

В. В. Плоткин¹✉

Доменный вариант магнитотеллурического зондирования

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

Аннотация. Для снижения вычислительных затрат при решении обратной задачи МТЗ сложно построенных сред предлагается новый принцип его проведения – выполнять наблюдения и обработку данных нескольких пунктов в ограниченном по площади и объему пространственном окне – домене. На тестовой модели среды продемонстрировано как правильно выбрать размеры окна и необходимое количество пунктов в нем.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, решение обратной задачи, домен

V. V. Plotkin¹✉

Domain version of magnetotelluric sounding

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

Abstract. To reduce computational costs when solving the inverse problem of MTS of complex built media, the domain principle of its implementation is proposed - to observe and process data from several points in a spatial window limited in area and volume - a domain. The test media model demonstrates how to correctly select the size of the window and the required number of puncts in it.

Keywords: magnetotelluric sounding, inverse problem solution, domain

Введение

При МТЗ сложно построенных сред необходимы численные расчеты с 3D моделями этих сред. Часто используют модели, учитывающие весь объем среды вдоль исследуемого профиля или полигона. Для таких расчетов нужны вычислительные средства с большой памятью и быстродействием. Поэтому на практике при решении обратных задач МТЗ обычно ограничиваются применением различных приближений и расчетами для 1D и 2D моделей. Однако и в этих случаях для проверки достоверности результатов следует провести расчеты с полученными моделями в 3D варианте.

Так как электромагнитное поле на частотах МТЗ затухает вглубь поглощающей среды, можно предположить, что на амплитудных и фазовых кривых в заданном пункте сказывается ограниченный объем прилегающей среды [1]. Это позволяет протестировать новый принцип проведения МТЗ – одновременно выполнять наблюдения и обработку данных нескольких пунктов в ограниченном по площади и объему пространственном окне – домене. Его преимущество - в уменьшении анализируемого объема среды и снижении вычислительных затрат. Конечно, существенен выбор размеров окна и количества пунктов в нем. В качестве проверки

правильности выбора этих параметров можно взять результаты сравнения расчетов с разными условиями на боковых границах домена в среде. Малое отличие кривых в центральных пунктах домена по результатам таких расчетов служит оценкой достоверности найденной модели среды. Возможность подобного подхода проверялась на тестовой 3D модели среды.

Модель среды и методы расчетов

Для проверки была взята тестовая 3D-модель среды, представленная 3 латерально неоднородными слоями (рис. 1, максимальное сопротивление электропроводности в слоях - 1000, 500, 100 Ом, толщин слоев 1, 1, 2 км, сверху вниз) и подстилающей средой с сопротивлением 10^4 Ом. Фоновое сопротивление в трех верхних слоях 40 Ом. Данный выбор обусловлен сходством поведения кривых МТЗ для этой модели и кривых, полученных в эксперименте на полигоне Салаир [2]. Предполагалось выяснить причины подобного поведения кривых МТЗ, и вызвано ли оно латеральной неоднородностью приповерхностных слоев выбранной модели.

Решения прямых задач МТЗ находились по методу Треффца [3, 4], при этом каждый слой представлялся набором одинаковых параллелепипедов, в которых электропроводность однородна, а их высота равна толщине слоя. На рис. 1 красными точками показаны центры этих параллелепипедов. Размеры полигона по оси ОХ 35 км, по оси ОУ 25 км, количество параллелепипедов вдоль осей 15 и 13 соответственно. Белыми линиями показаны границы тестируемого домена. Приведены кривые МТЗ для пункта в центре по расчетам на моделях среды внутри всего полигона и отдельно - домена.

Расчеты выполнены для двух вариантов граничных условий на боковых сторонах домена. В одном случае (БГУ1) считалось, что домен граничит с горизонтально слоистой средой - на боковых гранях домена вертикальные компоненты $E_z, H_z = 0$. Во втором случае (БГУ2) на боковых гранях домена задавались условия периодичности полей по осям оси ОХ и ОУ. Кривые МТЗ по расчетам для всего полигона (сплошные линии) приведены в случае БГУ1.

Видно, что указанные невязки δ по относительной величине между кривыми кажущихся сопротивлений для домена и полигона малы в обоих вариантах БГУ. Можно говорить об имеющемся сходстве кривых МТЗ для полигона и тестируемого домена и заключить, что объем среды вне домена слабо влияет на поведение кривых МТЗ в центральной части домена. Поэтому обратную задачу для полигона в целом можно решать доменным подходом, сводя ее решение к нескольким независимым задачам для интересующих доменов.

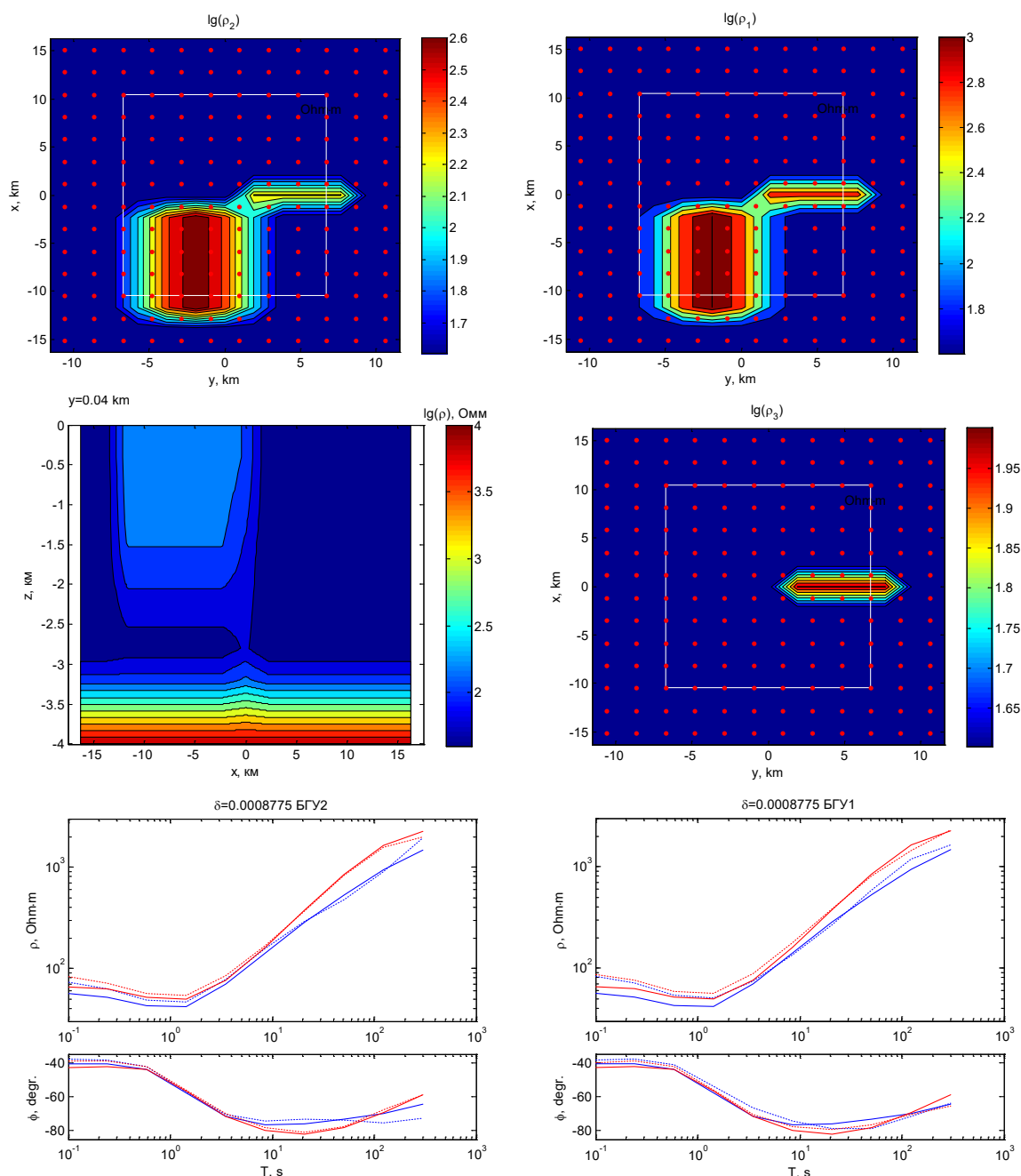


Рис. 1. 3D-модель среды и кривые МТЗ в центре
(сплошные линии – кривые МТЗ по расчетам для всего полигона, пунктир - по расчетам для домена;
БГУ1 – вне домена слоистая среда; БГУ2 – на боковых гранях домена условия периодичности полей; ρ_{xy} - кривые синего цвета, ρ_{yx} - кривые красного цвета;
 δ - невязки кривых кажущихся сопротивлений по относительной величине).

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

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

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

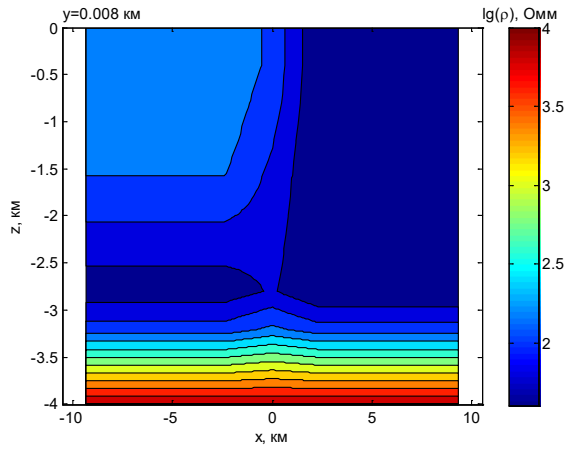
Так как невязка δ не равна нулю, и кривые МТЗ для полигона и домена точно не совпадают, необходимо выяснить, насколько отличается исходная модель среды в домене от получающейся при решении обратной задачи для него. Важно также понять, насколько на результатах сказывается количество и расположение учитываемых пунктов МТЗ.

Результаты расчетов и их обсуждение

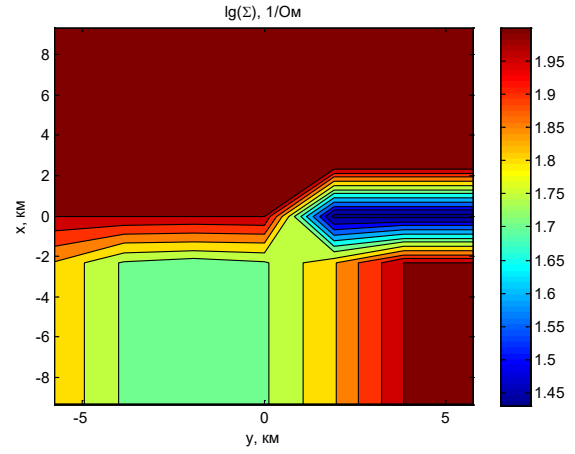
Решения обратной задачи повторялись 10 раз с разными стартовыми моделями. По результатам этих решений определялись средняя модель среды, с.к.о. параметров эквивалентных моделей и соответствующих кривых МТЗ [6]. Все стартовые модели – однородная среда, представленная 3 слоями. Толщины слоев и сопротивление среды задавались случайными числами с 10% отклонениями от исходных значений. Коридоры изменения параметров определяли 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^{-3} .

На рис. 2 представлены результаты, полученные по данным двух разных доменов. Сравниваются латеральные и глубинные распределения в исходной модели и в модели, полученной по данным взятых пунктов. С уменьшением количества этих пунктов восстановление исходной модели ухудшается. Результаты расчетов показывают, что эффективность такого восстановления зависит от положения домена относительно рассматриваемой латеральной неоднородности и расстановки пунктов в нем.

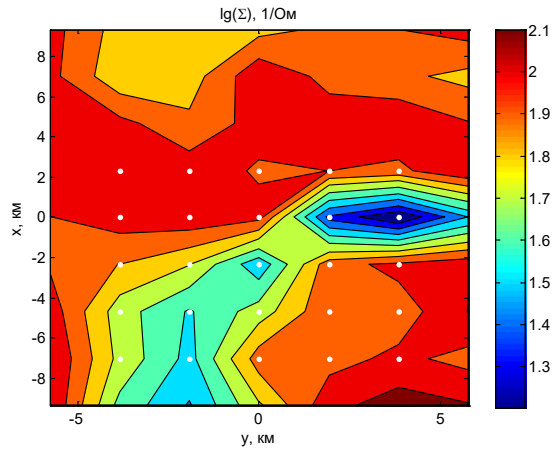
Для более детальной характеристики степени восстановления модели тестируемой среды учитывались результаты повторных решений обратной задачи с разными стартовыми моделями. В качестве примера на рис. 3 даны разбросы параметров эквивалентных моделей среды и соответствующих кривых кажущихся сопротивлений. Для каждого пункта приводятся невязки кривых для исходной модели и средней по решениям обратных задач. При малых представленных “погрешностях” кривых кажущихся сопротивлений разбросы параметров эквивалентных моделей среды заметно больше. Это является следствием неустойчивости и неоднозначности решений любых обратных задач.



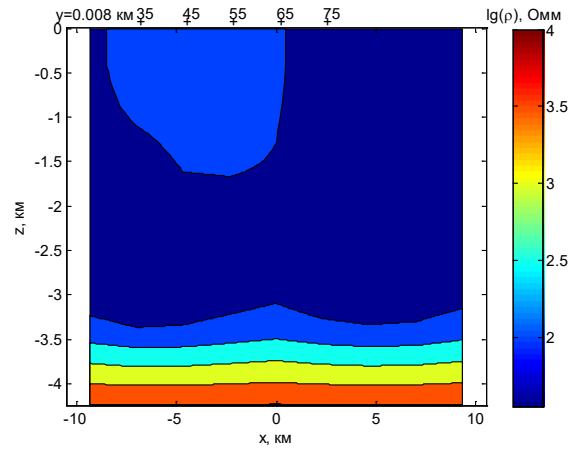
1



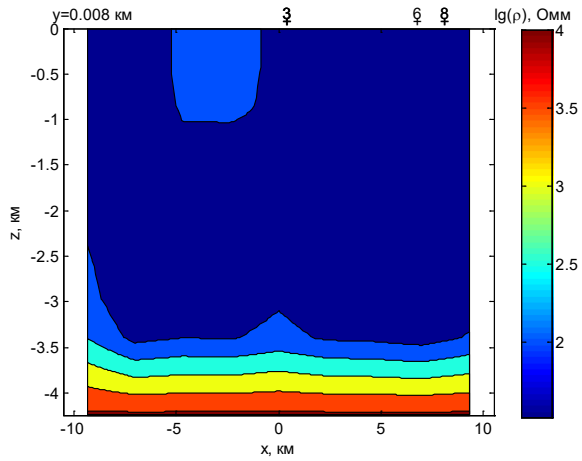
2



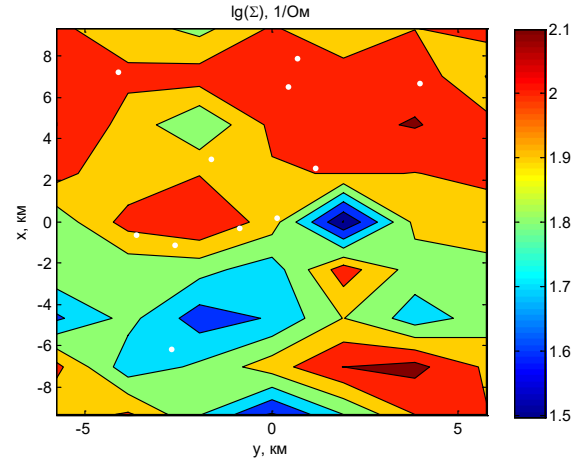
3



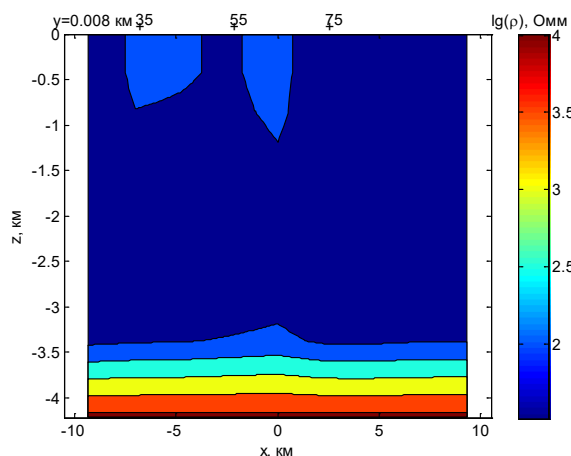
4



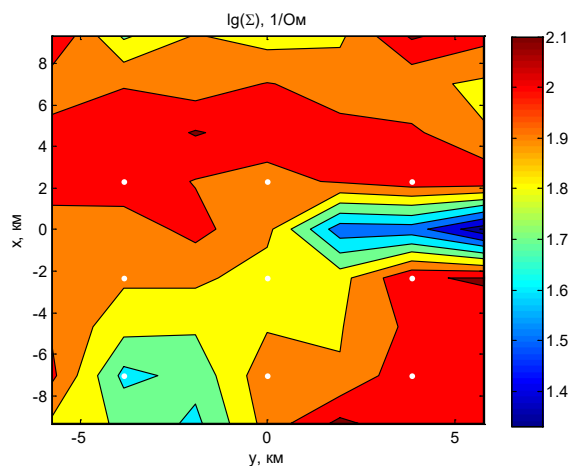
5



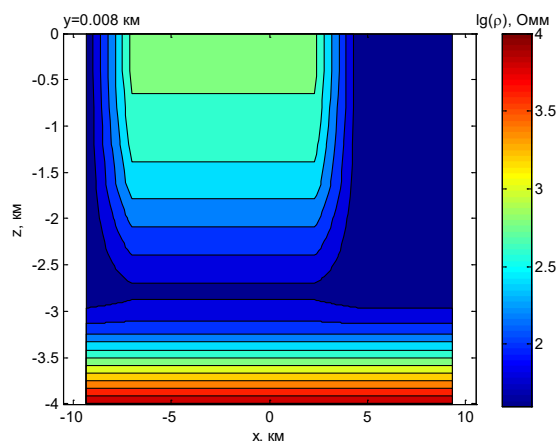
6



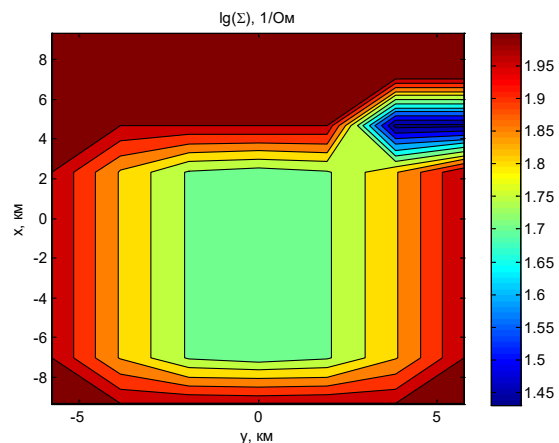
7



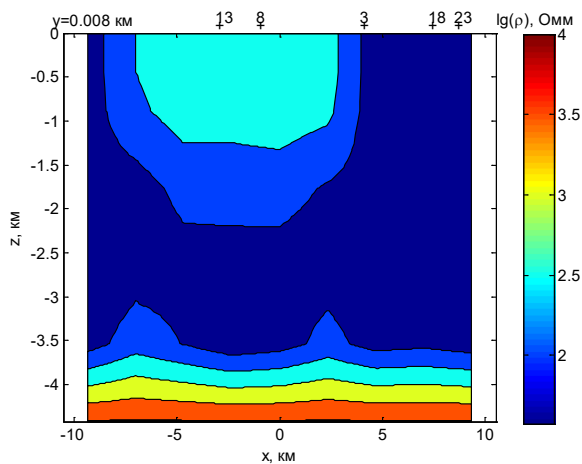
8



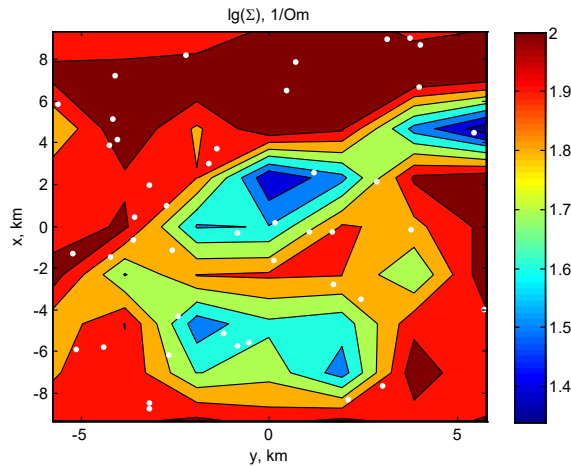
9



10



11



12

Рис. 2. Продольные проводимости (слева) и глубинные разрезы (справа) слоев среды. Исходные модели в двух доменах (1, 2) и (9, 10) и полученные оптимизацией по данным 25 пунктов (3, 4), 12 пунктов (5, 6), 9 пунктов (7, 8) и 50 пунктов (11, 12). Пункты показаны точками белого цвета (слева).

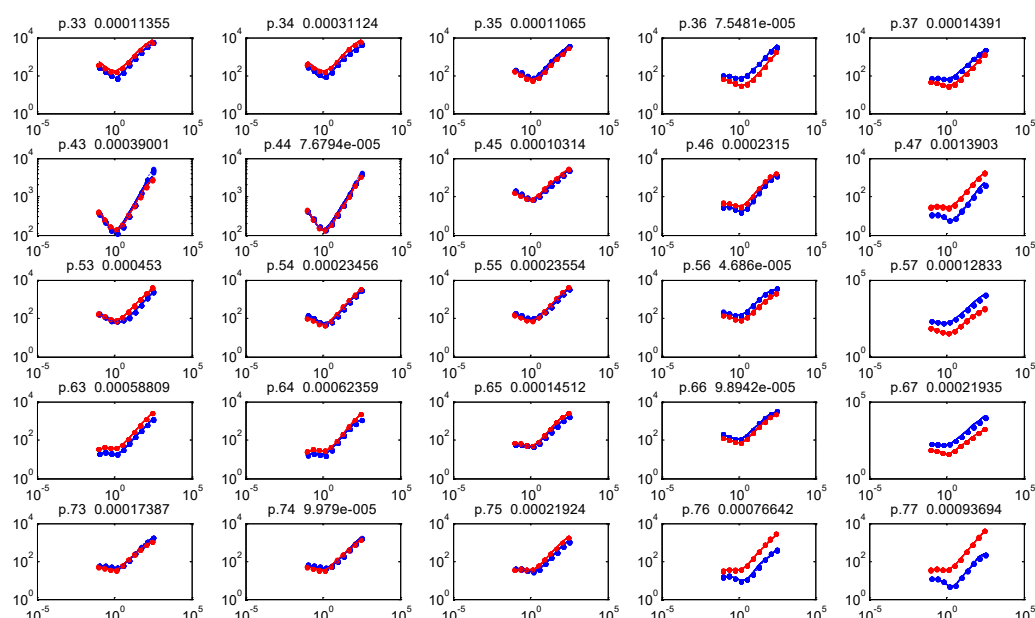
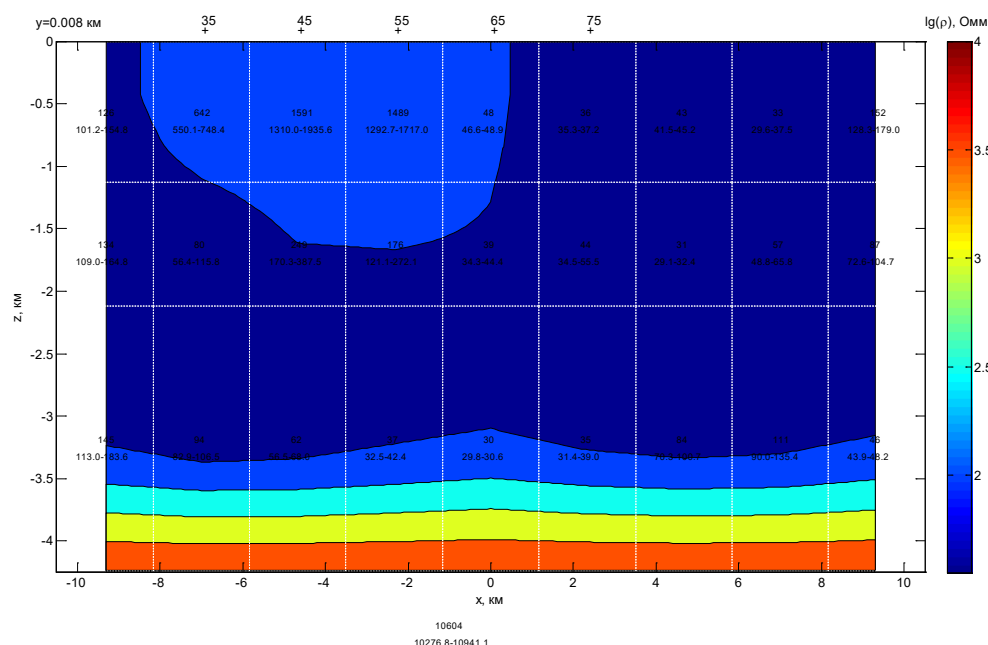


Рис. 3. Глубинный разрез модели среды, полученной по данным 25 пунктов (для каждого параллелепипеда цифрами указаны средние значения и коридор сопротивлений в соответствии с с.к.о.). Кривые кажущихся сопротивлений для исходной модели (сплошные линии) и средней по решениям обратных задач (пунктир, точки показаны кривые всех решений). ρ_{xy} - кривые синего цвета, ρ_{yx} - кривые красного цвета.

Заключение

Предложен доменный принцип проведения МТЗ – наблюдения и обработку данных нескольких пунктов осуществлять в ограниченном по площади и объему пространственном окне – домене. Его преимущество - в уменьшении анализи-

руемого объема среды и снижении вычислительных затрат. Это возможно благодаря диффузному характеру распространения и затуханию электромагнитного поля в поглощающей среде.

На тестовой модели среды продемонстрировано, как можно проверить выбор размеров окна и количества пунктов в нем. Предложено сравнивать результаты расчетов с разными граничными условиями на боковых сторонах домена в среде. Малое отличие кривых в центральных пунктах домена по результатам таких расчетов служит оценкой достоверности найденной модели среды.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2026-0049.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плоткин В.В. Зона влияния неоднородности среды и поля при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. - 2012. - Т. 53. - № 1. - С. 140-149.
2. Жимулев Ф.И., Поспеева Е.В., Потапов В.В., Новиков И.С., Котляров А.В. Глубинное строение и тектоника зоны сочленения Салаира и Горной Шории (северо-запад Центрально-Азиатского складчатого пояса) по результатам магнитотеллурического зондирования // Геология и геофизика – 2023. – Т. 64 – № 5 – С. 674-690.
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.
6. Плоткин В.В., Поспеева Е.В., Потапов В.В., Заплавнова А.А. Оценки достоверности результатов магнитотеллурического зондирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - XXI Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. – СГУГиТ – Новосибирск – Т. 2 – № 4 – С. 20-26 – 2025

© В. В. Плоткин, 2026