

ОПЫТЫ ПО ТРЕХМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

П.Ю. Пушкарев, В.А. Куликов, Е.В. Мойланен

Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Введение

Трехмерная (3D) инверсия магнитотеллурических (МТ) данных довольно широко применяется за рубежом при глубинных и поисково-разведочных исследованиях. В последнее время, в связи с появлением довольно мощных персональных компьютеров и установкой в ряде научных центров страны суперкомпьютеров, появились возможности применять ее и в России.

3D инверсия МТ-данных наиболее эффективна при площадных наблюдениях, впрочем, опыт показывает, что она дает важную информацию и при наличии нескольких удаленных профилей, и даже одиночного профиля наблюдений. Едва ли можно утверждать, что на практике 3D инверсия повсеместно обеспечит результат лучший, чем могут дать методы 2D и даже 1D инверсии, поскольку ей сложнее управлять и дольше ждать результатов расчетов. Однако она становится необходимой в случаях, когда трехмерные эффекты в МТ-поле сопоставимы с аномальным эффектом от изучаемых геоэлектрических структур.

В настоящей работе мы вкратце рассмотрим теоретические основы 3D инверсии МТ-данных и особенности программного обеспечения, а затем приведем примеры инверсии характерных для рудоносных районов синтетических и наблюдаемых данных.

Теоретические основы 3D инверсии МТ-данных

При инверсии МТ-данных (т.е. при решении обратной задачи) строится геоэлектрическая модель, обеспечивающая минимум невязки между модельными и наблюдаемыми данными, и удовлетворяющая определенным априорным ограничениям. Модельные данные при этом вычисляются в результате решения прямой задачи.

В нашем случае решение прямой задачи сводится к определению электрического и магнитного полей из уравнений Максвелла в квазистационарном приближении. Для этого применяются численные методы: конечных разностей или интегральных уравнений. При этом область, включающая неоднородности, заменяется сеткой, в ячейках которой задаются дискретные значения электропроводности. Задача решается для двух поляризаций сторонних токов, и далее из линейных соотношений, которым удовлетворяют компоненты МТ-поля, вычисляются компоненты тензора импеданса $[Z]$ и других матриц (Бердичевский и Дмитриев, 2009).

Существует два различных подхода к инверсии МТ-данных. При «сглаживающей» инверсии стабилизацию решения обеспечивает условие медленного изменения электропроводности от ячейке к ячейке. При таком подходе заглаживаются детали геоэлектрических структур, но зато он не очень требователен к выбору стартовой геоэлектрической модели. При «блочной» инверсии ячейки объединяются в блоки, каждому из которых отвечает одно значение электропроводности. Стабилизация осуществляется за счет резкого уменьшения количества искомых параметров. «Блочная» инверсия в принципе позволяет получать геологически осмысленный и детальный результат, но он существенно зависит от заданной пользователем геометрии границ блоков.

Программное обеспечение для 3D инверсии МТ-данных

Наибольшее распространение в мире получили две похожие программы, обеспечивающие «сглаживающую» 3D инверсию МТ-данных. Их авторами являются R. Mackie и W. Siripunvaraporn. Существует еще несколько программ, в основном используемых самими авторами и возглавляемыми ими группами (среди них М.С. Жданов, В.В. Спичак, И.М. Варенцов, Д.Б. Авдеев, А.В. Кувшинов).

В настоящей работе мы использовали программу WSIInv3DMT (Siripunvaraporn et al., 2005a). Прямая задача в этой программе решается методом конечных разностей. Эффективное использование вычислительных ресурсов при решении обратной задачи обеспечивает алгоритм, позволивший вместо системы уравнений размерности M^2 решать систему размерности N^2 (где M – число искомых электропроводностей, N – число данных, при этом как правило $M \gg N$). Программа выполняет инверсию четырех компонент тензора импеданса $[Z]$, однако в следующей версии станет возможной и инверсия компонент матрицы Визе-Паркинсона $[W]$.

Нами разработано дополнительное программное обеспечение для формирования входных файлов и для считывания и визуализации получаемых геоэлектрических моделей, а также модельных и наблюдаемых данных. Расчеты проводились не персональном компьютере с большим по современным меркам объемом оперативной памяти (12 Гб), что позволило использовать представительный набор МТ-данных и получить детальные геоэлектрические модели. При задействовании почти всей памяти, одна 3D инверсия (5-10 итераций) занимала 1-2 недели.

Инверсия синтетических МТ-данных

Синтетические МТ-данные были получены в результате решения прямой 3D задачи по программе MT3DFwd (автор – R. Mackie) и отвечают геоэлектрической модели, приведенной на рис. 1. Эта модель представляет собой схематизированный результат МТ-исследований на одной из площадей Норильского рудного узла, выполненных ООО «Северо-Запад».

В фоновом двухслойном разрезе присутствует высокоомная интрузия, состоящая из широкой верхней и более узкой нижней части. В подошве интрузии, на глубине примерно 250 – 300 м, располагаются два небольших рудных тела, обладающих высокой электропроводностью.

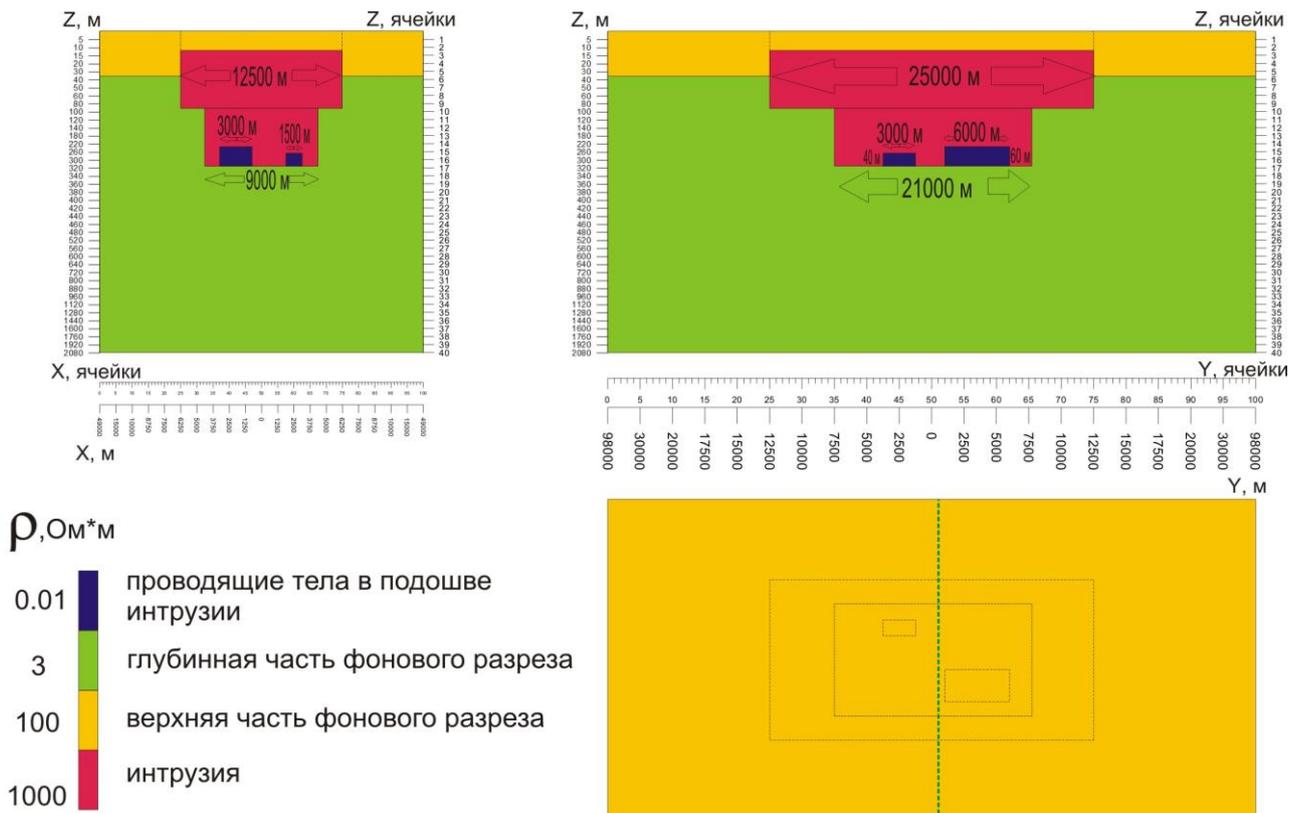


Рисунок 1. Трехмерная геоэлектрическая модель интрузии с локальными проводящими зонами. Проекция на плоскости xOz , yOz и xOy , на последней показана линия профиля.

Нами выполнена 3D инверсия всех компонент тензора импеданса $[Z]$, полученных на одиночном профиле длиной 20 км (шаг 500 м), пересекающем интрузию и проходящем между рудными телами. Стартовой моделью служило однородное полупространство сопротивлением 10 Ом*м.

На рисунке 2 приведен горизонтальный срез (на глубине 680 м) полученной в результате инверсии 3D геоэлектрической модели. Профиль проходит по линии $y = 0$ от $x = -10$ км до $x = 10$ км. По бокам от профиля сопротивление постепенно приближается к $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, отвечающим стартовой модели. На краях профиля наблюдаются характерные артефакты, возникающие вследствие эквивалентности моделей при недостатке данных. Эти явления в той или иной степени можно подавить выбором стартовой модели и регулировкой ее гладкости.

На карте присутствуют обе проводящие аномалии, между которыми прошел профиль. Их местоположение определено принципиально верно благодаря использованию дополнительных компонент тензора импеданса (Z_{xx} и Z_{yy}). Попытки выполнить инверсию только основных компонент тензора импеданса (Z_{xy} и Z_{yx}) приводили к построению эквивалентных геоэлектрических моделей, существенно отличающихся от истинной. Примерно такой же вывод уже был сделан в работе (Siripunvaratong et al., 2005b). Однако глубина, на которой выполнен срез модели, в 2 раза превышает истинную глубину залегания проводящих неоднородностей. То есть мы видим наблюдаем проводящие «корни» аномалий, характерные для результатов «сглаживающей» инверсии.

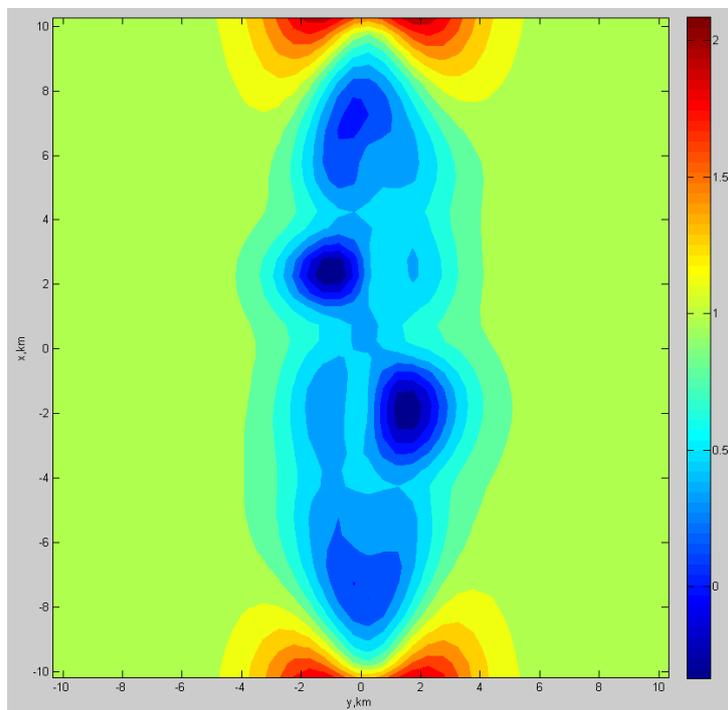


Рисунок 2. Карта удельного сопротивления (десятичный логарифм) на глубине 680 м, построенная по результатам 3D инверсии синтетических МТ-данных (после 18 итераций).

Инверсия наблюдаемых МТ-данных

Рассмотрим результаты 3D инверсии МТ-данных, полученных ООО «Норильскгеология» на еще одной площади Норильского рудного узла. Измерения проводились на нескольких удаленных друг от друга профилях, кроме того, на некоторых участках кондиционные данные отсутствовали из-за помех, поэтому сеть наблюдений получилась весьма нерегулярная. Точки наблюдения показаны на рисунке 3, иллюстрирующем также степень совпадения модельных и наблюдаемых данных.

Ограниченный объем тезисов не позволяет нам представить соответствующую геоэлектрическую модель. Отметим лишь, что ее получение потребовало многократных перезапусков программы с разными значениями параметров, определяющих погрешность данных и гладкость модели. Это объясняется, с одной стороны, резкими изменениями кривых МТ-зондирования от точки к точке, что заставляло программу строить контрастную модель, а с другой стороны, большими расстояниями между профилями, что позволяло программе создавать между ними яркие аномалии. Полученная

геоэлектрическая модель хорошо согласуется с имеющейся геологической информацией о строении участка работ, в отличие от моделей, полученных в результате 1D и 2D инверсии МТ-данных.

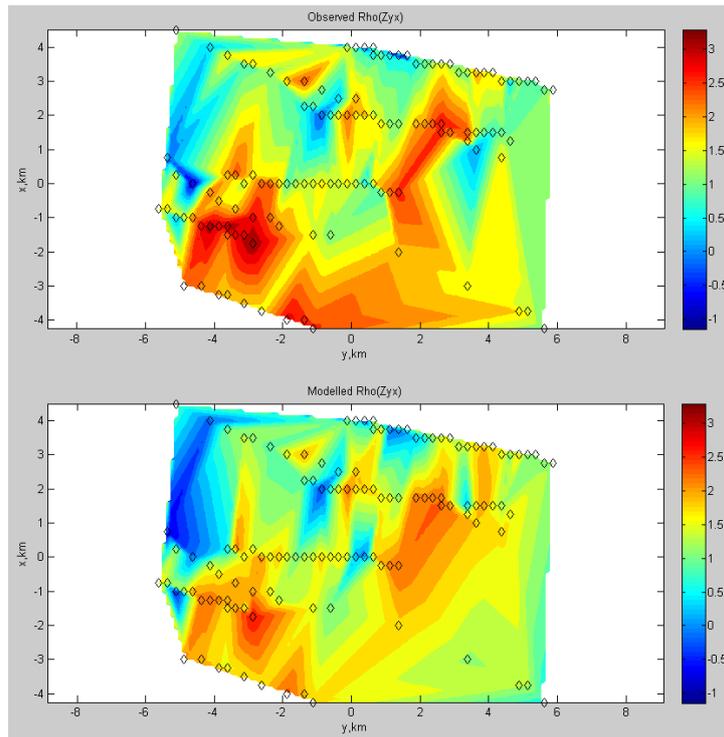


Рисунок 3. Карты наблюдаемых и модельных значений кажущегося сопротивления (десятичные логарифмы) по компоненте Zyx на периоде 0.034 с. Модельные значения отвечают 3D модели, полученной при инверсии наблюдаемых данных (после 10 итераций). Ромбики – точки наблюдения.

Выводы

1. 3D инверсия синтетических МТ-данных, полученных на одиночном профиле, дала информацию о геоэлектрических структурах в стороне от него. Это подтверждает идею М.Н. Бердичевского и В.И. Дмитриева о возможности «бокового зондирования» более или менее широкой полосы, охватывающей профиль.
2. 3D инверсия наблюдаемых на нерегулярной сети МТ-данных позволила построить геоэлектрическую модель, которая лучше, чем результаты 1D и 2D инверсии, согласуется с имеющейся геологической информацией об участке работ.
3. Уровень развития персональных компьютеров и активное внедрение суперкомпьютеров позволяют применять 3D инверсию при решении современных научных и прикладных задач геофизики.

Благодарности

Прежде всего, мы весьма признательны W. Siripunvaraporn, сделавшему свою программу открытой для научного сообщества (для некоммерческого использования). Мы также благодарим сотрудников ООО «Норильскгеология» и ООО «Северо-Запад» за представление материалов, позволивших практически оценить возможности программы.

Ссылки

- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., 2009. Модели и методы магнитотеллурики. Москва, Научный мир, 680 с.
- Siripunvaraporn W., Egbert G., Lenbury Y., Uyeshima M., 2005a. Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method. *Physics of the Earth and planetary interiors*, Vol. 150, p. 3-14.
- Siripunvaraporn W., Egbert G., Uyeshima M., 2005b. Interpretation of 2-D magnetotelluric profile data with 3-D inversion: synthetic examples. *Geophysical Journal International*, Vol. 160, p. 804-814.