

# РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

П.Ю. Пушкарев, Д.Д. Попов, М.А. Суконкин

Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

## Введение

К числу актуальных вопросов интерпретации магнитотеллурических (МТ) данных относятся:

- подавление влияния локальных приповерхностных неоднородностей (ППН);
- трёхмерная (3D) инверсия ограниченных наборов МТ данных.

Для оценки эффективности методов решения этих задач мы используем синтетические МТ данные, то есть рассчитанные для определённых геоэлектрических моделей.

## Геоэлектрическая модель с приповерхностными неоднородностями

Для оценки эффективности методов подавления приповерхностных искажений рассматривается геоэлектрическая модель [1], содержащая глубинный трёхслойный разрез с проводящим грабеном и верхний слой (25 м) с множеством ППН (рис. 1).

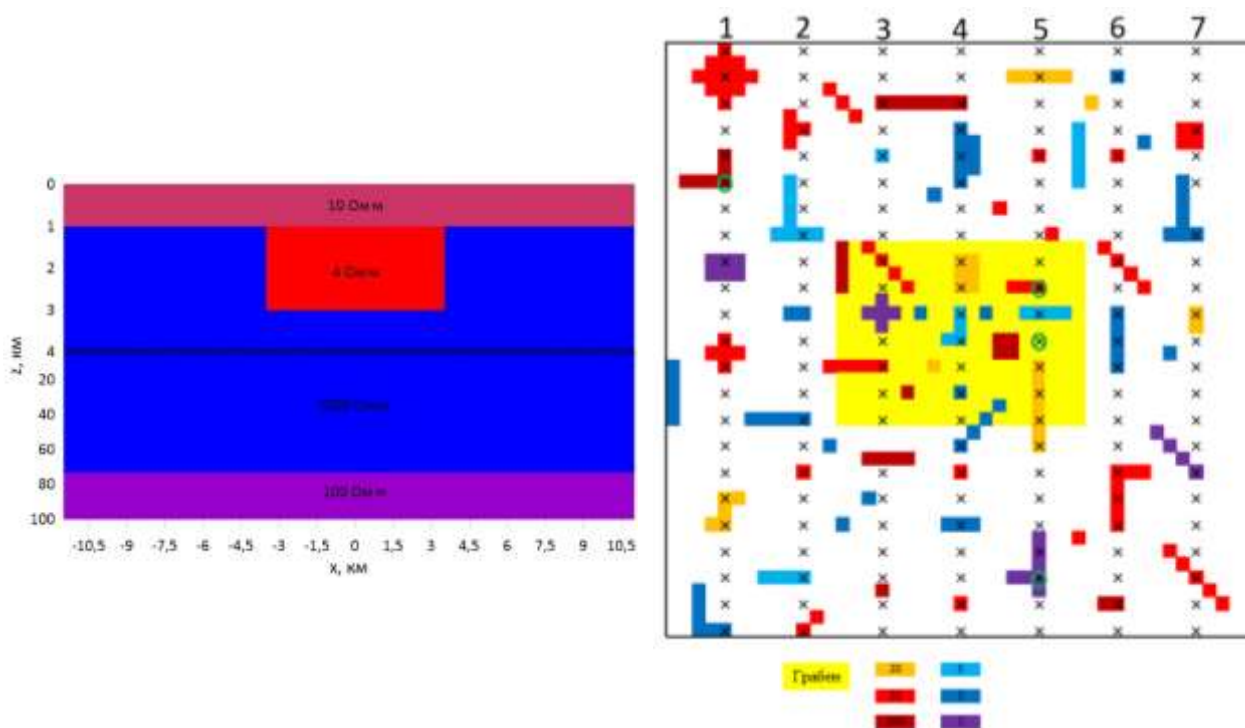


Рис. 1. Слева – глубинный разрез модели вдоль меридионального профиля. Справа – карта (22.5 x 22.5 км) верхнего слоя. Сопротивления ППН меняются от 1 до 100 Ом·м при фоновом значении 10 Ом·м. Жёлтый прямоугольник - положение грабена. Крестики – точки МТЗ.

Прямая задача решалась с помощью программы MT3DFwd [2]. MT данные были вычислены для двух вариантов модели: с однородным и с неоднородным верхним слоем.

Для перехода от компонент MT поля к передаточным функциям нами была разработана программа MTDA (MagnetoTelluric Data Analysis) в системе MATLAB. Она позволила вычислить компоненты тензора импеданса  $[Z]$ , матрицы Визе-Паркинсона  $[W]$ , магнитного тензора  $[M]$  и теллурического тензора  $[T]$ , а также их инвариантных параметров.

Приповерхностные искажения проявились на кривых кажущегося сопротивления в виде их смещения по уровню, на частотных разрезах – в виде «столбов», на картах – в виде локальных аномалий, наследуемых на всех периодах. Аналогичным образом ППН сказались на амплитудах компонент  $[T]$ . На фазовых характеристиках и на компонентах магнитных матриц  $[W]$  и  $[M]$  приповерхностные искажения отсутствуют.

### Оценка эффективности методов декомпозиции

Одним из основных подходов к подавлению влияния ППН является применение методов декомпозиции тензора импеданса  $[Z]$ . Их идея основана на матричном разложении:

$$[Z^S] = [e][Z^R],$$

где  $[Z^S]$  содержит суперпозицию локальных и региональных эффектов,  $[e]$  - вещественная матрица электрических искажений,  $[Z^R]$  - региональная составляющая тензора импеданса.

Пожалуй, наиболее важная информация, которую дают методы декомпозиции, это главные направления регионального тензора импеданса. В двумерных средах они совпадают с направлениями вдоль и вкrest региональных структур. В осесимметричных моделях они «закручиваются» вокруг структур, тяготея к радиальному и азимутальному направлениям.

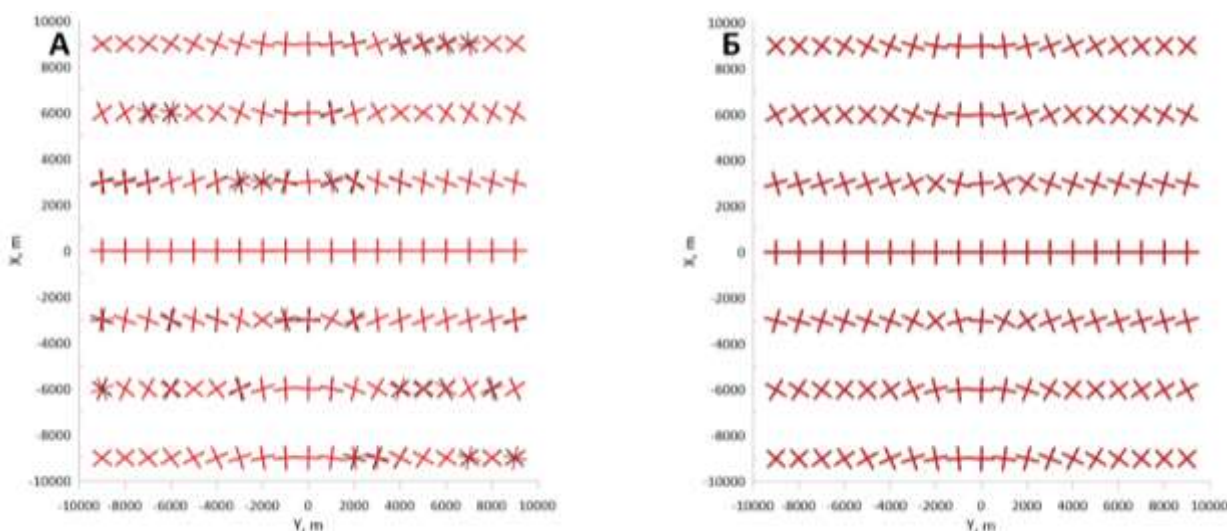


Рис. 2. Главные направления тензора импеданса, определённые методами Эггерса (А) и Бара (Б), карты на периоде 10 с. Чёрные крестики – для модели без ППН, красные – с ППН.

На рис. 2 представлены карты главных направлений, определённых методом Эггера [3], не различающим локальные и региональные эффекты, и методом Бара [4], относящимся к методам декомпозиции тензора импеданса. Видно, что наличие ППН искажает информацию о главных направлениях, определяемых методом Эггера, а метод Бара устойчив к их влиянию.

Наиболее информативным представляется метод фазового тензора [5], по отношению к которому метод Бара может рассматриваться как частный случай для сред с хорошо выраженной двухмерностью (или осевой симметрией) [6].

Теллурический тензор  $[T]$  редко используется при интерпретации, в том числе из-за сильных приповерхностных искажений. Однако, для  $[T]$  также можно записать разложение:

$$[T^S] = [e][T^R].$$

В докладе мы предлагаем адаптированный вариант метода фазового тензора для использования с теллурическим тензором  $[T]$ .

### Геоэлектрическая модель с неоднородностями на трёх структурных уровнях

Для оценки эффективности методов инверсии МТ данных нами составлена модель тектоносферы [7], содержащая слоистый разрез и 3D неоднородности на трёх уровнях (рис. 3):

- поднятие и прогиб в осадочном чехле (его проводимость меняется от 8.5 до 106 См);
- две вытянутые проводящие призмы в земной коре с азимутами простираения  $40^\circ$  и  $30^\circ$ ;
- слегка вытянутое поднятие проводящей астеносферы с азимутом простираения  $60^\circ$ .

Для упрощения построения 3D модели нами была разработана программа GMC (Geophysical Models Constructor) в системе MATLAB. Она позволяет на основе набора карт глубин залегания границ и ряда других параметров создать для заданной трёхмерной сетки массив значений свойств горных пород (в данном случае сопротивлений).

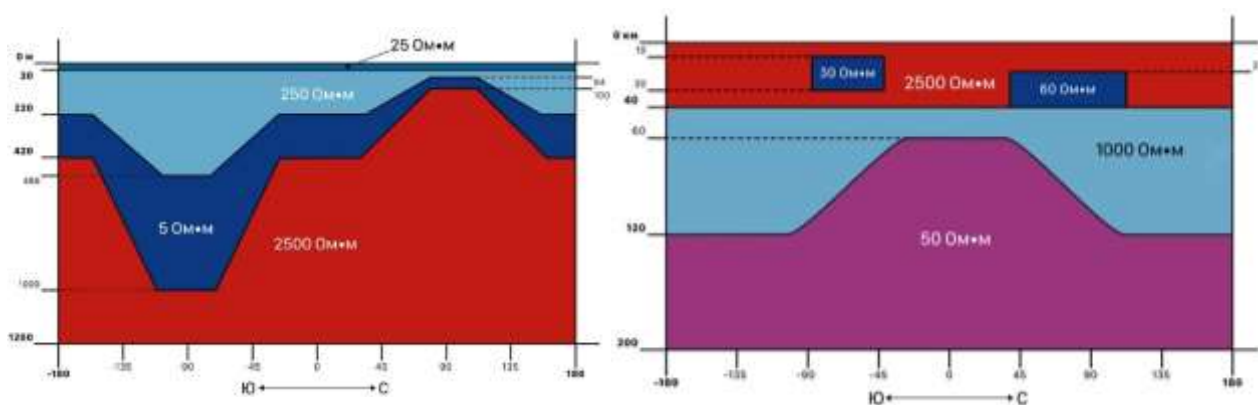


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы модели вдоль центрального меридионального профиля. Слева – до глубины 1200 м (осадочный чехол и верхняя часть фундамента), справа – до глубины 200 км (земная кора и часть верхней мантии).

Прямая задача была решена с помощью программы MT3DFwd [2]. Были также рассчитаны варианты модели с отсутствием каждой из упомянутых выше структур. На этой основе был выполнен анализ чувствительности к этим структурам различных компонент МТ данных [7]: эффективного кажущегося сопротивления и фазы эффективного импеданса, норм матриц [W], [M] и [T]. Он показал, что практически все эти компоненты обладают чувствительностью, существенно превышающей типичные погрешности наблюдений, при этом она наиболее высока к структурам в осадочном чехле, меньше по отношению к коровым призмам, а наиболее слабо проявляется в данных астеносферное поднятие.

### Оценка эффективности двумерной инверсии

Возможности 2D инверсии по получению образов структур нашей модели исследовались с помощью программы сглаживающей 2D инверсии ZondMT2D [8], широко применяемой в России в последние годы. Использовались данные по двум профилям, центральному меридиональному и центральному широтному, рассматривались различные компоненты данных и их комбинации (эффективный импеданс, поперечный импеданс, фаза продольного импеданса, типпер).

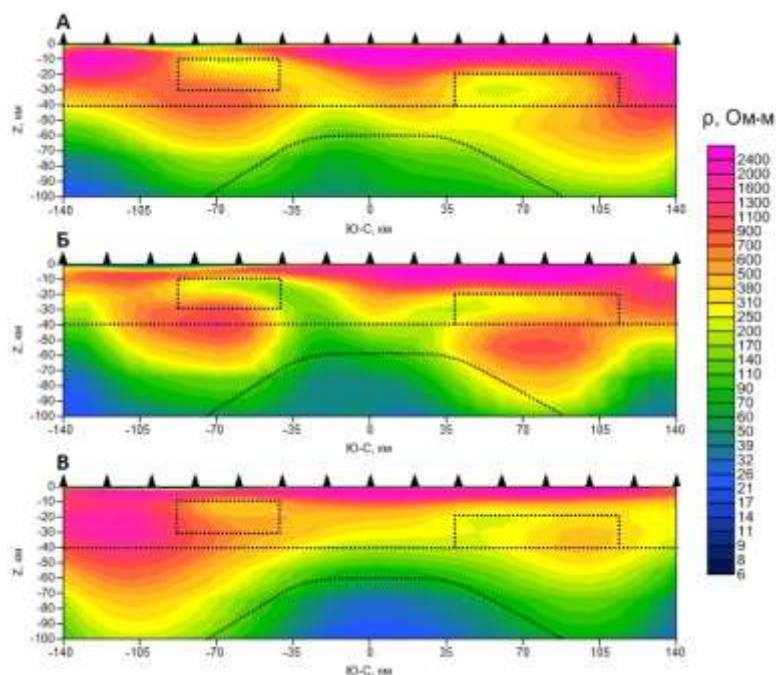


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы до 100 км по центральному меридиональному профилю по результатам 2D инверсии: А – эффективного импеданса, Б – поперечного импеданса, В – фазы продольного импеданса. Пунктиром показаны истинные границы структур.

На рис. 4 приведены примеры инверсии различных компонент по меридиональному профилю. Видно, что коровые призмы выделяются довольно успешно, хотя их сопротивления

завышены. Поднятие астеносферы определяется неустойчиво. Но следует отметить, что условия для 2D инверсии довольно сложные, структуры ограничены по простиранию и ориентированы под разными острыми углами к профилям, что создаёт сильные 3D эффекты.

Нами также был проведён эксперимент по инверсии зашумлённых данных. При добавлении случайного шума 2, 5, 10, 20 % результат постепенно ухудшается, при шуме 20 % глубинные структуры теряются.

### **Заключение**

В дальнейшие планы по направлению, связанному с подавлением приповерхностных искажений, входит оценка эффективности метода фазового тензора, а далее – опробование на синтетических данных методов нормализации амплитудных кривых МТЗ. По направлению, связанному с методами инверсии, планируется проведение 3D инверсии разных наборов МТ данных с использованием различных программ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, номер проекта 24-27-00147.

### **Литература**

1. Суконкин М.А., Пушкарев П.Ю. Анализ синтетических магнитотеллурических данных, рассчитанных для геоэлектрической модели с приповерхностными неоднородностями. *Геофизика*, 2023, № 6, с. 65-69.
2. Mackie R.L., Madden T.R., Wannamaker P.E. Three-dimensional magnetotelluric modeling using difference equations. *Geophysics*, 1993, 58, p. 215-226.
3. Eggers D.E. An eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor. *Geophysics*, 1982, 47, p. 1204-1214.
4. Bahr K. Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion. *Journal of Geophysics*, 1988, 62, p. 119–127.
5. Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal International*, 2004, 158, p. 457–469.
6. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва, *Научный мир*, 2009, 680 с.
7. Попов Д.Д., Пушкарев П.Ю. Чувствительность магнитотеллурических зондирований к типичным аномалиям электропроводности в тектоносфере. *Вестник Московского университета, Серия 4 (Геология)*, 2023, № 6, с. 134-143.
8. Каминский А.Е. Программа интерпретации магнитотеллурических зондирований ZondMT2d: Руководство пользователя. СПб.: Zond Software, 2006, 22 с.