

СОВМЕСТНАЯ ИНВЕРСИЯ МАГНИТНЫХ КОМПОНЕНТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

А.Н. Шеин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск

Заметной тенденцией современной геофизики является переход на площадные многокомпонентные системы наблюдения и оперирование объемными интерпретационными моделями изучаемых объектов. Это открывает новые перспективы в прогнозно-поисковых работах. Вместе с тем, наиболее часто применяемая модель в интерпретации электромагнитных данных – это одномерная горизонтально-слоистая изотропная модель. Одномерная интерпретация может служить достаточно надежной стартовой моделью объемных задач. Основной трудностью существующих методов одномерной количественной интерпретации данных электроразведки является некорректность обратной задачи [1]. Один из способов повышения качества инверсии является совместная обработка данных, т.е. одновременная инверсия нескольких компонент поля на одном пикете. В данной работе приводятся результаты совместной инверсии, выполненные с помощью программной системы разработанной в ИНГГ СО РАН (автор Антонов Е.Ю.). Решения получены в рамках горизонтально слоистой модели с частотной дисперсией проводимости. Обратная задача решалась относительно полного вектора производных магнитной индукции $\left(\frac{\partial B_x}{\partial t}, \frac{\partial B_y}{\partial t}, \frac{\partial B_z}{\partial t}\right)$. Для тестирования созданной системы использовались синтетические данные, а также экспериментальные записи, полученные на Крестищенском месторождении Харьковской области, Украина.

Основы теории квазистационарных полей в электроразведке содержатся в классических теоретических работах А.Н. Тихонова, С.М. Шейнмана, J.R. Wait и других российских и зарубежных ученых. Развитие метода началось в послевоенные годы такими видными учеными как Ф.М. Каменецкий, А.А. Kaufman, А. Hoerdt и др. [2]. В 1986 году, в комплексе с сейсмическими исследованиями в западной Германии использовалась система LOTEM (Long-Offset Electromagnetic Method), автором которой был немецкий геофизик Strack К.-М. А последние 2 десятилетия нестационарные электромагнитные (ЭМ) зондирования продолжают удерживать высокие позиции в исследовании Земной коры.

Рассматриваемая нами установка состоит из источника в виде заземленной линии и приемников – индукционных датчиков, позволяющих регистрировать компоненты полного вектора производных магнитной индукции $\left(\frac{\partial B_x}{\partial t}, \frac{\partial B_y}{\partial t}, \frac{\partial B_z}{\partial t}\right)$. С помощью заземленной электрической линии в земле возбуждаются вихревые токи, которые распространяются по горизонтали и по вертикали с течением времени. В приемнике записывается ЭМ поле этих индуцированных токов в виде производной по времени магнитного поля. Амплитуда и форма затухания сигнала содержат информацию о распределении проводимости земной толщи [4].

Традиционная модель среды, всесторонне исследованная в литературе, - это совокупность разделенных плоско-параллельными границами пластов, в пределах каждого из которых удельное электрическое сопротивление (УЭС) $\rho_1, \dots, \rho_i, \dots, \rho_N$

постоянно. Координаты плоских границ в декартовой системе координат XYZ (ось z направлена вниз) – $z_1, \dots, z_i, \dots, z_N$. Для учета вызванной поляризации мы использовали наиболее распространенную и часто применяемую на практике при решении электродинамических задач частотную зависимость комплексного сопротивления (формула Коул-Коул), которая имеет следующий вид [Pelton et al., 1978]:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[1 - \eta \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right].$$

Здесь η – стационарная поляризуемость ($\eta = \frac{\rho_0 - \rho_\infty}{\rho_0}$, ρ_0, ρ_∞ – удельные сопротивления на постоянном токе), τ – время релаксации, c – параметр частотной зависимости. При построении вычислительных процедур использовались рекуррентные формулы и алгоритмы, приведенные в [5,6].

Решение обратной задачи ищем, минимизируя функционал среднеквадратичного

отклонения. Целевая функция имеет вид: $\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \left[\left(\frac{1}{1 - n_j} \sum_i \left(\frac{f_i^{\text{экспер}} - f_i^{\text{теор}}}{f_i^{\text{экспер}} \delta_i^j} \right)^2 \right)^{1/2} \right]$, где

$f_i^{\text{экспер}}$ – данные полученные при полевых измерениях, $f_i^{\text{теор}}$ – вычисленная, с помощью описанного выше алгоритма, необходимая компонента поля, δ_i^j – относительная ошибка измерения. Коэффициент i соответствует времени t_i , коэффициент j – компонента поля, n_j – количество времен для соответствующей компоненты, k – количество используемых компонент. Минимизация проводится методом Нелдера-Мида.

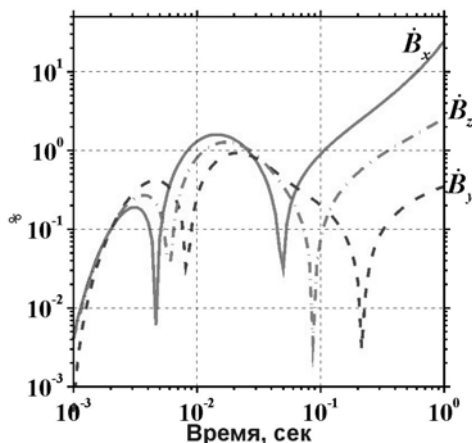


Рис. 1 Отклонение отклика от поляризуемой среды от, не осложненного частотной дисперсией сопротивления сигнала. Модель №1.

Первым этапом нашей работы было исследование чувствительности вектора производных магнитной индукции к ВП. Как известно, магнитные компонент поля слабо чувствительные к ВП, но все же некоторые моменты стоит исследовать. Для решения этой задачи были рассчитаны сигналы полного вектора производных магнитной индукции, как в присутствии ВП так и без, с теми же параметрами сопротивления и мощности слоев для всевозможных типов моделей с постоянным УЭС фундамента: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$, $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$, $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$, $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$. Относительная ошибка откликов от среды с вызванной поляризацией

и в отсутствие ВП показывает влияние частотной дисперсии сопротивления на каждую из компонент. На рисунке 1 представлен пример относительных ошибок всех компонент производных вектора магнитной индукции рассчитанных для Модели №1.

Модель №1

	$\rho, \text{Омм}$	$h, \text{м}$	η	τ	ϵ
1 Слой	45	500			
2 Слой	20	300	0.05	0.02	0.55
3 Слой	10	650			
4 Слой	2000	∞			

Расчеты показали, что величина относительной ошибки принципиально не изменяется для рассмотренных моделей: до 0.1 секунды ее можно считать в пределах погрешности измерения для всех магнитных компонент, а на остальном временном отрезке отклонение компоненты H_x может достигать 10% остальные же остаются в пределах допустимых отклонений. Такие ошибки могут привести к значительным погрешностям при восстановлении параметров геоэлектрического разреза. Т.о. при совместной инверсии магнитных откликов от поляризующихся сред необходимо учитывать, что на поздних временах частотная дисперсия сопротивления может существенно повлиять на измеряемый сигнал.

Принимая во внимание влияние ВП на каждую из магнитных компонент перейдем к совместной инверсии. Для подтверждения необходимости использования совместной инверсии было сгенерировано множество наборов синтетических данных, на примере одного из которых (Модель №2) проиллюстрируем полученные результаты.

Модель №2

	$\rho, \text{Омм}$	$h, \text{м}$	η	τ	ϵ
1 Слой	10	170	0.01	0.01	0.64
2 Слой	40	580	0.02	0.2	0.35
3 Слой	15	640			
4 Слой	2000	∞			

На Рисунке 2 представлены относительные ошибки подбора продольной проводимости $S_i = \sigma_i h_i$ для множества стартовых моделей. По оси X отложено начальное отклонения искомым параметров модели от истинных значений, относительная ошибка найденной продольной проводимости от истинной в результате инверсии по одной, двум и трем

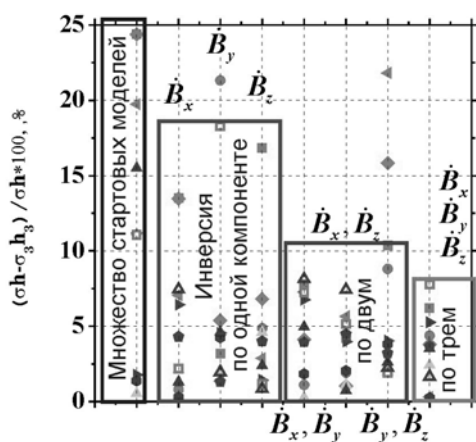


Рис. 2 Ошибки подбора параметров третьего слоя для инверсии по разному количеству компонент: одна, две, три.

компонентам. Для каждого стартового приближения проведена инверсия для различных комбинаций трех магнитных компонент. Контурами показана область ошибок при инверсии по одной ($\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z$), паре ($\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_x, \dot{B}_z, \dot{B}_y, \dot{B}_z$) и тройке $\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z$ компонент. Как видно эта область уменьшается, за исключением нескольких допустимых ошибок: ошибка стартовой модели достигает 25% и последовательно убывает с увеличением количества компонент. Т.о. можно считать, что качество подбора продольной проводимости

повышается с увеличением количества используемых компонент производных магнитной индукции в совместной инверсии.

Помимо тестирования на синтетических данных, с использованием созданной программной системы была проведена инверсия полевых измерений полученных на Крестищенском месторождении Харьковской области, Украина.

Используя в качестве априорных геологические данные Крестищенского района, была проведена покомпонентная инверсия, которая продемонстрировала достаточно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных, что дает нам стартовую модель для совместной инверсии. В результате совместной инверсии вектора производных магнитной индукции получен непротиворечивый геоэлектрический разрез достаточно хорошо коррелирующий с геологическими данными, что позволяет утверждать о состоятельности совместной инверсии многокомпонентных нестационарных ЭМ зондирований.

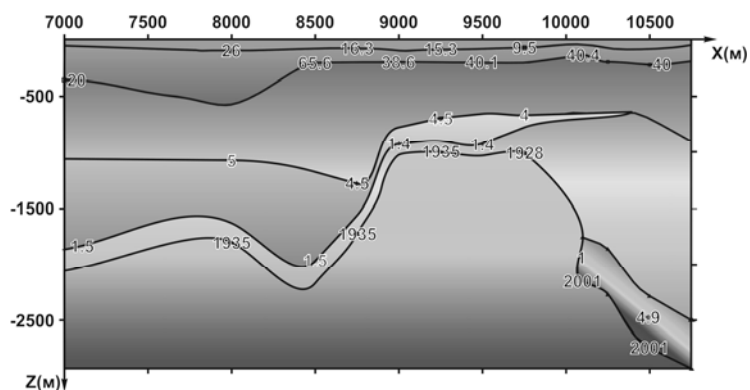


Рис. 3 Геоэлектрический разрез, построенный по результатам совместной инверсии с использованием производных вектора магнитной индукции (цифрами на разрезе обозначено УЭС)

непротиворечивый геоэлектрический разрез достаточно хорошо коррелирующий с геологическими данными, что позволяет утверждать о состоятельности совместной инверсии многокомпонентных нестационарных ЭМ зондирований.

В заключении можно сделать следующие выводы:

- Исследовано влияние вызванной поляризации на каждую из регистрируемых компонент вектора магнитной индукции. Установлено, что влияние частотной дисперсии сопротивления на поздних временах (после 0.1 секунды) на компоненту H_x может достигать 10% относительно отклика от неполяризующейся среды.
- На синтетических данных показано, что с увеличением количества компонент вектора производных магнитной индукции, используемых при инверсии, качество восстановления параметров геоэлектрического разреза возрастает. Это подтверждает состоятельность совместной инверсии многокомпонентных электромагнитных измерений.
- С использованием экспериментальных данных полученных на Крестищенском месторождении (Украина) получен непротиворечивый геоэлектрический разрез хорошо коррелирующий с геологическими данными данного района. Это еще раз подтверждает важность проведения многокомпонентных измерений и их совместной инверсии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев А.В. Методика и результаты многоразностных зондирований становлением поля при решении структурных задач [Текст] / А.В. Чернышев, Е.В. Крупнов, И.С. Кимайкин, А.С. Сверкунов, Е.Д. Тимаков // Труды всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых ТРОФИМУКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2008. Том 2. – Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, – 2008. С. 292-294
2. Каменецкий Ф.М. Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов [Текст] / Ф.М. Каменецкий – М.: ГЕОС, 1997. – 162 с.

3. Кожевников Н.О. Оценка возможностей метода переходных процессов при изучении верхней части геологического разреза [Текст] / Н.О Кожевников, А.Е. Плотников // Геофизика. – 2004. – №6. – С. 33-38
4. Strack K.-M. Long-offset transient electromagnetic (LOTEM) depth soundings applied to crustal studies in the Black Forest and Swebian Alb, Federal Republic of Germany [Text] / K.-M. Strack, E. Luschen, A.W. Kotz // Geophysics. – 1990. – №55. – P. 834-842.
5. Табаровский Л.А. Применение метода интегральных уравнений в задачах геоэлектрики [Текст] / Л.А. Табаровский – Новосибирск: Наука, 1975. – 142 с.
6. Табаровский Л.А. Программа расчета нестационарного поля дипольных источников в горизонтально-слоистой среде (Алекс) [Текст] / Л.А. Табаровский, В.П. Соколов // Электромагнитные методы геофизических исследований: Сб. научных трудов. – Новосибирск. – 1982.