

**Двухмерная интерпретация магнитотеллурических данных,  
синтезированных для трёхмерной геоэлектрической модели тектоносферы**

*Д.Д. Попов, П.Ю. Пушкарев*

*E-mail: crossbrian97@mail.ru, pavel\_pushkarev@list.ru*

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

**Аннотация.** A three-dimensional geoelectric model was constructed containing electrical conductivity anomalies of complex shape on three structural levels: in the sedimentary cover, in the consolidated earth's crust and in the upper mantle. Synthetic (model) magnetotelluric data were obtained as a result of solving the direct problem. These data were analyzed to identify anomalies associated with geoelectrical inhomogeneities at various depths. Quantitative estimates are given of the sensitivity of various components of magnetotelluric data to these inhomogeneities. A two-dimensional inversion was performed using these data. The sections obtained as a result of two-dimensional inversion will be used as starting models for further evaluation of the effectiveness of various three-dimensional interpretation techniques.

**Введение.**

При оценке возможностей геофизических методов широко применяются синтетические (модельные) геофизические данные, которые удобно использовать для определения эффективности методов анализа, коррекции, а также инверсии (решения обратных задач). В нашем исследовании мы используем модельные данные для оценки возможностей метода магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Особенности магнитотеллурического (МТ) поля в трехмерно-неоднородных (3D) средах посвящены работы М.Н. Бердичевского, В.И. Дмитриева, М.С. Жданова, Г. Хоманна, Ф. Ваннамейкера и других учёных. Однако многие вопросы методики трехмерной (3D) интерпретации остаются слабо изученными, и нашей целью является их решение с использованием синтетических данных.

В докладе мы представим 3D геоэлектрическую модель, содержащую характерные аномалии электропроводности на различных глубинах, рассмотрим результаты качественного анализа синтетических данных и количественной оценки их чувствительности к аномалиям электропроводности, а также проведенных на их основании двухмерных (2D) инверсий по центральным профилям: широтному и меридиональному. В дальнейшем представленные в докладе данные будут использоваться для оценки эффективности различных методик трехмерной интерпретации.

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 сопротивления, на нижнем – поднятие кровли мантийного проводника (астеносферы).

Вычисления выполнялись с помощью широко применяемой программы МТ3DFwd [3], основанной на методе конечных разностей. В результате решения прямой 3D задачи с помощью программы МТ3DFwd определяются компоненты МТ поля в центрах ячеек на земной поверхности для двух поляризации на заданных периодах (в нашем случае  $T = 0.1-5000$  с).

**Качественный анализ синтетических МТ данных.**

Основной передаточной функцией, используемой в методе МТЗ, является тензор импеданса ( $[Z]$ ), из которого можно, соответствующим образом, вывести кажущееся удельное электрическое сопротивление ( $УЭС$ ) ( $\rho_k$ ) и фазу импеданса ( $\phi Z$ ).  $[Z]$  имеет физический смысл комплексного сопротивления, которое оказывает среда индуцированному в ней электрическому току [2].

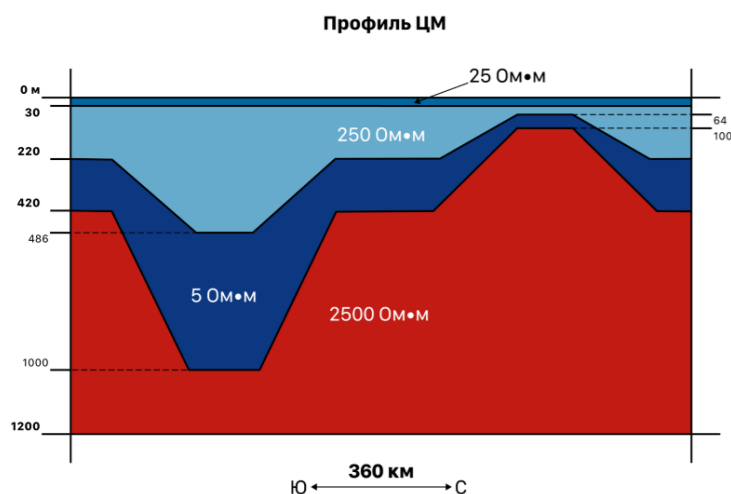


Рис. 1. Разрез вдоль центрального меридионального профиля – осадочный чехол.

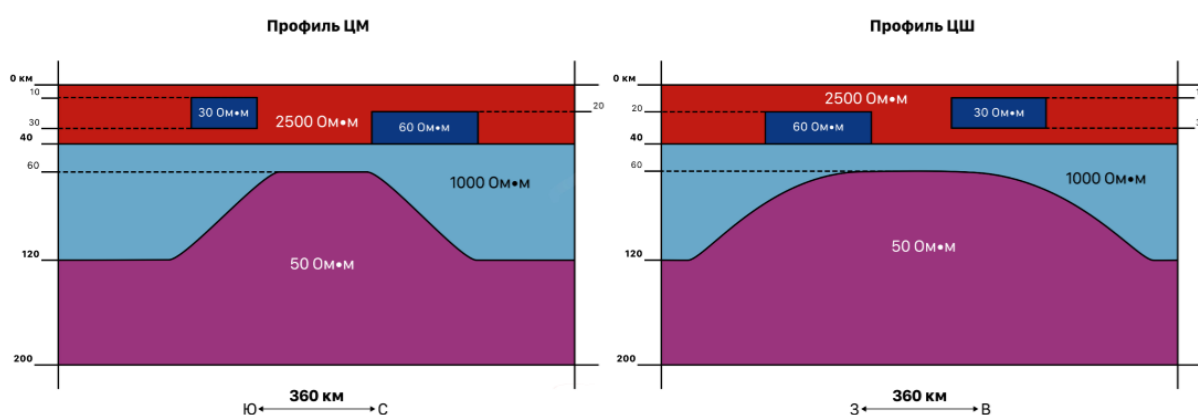


Рис. 2. Разрезы вдоль центрального меридионального и широтного профилей – консолидированная кора, содержащая проводящие призмы, верхняя мантия и астеносферное поднятие.

Для качественного анализа, в первую очередь, были выбраны наиболее широко используемые инварианты – кажущееся эффективное УЭС ( $\rho_{\text{eff}}$ ) и фаза эффективного импеданса ( $\varphi_{\text{eff}}$ ). Эффективный импеданс ( $Z_{\text{eff}}$ ) является инвариантным параметром, что позволяет избежать ошибок в разделении кривых зондирования на ТМ и ТЕ моды в двухмерно-неоднородной (2D) средах. По данным амплитудных и фазовых кривых  $Z_{\text{eff}}$  в точках центральных меридионального и широтного профилей определены три основных слоя: верхний проводящий слой, промежуточный высокоомный слой и проводящее основание. По картам аномалий  $\rho_{\text{eff}}$  и  $\varphi_{\text{eff}}$  определены наличие и положение неоднородностей в данных слоях, в особенности ярко выражены аномалии от поднятия и прогиба в осадочном чехле, а также юго-восточной призмы в консолидированной коре. 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 по априорным данным известно, что среда является трехмерно-неоднородной, наблюдаемые нами АПД и ФПД по своей форме преимущественно отвечают 2D модели. Данный факт можно объяснить региональным масштабом, которым характеризуются описанные выше неоднородности.

Второй важной передаточной функцией является матрица типпера ( $[W]$ ), предоставляющая возможность надежно определять положение глубинных протяженных проводящих тел.  $[W]$  обладает высокой чувствительностью к неоднородностям, расположенным в стороне от точки наблюдения, и на больших периодах практически не подвержен влиянию приповерхностных неоднородностей.

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. При этом  $ReW$  направлены от проводящих структур к высокоомным и являются удобным средством их локализации. По данным карт нормы матрицы  $||W||$  вытянутые структуры, в особенности юго-восточная призма, довольно точно указывают местоположение оси тока, так как над ней  $||W||$  стремится к нулю.

### Количественный анализ чувствительности различных компонент МТ данных к геоэлектрическим структурам.

Чтобы количественно оценить вклад каждой структуры нами были определены максимальные чувствительности различных компонент МТ данных к геоэлектрическим структурам. Для вычисления максимальной чувствительности мы сравнивали два набора данных, первый – отвечающий фоновой горизонтально-слоистой среде (ГСС), и второй – отвечающий погруженной в тот же разрез структуре. Далее 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  $\rho_{eff}$  и  $\Phi_{eff}$ , 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 (табл. 1), где зелёным цветом отмечена высокая чувствительность компоненты на данном периоде, жёлтым – средняя, красным – низкая, то есть в пределах типичной погрешности наблюдений.

Табл.1. Пример таблицы. Максимальные чувствительности различных компонент МТ данных к поднятию и прогибу фундамента.

		Поднятие и прогиб							
		T = 0.1 с	T = 1 с	T = 20 с	T = 500 с	T = 5000 с			
$\Delta \rho_{ef}, \%$		100	65	22	17	20	$\Delta \rho_{ef}, \%$	< 10	< 1
$\Delta \Phi_{ef}, ^\circ$		32	19	13	1,9	0,26	$\Delta \Phi_{ef}, ^\circ$	< 5	< 0.5
$\Delta   W  $		0,095	0,21	0,27	0,046	0,0095	$\Delta   W  $	< 0.1	< 0.03
$\Delta   M  $		0,054	0,145	0,21	0,016	0,0042	$\Delta   M  $	< 0.1	< 0.03
$\Delta   T  $		3,4	3,4	1,1	0,9	0,9	$\Delta   T  $	< 0.1	< 0.03

### Двухмерная инверсия синтетических МТ данных.

На первом этапе исследований результаты 2D интерпретации МТ данных являются трамплином для дальнейшего проведения 3D интерпретации. В результате 2D инверсии восстанавливается фоновый слоистый разрез, в первом приближении локализуются неоднородности и оцениваются глубины их залегания. На этой основе, на втором этапе, строится стартовая 3D геоэлектрическая модель, которая затем уточняется с помощью программы 3D инверсии.

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.

В рамках нашего исследования 2D инверсия синтетических данных выполнялась в программе ZondMT2D [1]. 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 и ТЕ мод по отдельности,  $Z_{\text{eff}}$  в целях минимизации ошибки разделения кривых на ТМ и ТЕ моды, а также типпера. При этом рассматривались данные без случайного шума. Мы понимаем необходимость добавления случайного шума к синтетическим МТ данным, так как реальные измерения на практике не могут обойтись без шумовой составляющей, а потому следующим шагом в нашем исследовании при 2D инверсии будет привлечение во входные данные этой компоненты. 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 ТМ-моды, ТЕ-моды,  $Z_{\text{eff}}$ , а также модулями  $W$ .

Рассмотрим случай 2D инверсии с применением по отдельности данных ТМ и ТЕ мод без случайного шума для центрального меридионального профиля и стартовой модели – однородной среды с УЭС = 100 Ом·м. Для  $\rho_k$  и  $\phi Z$  каждой моды были установлены равные веса, а также был рассмотрен случай, когда у ТЕ моды была задействована только  $\phi Z$ . При высоком качестве полученных «измерений» для параметра регуляризации использовалось низкое значение – 0.01. Для вычислений потребовалось от 10 до 20 итераций. При этом в связи с отсутствием случайного шума в использованных данных 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%. В нашем случае средние значения составили 2–3 %, для ТЕ моды на  $T \geq 150$  с относительные невязки составили от 4 до 8 %.

При инверсии квазипоперечного импеданса ( $Z^+$ ) на верхнем структурном уровне разреза были восстановлены поднятие и прогиб (рис. 3А). При этом видно, что погружение осадочного чехла в области положения прогиба оказывается завышенным (3 км вместо реального значения в 1 км). Несмотря на прогнозируемый экранирующий эффект от высокоомной консолидированной коры, были достоверно определены коровые проводящие призмы, но их значения УЭС оказались более завышенными (среднее значение в 210 Ом·м вместо 30 Ом·м для юго-восточной призмы и среднее значение в 300 Ом·м вместо 60 Ом·м для северо-западной призмы) (рис. 3Б). По бокам этих призм прослеживаются артефакты – проводящие корни, примыкающие к кровле астеносферного поднятия. При этом геометрия самой верхней границы астеносферы плохо коррелирует с априорной информацией. Кроме того, на разрезе явно отсутствует наличие верхней мантии с УЭС = 1000 Ом·м. Присутствуют локальные области со средними значениями УЭС, отвечающие данному структурному этажу, в пределах глубин, заниженных относительно значений по априорным данным.

Существенные искажения притерпел менее устойчивый к 2D аппроксимации проводящих структур квазипродольный импеданс ( $Z^{\parallel}$ ). В результате его инверсии под впадиной образовалась ложная относительно проводящая зона, соединяющая эту синформную структуру с юго-восточной призмой. При этом под самими призмами с завышенными значениями УЭС (среднее значение в 400 Ом·м) так же прослеживаются протяженные на большую глубину ложные субвертикальные проводящие «корни». Кроме того, такие артефакты «оказали» негативное влияние на восстановление верхней мантии и астеносферы на полученном разрезе. Более достоверная модель была получена при инверсии только  $\phi Z^{\parallel}$ , но так же не позволившей адекватно восстановить глубинные структуры (рис. 3В).

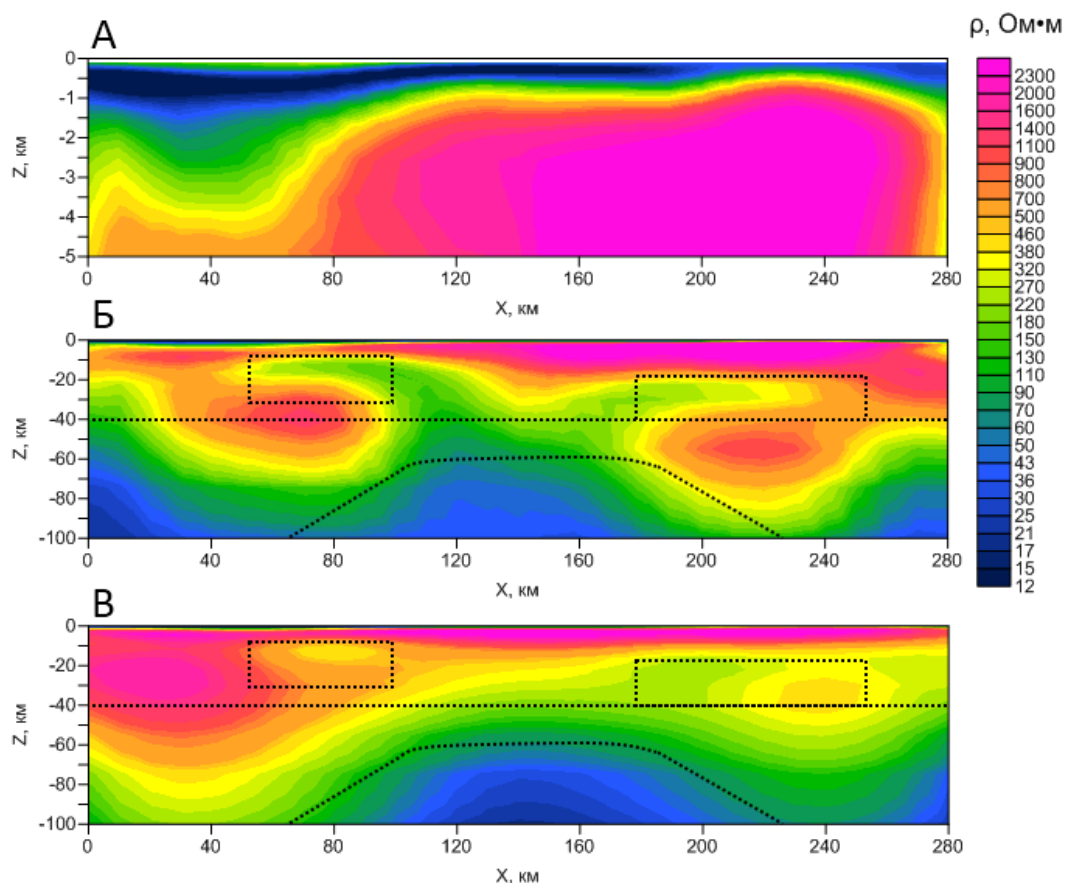


Рис. 3. Разрезы вдоль центрального меридионального профиля, построенные по  $\rho_k$  и  $\varphi Z$  ТМ моды (А и Б); разрез вдоль центрального меридионального профиля, построенный по  $\varphi Z$  ТЕ моды (В). Стартовая модель – однородная среда с УЭС = 100 Ом·м.

#### Заключение.

Нами была составлена 3D геоэлектрическая модель тектоносферы. Проведя расчет МТ поля, мы определили МТ передаточные функции и их инварианты, по данным которых были исследованы характеры аномалий, связанные с неоднородностями рассмотренной среды. Рассчитав чувствительности основных инвариантных параметров по отношению к неоднородностям, мы количественно оценили, какой вклад эти неоднородности вносят в аномалии инвариантных параметров на различных периодах. Результаты свидетельствуют, что все структуры вносят в данные заметный вклад, превышающий типичные погрешности наблюдений, но глубинные структуры проявляются наименее ярко. При 2D инверсии в рассмотренной ситуации наилучший результат обеспечило использование  $Z^+$ , позволившего относительно адекватно восстановить верхний и средний структурные этажи. В случае  $Z^{\parallel}$  применение только его фазы предоставляет более адекватный с точки зрения априорных данных результат, чем совместное использование  $\rho_{kZ^{\parallel}}$  и  $\varphi Z^{\parallel}$ .

#### Литература.

1. Каминский А.Е. Программа интерпретации магнитотеллурических зондирований ZondMT2d: Руководство пользователя. СПб.: Zond Software, 2006. 22 с.
2. Ковтун А.А., Успенский Н.И. Геоэлектрика. Естественное поле. С.: ВВМ, СПб., 2008г. 122 с.
3. 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. Pp. 215-226.