

ТРЕХМЕРНАЯ ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ

В.С. Могилатов^{1,2}, Е.Ю. Антонов¹, А.Н. Шеин¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Одной из основных задач структурной электроразведки является картирование рельефа плохо-проводящего консолидированного фундамента. Для ее решения важны как выделение локальных структур в подошве осадочного комплекса, так и оценка искажений результатов интерпретации из-за присутствия в слоистом геоэлектрическом разрезе неоднородных по проводимости областей. Другой, не менее важной задачей электромагнитных зондирований является проблема выделения антиклинальных ловушек нефти и газа. Адекватной этим задачам является горизонтально-слоистая модель с локальными включениями трехмерных аномальных областей. В статье рассмотрен метод зондирований нестационарным электромагнитным полем. Этот метод при решении структурных задач подразумевает достаточно равномерное распределение полей в относительно больших элементах объема исследуемого пространства, что делает эффективным применение метода возмущений (борновского приближения) при решении прямой электродинамической задачи. Представлены результаты применения процедуры трехмерной томографической инверсии с использованием синтетических данных и данных физического моделирования, которые позволяют утверждать, что разработанный математический аппарат для трехмерной инверсии, основанной на борновской линеаризации прямой задачи, вполне работоспособен.

Зондирование становлением поля, борновское приближение, линеаризованная инверсия.

3D TOMOGRAPHIC INVERSION OF TEM SOUNDING DATA

V.S. Mogilatov, E.Yu. Antonov, and A.N. Shein

One of the main objectives of geoelectric prospecting is mapping of the consolidated low-conductivity basement geometry. To resolve the issue, it will be equally important to delineate local structures at the bottom of the sedimentary complex and to estimate the misinterpretation of results due to the presence of areas with nonuniform conductivity in the stratified geologic cross section. Another relevant objective of EM sounding is to resolve the problem of delineation of anticlinal oil and gas traps. The horizontally layered model with a local inclusion of 3D abnormal areas is certain to fit for the above-mentioned objectives. The study is concerned with the technique of nonstationary EM sounding. When applied to the solution of structural problems, this technique considers the uniform distribution of fields within relatively large volume units of the space explored. Consequently, it results in the more efficient application of the perturbation technique (Born approximation) to the solution of the forward electrodynamics problem. The study presents the findings of 3D tomographic inversion with the use of synthetic and physical modeling data. They definitely allow us to acknowledge that the proposed mathematical apparatus for 3D inversion based on Born linearization of the forward problem has proved to be quite applicable.

Transient electromagnetic (TEM) sounding, Born approximation, linearized inversion

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач структурной электроразведки является картирование рельефа плохо-проводящего консолидированного фундамента. В этом случае интерес представляют как задача выделения локальных структур в подошве осадочного комплекса, так и оценка искажений результатов интерпретации за счет присутствия в слоистом геоэлектрическом разрезе неоднородных по проводимости областей. Вполне адекватной этим задачам является горизонтально-слоистая модель с локальными включениями трехмерных аномальных областей. Другой, не менее важной задачей электромагнитных зондирований является проблема выделения антиклинальных ловушек нефти и газа. Данная проблема также допускает постановку в виде объединения одномерной модели вмещающей среды и пространственного включения, с отличающимся от референтного распределением проводимости.

Математическое моделирование нестационарных полей в средах сложной геологической структуры является крайне ресурсоемким даже при условии использования экономичных конечно-разностных

алгоритмов и гибридных схем. Важную роль в этих условиях играет приближенное математическое моделирование. Очень часто физически адекватная замена одной модели другой резко упрощает алгоритмы моделирования. Так или иначе, остается крайне востребованной задача обеспечения быстрых вычислений, поскольку решение прямых задач, как и прежде, составляет основу методов решения обратных задач геоэлектрики. Обычный подход, использующий процедуры решения прямой трехмерной задачи для подбора определенным образом параметризованной трехмерной неоднородности, мало устраивает электроразведчиков из-за медлительности такого процесса.

В данной работе мы рассматриваем метод зондирования нестационарным электромагнитным полем. Этот метод при решении структурных задач подразумевает достаточно равномерное распределение полей в относительно больших элементах объема исследуемого пространства, поэтому при решении прямой электродинамической задачи эффективно применение метода возмущений и, в частности, борновского приближения [Born, 1933].

Методы возмущения нашли применение в численном моделировании электромагнитных полей в двумерных и трехмерных геоэлектрических средах [Обухов, 1967; Давыдов, 1968; Кауфман, Табаровский, 1970а, б; Обухов, Бутковская, 1974; Berdichevsky, Zhdanov, 1984; Табаровский и др., 1988; Эпов, Антонов, 1999]. Кроме того, приближение Борна широко используется при интерпретации экспериментальных данных, потому что обеспечивает линеаризованный подход к решению обратных задач [Bleistein, Gray, 1985; Oristaglio, 1989; Nabashy et al., 1986; Жданов, 2007]. В свою очередь, линеаризованный подход к решению трехмерной обратной задачи может быть реализован в рамках томографической технологии, что мы и демонстрируем в данной работе. Этот подход предлагался нами для зондирования становлением уже довольно давно [Могилатов, 1999; Могилатов и др., 1999; Могилатов, Эпов, 2000], но теперь мы можем показать довольно конкретные результаты.

БОРНОВСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ

Один из наиболее используемых подходов численного моделирования электромагнитных полей основывается на линеаризации интегральных уравнений, которые являются формальной записью точного решения. Линеаризация прямой задачи осуществляется с помощью аппарата теории возмущений. При этом ограничиваются нулевым и первым разложением исходного интегрального уравнения Фредгольма второго рода в ряд Неймана в окрестности решения для одномерной референтной среды. Этот подход обычно называют приближением Борна. Изначально борновское приближение разрабатывалось для описания механического рассеивания фотонов [Born, 1933]. С тех пор основная идея метода получила применение при построении приближенных решений в различных областях науки. В том числе, этот метод нашел применение и в решении задач индукционного и электрического каротажа, методах зондирования становлением электромагнитного поля и др. Рассмотрим кратко эту процедуру.

Предположим, что в некотором объеме среды $V(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ действует возмущающий по отношению к базовой (референтной) модели фактор, зависящий от электрического поля линейно, например, возмущение проводимости. В этой области первое уравнение Максвелла после выключения источника будет выглядеть следующим образом:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \sigma_0(z) \cdot \mathbf{E} + \Delta\sigma(x, y, z) \cdot \mathbf{E}. \quad (1)$$

Представляя электромагнитное поле в виде суперпозиции нормальных ($\mathbf{E}^0$ и $\mathbf{H}^0$) и аномальных ($\mathbf{e}$ и $\mathbf{h}$) полей, а также полагая, что слагаемое $\Delta\sigma$ мало по сравнению с другими слагаемыми в правой части первого уравнения (1), получим систему уравнений для аномального поля, в которой первое уравнение

$$\text{rot } \mathbf{h} = \sigma_0 \mathbf{e} + \Delta\sigma \mathbf{E}^0, \quad (2)$$

т. е. рассматривается одномерная задача с распределенным сторонним током. Решение этой задачи известно и имеет быструю численную реализацию.

Построим подобный алгоритм для петлевого варианта зондирования в ближней зоне (ЗСБ). Итак, источник — токовая петля с током I , радиуса a с центром в точке $S = (x_0, y_0, z_0)$. В этом случае электрическое поле имеет только компоненту E_ϕ в одномерной слоистой среде и решение (пока в частотной области) можно представить как

$$E_\phi^0(x, y, z, S, \omega) = I \cdot e(x, y, z, S, \omega). \quad (3)$$

Область возмущения, которую мы примем в виде параллелепипеда, можно представить совокупностью электрических диполей с моментами $dI = \Delta\sigma \cdot E_\phi^0 \cdot d\bar{x}d\bar{y}d\bar{z}$, где E_ϕ^0 — нормальное (невозмущенное) поле, которым мы заменяем полное поле. Мы также можем использовать в данном случае то

обстоятельство, что задача симметрична относительно петлевых источника и приемника. Итак, полагая, что возмущение $\Delta\sigma$ в области V в целом слабо влияет на процесс становления, мы получим решение одномерной задачи (2), а значит и полный «трехмерный» сигнал в приемной петле с центром в точке $R = (x, y, z)$ в виде

$$E(R, S, \omega) = E^0(R, S, \omega) + I \cdot \Delta\sigma \cdot \iiint_V e(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, S, \omega) e(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, R, \omega) \phi d\bar{x} d\bar{y} d\bar{z}. \quad (4)$$

Рассмотрим формулы (3) и (4) более подробно. Итак, как известно (например [Могилатов, 2014])

$$E_\phi^0(r, z, \omega) = -i\omega\mu \cdot I \cdot a \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) \lambda X(\lambda, \omega, z) d\lambda, \quad (5)$$

где J_1 — функция Бесселя, $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, a — радиус питающей петли, X — решение одномерной задачи в области пространственных гармоник, $i = \sqrt{-1}$ — мнимая единица. Аномальное поле теперь, вместо (4), представится в виде

$$\Delta E(R, S, \omega) = \Delta\sigma \cdot (i\omega\mu)^2 I a b \int_0^\infty \int_0^\infty T(\lambda, \lambda') \lambda \lambda' Z(\lambda, \lambda', \omega) d\lambda d\lambda', \quad (6)$$

$$Z(\lambda, \lambda', \omega) = \int_{z_1}^{z_2} X(\lambda, \omega, \bar{z}) X(\lambda', \omega, \bar{z}) d\bar{z} = \left[\frac{X'_z(\lambda) X(\lambda') - X(\lambda) X'_z(\lambda')}{\lambda^2 - \lambda'^2} \right]_{z_1}^{z_2},$$

$$T(\lambda, \lambda') = J_1(\lambda a) J_1(\lambda' b) \cdot \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \phi(S, R, \bar{x}, \bar{y}) J_1(\lambda r_1) J_1(\lambda' r_2) d\bar{x} d\bar{y},$$

$$r_1 = \sqrt{(\bar{x} - x_0)^2 + (\bar{y} - y_0)^2}, \quad r_2 = \sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2},$$

b — радиус приемной петли, $\{(x_j, y_j, z_j), j = 1, 2\}$ — границы области аномального объекта (параллелепипед), ϕ — геометрический фактор, учитывающий взаимное расположение источника, приемника и объекта (угловой коэффициент). Мы здесь воспользовались свойствами функции X как решения граничной задачи [Могилатов, 2014]. Следует еще рассмотреть Z при $\lambda = \lambda'$.

Во временной области решение получается, если к выражениям (4)–(6) применить обратное преобразование Фурье:

$$F(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{-i\omega} f(x, y, z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega, \quad (7)$$

где ω — циклическая частота, t — время.

Заметим, что возмущение $\Delta\sigma$ в формулах (4) или (6) можно оставить в частотной области или перенести во временную. В первом случае мы получим возможность использовать частотно зависимое возмущение (по формуле Cole-Cole) и, таким образом, распространим наше решение на случай поляризующегося трехмерного включения.

Тестирование процедуры MAG3D, реализующей описанный выше алгоритм, осуществлялось сравнением с точными трехмерными расчетами векторным методом конечных элементов (ВМКЭ) [Персова и др., 2010, 2011]. На рис. 1 дано изображение в плане одной из использованных моделей. Вмещающая среда двухслойная ($\rho_1 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $h_1 = 1000 \text{ м}$, $\rho_2 = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Объект по оси X от -1000 до 1000 м , по Y от -1000 до 500 м , по Z от -600 до -300 м , $\rho = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (проводящий). Петля с радиусом 564 м , с центром в точке $(0, 1000 \text{ м})$, ток 1 А .

Итак, представим для сравнения кривые становления (dB_z/dt) в точке $(1000, -1000)$ (показана стрелкой на рис. 1). На рис. 1 суммарные поля, рассчитанные ВМКЭ и по построенному выше алгоритму борновского приближения, практически совпадают. Этот результат, конечно, выглядит вполне убедительно. Однако на рис. 1 приведена также кривая становления для вмещающей среды — нормальный сигнал. Видно, что влияние неоднородности небольшое. Поэтому хорошо работает борновское приближение. Более показательное сравнение аномальных полей. На рис. 2 приведено такое сравнение, и оно подтверждает удовлетворительную точность решения с помощью борновского приближения. Для моде-

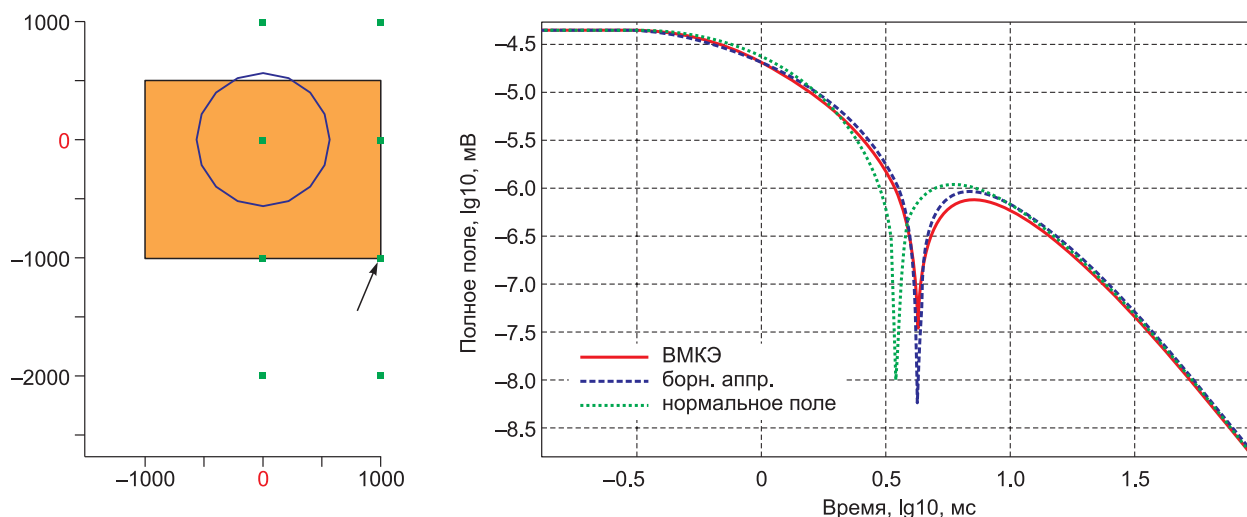


Рис. 1. Модель для тестирования, сравнение расчетов ВМКЭ и программы MAG3D.

Суммарные поля и нормальное поле.

ли, представленной на рис.1, расчеты для других точек измерения, а также и при другом положении источника показывают хорошее согласие борновского приближения с результатами расчетов с помощью ВМКЭ. Вообще же, это непростой вопрос — как оценивать результаты тестирования программы, которая использует заведомо приближенный алгоритм. Авторы на основании многолетнего опыта работы с синтетическими и полевыми сигналами импульсной электроразведки сочли представленный результат весьма удовлетворительным. Более объективную оценку мы получим, используя линейаризованную прямую задачу при решении обратной задачи.

ТОМОГРАФИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ЗС

Такой линейный вид решения прямой задачи, как предлагается формулой (4), сразу наводит на мысль о решении обратной задачи посредством линейной инверсии. Наше приближение означает пренебрежение взаимодействием отдельных возмущений между собой, и мы можем составить линейную систему, связывающую полевые данные и неизвестные возмущения проводимости в некотором количестве пространственных элементов обследуемой области среды. Добавив к этому характерный подход к описанию среды и способы представления результатов инверсии, мы можем претендовать на томографический подход к решению обратной задачи. Впрочем, томографический подход, несколько различным образом понимаемый в конкретных электромагнитных методах, давно провозглашается в стационарной и квазистационарной геоэлектрике, где физические основания определяются уравнениями Лапласа и теплопроводности. Конечно, при этом мы далеко уходим от основ классической рентгеновской томографии и даже от сейсмотомографии с их лучевой и геометрической оптикой.

Томографическая инверсия понимается как один из способов решения обратной задачи. Здесь есть устоявшиеся представления, состоящие в том, что от томографической инверсии ждут весьма оперативного результата в виде некоторых изображений среды (объемных или разрезов). Это достигается за счет известных упрощений. Для томографической инверсии характерно использование приближенного, обычно, линейаризованного решения прямой задачи. Такая постановка проблемы предусматривает привлечение эффективного аппарата линейной инверсии. Приближение (линейаризация) может сопровождаться упрощениями модели физического процесса. Кроме качества прямой

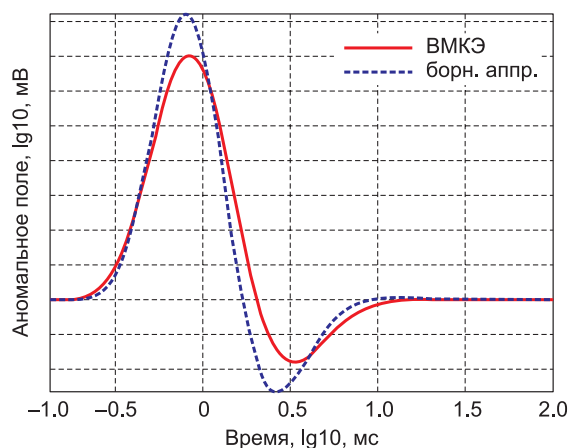


Рис. 2. Сравнение результатов MAG3D и ВМКЭ.

Аномальное поле.

задачи, существуют вопросы удобной параметризации трехмерной структуры среды как совокупности стандартных, однородных внутри элементов, техники линейной инверсии, проблемы представления и оценки результатов инверсии. Все эти вопросы разумным образом решаются в рамках томографического подхода, который можно кратко сформулировать в виде следующих положений:

- 1) область возмущения образована множеством примитивных элементов;
- 2) строится линейаризованное решение многомерной прямой задачи в окрестности простой (одномерной или даже однородной) референтной модели;
- 3) инверсия заключается в обращении линейной системы, связывающей экспериментальные данные и возмущения геоэлектрических параметров относительно референтной среды;
- 4) структура среды восстанавливается по полученному пространственному распределению параметров (например, электропроводности).

Центральным (но не равнозначным всему подходу в целом) пунктом в приведенной схеме является эффективное решение прямой задачи в приближенном, линейаризованном представлении. Совокупность экспериментальных наблюдений, полученных при различных условиях (время регистрации, положение источников и пунктов наблюдения) необходимо соотнести с соответствующими приближенными представлениями, в результате чего получается система линейных уравнений для определения совокупности кусочно-постоянных возмущений проводимости. Итак,

$$\begin{aligned}
 E(t_1) &= E^0(t_1) + I_0 \cdot \sum_{j=1}^K \Delta\sigma_j \cdot G_j(t_1), \\
 E(t_2) &= E^0(t_2) + I_0 \cdot \sum_{j=1}^K \Delta\sigma_j \cdot G_j(t_2), \\
 &\dots\dots\dots \\
 E(t_i) &= E^0(t_i) + I_0 \cdot \sum_{j=1}^K \Delta\sigma_j \cdot G_j(t_i), \\
 &\dots\dots\dots \\
 E(t_N) &= E^0(t_N) + I_0 \cdot \sum_{j=1}^K \Delta\sigma_j \cdot G_j(t_N),
 \end{aligned} \tag{8}$$

где E^0 — переходной сигнал вмещающей одномерной среды, K — количество стандартных объемных элементов (ячейки томографической сетки), на которое мы разбили исследуемую часть среды, $\Delta\sigma_j$ — возмущение проводимости в j -м элементе по отношению ко вмещающей среде, $G_j(t_i)$ — коэффициенты линейаризованного представления (определенного выше) прямой задачи, а N — количество измерений.

Приняв во внимание ошибки в экспериментальных данных, следует использовать большее число данных, нежели число неизвестных. Конечно, предполагается, что данные (измерения) должны быть независимы. Заметим, что при использовании переходных сигналов каждое значение сигнала на каждом времени от каждой кривой становления привносит свое уравнение в систему (8), хотя соседние измерения на кривой становления могут почти не отличаться информативно. Так что систему (8) на практике легко формально переопределить, но фактически, по физическим основаниям, она может быть недоопределена. Мы вполне убедились, что обращение системы (8) отражает некорректность решения обратной задачи. Оно весьма неустойчиво, неоднозначно и нуждается в дополнительных регуляризациях.

В таких условиях решение нужно искать как минимизирующее. Для обращения системы мы использовали стандартный алгоритм, позволяющий находить общее решение переопределенной системы уравнений, основанный на методе наименьших квадратов и разложении по сингулярным числам [Уилкинсон и Райнш, 1976]. При этом множество решений ограничивается решением с минимальной нормой, что хорошо соответствует реальному распределению возмущения проводимости, более или менее гладкому. Пользователю предоставляется возможность выбора варианта решения в зависимости от количества используемых сингулярных чисел.

ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Синтетические данные. Мы использовали имеющиеся у нас трехмерные расчеты методом конечных элементов, сделанные М.Г. Персовой. Модель среды показана на рис. 3, а изображение выполнено с использованием элементов графического интерфейса программы GeoPrep (М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик).

Неоднородность с размерами $2000 \times 1500 \times 300$ м с УЭС 50 Ом · м помещена в двухслойный геоэлектрический разрез. Кровля неоднородности находится на глубине 300 м. Как видим, используются

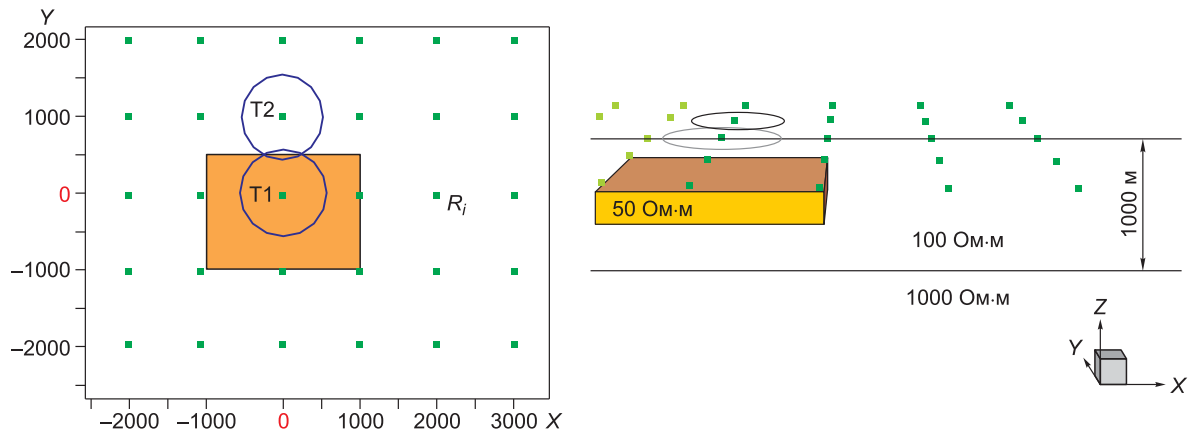


Рис. 3. Модель.

План и разрез.

два положения генераторной петли T1 и T2 с радиусом 564 м (соответствует квадратному контуру 1000×1000 м) и координатами (0, 0) и (0, 1000). От каждого из них регистрируется переходный процесс в 35 точках. Всего, таким образом, имеются 70 кривых становления.

На рис. 4 показан пример кривых становления (нормальной и суммарной) в точке $X = 2000$ м, $Y = -1000$ м. Это расчетные кривые, и они «длинные» (166 времен), с излишними начальной и поздней стадиями, в которых влияние неоднородности отсутствует. К недостаткам материала следует отнести довольно слабое различие в двух положениях источника и наличие больших разносов (> 4 км), где сигнал и, тем более, влияние объекта слабы. Судя по сопоставлению кривой для вмещающей среды и суммарной кривой, аномальный эффект невелик и локализуется во временном интервале, в котором кривые меняют знак, т. е. в окрестности нулевых значений сигналов. Этот факт затрудняет применение традиционных подходов с использованием кажущихся величин.

Первый этап. Итак, мы имеем 70 кривых становления от двух генераторных петель. На первом этапе мы полагаем, что положение неоднородности (и даже ее наличие) нам неизвестны. В таком случае мы подозреваем обширную область в районе зондирования — 3000×3000 м. Для начала рассмотрим трехмерную томографическую сеть, которая показана на рис. 5 — 4×4×2 км. По глубине (м) рассматриваем два слоя $-1000 < z < -600$ и $-600 < z < -300$. Итак, будем определять возмущения проводимости известной вмещающей среды в 32 ячейках томографической сети.

Томографическая инверсия, согласно нашему описанию выше, состоит в выполнении определенных процедур, из которых первую (построение сетки) мы реализовали. Теперь мы должны, согласно выбранной сетке, сделать расчет коэффициентов для каждого элемента, т.е. построить линейризованное решение трехмерной прямой задачи. При этом параметры вмещающего разреза должны быть установлены (например, предварительной одномерной интерпретацией). Расчет коэффициентов, согласно формулам (4)–(8) — наиболее ресурсоемкая часть предлагаемого математического аппарата. Мы должны рассчитать и запомнить устанавливающиеся функции-коэффициенты в количестве $N_x \times N_y \times N_z \times N_t$, где N_x — число разбиений сетки по X , N_y — число разбиений сетки по Y , N_z — число разбиений сетки по Z , N_t — число привлекаемых кривых становления от всех генераторов и приемников, помноженное на число временных отсчетов. В нашем случае получится $4 \times 4 \times 2 \times 70 = 2240$ функций-коэффициентов, каждая из которых определена на 166 временных отсчетах.

Таким образом, составляется линейная система из 70×166 (в нашем случае) уравнений, в которой правая часть есть разность между псевдоэкспериментальными и расчетными данными для нормальной среды. Коэффициенты системы уравнений рассчитываются однократно и консервиру-

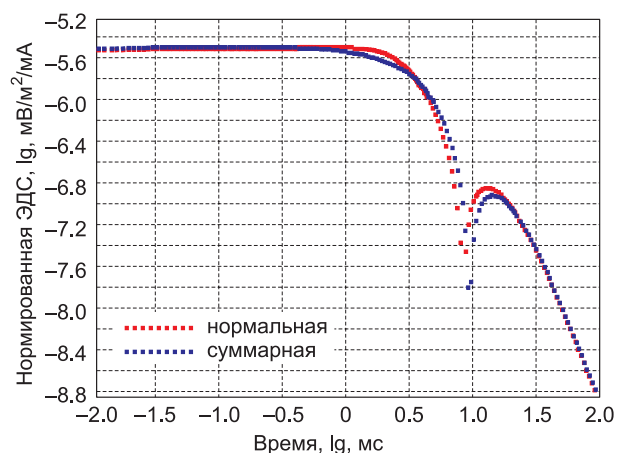


Рис. 4. Пример кривых становления.

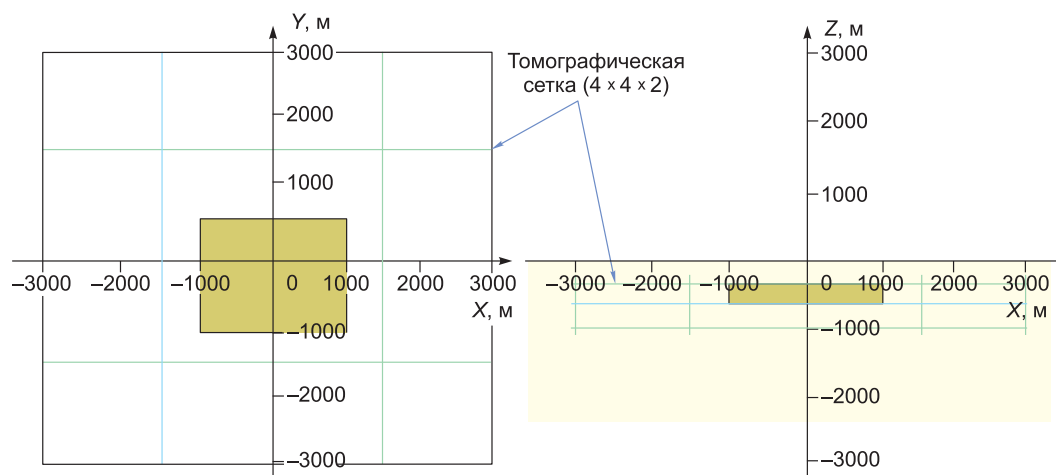


Рис. 5. Грубая томографическая сетка.

ются, а $N_x \times N_y \times N_z$ неизвестными являются возмущения проводимости ($\Delta\sigma$) в каждом примитивном элементе разбиения среды.

Решение линейной системы выполняется методом наименьших квадратов и с регуляризацией (наименьшая норма). Это быстрая процедура (использующая предварительно рассчитанные коэффициенты), поэтому ее можно повторять, изменяя при необходимости параметры инверсии и/или доопределяя некоторые элементы как известные (например, детали рельефа и ВЧР).

На рис. 6 показан послойный результат томографической инверсии. В приведенной на рис. 6 таблице, координаты X и Y отнесены к центрам ячеек томографической сетки.

Видно, что по удельному сопротивлению явно выделились четыре элемента (ячейки) в верхнем слое ($-600 < z < -300$), маркированные в таблице цветом. Здесь же приведен результат в графическом «трехмерном виде». Необходимо отметить, что способы и средства визуального представления результатов инверсии составляют существенную часть томографической технологии.

Второй этап, подробная сетка. Первый этап инверсии позволил грубо локализовать аномальный объект, поэтому на втором этапе можно построить более подробную сетку в области меньших размеров (см. рис. 7). По вертикали был рассмотрен один слой, результат томографической инверсии представлен на рис. 7 в графическом виде.

На рисунке видно, что довольно точно установлено местоположение, форма неоднородности и ее УЭС. Процесс детализации аномального объекта можно продолжать. Однако результат ограничивается как точностью линейного приближения, так и точностью априорных данных о вмещающей среде, количеством и качеством полевых данных.

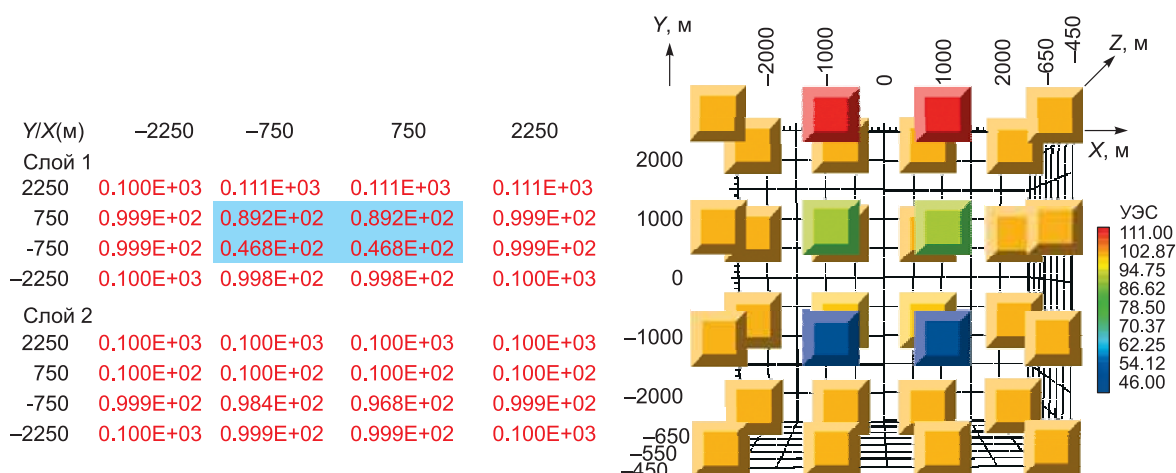


Рис. 6. Результат инверсии на грубой томографической сетке.

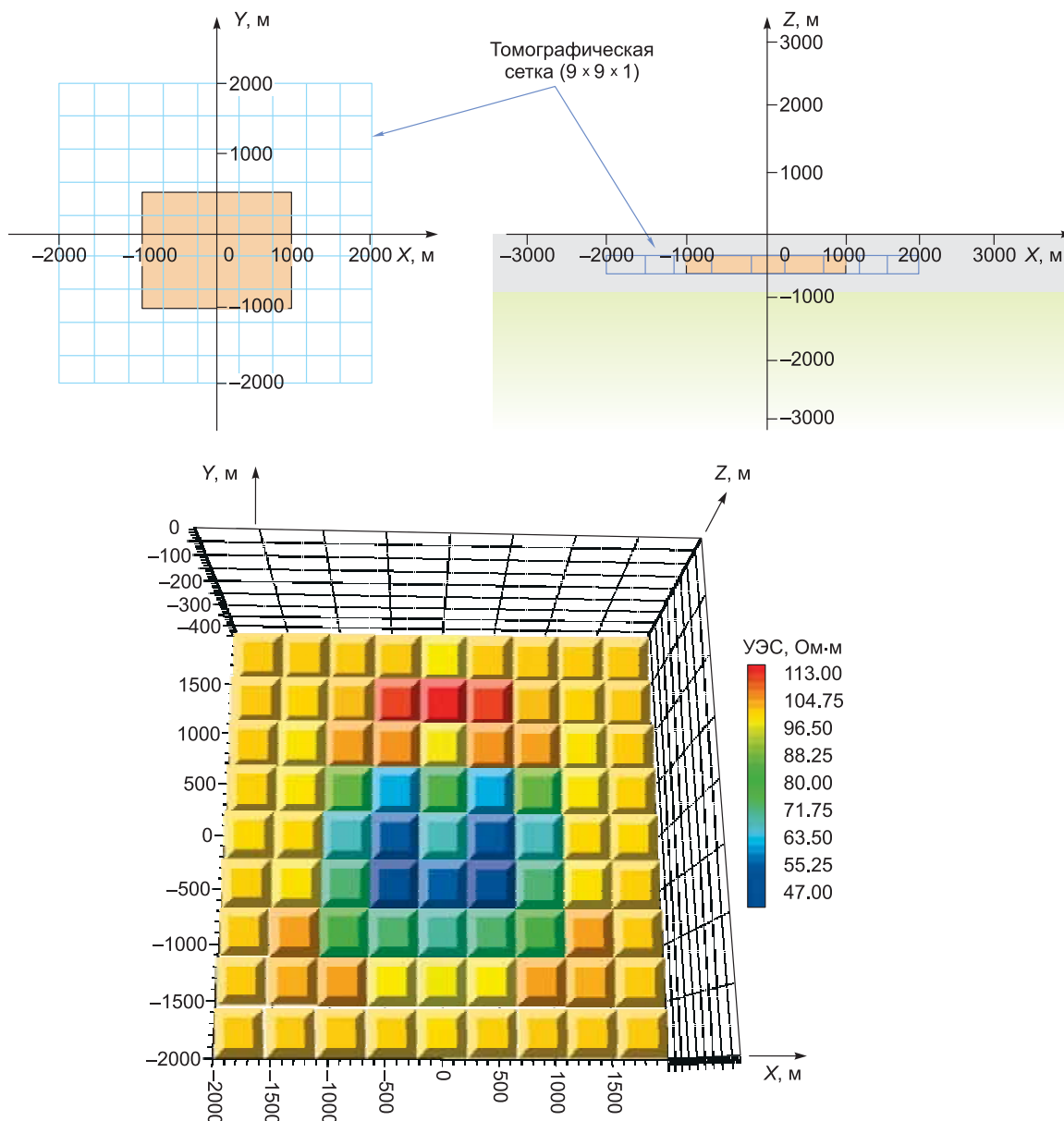


Рис. 7. Подробная томографическая сетка.

Еще примеры инверсии. Приведем еще один пример томографической инверсии с той же моделью и с теми же «полевыми» данными. Здесь мы подробно, в три слоя (100, 100 и 100 м), исследуем целевой горизонт (рис. 8).

До сих пор мы использовали синтетические данные, предоставленные нам М.Г. Персовой. Было интересно также взять расчеты по другой программе трехмерного моделирования. Была использована программа Modem3D (авторы: М.И. Иванов, И.А. Кремер и В.А. Катешов), в которой также применяется векторный метод конечных элементов [Иванов и др., 2007, 2009; Shein et al., 2012; Шеин, 2013; Шеин и др., 2014, 2015]. Для контроля использовались те же модель и набор приемных пунктов, что и раньше, но в систему наблюдения был добавлен третий источник (рис. 9).

Сложное включение. Теперь рассмотрим еще один довольно эффектный результат, когда по площадным регистрациям переходного сигнала от закрепленных источников восстанавливается контур сложной неоднородности (рис. 10). Вмещающая среда такая же, как в предыдущих примерах (слой 1000 м, УЭС 100 Ом·м на основании с УЭС 1000 Ом·м). Неоднородность занимает по вертикали диапазон от 300 м до 600 м, УЭС 30 Ом·м. Использовались пять генераторных петель, отклик регистрировался в 36 пунктах сети наблюдений с шагом 400 м (см. рис. 10).

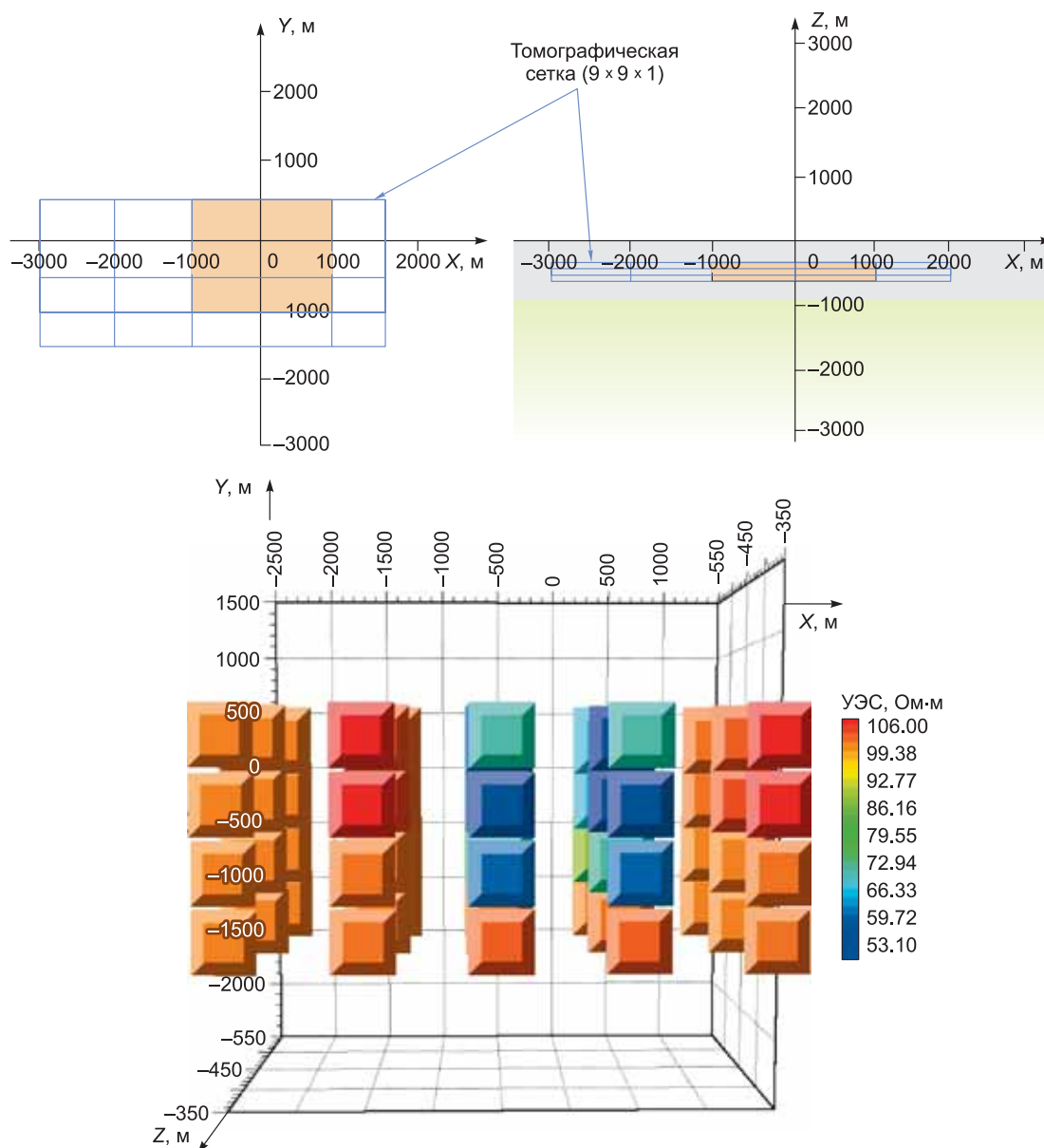


Рис. 8. Еще один пример.

Модель, сетка и результат.

Необходимо отметить особенность этого численного эксперимента. Синтетические данные мы получили, воспользовавшись линеаризованным представлением прямой задачи (прямая задача в борновском приближении). Таким образом, по статусу это вроде бы всего лишь «внутренняя» проверка алгоритма инверсии. Однако мы внесли помехи в виде несовпадения линий томографической сетки (12×12) с границами неоднородности. Таким образом, был получен новый методический результат. Оказалось, что инверсия с пятью генераторными петлями (впрочем, в этом случае использовались только 9 точек наблюдения — всего 45 кривых) не улучшает инверсию с использованием сигналов от одного, центрального источника. Дело в том, что относительный аномальный эффект растет с увеличением разности, а данные, полученные вблизи генераторных петель, подавляют аномальный эффект.

Физическое моделирование. Наконец покажем результат, который является важным шагом к томографической инверсии реальных полевых данных. По нашему предложению, А.К. Захаркин, который является известным специалистом по физическому моделированию процессов становления, провел моделирование на металлических листах, а потом данные и модель были пересчитаны с учетом электродинамического подобия в «натурный» масштаб. Модель показана на рис. 11, где также можно получить

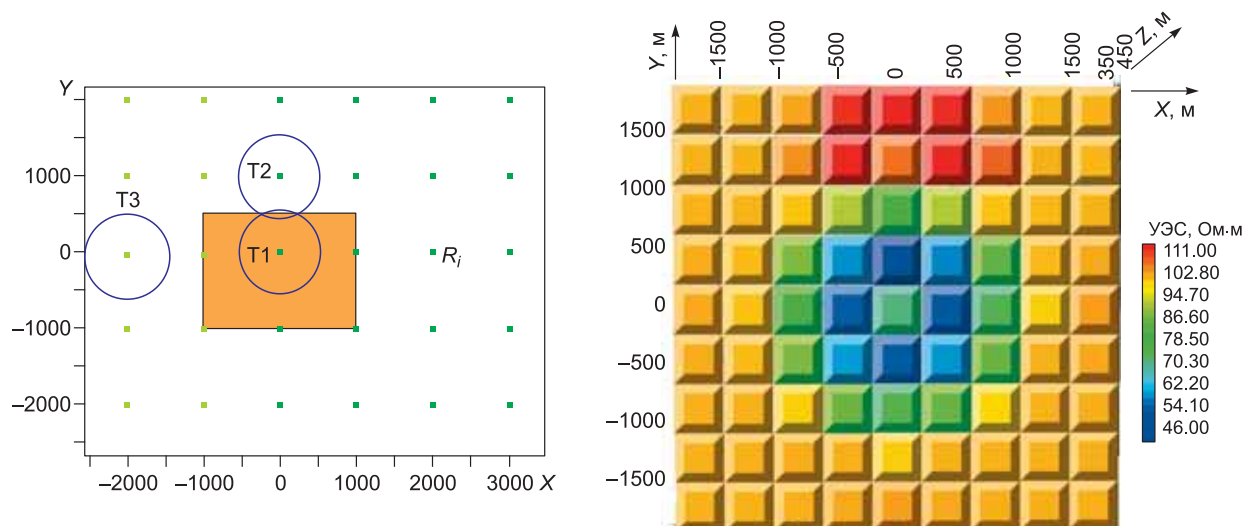


Рис. 9. Модель.

План и разрез.

представление о системе наблюдений, которая складывается из откликов в 22 точках от каждой из двух генераторных петель — всего 44 кривых становления. Для регистрации использовалась стандартная аппаратура «Цикл-7». Разрез состоит из двух проводящих пластов, в нижнем есть вставка (5.5×5.5 км) с пониженной проводимостью (равномерное сверление в металлическом листе).

Результаты, представленные на рис. 12, показывают, что положение, размеры и даже форму удастся восстановить. Надо отметить, что качество моделирования не было каким-то особенным. Вмещающая среда не была совсем выдержанной из-за изгибов металлических пластов. В целом, на наш взгляд, ошибки измерений вполне симулировали ситуацию при полевых работах.

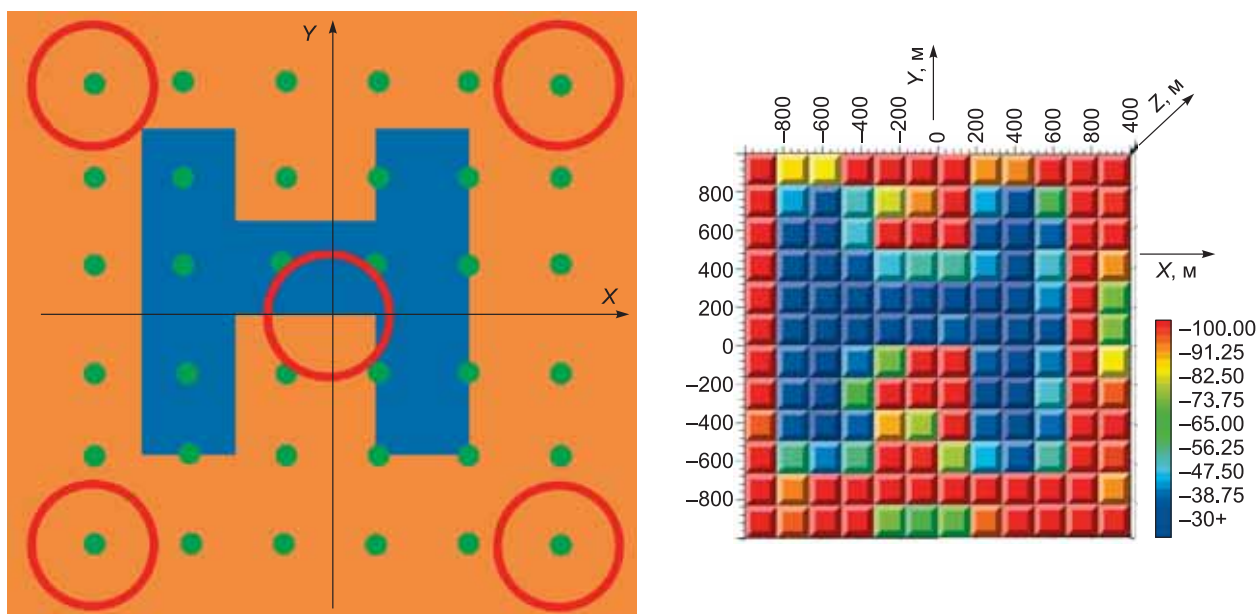


Рис. 10. Сложная неоднородность.

Инверсия переходных сигналов от центрального положения генераторной петли.

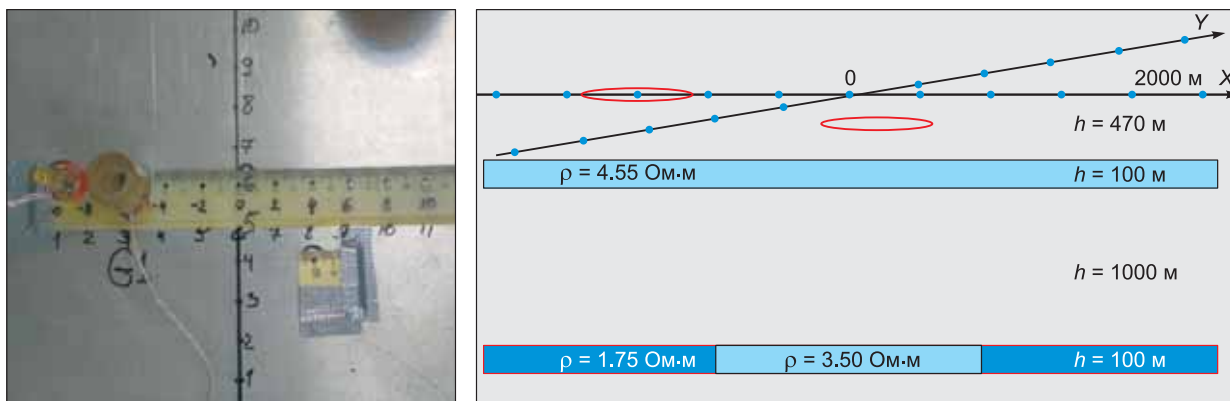


Рис. 11. Физическое моделирование.

Фото установки (слева), эквивалентная модель и система наблюдений.

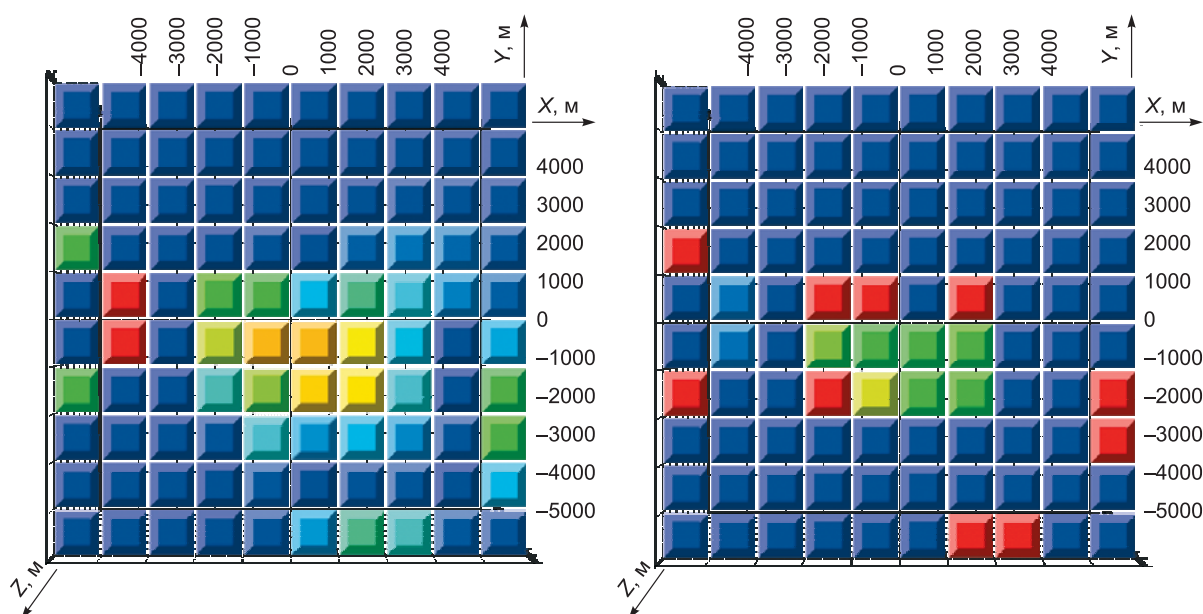


Рис. 12. Результаты инверсии при различных параметрах регуляризации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование процедуры трехмерной томографической инверсии с использованием данных математического и физического моделирования позволяет утверждать, что представленный математический аппарат для трехмерной инверсии, основанной на борновской линеаризации прямой задачи, вполне работоспособен. Можно сказать, что подготовлен уже следующий шаг — привлечение реального полевого материала. Томографический подход должен содержать в себе еще сервисное обеспечение для оперативного и наглядного взаимодействия с базами данных и графические инструменты для представления результатов. Безусловно, наличие точной процедуры решения трехмерной прямой задачи, сильно подержало бы оперативную томографическую инверсию.

Результаты этой работы были получены с привлечением точного трехмерного моделирования, за что мы выражаем благодарность М.Г. Персовой, М.И. Иванову и И.А. Кремеру. Большое значение для нас имели данные физического моделирования, предоставленные А.К. Захаркиным.

ЛИТЕРАТУРА

Давыдов В.М. Электромагнитное поле произвольного источника над пологими структурами // Геология и геофизика, 1968 (6), с. 83—91.

- Жданов М.С.** Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М., Научный мир, 2007, 712 с.
- Иванов М.И., Катешов В.А., Кремер И.А., Урев М.В.** Решение трехмерных нестационарных задач импульсной электроразведки // *Автометрия*, 2007, т. 43, № 2, с. 33.
- Иванов М.И., Катешов В.А., Кремер И.А., Эпов М.И.** Программное обеспечение Модем 3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации // *Записки Горного института*, 2009, т. 183, с. 242—245.
- Кауфман А.А., Табаровский Л.А.** Электромагнитное поле над пологими структурами (двухмерная задача) // *Электромагнитные поля в геофизических методах исследований*. Новосибирск, 1970а, вып. 54, с. 5—31.
- Кауфман А.А., Табаровский Л.А.** Основы теории магнитотеллурических зондирований в средах с пологими структурами. Новосибирск, Наука, 1970б, 107 с.
- Могилатов В.С.** Вторичные источники и линеаризация в задачах геоэлектрики // *Геология и геофизика*, 1999, т. 40 (7), с. 1102—1108.
- Могилатов В.С.** Импульсная геоэлектрика. Новосибирск, Изд-во Новосиб. ун-та, 2014, 182 с.
- Могилатов В.С., Эпов М.И.** Томографический подход к интерпретации данных геоэлектромагнитных зондирований // *Физика Земли*, 2000, № 1, с. 78—86.
- Могилатов В.С., Эпов М.И., Исаев И.О.** Томографическая инверсия данных зондирований становлением // *Геология и геофизика*, 1999, т. 40 (4), с. 637—644.
- Обухов Г.Г.** Поле горизонтального электрического диполя над малыми неровностями изолирующего основания // *Прикладная геофизика*, 1967, вып. 50, с. 124—131.
- Обухов Г.Г., Бутковская А.И.** Теория метода становления поля в ближней зоне в горизонтально-неоднородной среде // *Прикладная геофизика*, 1974, вып. 73, с. 132—143.
- Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Домников П.А., Симое Е.И.** О томографическом подходе к интерпретации данных электромагнитных зондирований в трехмерных средах // *Материалы X Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» ФПЭП-2010*. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2010, т. 6, с. 150—155.
- Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Тригубович Г.М.** Компьютерное моделирование геоэлектромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // *Изв. РАН. Сер. Физика Земли*, 2011, № 2, с. 3—14.
- Табаровский Л.А., Эпов М.И., Антонов Е.Ю.** Электромагнитное поле в средах со слабонегоризонтальными границами. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1988, 21 с. (Деп. в ВИНТИ, 04.08.88, № 6258-B88).
- Уилкинсон Дж., Райнш К.** Справочник алгоритмов на языке Алгол / Пер. с англ. М., Машиностроение, 1976, 390 с.
- Шейн А.Н.** Особенности программы для расчета нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах Modem3D // *Материалы Всероссийской научной конференции в 2-х т. Т.2 / Старооскольский филиал ФГБОУ ВПО МГРИ-РГГРУ/ИПК «Кириллица»*. Старый Оскол, 2013, с. 99—104.
- Шейн А.Н., Могилатов В.С., Антонов Е.Ю.** Опробование томографической 3D-инверсии данных зондирований становлением на основе линейного (борновского) приближения // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. (8—18 апреля 2014 г., Новосибирск)*. Новосибирск, СГГА, 2014, с. 159—164.
- Шейн А.Н., Могилатов В.С., Антонов Е.Ю.** Ограничения томографического подхода 3D-инверсии данных зондирований становлением на основе линейного (борновского) приближения. Интерэкспо Гео-Сибирь. Междунар. конференция «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» // *Геоэкология*, 2015, т. 2, № 2, с. 294—298.
- Эпов М.И., Антонов Е.Ю.** Прямые задачи электромагнитных зондирований с учетом дисперсии геоэлектрических параметров // *Физика Земли*, 1999, № 3—4, с. А48-А55.
- Berdichevsky M.N., Zhdanov M.S.** Advanced theory of deep geomagnetic sounding. Elsevier Science Publ. Co., Inc., 1984, 408 p.
- Bleistein N., Gray S.H.** An extension of the Born inversion method to a depth-dependent reference profile // *Geophys. Prosp.*, 1985, v. 33, p. 999—1022.
- Born M.** Optic. Springer Publ. Co., 1933, 591 p.
- Habashy T.M., Chew W.C., Chow E.Y.** Simultaneous reconstruction of permittivity and conductivity profiles in a radially inhomogeneous slab // *Radio Sci.*, 1986, v. 21, № 4, p. 635—645.
- Oristaglio M.L.** An inverse-scattering formula that uses all the data // *Inverse Prob.*, 1989, v. 5, p. 1097—1105.

Shein A.N., Antonov E.Yu., Kremer I.A., Ivanov M.I. Interpretation of TEM data by the program Modem3D for 3D modeling of transient electromagnetic field // The 6th International Siberian Early Career GeoScientists Conference: Proceedings of the Conference (9—23 June 2012, Novosibirsk, Russia). IGM & IPPG SB RAS. Novosibirsk, NSU, 2012, p. 303—304.

*Рекомендована к печати 18 декабря 2017 г.,
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
15 июня 2017 г.*