

## О СРАВНЕНИИ ДВУХ ПОДХОДОВ К 3D-ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., Симон Е.И., Шашкова Т.Г.

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск.

В работе рассматриваются подходы к 3D-инверсии данных зондирования становлением поля. Один из подходов заключается в подборе удельной электрической проводимости в ячеистых структурах. Второй подход основан на подборе параметров локальных 3D-объектов: координат границ и удельной электрической проводимости. Приводятся примеры использования обоих подходов на синтетических данных, полученных с использованием 3D-моделирования. Для подхода, использующего ячеистые структуры, сравниваются различные способы регуляризации. Для подхода, основанного на поиске границ локальных 3D-объектов, рассматривается ситуация, когда стартовая модель задается очень далекой от истинной. В результате исследований было показано, что при подборе в ячеистых структурах картина может получаться или слишком "пестрой", или слишком "выглаженной", при этом геометрия объектов точно не определяется. При использовании же подхода с подбором границ 3D-объекты определяются намного точнее.

*Ключевые слова:* 3D-инверсии, зондирование становлением поля

Создание программного обеспечения, реализующего 3D-инверсии данных электромагнитных зондирований, является на сегодняшний день одной из самых актуальных проблем геоэлектрики.

Наиболее распространенными являются подходы к 3D-инверсиям, основанные на использовании ячеистых структур высокой степени подробности. При этом большинство работ посвящено методам электроразведки, основанным на возбуждении поля гармоническим током, но в последнее время стали появляться работы, где описаны результаты 3D-инверсии и для технологий, где изучаются процессы становления поля [1, 2].

С учетом того, что при такой постановке обратная задача очень неустойчива, при ее решении важнейшую роль играет регуляризация. Вариантов регуляризации довольно много, однако все они нацелены на максимальное сглаживание и фокусировку распределения удельной проводимости. При этом дополнительные дробления ячеек, как правило, не приводят к желаемому результату: геометрия объектов лучше не ищется. Наоборот, при недостаточном сглаживании получается либо совсем "пестрая" картина (со скачками значений удельной проводимости в соседних ячейках), либо объекты довольно "изрезанной" формы, не соответствующие реальным. При увеличении же коэффициентов регуляризации распределение проводимости может лучше соответствовать примерному положению центральной части 3D-объектов, но их размеры определяются столь же неточно.

Рассмотрим процедуры инверсии, в которых геоэлектрические параметры среды определяются на основании минимизации функционала

$$\Phi^{\alpha}(\mathbf{b}) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \left( \omega_{lk} \delta \mathcal{E}_{lk}(\mathbf{b}^0) + \omega_{lk} \sum_{m=1}^M \frac{\partial(\delta \mathcal{E}_{lk})}{\partial b_m} \Delta b_m \right)^2 + \sum_{m=1}^M \alpha_m (b_m^0 - \bar{b}_m + \Delta b_m)^2 + \sum_{m=1}^M \gamma_m \sum_{s \in I_m} (\Delta b_m - \Delta b_s)^2.$$

где  $\delta \mathcal{E}_{lk}$  – отклонения практических (экспериментальных) данных от теоретических в  $l$ -м приемнике в  $k$ -й момент времени;  $\mathbf{b}$  – вектор искомых параметров;  $\Delta b_m$  – компоненты приращений к вектору  $\mathbf{b}^0$  параметров, полученных на предыдущей итерации;  $\bar{b}_m$  – значения параметров референтной модели, к которой производится сглаживание;  $\omega_{lk}$  – некоторые веса для практических данных,  $\alpha_m$  и  $\gamma_m$  – параметры регуляризации;  $I_m$  – множество номеров ячеек, окружающих  $m$ -ю ячейку и входящих в ту же подобласть сглаживания [3] (используется только для инверсии в ячеистых структурах).

Приведем пример использования подхода, основанного на поиске проводимости с использованием ячеистых структур, на синтетических данных для относительно простой геоэлектрической 3D-модели, которая содержит два обособленных объекта, один из которых является более проводящим, а другой – менее проводящим, чем слой, в котором они расположены.

При этом будем рассматривать наиболее простую и благоприятную для этого подхода ситуацию, когда объекты расположены в одном слое и ячеистая структура, используемая для подбора, также задана только в этом слое.

В качестве вмещающей возьмем пятислойную горизонтально-слоистую среду с параметрами  $h_1 = 230$  м,  $\rho_1 = 70$  Ом·м,  $h_2 = 270$  м,  $\rho_2 = 15$  Ом·м,  $h_3 = 440$  м,  $\rho_3 = 7$  Ом·м,  $h_4 = 460$  м,  $\rho_4 = 3$  Ом·м,  $\rho_5 = 300$  Ом·м ( $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя,  $\rho_i$  – его удельное сопротивление). В четвертый слой этой среды поместим два объекта, положение которых в плане показано на рис. 1а. Электромагнитное поле возбуждается квадратной петлей размером  $1 \times 1$  км<sup>2</sup>, перемещаемой по трем профилям. На каждом из профилей было сделано по четыре положения приемно-генераторной установки. В каждом положении сигналы регистрируются в 49 приемниках, которые для первого положения приемно-генераторной установки показаны на рис. 1а точками.

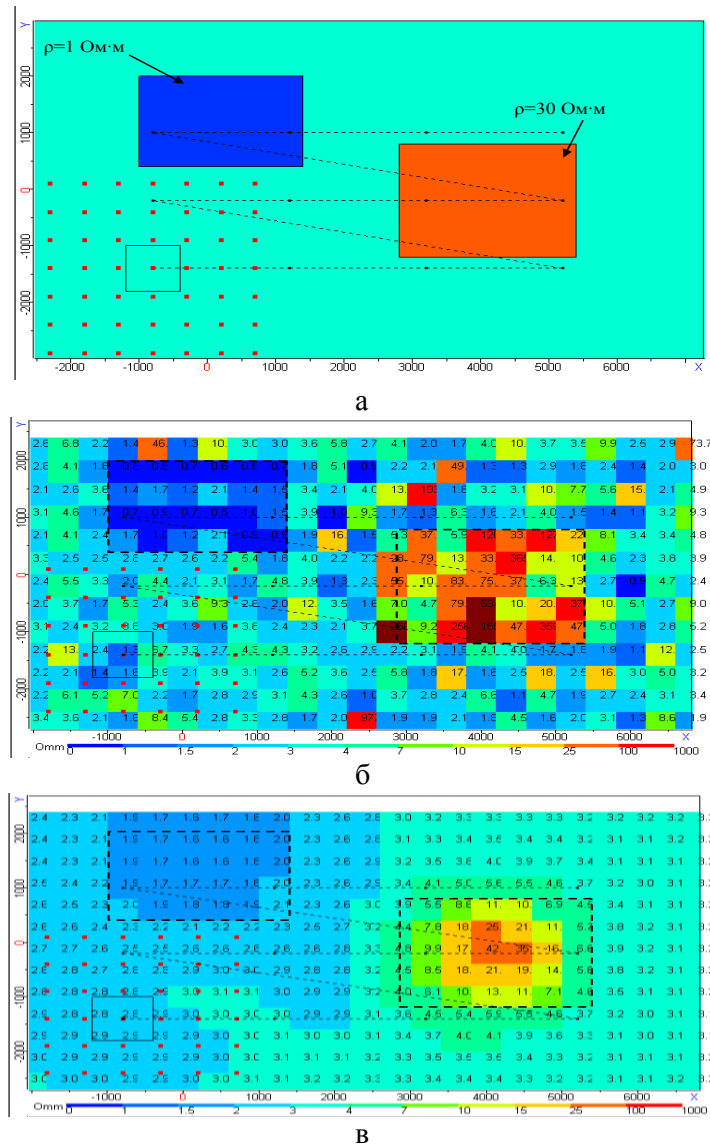


Рис. 1. Результаты 3D-инверсии при использовании ячеистых структур: а – истинная модель, б – результат 3D-инверсии при  $\gamma_m = 0$ , в – результат 3D-инверсии при  $\gamma_m \neq 0$

На рис.1б и 1в приведены два варианта 3D-инверсии для различных параметров регуляризации. При получении результата, приведенного на рис.1б, ненулевыми для регуляризации брались только параметры  $\alpha_m$  (параметры  $\gamma_m$  брались нулевыми), а при получении результата, приведенного на рис. 1в, ненулевыми были как параметры  $\alpha_m$ , так и  $\gamma_m$ . Как видно из полученных результатов, в первом случае картина получается слишком "пестрой", а во втором – слишком сглаженной. Принципиально, конечно, можно подобрать параметры регуляризации, при которых будет получен

результат, более близкий к истинной модели. Однако, очевидно, что подбор этих параметров сильно зависит от среды и на практике корректно определить границы 3D-неоднородностей вряд ли удастся. Кроме того, с увеличением количества ячеек и с дроблением слоев по Z ситуация только ухудшается (либо увеличивается "пестрота", либо теряется конфигурация объектов).

Альтернативным к рассмотренному является подход, в котором наряду с проводимостью ищутся геометрические параметры 3D-объектов [4]. В работе [4] предлагалась двухэтапная процедура, на первом этапе которой поиск осуществлялся в ячеистой структуре с грубыми ячейками, а на втором параметры (геометрия и проводимость) выделенных 3D-неоднородностей уточнялись. В данной работе мы покажем, что первый этап совсем не обязателен. Процедура 3D-инверсии, основанная на поиске параметров 3D-объектов в виде координат их границ и удельной электрической проводимости, позволяет получать адекватный результат, отталкиваясь от очень далекого начального приближения.

В качестве первого примера приведем результаты, полученные для рассмотренной выше трехмерной модели. В качестве стартовой модели была взята модель, в которой было задано два 3D-объекта, расположенных в плане достаточно далеко от объектов истинной модели и удельное сопротивление которых было задано совпадающим с сопротивлением вмещающей среды. В плане эта модель приведена на рис. 2а. В результате нелинейной 3D-инверсии за 31 итерацию было получено уменьшение функционала невязки от 18.1 до 0.026 и были получены 3D-объекты, показанные на рис. 2б. При сравнении с рис. 1а, где показаны объекты истинной модели, можно заключить, что геометрия объектов и их удельное электрическое сопротивление находится практически точно.

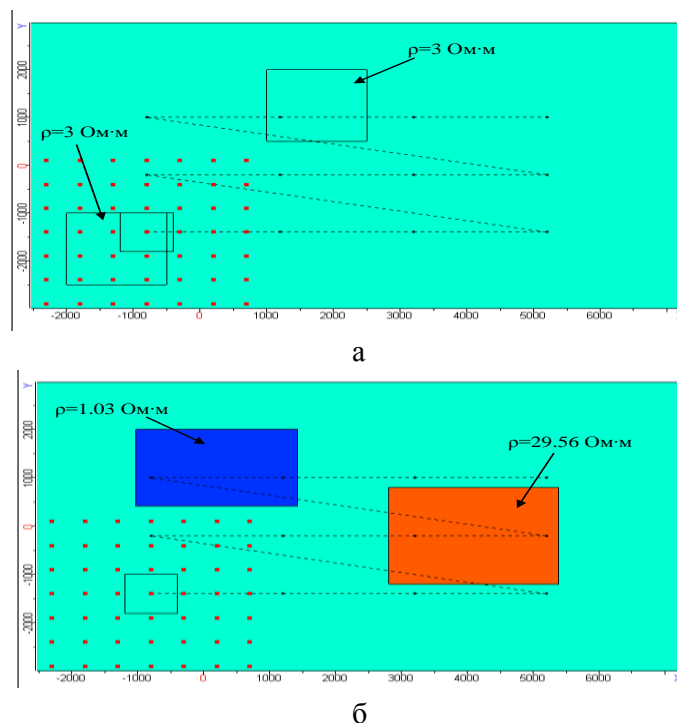


Рис. 2. Результаты 3D-инверсии при использовании подхода с поиском как удельного электрического сопротивления, так и координат границ 3D-объектов: а – стартовая модель, б – результат 3D-инверсии

Усложним ситуацию. Возьмем в качестве истинной модель, в которой слабопроводящий и хорошопроводящий 3D-объекты расположены соответственно в подошве и кровле четвертого слоя. Соответствующая геоэлектрическая модель в плане и в разрезе приведена на рис. 3а. В качестве стартовой возьмем модель, которая содержит два 3D-объекта, далеких в плане от объектов истинной модели, мощностью на весь слой и с удельной электрической проводимостью, совпадающей с проводимостью соответствующего слоя вмещающей среды. Эта модель показана в плане и разрезе на рис. 3б.

В результате нелинейной 3D-инверсии за 74 итерации было получено уменьшение функционала невязки от 5.12 до 0.015 и были получены 3D-объекты, показанные на рис. 3в.

Как видно из результатов, приведенных на рис. 3, и в этой ситуации параметры 3D-объектов находятся очень близкими к истинным (с учетом, конечно, эквивалентности мощность-проводимость).

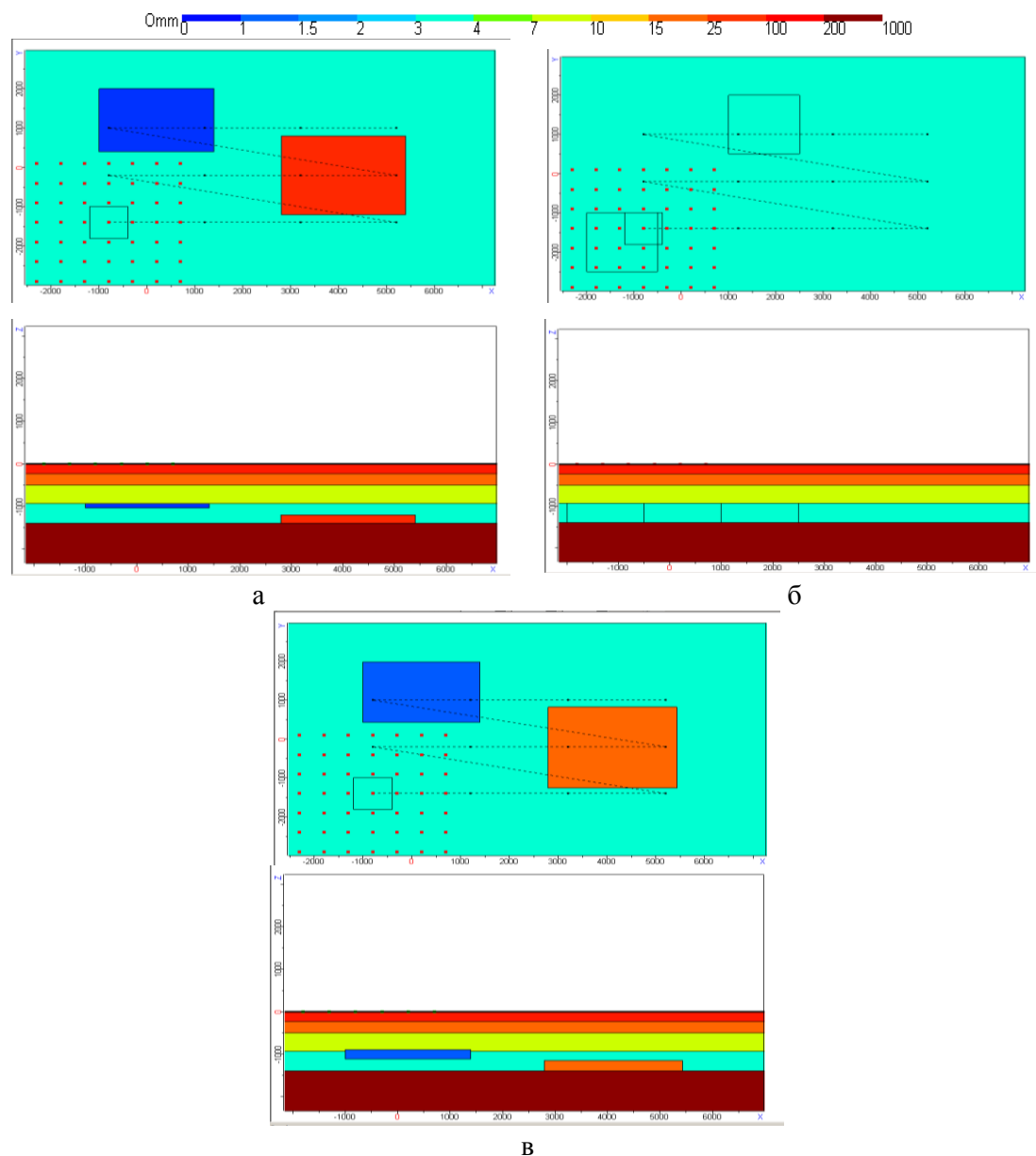


Рис. 3. Результаты 3D-инверсии, когда 3D-объекты расположены в кровле и подошве слоя:  
 а – истинная модель, б – стартовая модель, в – результат 3D-инверсии

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

1. Cox L., Wilson G., Zhdanov M. 3D inversion of airborne electromagnetic data. Geophysics – 2012. Vol. 77. №4. P. WB59-WB69.
2. Oldenburg D., Haber E., Shekhman R. Three dimensional inversion of multisource time domain electromagnetic data. Geophysics–2013. Vol. 78. №1. P. E47-E57.
3. Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Токарева М.Г., Симон Е.И., Абрамов М.В., Сафронова У.А. 3D-инверсия данных вызванной поляризации на основе конечноэлементного моделирования. // Научный вестник НГТУ, № 3 (48), 2012. - С. 25-34.
4. М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Г.М. Тригубович, М.Г. Токарева. Методы и алгоритмы восстановления трехмерной структуры проводимости и поляризуемости среды по данным электромагнитных зондирований на основе конечноэлементного 3D-моделирования. Физика Земли, 2013, № 3, С. 30–45.