривые, частотные характеристики параметра k , не подвержены влиянию S -эффекта. В отличие от дифференциальных, амплитудная и фазовые дифференциально-нормированные кривые смещены по уровню относительно исходных кривых. Их левой асимптотой является нулевая линия (рис. 2). На рис. 2 видно, что четкими острыми экстремумами отмечаются точки перегиба исходных кривых, а экстремумы – переходом через ноль.

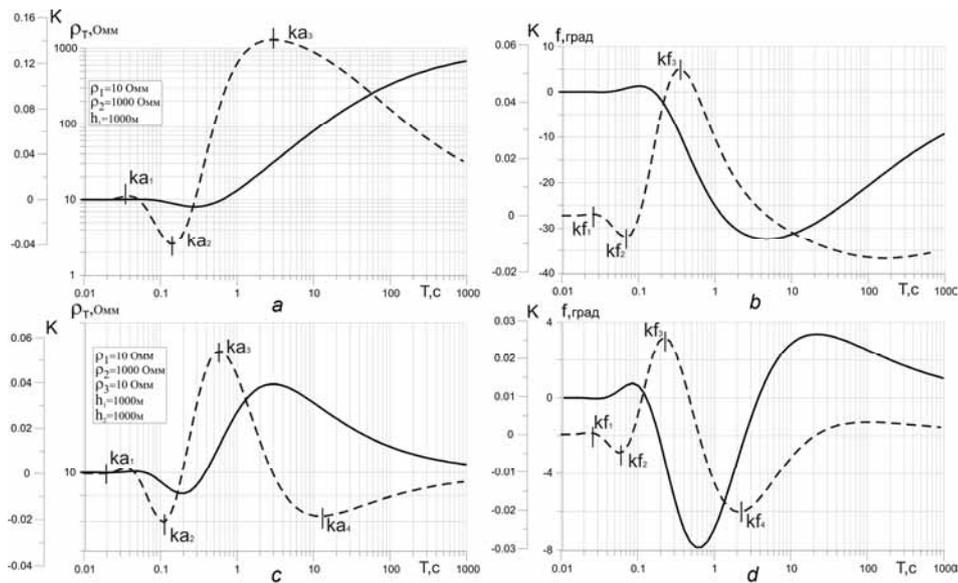


Рис. 2. Стандартные (сплошная) амплитудные (а, с) и фазовые (b, d) кривые МТЗ и дифференциально-нормированного параметра k (пунктир) для двухслойного (а, b) и трехслойного (с, d) разрезов, как функции периода электромагнитной волны: ρ_T, f, k и T – соответственно, амплитуда, фаза, дифференциально-нормированный параметр и период регистрации электромагнитной волны

Абсциссы первых двух экстремумов параметра k , рассчитанного по амплитудным кривым (ka_1 и ka_2), связаны с параметрами надпорной толщи следующими эмпирическими соотношениями

$$h_1 S_1 = 0,256 \cdot 10^7 T_{ka1}; \quad (10)$$

$$h_1 S_1 = 0,072 \cdot 10^7 T_{ka2}. \quad (11)$$

То есть, также как и в случае дифференциального параметра, определяются произведением мощности низкоомного слоя на его суммарную продольную проводимость. Параметры надпорной толщи с использованием абсцисс экстремумов параметра k , рассчитанного по фазовым кривым (kf_1 и kf_2), могут быть определены из следующих эмпирических соотношений

$$h_1 S_1 = 0,415 \cdot 10^7 T_{kf1}; \quad (12)$$

$$h_1 S_1 = 0,147 \cdot 10^7 T_{kf2}. \quad (13)$$

В отличие от первых двух экстремумов дифференциально-нормированных кривых, амплитуда третьего экстремума как фазовых, так и амплитудных кривых определяется величиной суммарной продольной проводимости S низкоомного слоя. Для определения S удобно использовать отношение абсцисс третьего экстремума к значению T в первом или втором экстремумах.

$$S = 2,17(T_{a3}/T_{a2})^2 - 45,784(T_{a3}/T_{a2}) + 256,02; \quad (14)$$

$$S = 16,771(T_{f3}/T_{f2})^2 - 272,28(T_{f3}/T_{f2}) + 1125,6. \quad (15)$$

Таким образом, по дифференциально-нормированным кривым мы можем по формулам (14) и (15) опре-

делить суммарную продольную проводимость S , а затем, используя формулы (10)–(13), определить мощность низкоомного слоя h_1 .

Опробование дифференциальных и дифференциально-нормированных кривых для моделей, приведенных в работе [1], позволило довести точность определения суммарной мощности надпорной толщи до 2–3%, то есть, практически, довести ее до точности полевых работ (рис. 3).

Временные разрезы наблюдаемых, дифференциальных и дифференциально-нормированных кривых МТЗ. Собственно, построение корреляционных схем кривых МТЗ, ЧЭЗ не является чем-то необычным и новым. Российские и украинские геофизики, по крайней мере, несколько десятилетий пользовались этим приемом. Суть его заключается в том, что по вертикальной оси откладывается частота f (или период T) колебаний, а по горизонтальной оси откладывается амплитуда или фаза кажущегося сопротивления. При этом, одно и то же значение амплитуды или фазы на самой высокой частоте совмещается с положением точки наблюдений в плане. То, что данная методика не получила в то время повсеместного распространения, можно объяснить редким шагом наблюдений по профилям (кривые существенно меняли форму от точки к точке и корреляция экстремумов не всегда была однозначной) и редким шагом дискретизации, что не позволяло достаточно ярко прописывать экстремумы. Возможности современной аппаратуры позволили значительно сократить шаг дискретизации и работы вдоль профилей наблюдений с детальным шагом. Новые возможности открывают дифференциальные и дифференциально-нормированные кривые МТЗ. Поэтому можно предположить, что, приведенные на рис. 4–6 вертикальные разрезы указанных кривых МТЗ, особенно для многослойных разрезов, завоевывают популярность.

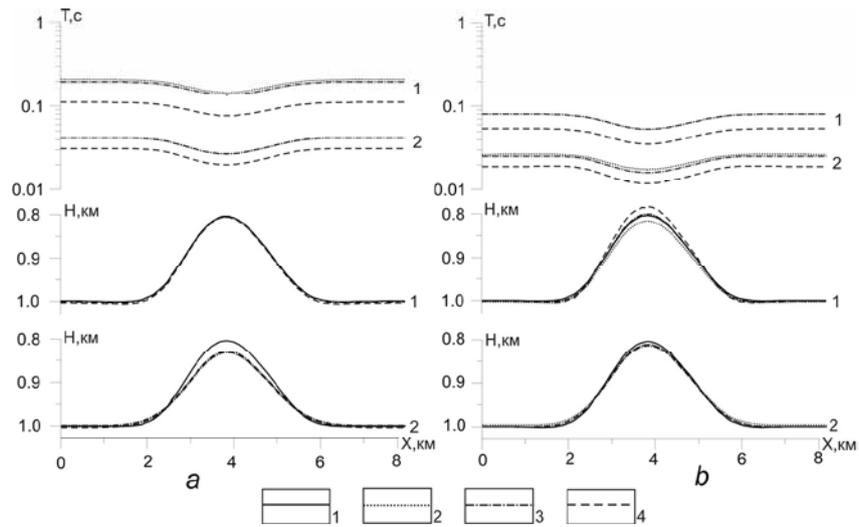


Рис. 3. Годографы характерных точек поперечной компоненты электромагнитного поля и результаты определения мощности надпорной толщи над антиклинальной структурой по амплитудным (а) и фазовым (б) кривым; 1, 2 – порядковые номера экстремумов. Положение кровли антиклинали: 1 – истинное; 2 – по стандартным кривым; 3 – по дифференциальным кривым; 4 – по параметру „расслоенности геоэлектрического разреза“

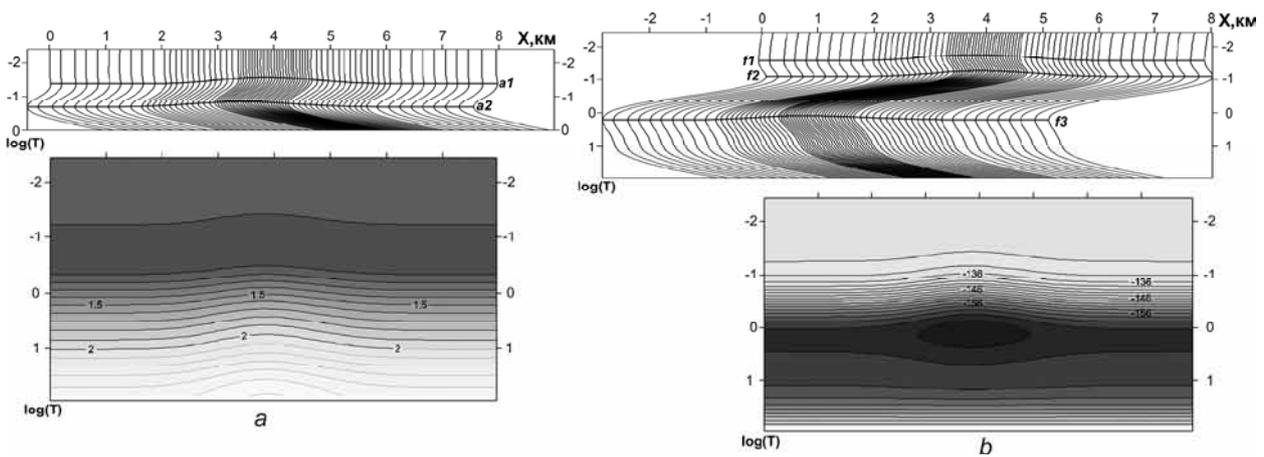


Рис. 4. Годографы и временные разрезы экстремумов амплитудных (а) и фазовых кривых (б) поперечной компоненты электромагнитного поля над антиклинальной структурой

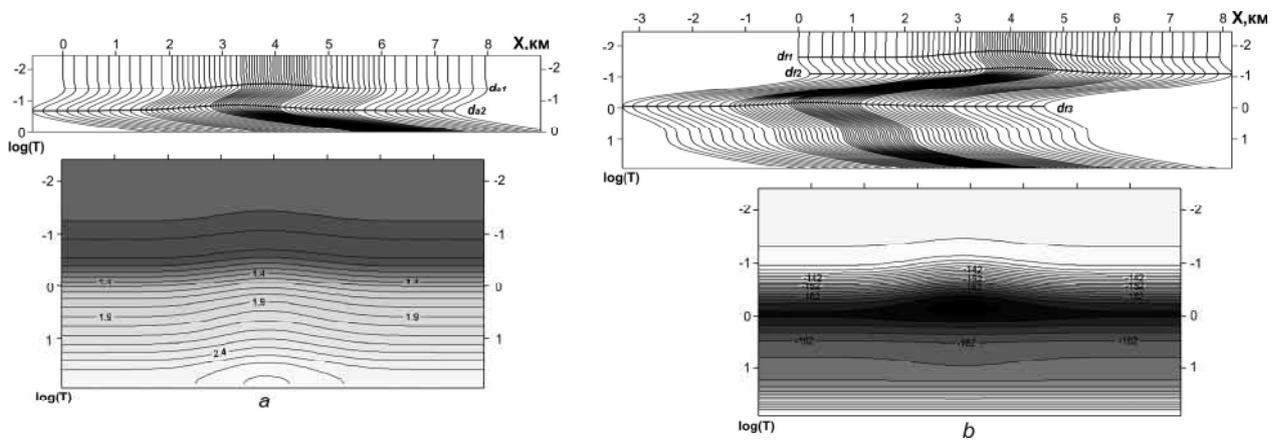


Рис. 5. Годографы и временные разрезы экстремумов дифференциальных по амплитудным (а) и фазовым кривым (б) поперечной компоненты электромагнитного поля над антиклинальной структурой

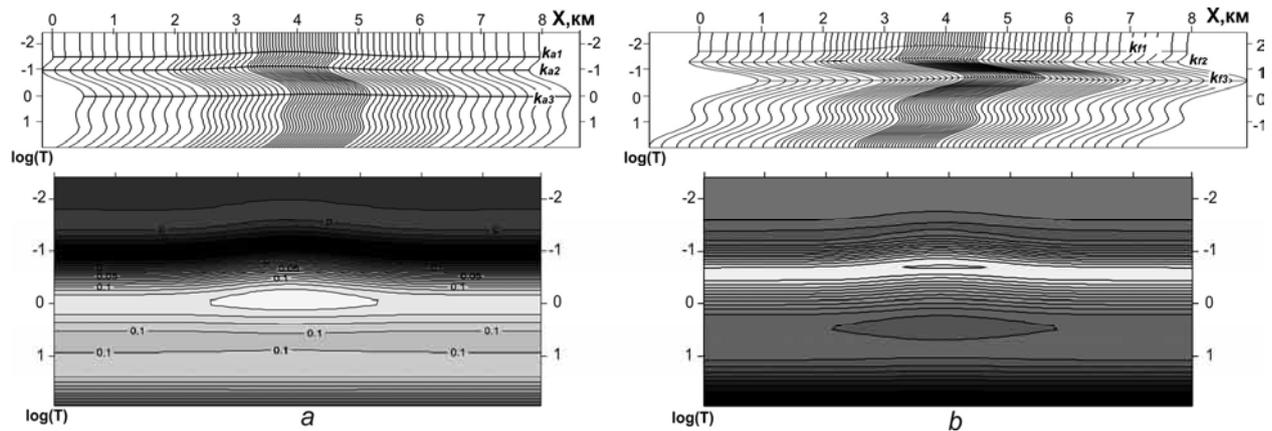


Рис. 6. Годографы и временные разрезы экстремумов дифференциально нормированного параметра по амплитудным (а) и фазовым кривым (б) поперечной компоненты электромагнитного поля над антиклинальной структурой

Выводы.

1. Абсциссы особых точек амплитудных и фазовых кривых методов индукционных зондирований с естественными источниками (МИЗЕИ) несут сконцентрированную информацию о поведении субгоризонтальных границ в геоэлектрическом разрезе.

2. Конечно-разностные дифференциальные кривые позволяют повысить однозначность определения абсцисс особых точек и, как следствие, повысить точность определения положения границ в разрезе.

3. Предлагается использование двух видов конечно-разностных дифференциальных параметров для амплитудных и фазовых кривых МИЗЕИ:

- двухчастотного дифференциального параметра;
- дифференциально-нормированных кривых „коэффициента расслоенности геоэлектрического разреза“.

4. При высоком качестве полевых данных достигнуть точности картирования высокоомной границы в 2–3% позволяют:

- использование нескольких абсцисс характерных точек, связанных с наличием данной границы, амплитудных и фазовых кривых МИЗЕИ;
- использование, кроме наблюдаемых дифференциальных кривых, двухчастотного дифференциального параметра и дифференциально-нормированных кривых.

5. Корреляционные схемы кривых МТЗ (псевдovременные разрезы) и, в первую очередь, дифференциально-нормированного параметра являются удобным элементом, наглядно демонстрирующим геометрию границ, позволяют проводить по экстремальным точкам корреляцию границ и определять участки ее нарушения, подобно тому, как это делается в настоящее время по временным сейсмическим разрезам.

Список литературы / References

1. Использование амплитудных и фазовых кривых индукционных зондирований с естественными источниками для целей картирования / А.И. Ингеров, И.А. Ингеров, А.Л. Лозовой, Я.В. Мендрий // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 2. – С. 5–10.

Ingerov, A.I., Ingerov, I.A., Lozovoy, A.L. and Mendriy, Ya.V. (2012), “The application of amplitude and phase curves from the induction soundings with a natural source for the purpose of mapping”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, Dnipropetrovsk, no. 2, pp. 5–10.

2. Ingerov, A.I. and Soldatenko, V.P. (1998), “About accuracy bedrock depth of high resistance horizon determination by frequency domain electromagnetic sounding”, *Transactions of the Ukrainian Academy of Science. Mathematics, Nature and Technical series*, no. 12.

3. Пигулевский П.И. Геоэлектрические особенности строения литосферы центральной части Среднеприднепровского мегаблока Украинского щита: материалы Пятой всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011; в двух книгах / П.И. Пигулевский – СПб.: СПбГУ, 2011. – Книга 2. – С. 289–292.

Pigulevskiy, P.I. (2011), “Geoelectrical features of structure of lithosphere of central part of Sredneprydneprovskogo megabloka of the Ukrainian shield”, *Proc. of the 5th All-Russian School-Seminar of the Electromagnetic Soundings of Earth – EMS-2011*, In two books. Book 2, SPbSU, St.-Petersburg, pp. 289–292.

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

Методика. На підставі результатів одномірного й двомірного 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 та сейсморозвідки.

Встановлені емпіричні залежності для визначення параметрів геоелектричного розрізу за спостережувальними періодами інтерференційних екстремумів

амплітудних і фазових кривих магнітотеллуричного зондування (МТЗ).

Результати. Запропонована методика використання в цілях картування двох видів кінцево-різницевих диференціальних параметрів для амплітудних і фазових кривих МТЗ. Кінцево-різницеві диференціальні криві дозволяють підвищити однозначність визначення абсцис особливих точок і, як наслідок, за високої якості польових даних, підвищити точність визначення положення геоелектричних границь у розрізі до 2–3%. Представлення даних МТЗ у вигляді псевдочасових розрізів є зручним елементом, що наочно демонструє зміну морфології геоелектричних границь.

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

Практична значимість. Методика може бути використана при експрес-інтерпретації практичних даних електромагнітних зондувань для вивчення морфології цільових горизонтів на родовищах нафти й газу, що дозволяє зменшити витрати на дорогі сейсмічні дослідження.

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

Purpose. To use interference extremum of differential and differential-normalized (amplitude and phase) curves of induction sounding methods with a natural source for mapping of reference high-resistivity geoelectrical horizons.

Methodology. On the basis of the 1D and 2D physical and mathematical modelling results the interference extremum of differential and differential-normalized curves

behaviour as function of the parameters of geoelectrical section has been investigated. Electrical logging and seismic prospecting data has been used for elimination of statistical level shift of curves caused by near-surface inhomogeneity. The correlation dependences between the parameters of geoelectrical section and the interference extremum of differential and differential-normalized curves have been defined.

Findings. We have suggested the method of mapping based on two type of finite-difference differential parameters for amplitude and phase MTS curves. The finite-difference differential curves allow us to improve the unambiguity in identification of the special point abscissas, and thus, when field data has good quality, to increase the accuracy of geoelectrical boundary determination to 2–3%. MTS data can be presented as pseudotime section. This is a convenient way to demonstrate changes in morphology of geoelectrical boundaries.

Originality. The abscissas of the interference extremum of differential and differential-normalized curves 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 MT sounding data when studying the morphology of target horizons in oil and gas bearing formations. This allows us to cut costs for expensive seismic investigations.

Keywords: electromagnetic field, induction sounding, amplitude and phase curves, apparent resistance, electromagnetic wave traveltime graph

Рекомендовано до публікації докт. геол. наук М.М. Довбнічем. Дата надходження рукопису 06.02.14.