

В. В. Плоткин^{1✉}, Е. В. Поспеева¹, В. В. Потапов¹, А. А. Заплавнова¹

Оценки достоверности результатов магнитотеллурического зондирования

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Обратная задача МТЗ неустойчива, даже весьма малым изменениям входных экспериментальных данных – амплитудных и фазовых кривых МТЗ соответствует широкий набор эквивалентных моделей сред. Поэтому для характеристики достоверности результатов МТЗ необходимо определять и приводить разбросы параметров эквивалентных моделей сред. Предлагается алгоритм оценки достоверности результатов МТЗ.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, неустойчивость обратной задачи, достоверность результатов

V. V. Plotkin^{1✉}, E. V. Pospeeva¹, V. V. Potapov¹, A. A. Zaplavnova¹

Estimates of Reliability of Magnetotelluric Sounding Results

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

Abstract. The inverse problem of magnetotelluric sounding (MTS) is unstable, even very small changes in the input experimental data - amplitude and phase curves of MTS correspond to a wide range of equivalent media models. Therefore, to characterize the reliability of MTS results, it is necessary to determine and cite the variations in the parameters of equivalent media models. An algorithm for evaluating the reliability of MTS results is proposed.

Keywords: magnetotelluric sounding, inverse problem instability, reliability of results

Введение

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) применяется для определения пространственного распределения и величин электропроводности внутри среды [1, 2]. В эксперименте регистрируются кривые МТЗ – зависимости кажущихся сопротивлений и фаз импеданса от частоты зондирования. При наличии помех значения всех характеристик определяются лишь приблизительно с некоторой погрешностью, зависящей от уровня этих помех. Искомая глубинная структура электропроводности в среде определяется в ходе решения обратной задачи. Но такая задача является неустойчивой. Даже весьма малым изменениям входных экспериментальных данных – амплитудных и фазовых кривых МТЗ может соответствовать широкий набор эквивалентных моделей сред. Следовательно, для характеристики достоверности результатов МТЗ необходимо связать уровень экс-

периментальных погрешностей с разбросами искомых параметров эквивалентных моделей сред.

В данной работе предлагается способ оценки достоверности результатов МТЗ, позволяющий получить и отобразить набор эквивалентных моделей в зависимости от погрешностей экспериментальных данных.

Алгоритм оценок достоверности результатов МТЗ

Обратная задача МТЗ заключается в поисках модели среды, наилучшим образом соответствующей экспериментальным данным. В процессе поиска для каждой из таких моделей сред решается прямая задача вычисления кривых МТЗ. В зависимости от размерности предполагаемой модели среды используют различные методы решения прямой задачи. В случае 1D среды вычисления проводились по аналитическим формулам для горизонтально слоистой модели [2]. Для 2D и 3D сред расчеты выполнялись по методу Треффца [3, 4]. Модели среды в этих случаях представляются набором параллелепипедов, в которых электропроводность однородна.

Обратные задачи решались нелинейным методом наименьших квадратов с вычислениями матрицы чувствительности [5]. Решение находилось по данным пунктов МТЗ с помощью минимизации следующего целевого функционала:

$$\Phi = \frac{1}{4K} \sum_{k=1}^K \left(\left| \frac{\ln \rho_{xy} - \ln \rho_{xy}^0}{\ln \rho_{xy}^0} \right|_k^2 + \left| \frac{\ln \rho_{yx} - \ln \rho_{yx}^0}{\ln \rho_{yx}^0} \right|_k^2 + \left| \frac{\varphi_{xy} - \varphi_{xy}^0}{\varphi_{xy}^0} \right|_k^2 + \left| \frac{\varphi_{yx} - \varphi_{yx}^0}{\varphi_{yx}^0} \right|_k^2 \right),$$

где K – количество учитываемых временных периодов и имеющихся пунктов МТЗ, $\rho_{xy, yx}, \rho_{xy, yx}^0, \varphi_{xy, yx}, \varphi_{xy, yx}^0$ – кажущиеся сопротивления и фазы для текущей и исходной модели среды соответственно.

Предлагаемый алгоритм оценок достоверности результатов МТЗ применен к тестовым моделям сред и состоит из следующих этапов. Для всех выбранных тестовых моделей сред решения обратной задачи находились несколько раз с разными стартовыми моделями и ограниченным количеством итераций. По результатам всех решений обратных задач определялись средняя модель среды, с.к.о. параметров эквивалентных моделей и соответствующих кривых МТЗ.

Оценки достоверности результатов МТЗ

Предлагаемым алгоритмом получены оценки достоверности результатов МТЗ для случаев 1D сред. В качестве одного примера на рис. 1 отображена исходная модель среды (сплошная черного цвета). Она состоит из 5 слоев толщиной 3 км каждый с сопротивлениями 40, 10, 10^2 , 10^3 , 10^5 Ом·м (сверху вниз) и подстилающим пространством с сопротивлением 10^6 Ом·м.

Обратная задача решалась 50 раз с различными стартовыми моделями. Все стартовые модели также представлены 5 слоями, но со случайным выбором тол-

щин слоев (от 2.8 до 3.2 км) и их сопротивлений в диапазоне $1-10^3$ Ом·м. Такие коридоры изменения параметров определяют соответствующие наборы эквивалентных моделей искомой среды. Решение каждой обратной задачи ограничивалось 15 итерациями, практически во всех вариантах невязки кривых МТЗ по относительной величине не превышали 10^{-4} . На рис. 1 (внизу) даны кривые МТЗ для исходной модели (сплошные линии) и для всех эквивалентных моделей (пунктир). Однако даже столь малым невязкам кривых МТЗ для всех эквивалентных моделей 1D среды соответствуют широкие коридоры их параметров. На рис.1 (вверху) сплошной линией красного цвета приведена усредненная по всем эквивалентным модель среды и пунктиром коридоры (с.к.о.) параметров этих моделей. Стоит отметить, что надежнее определяются верхние слои исходной модели, а более глубокие слои - с большим разбросом эквивалентности моделей даже при очень малых с.к.о. кривых МТЗ. Это вызвано диффузным характером распространения электромагнитного поля и увеличением толщины скин-слоя на более низких частотах.

В качестве другого примера на рис. 2 и 3 отображены результаты расчетов для модели 2D среды, состоящей из пяти неоднородных вдоль оси OX слоев и однородного подстилающего полупространства. Моделировался наклонный разлом, справа от него сопротивление среды задавалось равным 10^3 Ом·м, слева сопротивления слоев равны 100, 200, 400, 600, 800 Ом·м (сверху вниз), все слои толщиной 6 км. Подстилающее полупространство 10^3 Ом·м. В каждом слое модель представлялась набором одинаковых параллелепипедов, в которых электропроводность однородна. Их количество 11, размер полигона вдоль оси OX равен 44 км. На поверхности среды имеется 9 пунктов МТЗ, расположенных через 5 км (они показаны на поверхности крестиками и цифрами черного цвета).

Обратная задача решалась 10 раз с различными стартовыми моделями. Все стартовые модели задавались как однородное полупространство с различным сопротивлением (вблизи 500 Ом·м, случайные отклонения сопротивлений определяли разброс эквивалентных моделей искомой среды). Толщины слоев также задавались случайным образом (вблизи 7 км). Решение каждой обратной задачи ограничивалось 50 итерациями. Для регуляризации также вводились априорные данные в виде ограничений на коридоры искомых параметров модели среды (диапазон сопротивлений 50-2000 Ом·м, толщин слоев 5-10 км). По результатам 10 решений обратных задач определялись средняя модель среды, с.к.о. ее параметров, а также разбросы кривых МТЗ. Во всех вариантах решений невязки кривых МТЗ по относительной величине не превышали 10^{-6} . На рис. 3 показаны кривые МТЗ во всех пунктах для исходной тестовой модели (сплошными линиями). Пунктиром показаны те же кривые для усредненной модели по всем эквивалентным моделям. Вертикальными отрезками черного цвета отображены с.к.о. кривых, вычисленные по всем эквивалентным моделям (по сопротивлениям они <3.5 Ом·м, по фазам $<0.5^\circ$).

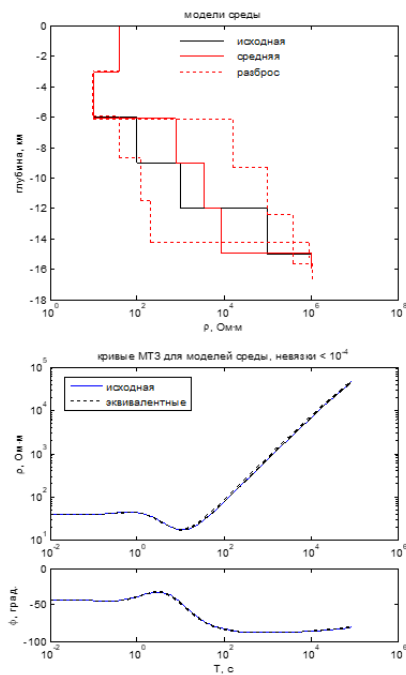


Рис. 1. Разбросы параметров эквивалентных моделей для случая 1D среды (вверху) и разбросы параметров соответствующих кривых МТЗ (внизу).

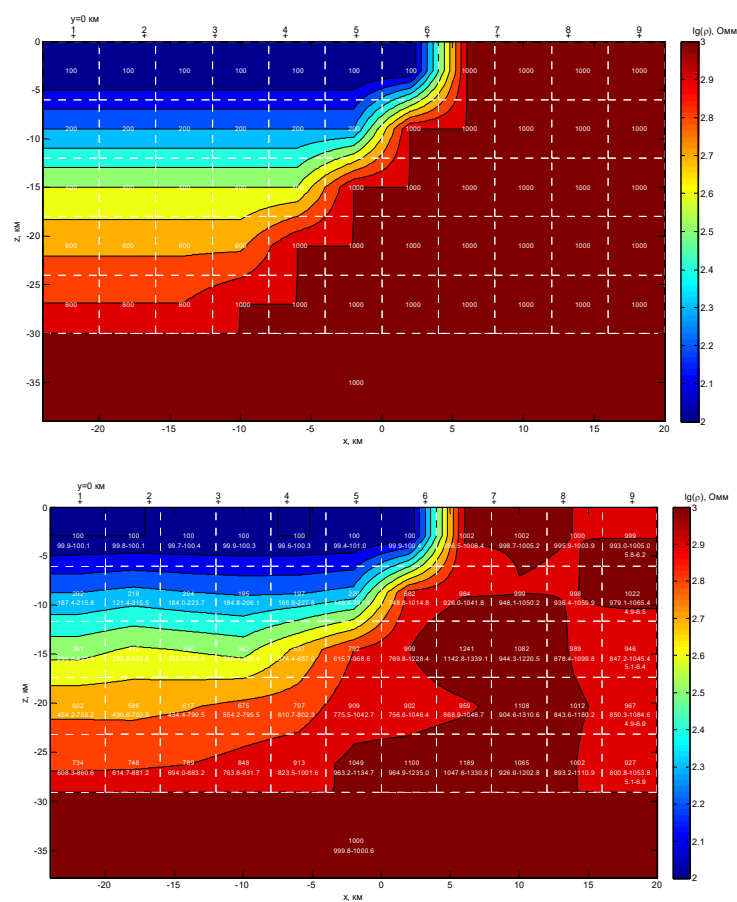


Рис. 2. Исходная (вверху) и усредненная по всем эквивалентным модель 2D среды (внизу).

Цифрами белого цвета указаны сопротивления, их разбросы, дополнительно в правой колонке - разбросы толщин слоев в эквивалентных моделях для всех параллелепипедов, отображающих среду в расчетах методом Треффца, на поверхности указаны пункты МТЗ. Пунктирами белого цвета показаны границы параллелепипедов, представляющих среднюю и исходную модели среды.

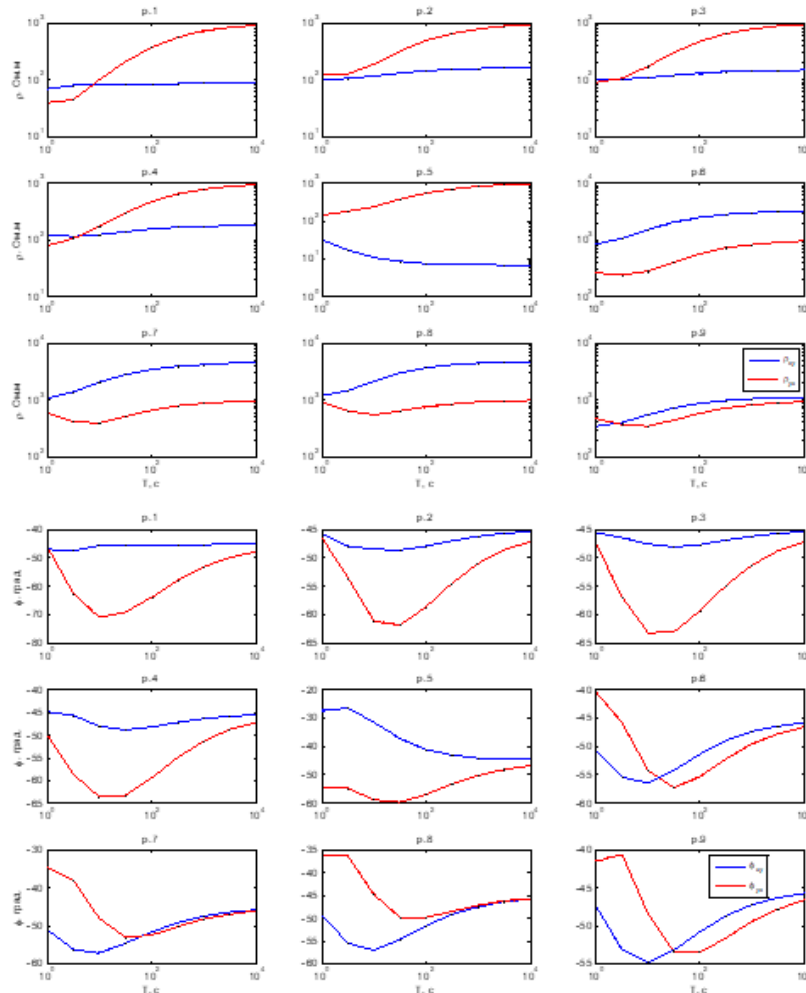


Рис. 3. Кривые кажущихся сопротивлений (вверху) и фаз импедансов (внизу) в пунктах МТЗ. Для исходной модели кривые показаны сплошными линиями, для усредненной по всем эквивалентным моделям 2D среды они даны пунктиром. Вертикальными отрезками черного цвета отображены с.к.о. кривых, вычисленные по всем эквивалентным моделям (по сопротивлениям они $< 3.5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, по фазам $< 0.5^\circ$).

Как видно, все кривые в одной и той же ситуации практически совпадают. Однако при малых различиях кривых МТЗ эквивалентные модели отличаются по параметрам более заметно, и разбросы параметров увеличиваются с ростом глубины (рис. 2). Как и в 1D случае, это связано с возрастанием толщины скин-слоя на низких частотах зондирования и вызванным данным обстоятельством паде-

нием степени разрешения метода МТЗ по определению распределения электропроводности на больших глубинах. Поэтому надежнее определяются лишь верхние слои исходной тестовой модели среды.

Заключение

Предложен алгоритм получения оценок достоверности результатов МТЗ. Он позволяет определить и отобразить набор эквивалентных моделей сред в зависимости от погрешностей экспериментальных данных.

Показано, что методом МТЗ надежнее определяются верхние слои моделей сред, а более глубокие слои - с увеличенным разбросом эквивалентных моделей даже при очень малых с.к.о. кривых МТЗ. Это вызвано диффузным характером распространения электромагнитного поля и увеличением толщины скин-слоя на более низких частотах.

На тестовых моделях сред продемонстрировано, как можно определить степень достоверности результатов МТЗ для рассматриваемой модели среды. Аналогичным способом вполне можно определить разбросы эквивалентных моделей среды, обусловленные погрешностями в кривых МТЗ при работах с экспериментальными данными.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. - М.: Научный мир, 2009. - 668 с.
2. Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. – 320 с.
3. Егоров И.В. Метод Треффца для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектрики // Физика Земли. - 2011. - Т. 47. - № 2. - С. 15-26.
4. Плоткин В.В., Губин Д.И. Учет приповерхностных неоднородностей над горизонтально слоистым разрезом при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. - 2015. - Т. 56. - № 7. - С. 1381-1390.
5. Плоткин В.В. Алгоритм устойчивого решения обратной задачи магнитотеллурического зондирования // Геофизические технологии. – 2023. – № 1. – С. 13-24.

© В. В. Плоткин, Е. В. Поспеева, В. В. Потапов, А. А. Заплавнова, 2025