

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДВУХМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТРЁХМЕРНЫХ СТРУКТУР

Попов Д.Д., Пушкарев П.Ю.

crossbrian97@mail.ru

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Введение. При анализе возможностей геофизических методов широко применяются синтетические (модельные) геофизические данные, рассчитанные для известных моделей среды. Эффективность методов интерпретации по синтетическим данным можно оценить более однозначно, чем по наблюдаемым, когда истинная модель неизвестна. В данной работе мы используем синтетические магнитотеллурические (МТ) данные для анализа возможностей двухмерной (2D) инверсии при изучении трёхмерных (3D) структур.

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

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

Построенная 3D геоэлектрическая модель тектоносферы включает в себя фоновый слоистый разрез и содержит горизонтальные неоднородности, ограниченные по протяженности и разного азимутального простирания на трёх структурных уровнях: осадочный чехол, консолидированная земная кора и верхняя мантия (рисунки 1 и 2). На верхнем уровне в модель включены поднятие и прогиб в кровле фундамента, на среднем – типичные вытянутые коровые аномалии низкого сопротивления, на нижнем – поднятие кровли мантийного проводника (астеносферы).

На основании рассмотренной модели вычисления выполнялись с помощью широко применяемой программы MT3DFwd [2], основанной на методе конечных разностей. Размер сетки составил 100 x 100 x 79 ячеек. В результате решения прямой 3D задачи были получены компоненты МТ поля для двух поляризаций поля на 15 периодах в интервале от 0.1 до 5000 с. Они были пересчитаны нами в компоненты МТ матриц: тензора импеданса [Z], матрицы типпера [W], магнитного тензора [M] и теллурического тензора [T], а также в различные инвариантные параметры. В качестве альтернативы для проведения прямого моделирования мы планируем задействовать программу GEMMIE (автор Кругляков М.С.), чтобы сопоставить полученные результаты расчета от данной программы с результатами вычислений в MT3DFwd.

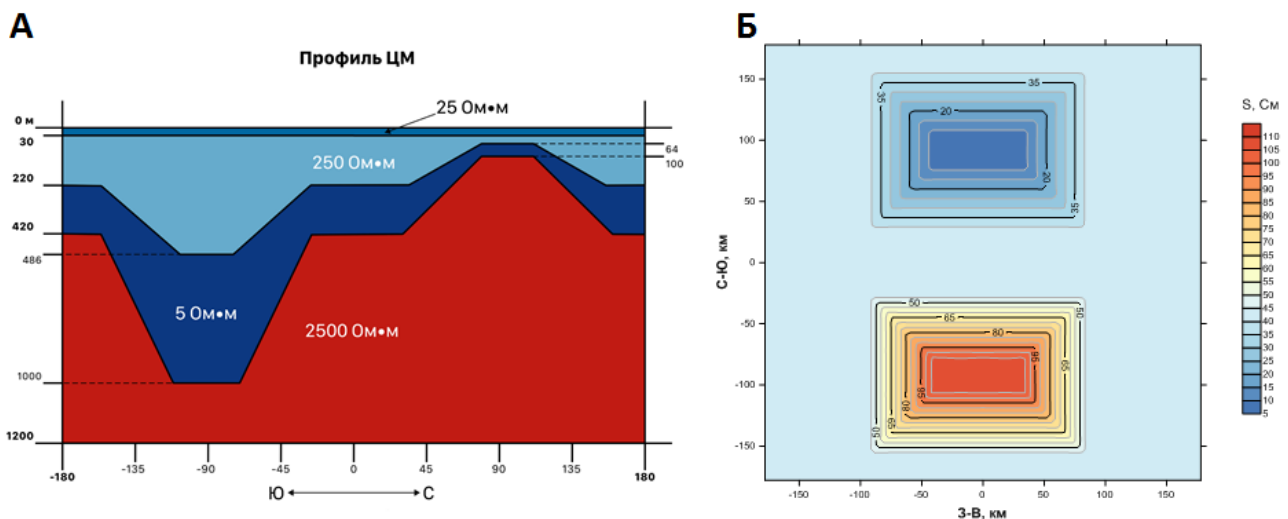


Рисунок 1 – А. Разрез вдоль центрального меридионального профиля – осадочный чехол; Б. План – суммарная продольная проводимость осадочного чехла.

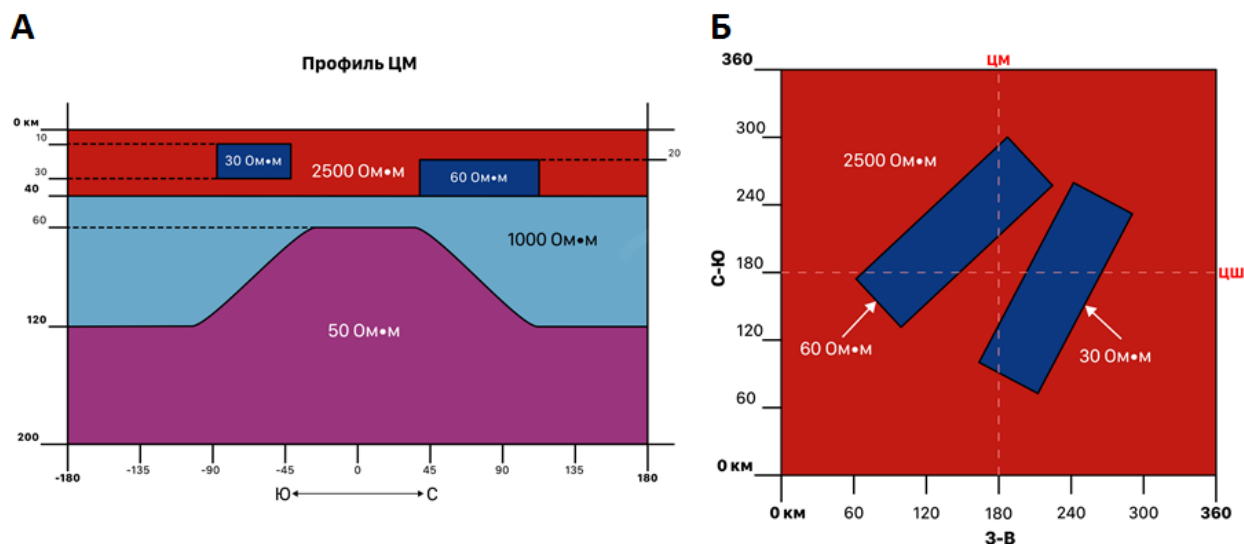


Рисунок 2 – А. Разрез вдоль центрального меридионального профиля – консолидированная кора, содержащая проводящие призмы, верхняя мантия и астеносферное поднятие. Б. План – консолидированная кора, содержащая проводящие призмы.

Качественный анализ синтетических МТ данных. 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.

Для качественного анализа, в первую очередь, были выбраны наиболее широко используемые инварианты – кажущееся эффективное УЭС ρ_{eff} и фаза эффективного импеданса φ_{eff} . Эффективный импеданс Z_{eff} является инвариантным параметром, что позволяет избежать ошибок в разделении кривых зондирования на ТМ и ТЕ моды в 2D средах. По данным амплитудных и фазовых кривых Z_{eff} в точках центральных меридионального и широтного профилей, а также картам аномалий ρ_{eff} и φ_{eff} определены количество слоев в фоновом разрезе и наличие с плановым положением неоднородностей в данных слоях. Кроме того, были построены карты амплитудных и фазовых полярных диаграмм (АПД и ФПД) основной и дополнительной компонент $[Z]$. По их форме и ориентации можно оценить размерность среды и направления вдоль или поперёк структур. Несмотря на то, что формы диаграмм в основном характерны для 2D среды, можно увидеть, что они ориентированы под углом по отношению к центральным меридиональному и широтному профилям.

Основным способом представления $[W]$ являются вещественные и мнимые индукционные стрелки ReW и ImW . По картам индукционных стрелок видно, что в случае 3D среды на тех точках наблюдения, которые сосредоточены вблизи границ раздела сред, нарушается коллинеарность векторов ReW и ImW , но перемещаясь к центрам структур коллинеарность восстанавливается. По мере удаления от неоднородностей в сторону вмещающей среды модули векторов ReW и ImW стремятся к нулю. Также по данным ReW и ImW хорошо детектируются вытянутые структуры с местоположениями осей токов, в особенности юго-восточная призма.

Количественный анализ чувствительности различных компонент МТ данных к геоэлектрическим структурам. Для количественной оценки вклада в наблюдаемые МТ данные отдельной структуры нами были определены максимальные чувствительности различных компонент этих данных к геоэлектрическим неоднородностям. Для вычисления максимальной чувствительности мы сравнивали два набора данных, первый отвечает фоновой горизонтально-слоистой среде (ГСС), а второй – погруженной в тот же разрез структуре. Затем вычислялась максимальная (по всем точкам МТЗ на данном периоде) разность между

полученными фоновым и аномальным значениями компоненты МТ данных. В качестве таких компонент рассматривались инварианты ρ_{eff} и φ_{eff} , а также нормы матриц $\|W\|$, $\|M\|$ и $\|T\|$.

Результаты свидетельствуют, что все структуры вносят в данные заметный вклад, превышающий типичные погрешности наблюдений, но глубинные структуры проявляются наименее ярко. Данные результаты представлены в виде таблиц (таблица 1), где зелёным цветом отмечена высокая чувствительность компоненты на данном периоде, жёлтым – средняя, красным – низкая, то есть в пределах типичной погрешности наблюдений.

Таблица 1 – Максимальные чувствительности компонент МТ данных к структурам на примере поднятия и прогиба высокоомного фундамента.

		Юго-Восточная призма							
		T = 0.1	T = 1	T = 20	T = 500	T = 5000			
		с	с	с	с	с			
$\square\square\square_{\text{ef}}$, %		0,19	0,8	20	16	20	$\Delta \rho_{\text{ef}}$, %	< 10	< 1
$\square\square\square_{\text{ef}}$, °		0,26	8	8,5	1,7	0,85	$\Delta \varphi_{\text{ef}}$, °	< 5	< 0.5
$\square \ W\ $	8,50E-05	0,0145	0,25	0,075	0,015		$\Delta \ W\ $	< 0.1	0.03
$\square \ M\ $	2,90E-05	0,0075	0,18	0,034	0,008		$\Delta \ M\ $	< 0.1	0.03
$\square \ T\ $	3,40E-03	0,025	0,54	0,5	0,52		$\Delta \ T\ $	< 0.1	0.03

Двухмерная инверсия синтетических МТ данных. В рамках нашего исследования 2D инверсия синтетических данных выполнялась с помощью программы ZondMT2D, основанной на методе Ньютона [1]. Для получения устойчивого решения применяется регуляризация, обеспечивающая получение эквивалентной модели с максимально гладким распределением УЭС в разрезе. Для этого из реализованных в программе вариантов минимизируемого функционала был выбран алгоритм «Оссат». В качестве функционала невязки рассматривалось среднеквадратическое отклонение (RMS).

К инверсии привлекались данные ТМ (квазипоперечного импеданса Z^{\perp}) и ТЕ (квазипродольного импеданса Z^{\parallel} и типпера W) мод, а также эффективного импеданса Z_{eff} 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 априорный 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. Рассмотрим информативность отдельно взятых составляющих $[Z]$: Z_{eff} , Z^{\perp} (ρ_k^{\perp} и φ_Z^{\perp}) и Z^{\parallel} (φ_Z^{\parallel}) для центрального меридионального профиля и основной стартовой модели – однородной среды с УЭС в 100 Ом·м (рисунок 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%.

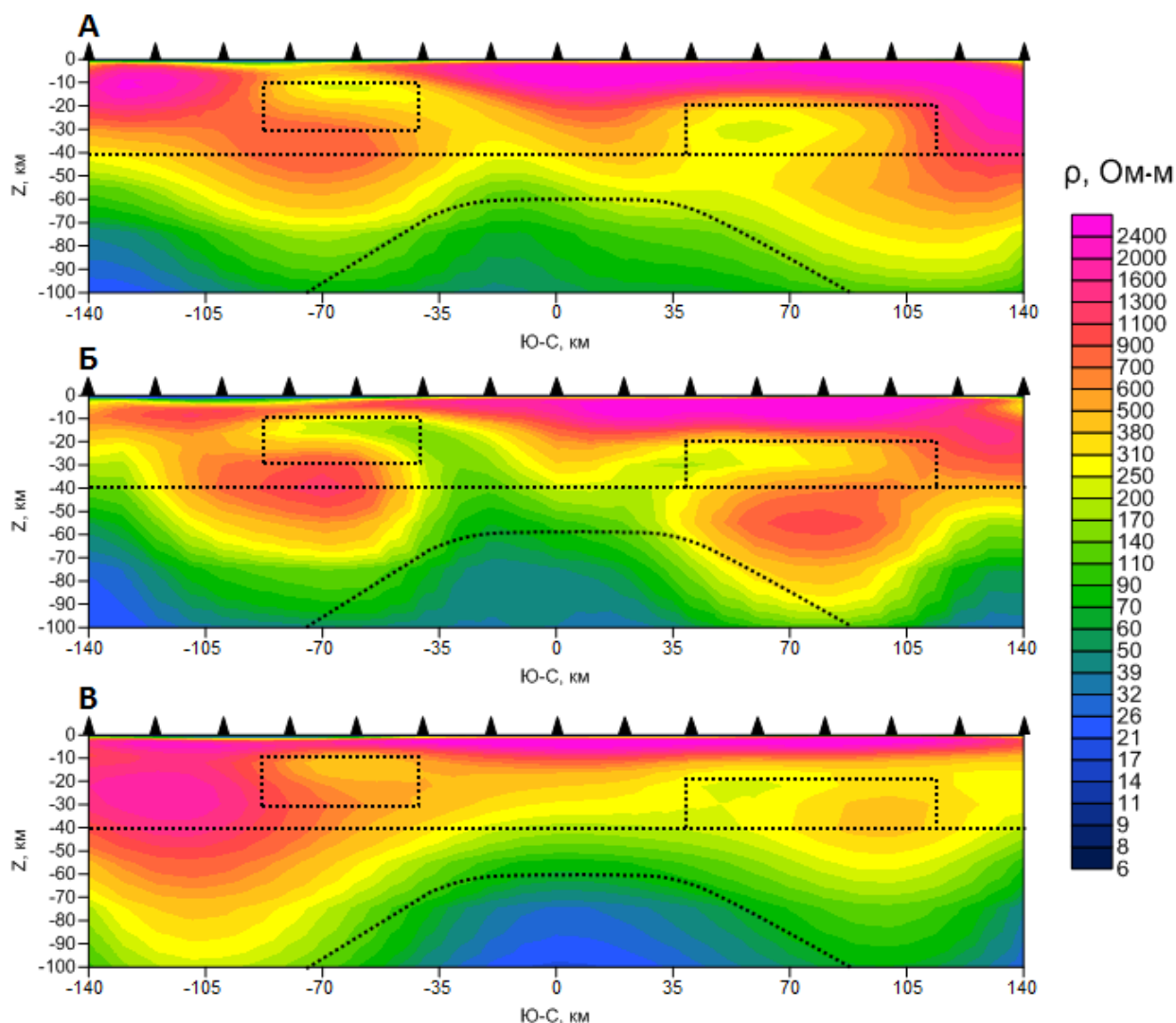


Рисунок 3 – Проводящие призмы в консолидированной коре и астеносферное поднятие. Разрезы вдоль центрального меридионального профиля, построенные по данным: А – Z_{eff} , Б – Z^+ (ТМ мода) и В – Z^{\parallel} (ТЕ мода). Стартовая модель – однородная среда с УЭС в 100 Ом·м.

На верхнем структурном уровне разреза по всем компонентам довольно хорошо восстановлены поднятие и прогиб кровли фундамента. Причём по данным ТМ моды, по Z^+ , под прогибом в фундаменте возникла ложная область средних значений УЭС. При использовании данных ТЕ-моды, по $\arg(Z^{\parallel})$, фундамент получился лучше. Подключение к данным ТМ-моды данных ТЕ-моды в виде W^{\parallel} также улучшает ситуацию.

При использовании Z^+ (рисунок 3Б) определены коровые проводящие призмы, но их значения УЭС оказались завышенными (среднее значение 210 Ом·м вместо 30 Ом·м для юго-восточной призмы и среднее значение 300 Ом·м вместо 60 Ом·м для северо-западной призмы). По бокам этих призм прослеживаются артефакты – проводящие корни, примыкающие к кровле астеносферного поднятия. Более сглаженный и менее достоверный с точки зрения восстановления проводящих призм результат был получен с применением $\arg(Z^{\parallel})$ (рисунок 3В). Границы северо-западной призмы получились сильно размытыми, а у юго-восточной значение УЭС оказалось сильно завышенным (400-500 Ом·м). Наилучший результат получился по Z_{eff} (рисунок 3А): хотя УЭС призм сильно завышены, они уверенно выделяются и достаточно чётко отделены от астеносферного поднятия. Само это поднятие неплохо выделяется на всех трёх вариантах разрезов, но похожие проводящие зоны есть и по краям разрезов. Лучше всего мантийная часть восстановлена по $\arg(Z^{\parallel})$, а хуже всего – по Z^+ .

Результаты двумерных инверсий зашумленных данных ТМ моды для центрального меридионального профиля. Теперь рассмотрим случай 2D инверсии с применением зашумленной квазипоперечной Z^+ (ρ_k^+ и φ_Z^+) компоненты $[Z]$. Использовался случайный шум с нормальным распределением и разным отклонением от амплитуды $Z^+ - 2, 5, 10$ и 20% . По мере повышения уровня шума эмпирическим путем увеличивалось 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^+ 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^+ , 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. На основании построенной 3D геоэлектрической модели тектоносферы был произведен расчет МТ поля. Результаты расчета конвертировались в МТ и МВ передаточные функции, по данным которых решались 2D обратные задачи. При 2D инверсии в рассмотренной ситуации наилучший результат обеспечило использование не зашумленного варианта Z^+ , позволившего относительно адекватно восстановить верхний и средний структурные этажи. В случае применения зашумленных вариантов Z^+ реконструкцию тектоносферы удалось провести до уровня шума в 10% .

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-00147).

Литература

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.