

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДВУХМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТРЁХМЕРНЫХ СТРУКТУР

Попов Данила Денисович¹, Пушкарев Павел Юрьевич¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Россия

Введение

При оценке возможностей геофизических методов широко применяются синтетические (модельные) геофизические данные, рассчитанные для известных моделей среды. На данном этапе в нашем исследовании мы используем модельные данные для оценки возможностей двухмерных (2D) инверсий (решений обратных задач) магнитотеллурических (МТ) данных при изучении трехмерных (3D) структур.

При 2D интерпретации МТ данных мы имеем дело с набором компонент, относящихся к двум поляризациям поля и обладающих разными:

- чувствительностью к тем или иным геоэлектрическим структурам;
- устойчивостью к 2D аппроксимации реальных 3D структур.

Построенная 3D геоэлектрическая модель тектоносферы является результатом обобщения мирового опыта применения метода МТЗ. Она включает в себя фоновый слоистый разрез и содержит горизонтальные неоднородности разного азимутального простирания на трёх структурных уровнях: осадочный чехол, консолидированная земная кора и верхняя мантия (рис. 1 и 2). На верхнем уровне в модель включены поднятие и прогиб в кровле фундамента, на среднем – типичные вытянутые коровые аномалии низкого удельного электрического сопротивления (УЭС), на нижнем – поднятие кровли мантийного проводника (астеносферы).

Вычисления выполнялись с помощью широко применяемой программы MT3DFwd [Maskie и др., 1993], основанной на методе конечных разностей. В результате решения прямой 3D задачи с помощью программы MT3DFwd определяются компоненты МТ поля в центрах ячеек на земной поверхности для двух поляризаций на заданных периодах (в нашем случае $T = 0.1 - 5000$ с).

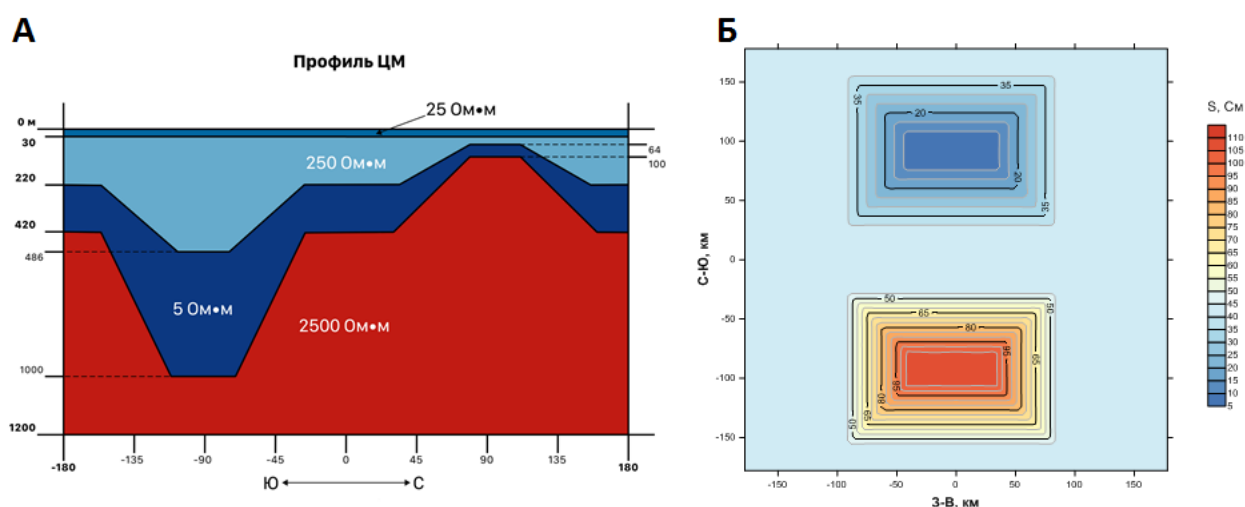


Рисунок 1. А. Разрез вдоль центрального меридионального профиля – осадочный чехол; Б. План – суммарная продольная проводимость осадочного чехла

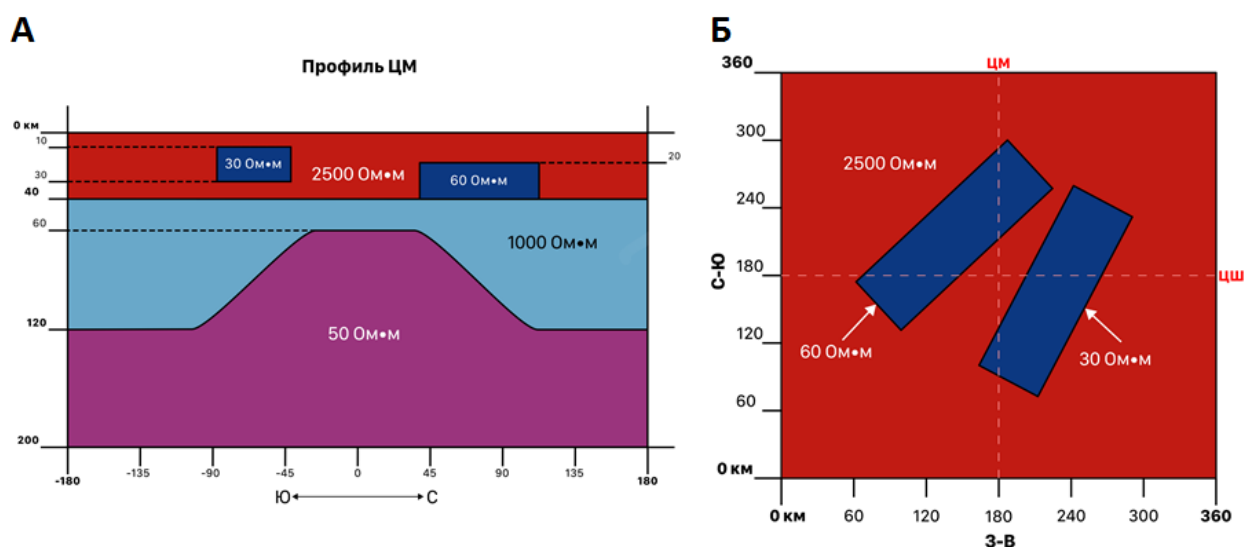


Рисунок 2. А. Разрез вдоль центрального меридионального профиля – консолидированная кора, содержащая проводящие призмы, верхняя мантия и астеносферное поднятие. Б. План – консолидированная кора, содержащая проводящие призмы

Основной МТ передаточной функцией, используемой в наших исследованиях, является тензор импеданса $[Z]$, из которого можно, соответствующим образом, вывести кажущееся УЭС ρ_k и фазу импеданса φ_Z . Кроме того, в качестве магнитовариационного (МВ) параметра была использована матрица Визе-Паркинсона или типпер $[W]$, определяемая по данным всех трех составляющих магнитного поля и предоставляющая возможность надежно определять положение глубинных протяженных проводящих тел.

Двухмерная инверсия синтетических МТ данных

В рамках нашего исследования 2D инверсия синтетических данных выполнялась в программе ZondMT2D [Каминский, 2006]. Для решения обратной задачи в данной программе используется итерационный метод наименьших квадратов Ньютона с регуляризацией. В ходе инверсии применялся алгоритм Оссам с использованием сглаживающего стабилизатора, а в качестве функционала невязки рассматривалось среднеквадратическое отклонение (RMS).

Инверсия проводилась с применением данных ТМ (квазипоперечного импеданса Z^{\perp}) и ТЕ (квазипродольного импеданса Z^{\parallel} и типпера W) мод, эффективного импеданса Z_{eff} в целях минимизации ошибки разделения кривых на ТМ и ТЕ моды как по отдельности, так и совместно. При этом также рассматривались данные Z^{\perp} с добавлением случайного шума, так как реальные измерения на практике не могут обойтись без шумовой составляющей. В качестве стартовой априорной модели использовались два варианта – однородная среда с УЭС = 100 Ом·м и фоновый слоистый разрез. Качество подбора определялось невязками между наблюдаемыми и рассчитанными амплитудными и фазовыми кривыми для Z^{\perp} , Z^{\parallel} , Z_{eff} , а также модулями $|W|$.

Результаты двухмерных инверсий МТ данных для центрального меридионального профиля

Для начала рассмотрим информативность отдельно взятых составляющих $[Z]$: Z_{eff} , Z^{\perp} (ρ_k^{\perp} и φ_Z^{\perp}) и Z^{\parallel} (ρ_k^{\parallel}) для центрального меридионального профиля и стартовой модели – однородной среды с УЭС = 100 Ом·м (рис. 3).

Для вычислений потребовалось до 20 итераций. При высоком качестве полученных «измерений» (отсутствии шума) для параметра регуляризации α использовалось низкое значение – 0.01. При этом примерно после 5-ой итерации RMS достигало значений меньше 0.01. Экспресс-оценка результата инверсии проводилась по значению относительной невязки на псевдорезах сходимости по каждому измерению между наблюдаемыми и вычисленными значениями. Как правило, при «среднем» качестве данных значение не должно превышать 5%.

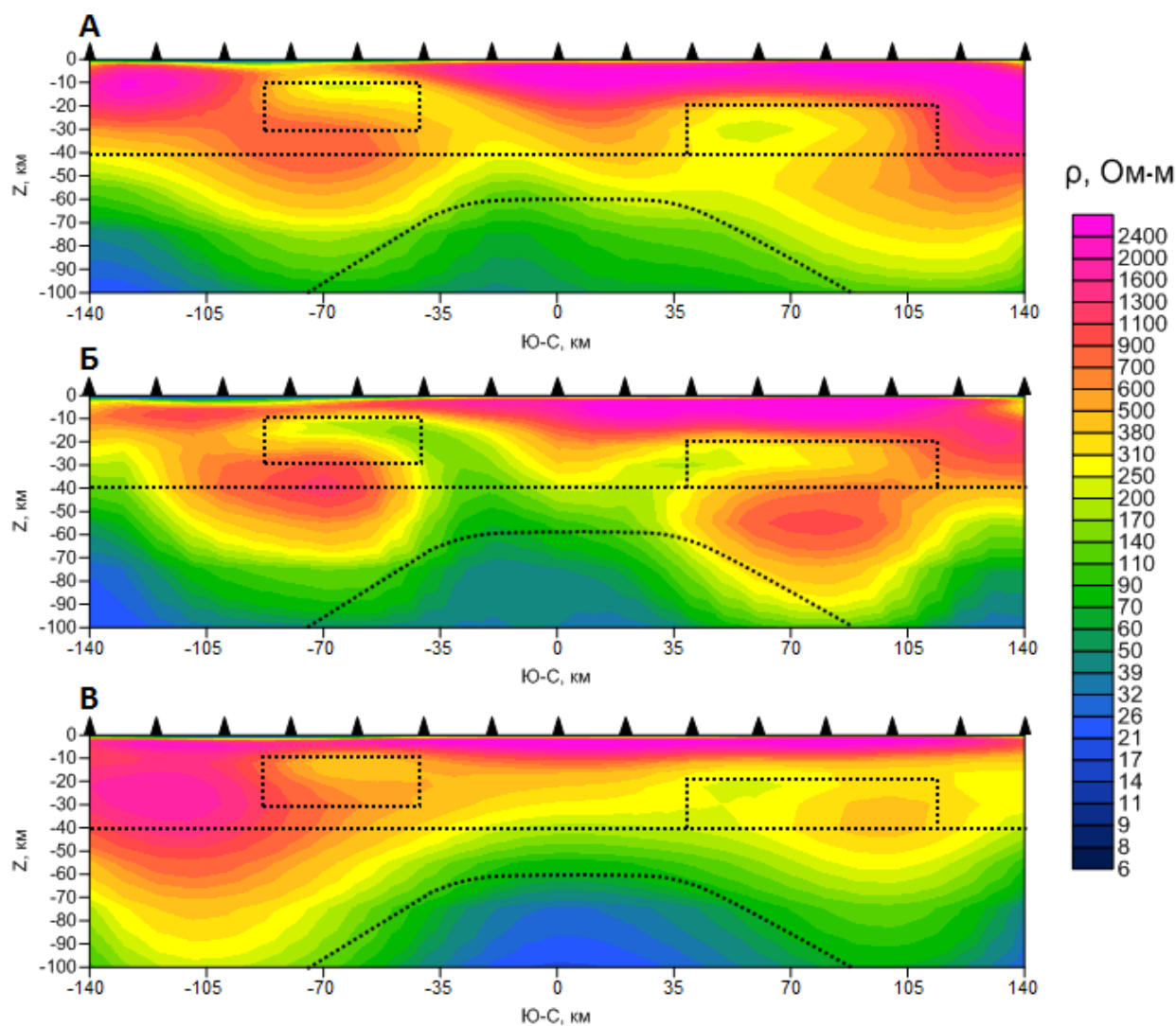


Рисунок 3. Проводящие призмы в консолидированной коре и астеносферное поднятие. Разрезы вдоль центрального меридионального профиля, построенные по данным: А – Z_{eff} , Б – Z^+ (ТМ мода) и В – Z^{\parallel} (ТЕ мода). Стартовая модель – однородная среда с УЭС = 100 Ом·м

На верхнем структурном уровне разреза были восстановлены поднятие и прогиб. В случае Z^+ погружение осадочного чехла в области положения прогиба оказывается завышенным (3 км вместо реального значения в 1 км). Обратная ситуация наблюдается с применением Z^{\parallel} . В данном случае прогиб был восстановлен с более высокой достоверностью, чем в случае Z^+ .

Несмотря на прогнозируемый экранирующий эффект от высокоомной консолидированной коры, в случае применения Z^+ были достоверно определены коровые проводящие призмы, но их значения УЭС оказались более завышенными. По бокам этих призм прослеживаются артефакты – проводящие корни, примыкающие к кровле

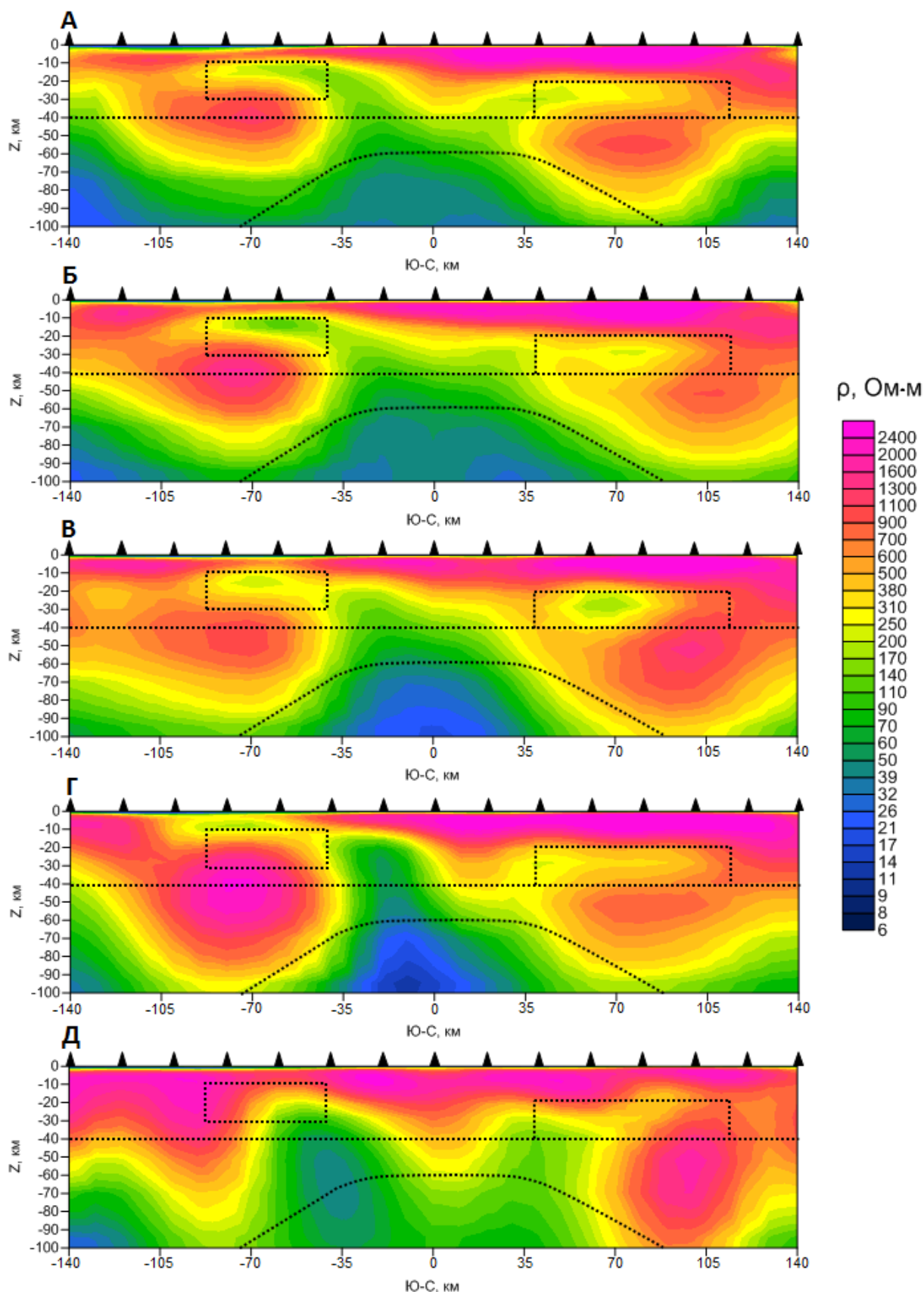


Рисунок 4. Проводящие призмы в консолидированной коре и астеносферное поднятие. Разрезы вдоль центрального меридионального профиля, построенные по данным Z^{\pm} с разным уровнем шума: А – 0%, Б – 2%, В – 5%, Г – 10%, Д – 20%. Стартовая модель – однородная среда с УЭС = 100 Ом·м

астеносферного поднятия. С точки зрения восстановления проводящих призм менее достоверный результат был получен с применением Z^{\parallel} . Границы северо-западной призмы получились сильно размытыми, а у юго-восточной значение УЭС оказалось сильно завышенным.

Кроме того, на всех вариантах разреза в интервале глубин 40-120 км не восстановлена верхняя мантия. Присутствуют локальные области со средними значениями УЭС, отвечающие данному структурному этажу, в пределах глубин, заниженных относительно значений по априорным данным. При этом геометрия астеносферного поднятия плохо коррелирует с априорной информацией, но лучше всего восстановлена по данным Z^{\parallel} .

Результаты двумерных инверсий зашумленных данных ТМ моды для центрального меридионального профиля

Теперь рассмотрим случай 2D инверсии с применением зашумленной квазипоперечной Z^{\perp} (ρ_k^{\perp} и φ_z^{\perp}) компоненты $[Z]$ (рис. 4). Использовался случайный шум с нормальным распределением и разным отклонением от амплитуды Z^{\perp} – 2, 5, 10 и 20 %. По мере повышения уровня шума мы эмпирическим путем увеличивали значение α : 2 % – 0.05, 5 % – 0.2, 10 % – 0.3 и 20 % – 1. При использовании зашумленных данных критерию их «среднего» качества отвечают результаты с привлечением уровня шума до 5 %.

В случае центрального меридионального профиля по данным Z^{\perp} при всех задействованных уровнях шума на верхнем структурном уровне разреза были восстановлены поднятие и прогиб. В случае реконструкции проводящих призм и астеносферного поднятия относительно адекватные результаты были получены до уровня шума в 10 %. При этом закономерным образом качество разреза падает по мере усиления зашумления Z^{\perp} , а при двадцатипроцентном шуме модель "распадается". Из особенностей полученных результатов следует отметить, что для случая пятипроцентного шума северо-западную призму (менее контрастную и более глубинную, чем юго-восточная призма) удалось лучше восстановить, чем в случае двухпроцентного шума.

Заключение

Нами была составлена 3D геоэлектрическая модель тектоносферы. Проведя расчет МТ поля, мы определили МТ и МВ передаточные функции, по данным которых были проведены 2D инверсии. При 2D инверсии в рассмотренной ситуации наилучший результат обеспечило использование не зашумленного варианта Z^{\perp} , позволившего относительно адекватно восстановить верхний и средний структурные этажи. В случае применения зашумленных вариантов Z^{\perp} реконструкцию тектоносферы удалось провести до уровня шума в 10 %.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-27-00147.

Список литературы

1. Каминский А.Е. Программа интерпретации магнитотеллурических зондирований ZondMT2d: Руководство пользователя. СПб.: Zond Software, 2006. 22 с.
2. Mackie R.L., Madden T.R., Wannamaker P.E. Three-dimensional magnetotelluric modeling using difference equations - theory and comparison to integral equation solutions. Geophysics, 1993, 58, 215-226.