

УДК 550.837.211

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-185-196

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ, ОСНОВАННЫХ НА ЛОКАЛЬНО-РЕГИОНАЛЬНОМ РАЗЛОЖЕНИИ ТЕНЗОРА ИМПЕДАНСА

Максим Алексеевич Суконкин^{1✉}, Павел Юрьевич Пушкарёв²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; msukonkin@mail.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;
pavel_pushkarev@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2894-2609>

Аннотация. Составлена характерная упрощенная геоэлектрическая модель земной коры, содержащая трехмерную проводящую осадочную впадину в высокоомном фундаменте. Рассмотрены два варианта модели: с однородной верхней частью разреза и с множеством локальных приповерхностных неоднородностей. С помощью трехмерного моделирования рассчитаны синтетические данные магнитотеллурического зондирования (МТЗ) по системе профилей. В данных для второго варианта модели наблюдается широко распространенный эффект приповерхностных искажений, приводящий к смещению амплитудных кривых МТЗ по уровню, но не затрагивающий фазовые кривые. Нами применены методы разделения локальных и региональных эффектов в данных МТЗ, основанные на соответствующем разложении тензора импеданса. Показано, что в условиях применимости этого разложения методы Бара и фазового тензора позволяют уверенно определить главные направления (азимуты), связанные с региональными структурами (с осадочной впадиной) и не искаженные локальными эффектами (приповерхностных неоднородностей). Демонстрируется эффективность применения карт главных направлений, полярных диаграмм фазы компоненты тензора импеданса и компонент фазового тензора, а также эллипсов фазового тензора для характеристики региональных геоэлектрических структур.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, локально-региональное разложение, метод Бара, фазовый тензор, полярные диаграммы

Для цитирования: Суконкин М.А., Пушкарёв П.Ю. Использование синтетических магнитотеллурических данных для оценки эффективности методов, основанных на локально-региональном разложении тензора импеданса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 185–196.

USING SYNTHETIC MAGNETOTELLURIC DATA TO EVALUATE THE EFFICIENCY OF METHODS BASED ON LOCAL-REGIONAL DECOMPOSITION OF THE IMPEDANCE TENSOR

Maksim A. Sukonkin^{1✉}, Pavel Yu. Pushkarev²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; msukonkin@mail.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; pavel_pushkarev@list.ru

Abstract. A characteristic simplified resistivity model of the earth's crust has been compiled, containing a three-dimensional conductive sedimentary depression in a resistive basement. Two variants of the model are considered: with a uniform near-surface part and with multiple local near-surface inhomogeneities. Using three-dimensional modeling, synthetic magnetotelluric sounding (MTS) data were calculated using a system of profiles. In the data for the second variant of the model, a widespread effect of near-surface distortions is observed, leading to a static shift in the amplitude MTS curves, but not affecting the phase curves. We applied methods for separating local and regional effects in MT data, based on the corresponding decomposition of the impedance tensor. It is shown that, under the conditions of the applicability of this decomposition, the Bahr's and phase tensor methods make it possible to confidently determine the principal directions (azimuths) associated with regional structures (with a sedimentary depression) and not distorted by local effects (of near-surface inhomogeneities). The effectiveness of using maps of principal directions, polar diagrams of the phase of impedance tensor component and of the phase tensor components, as well as phase tensor ellipses for characterizing regional resistivity structures is demonstrated.

Keywords: magnetotelluric sounding, local-regional decomposition, Bahr's method, phase tensor, polar diagrams

For citation: Sukonkin M.A., Pushkarev P.Yu. Using synthetic magnetotelluric data to evaluate the efficiency of methods based on local-regional decomposition of the impedance tensor. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 6: 185–196. (In Russ.).

Введение. Геофизический метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) основан на изучении естественного переменного электромагнитного поля Земли, называемого магнитотеллурическим (МТ) полем. Его высокочастотная составляющая, из-за сильного затухания, несет информацию только о верхних слоях разреза, а низкочастотная составляющая проникает глубже и несет информацию о глубинных слоях. Таким образом, используя различные частоты, мы можем осуществлять зондирование и оценивать зависимость удельного электрического сопротивления (УЭС) от глубины. Ситуация усложняется при наличии в верхней части разреза локальных приповерхностных неоднородностей (ППН), что довольно часто встречается на практике. Влияние ППН в электрической составляющей МТ поля проявляется во всем диапазоне частот, искажая информацию о глубинных структурах.

Данные МТЗ включают несколько частотно-зависимых комплекснозначных характеристик, основной из которых является тензор импеданса $[Z]$ (тензор второго ранга), связывающий горизонтальное электрическое поле $\vec{E}_\tau$ и горизонтальное магнитное поле $\vec{H}_\tau$ в соответствии с формулой [Бердичевский, Дмитриев, 2009]

$$\vec{E}_\tau = [Z]\vec{H}_\tau.$$

В декартовой системе координат, где ось x смотрит на север, y — на восток, z — вниз, покомпонентная запись этого уравнения выглядит следующим образом:

$$E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y,$$

$$E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y$$

Компоненты Z_{xx} и Z_{yy} принято называть дополнительными, в горизонтально-слоистой среде они равны нулю. Компоненты Z_{xy} и Z_{yx} называют основными, их модули могут быть пересчитаны в кажущиеся сопротивления по формулам:

$$\rho_{xy} = \frac{|Z_{xy}|^2}{\omega\mu_0}, \quad \rho_{yx} = \frac{|Z_{yx}|^2}{\omega\mu_0},$$

где ω — круговая частота колебаний поля, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума. Частотные зависимости модулей компонент $[Z]$ и кажущихся сопротивлений называют амплитудными кривыми МТЗ, а частотные зависимости фаз компонент $[Z]$ — фазовыми кривыми.

Существует целый ряд методов, которые позволяют подавлять влияние локальных ППН, и которые можно разделить на две основные группы. К первой группе можно отнести методы нормализации амплитудных кривых МТЗ, т.е. их смещения по уровню [Бердичевский и др., 1986]. Кривые могут приводиться: к усредненному уровню соседних кривых МТЗ; к уровню кривых других методов электромагнитного зондирования, не использующих элек-

трическое поле; к уровню, определяемому исходя из априорной информации и т.д. Эти методы хорошо зарекомендовали себя при нормализации кривых кажущегося сопротивления, но их использование с дополнительными компонентами $[Z]$ требует отдельных исследований.

Вторая группа методов основана на разложении (или декомпозиции) тензора $[Z]$ на две составляющие, связанные с изучаемыми региональными структурами и с локальными ППН, которые рассматриваются как шум. Эти методы позволяют извлечь из-под шума информацию о глубинных структурах. Подробнее речь о них пойдет в данной статье.

Для объективной оценки возможностей этих методов мы будем использовать синтетические МТ данные, рассчитанные для двух трехмерных геоэлектрических моделей [Суконкин и Пушкарев, 2023], отличающихся приповерхностным слоем, который в первой модели является однородным, а во второй — наполнен локальными ППН.

Помимо тензора импеданса $[Z]$, к которому подобные методы широко применяются, можно рассмотреть и выделение региональных структур в теллурическом тензоре $[T]$, что будет представлено нами в отдельной статье. Матрицу Визе-Паркинсона $[W]$ и магнитный тензор $[M]$ мы рассматривать не будем, поскольку они строятся по магнитному полю, которое с понижением частоты освобождается от влияния ППН [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

Для дальнейшего изложения будет полезно напомнить, как структура тензора $[Z]$ упрощается в 1D и 2D средах.

В 1D (горизонтально-слоистой) среде тензор импеданса принимает вид:

$$[Z^{1D}] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z^N \\ -Z^N & 0 \end{bmatrix},$$

где Z^N — импеданс нормального слоистого разреза. Практически считать среду одномерной можно при малых значениях параметра неоднородности [Бердичевский, Дмитриев, 2009]:

$$N = \sqrt{1 - 4 \frac{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}}{(Z_{xy} - Z_{yx})^2}}.$$

В 2D среде, в случае, когда y — ось однородности среды, тензор импеданса выглядит следующим образом:

$$[Z^{2D}] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z^\perp \\ -Z^\parallel & 0 \end{bmatrix},$$

где $Z^\perp$ — поперечный импеданс, связанный с токами, текущими вкост структур (Н-поляризация поля или ТМ-мода), а $Z^\parallel$ — продольный импеданс, связанный с токами, текущими вдоль структур (Е-поляризация поля или ТЕ-мода). Практически

считать среднюю двухмерную можно при малых значениях параметра асимметрии Свифта:

$$skew_s = \frac{|Z_{xx} + Z_{yy}|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|}.$$

В общем случае 2D структуры имеют произвольный по отношению к координатным осям азимут простирания. Для дальнейшего решения обратной 2D задачи его необходимо определить. Это можно сделать с помощью метода определения главных направлений и главных значений тензора импеданса Эггера [Eggers, 1982], либо других аналогичных методов [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. При этом мы не можем различить направления вдоль и вкрест структур, это может быть сделано на основе априорной информации. Подчеркнем, что метод Эггера и его аналоги неустойчивы к искажающему влиянию ППН.

Методы декомпозиции тензора импеданса.

Разделение тензора импеданса на множители, связанные с региональной и локальной составляющими, было предложено в работе [Zhang, et al., 1987]. Если $[Z^S]$, $\overline{E}_\tau^S$, $\overline{H}_\tau^S$ — тензор импеданса и горизонтальные компоненты поля, отвечающие суперпозиции региональных и локальных структур, $[Z^R]$, $\overline{E}_\tau^R$, $\overline{H}_\tau^R$ — их региональные составляющие, а $[e]$ и $[h]$ — матрицы локальных электрических и магнитных искажений [Бердичевский, Дмитриев, 2009], то:

$$\overline{E}_\tau^S = [e]\overline{E}_\tau^R = [e][Z^R]\overline{H}_\tau^R = [e][Z^R][h]^{-1}\overline{H}_\tau^S = [Z^S]\overline{H}_\tau^S,$$

где

$$[Z^S] = [e][Z^R][h]^{-1}.$$

Задача состоит в том, чтобы выделить региональную составляющую $[Z^R]$.

Если предположить, что локальные ППН сосредоточены в тонком слое и частота настолько мала, что электрические искажения имеют гальванический характер, не затрагивая фазы, а магнитными искажениями можно пренебречь, то последняя формула упрощается:

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

где матрица $[e]$ является вещественно-значной и не зависит от частоты. В качестве критерия применимости модели, в которой справедливо это разложение, а региональная среда является двухмерной (или осесимметричной), в работе [Bahr, 1988] была предложена близость к нулю параметра, который позже был назван параметром асимметрии Бара:

$$skew_B = \frac{\sqrt{|\operatorname{Im}(Z_{xy}Z_{yy}^* + Z_{xx}Z_{yx}^*)|}}{|Z_{xy} - Z_{yx}|},$$

где звездочка означает комплексно-сопряженную величину.

В той же работе [Bahr, 1988] был предложен метод, известный сейчас как метод Бара. В нем оцени-

вается азимут простирания региональных структур (с точностью до 90°):

$$\alpha_R = \frac{1}{2} \arctg \frac{\operatorname{Im}(Z_{yx}Z_{xx}^* + Z_{xy}Z_{yy}^*)}{\operatorname{Im}(Z_{xx}Z_{yy}^* + Z_{xy}Z_{yx}^*)}.$$

Далее мы можем поворотом системы координат перейти к направлениям α_R и $\alpha_R + 90^\circ$ и получить отвечающие им импедансы Z_1 и Z_2 . В региональной 2D среде один из них будет продольным, а второй — поперечным по отношению к структурам. В осесимметричной среде один будет отвечать азимутальному, другой — радиальному направлению. Подчеркнем, что амплитуды $|Z_1|$ и $|Z_2|$ будут по-прежнему подвержены статическим смещениям.

В случае, если фазы импедансов $\arg(Z_1)$ и $\arg(Z_2)$ близки (например, региональный разрез горизонтально-однороден), метод Бара работает неустойчиво. Поэтому в дополнение к условию малости $skew_B$ был предложен дополнительный критерий применимости метода Бара — параметр Δ , определяемый по разности фаз [Бердичевский, Дмитриев, 2009]:

$$\Delta = |\arg(Z_1) - \arg(Z_2)|.$$

Другой метод декомпозиции, основанный на тех же допущениях, предложен в работе [Groom, Bailey, 1989]. Матрица $[e]$ в нем представлена как произведение масштабного коэффициента и трех матриц, отвечающих за искажения $[Z]$, аналогичные эффектам поворота, сдвига и анизотропии:

$$[e] = g [T][S][A].$$

Простирание региональных структур и другие параметры оцениваются в методе Грума-Бэйли методом наименьших квадратов. Позднее была реализована многочастотная и многоточечная схема его применения [McNeice, Jones, 2001], повысившая стабильность результатов.

Существуют и другие методы разложения $[Z]$, например, предполагающие двухмерный характер ППН или учитывающие магнитные искажения [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

Метод фазового тензора. Этот метод был предложен в работе [Caldwell, et al., 2004]. Его отличием и сильной стороной является отсутствие требования к двухмерности регионального разреза.

Запишем полученную выше формулу $[Z^S] = [e] \times [Z^R]$ отдельно для вещественных и мнимых частей:

$$[\operatorname{Re}Z^S] = [e][\operatorname{Re}Z^R], \quad [\operatorname{Im}Z^S] = [e][\operatorname{Im}Z^R].$$

Далее введем вещественнозначный фазовый тензор:

$$\begin{aligned} [\Phi] &= [\operatorname{Im}Z^S][\operatorname{Re}Z^S]^{-1} = [e][\operatorname{Im}Z^R][e][\operatorname{Re}Z^R]^{-1} = \\ &= [\operatorname{Im}Z^R][\operatorname{Re}Z^R]^{-1} = \begin{bmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Как видно, он связан только с региональным импедансом, и не подвержен влиянию ППН.

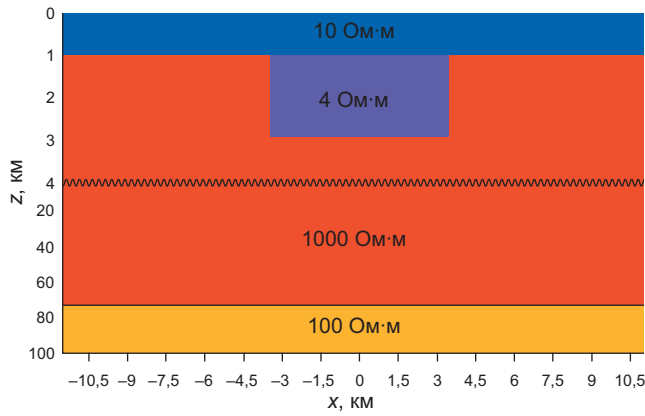


Рис. 1. Разрез геоэлектрической модели вдоль центрального меридионального профиля

В одномерной среде фазовый тензор приобретает вид:

$$[\Phi^{1D}] = \begin{bmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{tg} \arg Z^N & 0 \\ 0 & \operatorname{tg} \arg Z^N \end{bmatrix}.$$

В двухмерной среде, если y — ось однородности среды:

$$[\Phi^{2D}] = \begin{bmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{tg} \arg Z^{\parallel} & 0 \\ 0 & \operatorname{tg} \arg Z^{\perp} \end{bmatrix}.$$

По фазовому тензору можно определить азимут простирания региональных двухмерных структур α (с точностью до 90°) [Бердичевский, Дмитриев, 2009]:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\Phi_{xy} + \Phi_{yx}}{\Phi_{xx} - \Phi_{yy}} = \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(Z_{yx}Z_{xx}^* + Z_{xy}Z_{yy}^*)}{\operatorname{Im}(Z_{xx}Z_{yy}^* + Z_{xy}Z_{yx}^*)}. \end{aligned}$$

То есть в случае, когда региональный разрез является двухмерным, метод фазового тензора дает тот же результат, что и метод Бара.

Также в методе фазового тензора вводится инвариантный параметр β , который характеризует региональную асимметрию среды:

$$\beta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\Phi_{xy} - \Phi_{yx}}{\Phi_{xx} + \Phi_{yy}}.$$

Параметр β является аналогом $skew_B$, его величина тем больше, чем сильнее региональные трехмерные эффекты. С его помощью можно определить главные направления фазового тензора:

$$\alpha_1 = \alpha - \beta, \alpha_2 = \alpha + 90^\circ.$$

Подчеркнем, что в трехмерных средах $\beta \neq 0$ и азимутальные углы α_1 и α_2 будут отличаться от азимутального угла α , определяемого методом Бара.

Геоэлектрические модели. Рассмотрим применение представленной выше теории на синтетиче-

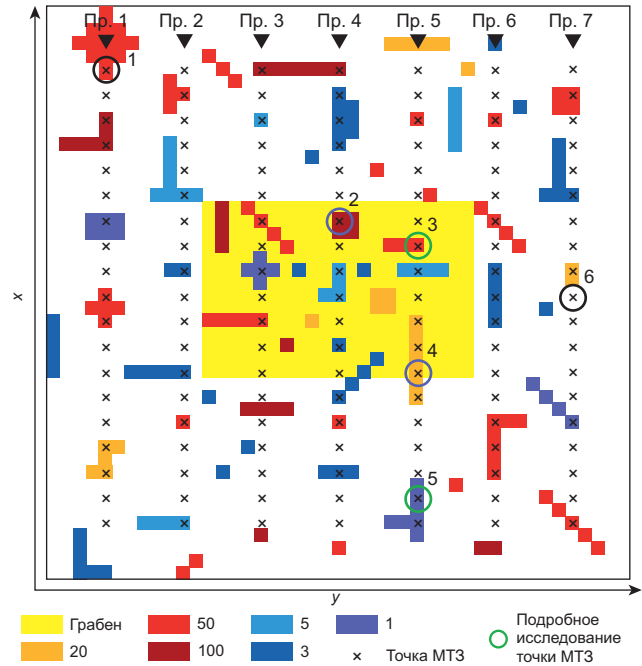


Рис. 2. Карта верхнего слоя, содержащего ППН (размер $22,5 \times 22,5$ км). Фоновое УЭС $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, УЭС ППН меняются от 1 до $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (см. условные обозначения). Желтый прямоугольник — положение глубинного грабена. Крестики — точки МТЗ. Кружками обведены точки, данные которых представлены на рисунках: зелеными — кривые на рис. 3, черными — азимуты и параметры асимметрии на рис. 7 и 8, фиолетовыми — диаграммы и эллипсы на рис. 9–12

ских данных, рассчитанных для двух моделей, совпадающих в своей глубинной части и отличающихся приповерхностным слоем. Эти модели представлены в работе [Суконкин и Пушкарев, 2023], здесь мы для ясности изложения также их кратко опишем.

Глубинная часть геоэлектрических моделей включает фоновый слоистый разрез и трехмерную неоднородность (рис. 1). Фоновый разрез состоит из трех слоев, имитирующих проводящий осадочный чехол, высокоомную литосферу и проводящую мантию. Глубинная неоднородность представляет собой проводящую вставку, имитирующую грабен под осадочным чехлом. Приповерхностный слой в первой модели является однородным, а во второй — содержит в себе множество трехмерных ППН.

Модель представлена на сетке, размер которой по осям x, y, z составил $59 \times 59 \times 42$ ячеек. По горизонтали размер ячеек меняется от $0,5$ км в центральной части до 64 км у боковых границ области моделирования. Размеры ячеек по вертикали увеличиваются от 10 м у поверхности до 50 км в глубинной части. Фоновый разрез состоит из трех слоев: осадочного — до глубины 1 км с УЭС $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; литосферы — до 73 км с УЭС $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; верхней мантии с УЭС $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. В верхней части второго слоя расположен грабен, размеры которого по осям x и y составляют 7 км (14 ячеек) $\times$ $10,5$ км (21 ячейка), а мощность равна 2 км (рис. 1; 2).

В первой модели верхний слой мощностью 25 м (верхние две ячейки) однороден и имеет УЭС

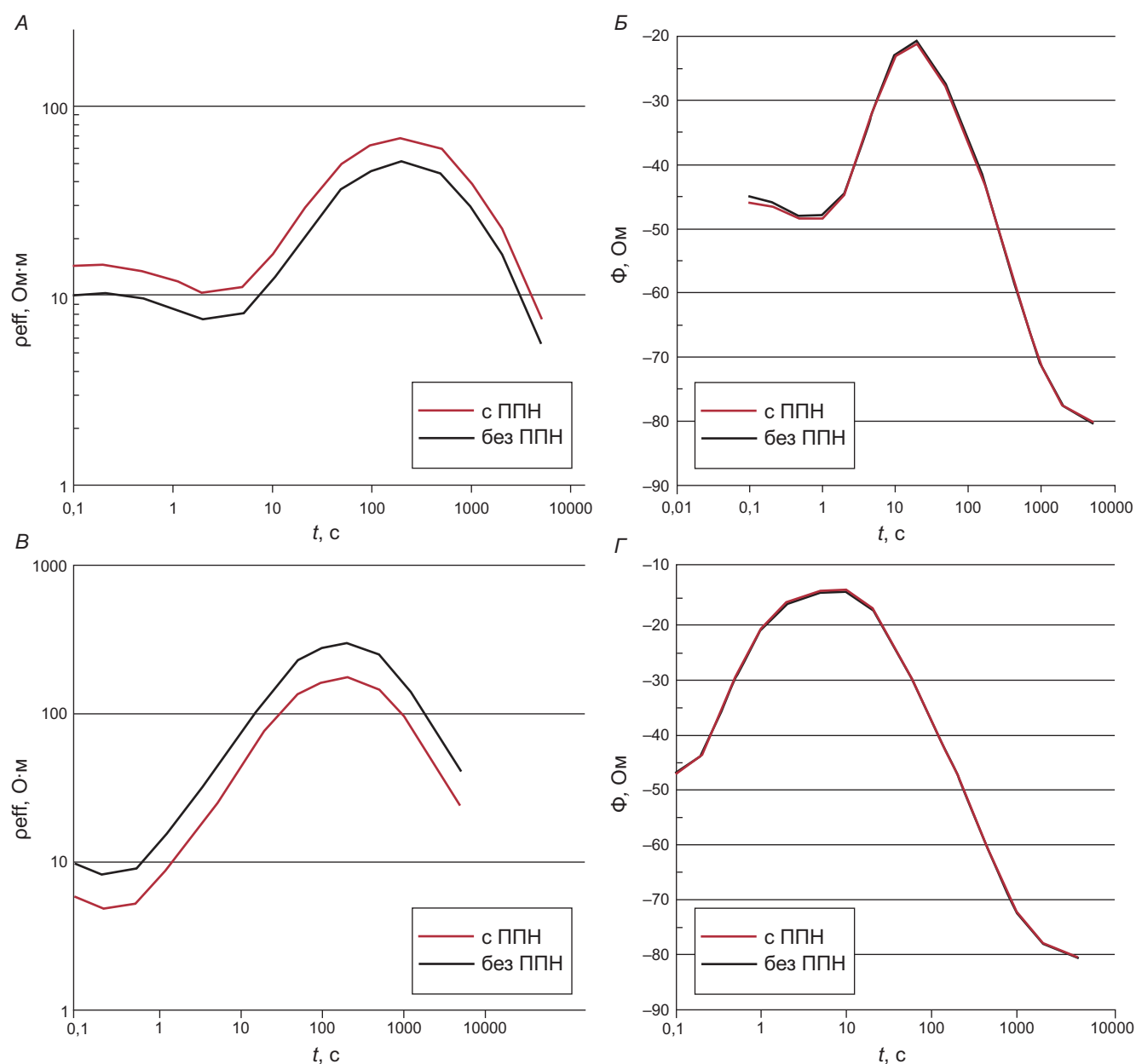


Рис. 3. Кривые эффективного кажущегося сопротивления (А, В) и фазы эффективного импеданса (Б, Г). Вверху (А, Б) — точка 3 над высокоомной ППН (1 Ом·м), внизу (В, Г) — точка 5 над проводящей ППН (50 Ом·м)

10 Ом·м. Во второй модели он содержит множество мелких ППН с УЭС от 1 до 100 Ом·м, сосредоточенных на планшете размером 22,5 × 22,5 км или 45 × 45 ячеек (рис. 2).

Расчеты компонент поля для двух поляризаций проводились с помощью программы 3D моделирования MT3DFwd [Mackie, et al., 1993], основанной на методе конечных разностей. Для пересчета поля в компоненты МТ матриц и их анализа нами в системе MATLAB была разработана программа MTDA (Magnetotelluric data analysis). Данные МТЗ были получены в диапазоне периодов от 0,1 до 5000 с в точках семи субмеридиональных профилей (шаг по профилю 1 км, расстояние между профилями 3 км).

Анализ данных. На рис. 3 представлены кривые эффективного кажущегося сопротивления и фазы эффективного импеданса в точках МТЗ в точках 3

и 5, отмеченных на карте на рис. 2. Под влиянием ППН происходит статический сдвиг кривых кажущегося сопротивления, а фазовые кривые остаются неизменными. На рис. 3, А, Б изображены кривые МТЗ над высокоомной ППН (точка 3), здесь кривая кажущегося сопротивления смещается вверх (по сравнению с результатами для модели с однородным верхним слоем). На рис. 3, В, Г показаны кривые над проводящей ППН (точка 5), в этом случае, соответственно, кривая кажущегося сопротивления смещается вниз. Если точка наблюдения располагается рядом с ППН, искажающий эффект проявляется слабее и полностью затухает при удалении от ППН.

При анализе данных МТЗ по профилю обычно используются частотные разрезы или псевдоразрезы кажущегося сопротивления, на них влияние ППН проявляется в виде столбообразных структур. При

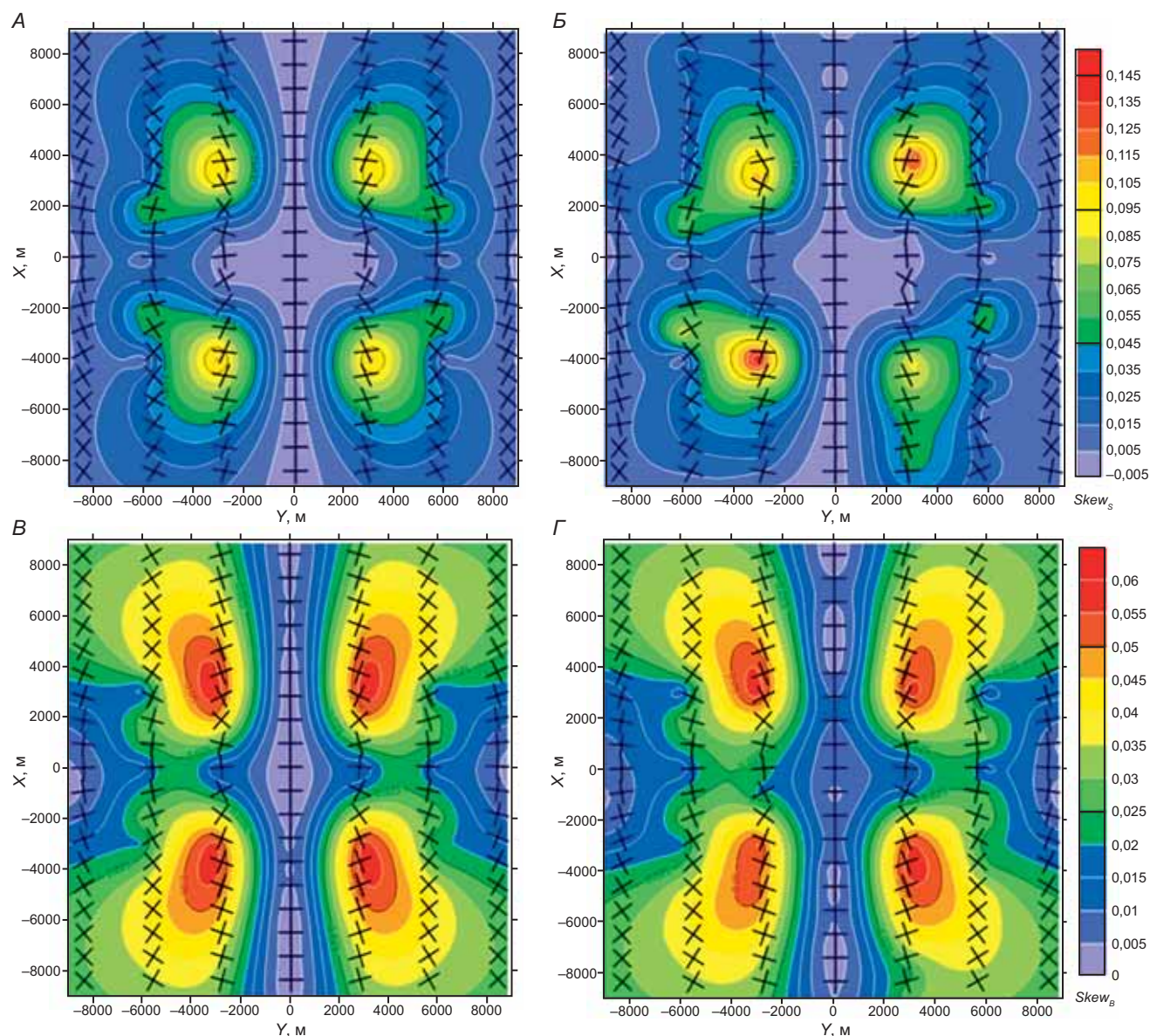


Рис. 4. Карты главных направлений (показаны крестиками), определенных методами Эггерса (А и Б) и Бара (В и Г) на фоне значений параметров асимметрии (показаны цветом) Свифта $skew_S$ (А и Б) и Бара $skew_B$ (В и Г). Слева (А и В) — результаты для модели без ППН, справа (Б и Г) — для модели с ППН. Период 10 с

анализе данных по площади строятся карты кажущегося сопротивления на выбранных периодах, при наличии ППН на них возникают локальные аномалии, наследуемые на всех периодах. В статье [Суконкин и Пушкарев, 2023] эти эффекты продемонстрированы на данных для рассматриваемых моделей.

Похожим образом влияние ППН проявляется и в теллурическом тензоре, в частности, создавая частотно-независимые аномалии на картах значений нормы этого тензора [Суконкин и Пушкарев, 2023]. В то же время, в картах значений норм матрицы Визе-Паркинсона и горизонтального магнитного тензора на больших периодах влияние ППН отсутствует, поскольку магнитное поле на этих периодах освобождается от их влияния.

Определение главных направлений. Главные направления тензора $[Z]$ определяют азимуты вдоль и вкост простираня структур, что имеет важное

значение при 2D интерпретации. В осесимметричных средах главные направления отвечают радиальному и азимутальному направлениям. Как уже отмечалось, для определения главных направлений может применяться метод Эггерса [Eggers, 1982], который, однако, неустойчив к влиянию ППН. Основным достоинством методов локально-региональной декомпозиции $[Z]$ является их способность определять главные направления, связанные именно с региональными (глубинными) структурами.

На рис. 4 крестиками показаны главные направления, определенные методами Эггерса (вверху) и Бара (внизу) на периоде 10 с. Слева приведены результаты для модели с однородным верхним слоем, а справа — с ППН. В качестве фона на рис. 4 показаны значения параметров асимметрии Свифта $skew_S$ (вверху) и Бара $skew_B$ (внизу). Видно, что добавление в модель ППН влияет на главные направ-

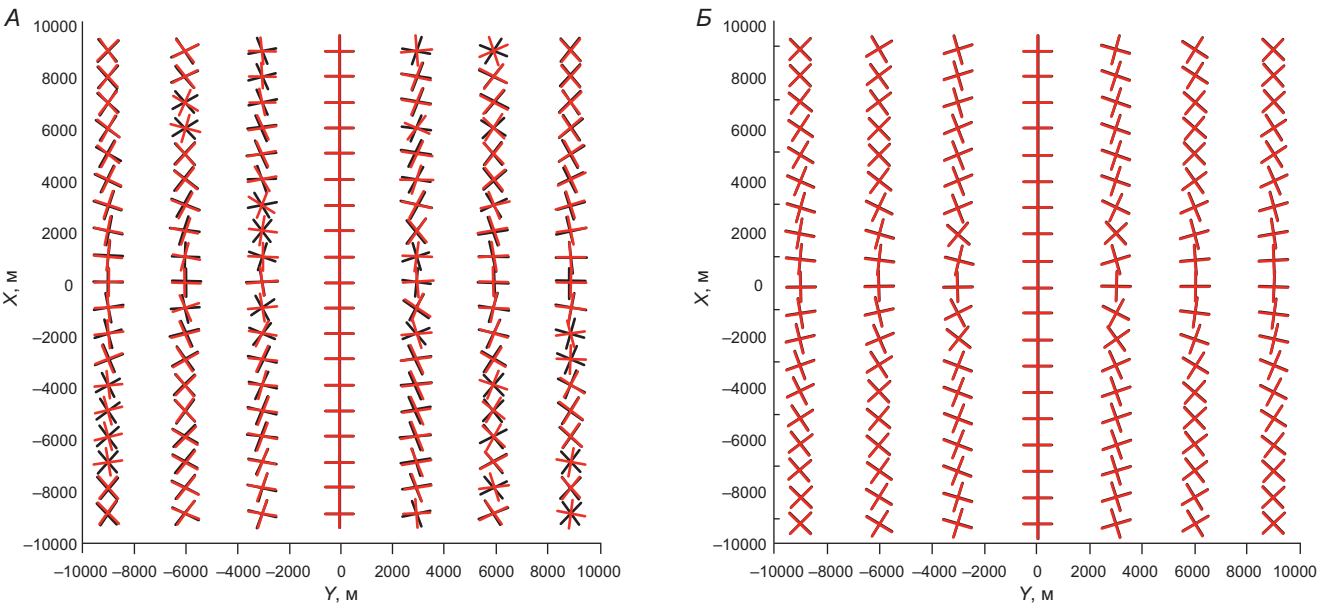


Рис. 5. Главные направления тензора импеданса, определенные методами Эггерса (А) и Бара (Б), карты на периоде 10 с. Черные крестики — для модели без ППН, красные — с ППН

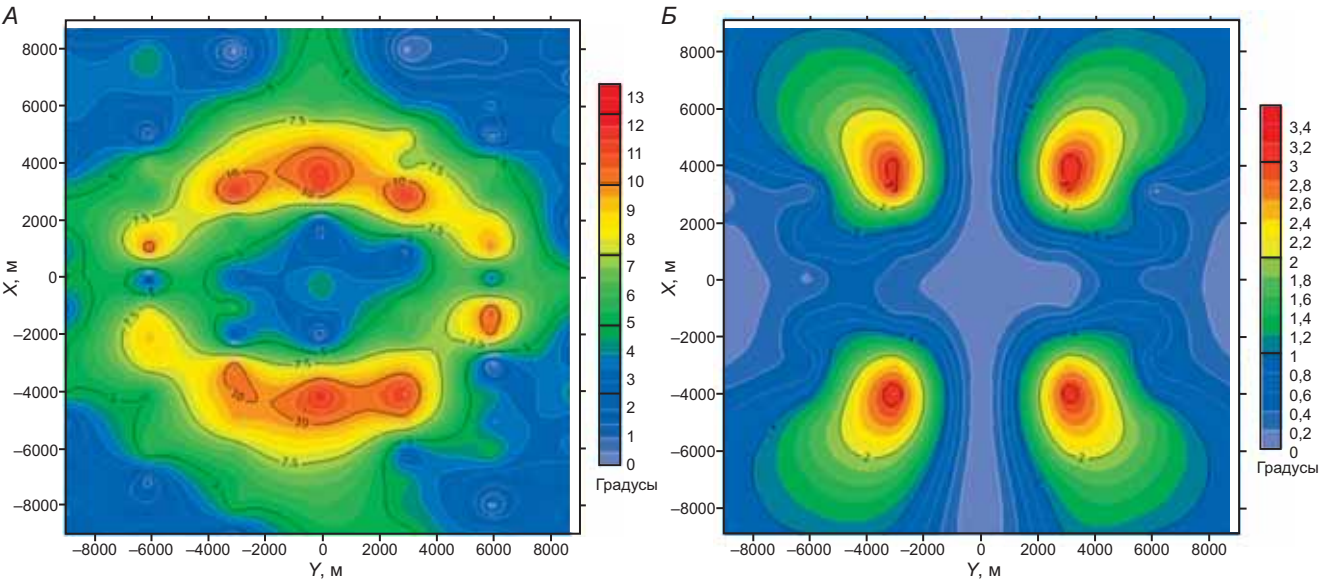


Рис. 6. Карты параметров Δ (А) и β (Б) для периода 10 с

ления по Эггерсу и значения $skew_S$, в то время как главные направления по Бару и значения $skew_B$ при этом почти не меняются.

Для наглядности на рис. 5 еще раз показаны главные направления, определенные этими двумя методами, и наложенные друг на друга для двух вариантов модели (с однородным и неоднородным верхним слоем). Направления по Эггерсу во многих точках существенно изменились при появлении ППН, а метод Бара демонстрирует устойчивость к их влиянию.

Как видно из рис. 4, значения параметра асимметрии Бара $skew_B$ повсеместно малы, что свидетельствует о применимости локально-региональной декомпозиции. Однако, как было отмечено выше, метод Бара будет работать устойчиво лишь при су-

щественном значении параметра Δ , который равен разности фаз импедансов, отвечающих главным региональным направлениям. Карта абсолютных значений Δ для периода 10 с приведена на рис. 6, А. Видно, что они превышают $2-3^\circ$ (т.е. характерную погрешность наблюдений) вблизи границ грабена и малы в центре модели и на удаленных от грабена углах планшета. Однако, как мы видели на рис. 4 и 5, и здесь для двух наборов данных (полученных при отсутствии и наличии ППН) результаты получились устойчиво.

На рис. 6, Б продемонстрирована карта параметра асимметрии β для периода 10 с. Его распределение напоминает параметр $skew_B$, максимальные значения достигаются у углов грабена и составляют около 3° .

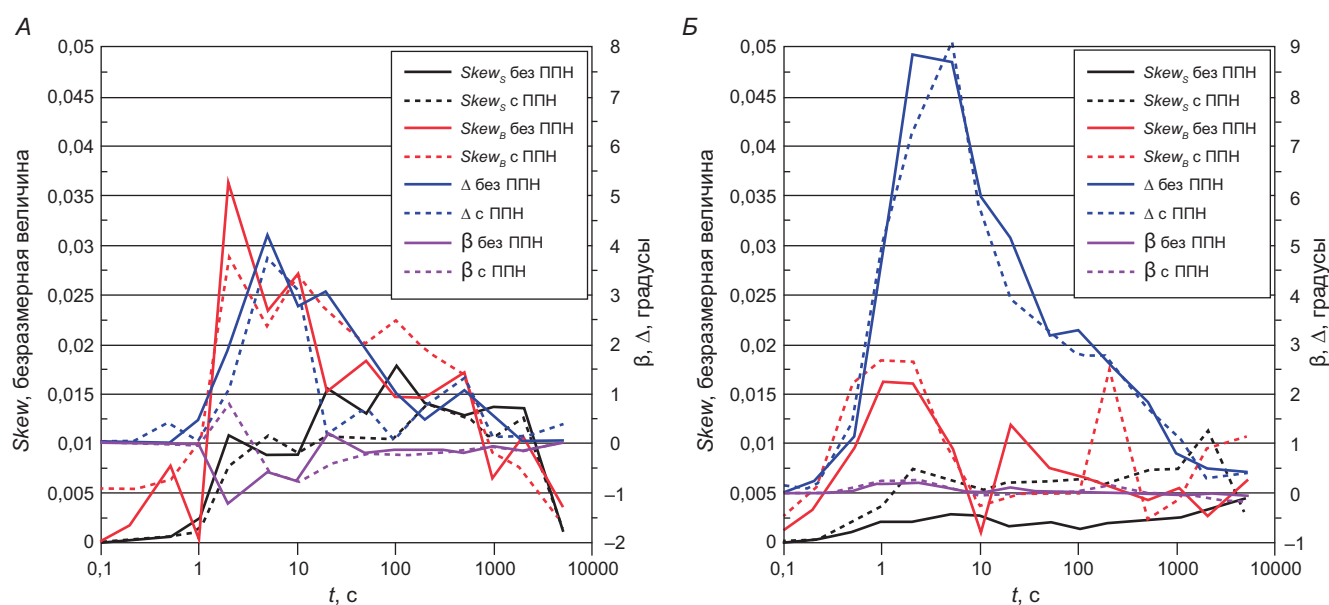


Рис. 7. Параметры асимметрии $skew_s$ и $skew_B$, а также параметры Δ и β в зависимости от периода: А — в точке 1; Б — в точке 6 (см. рис. 2)

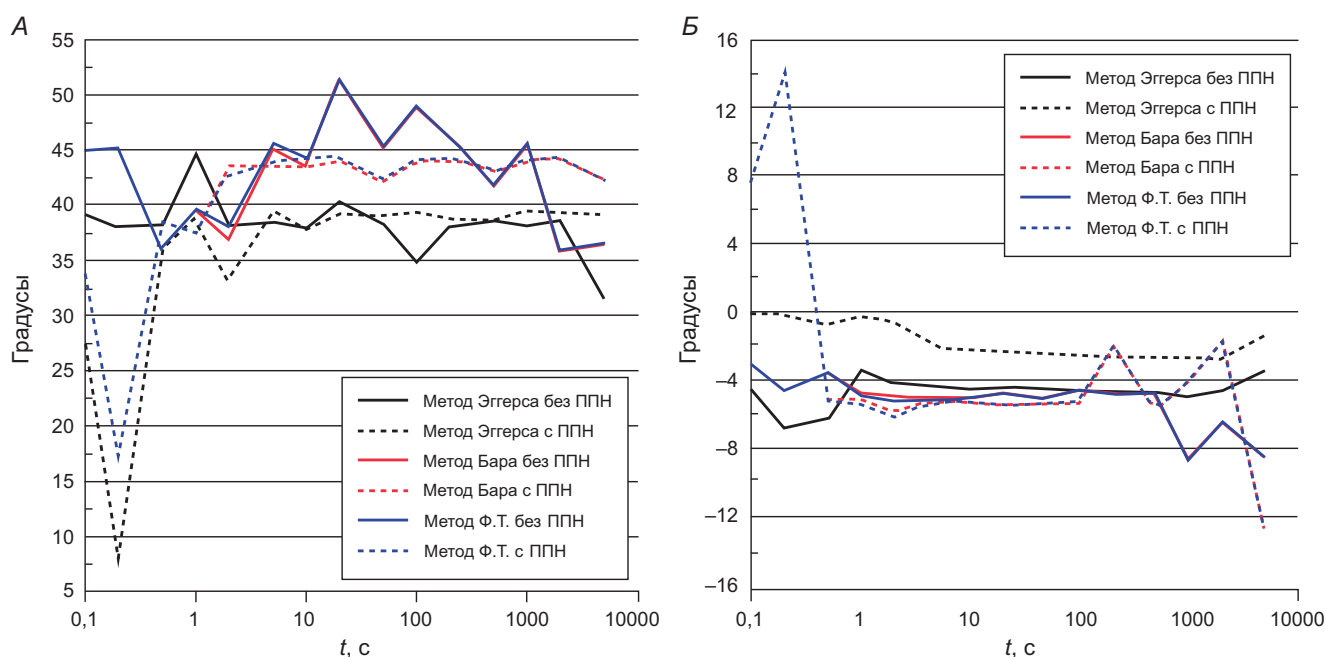


Рис. 8. Главные направления, определенные методами Эггера, Бара и фазового тензора: А — в точке 1, Б — в точке 6 (см. рис. 2)

Рассмотрим зависимости параметров $skew_s$, $skew_B$, Δ и β от периода (рис. 7). Графики построены для двух точек МТЗ (1 и 6), положение которых показано на рис. 2. Точка 1 располагается в области с низким значением разности фаз Δ , максимальное значение которой достигает лишь 4° на периоде около 5 с. В точке 6 этот параметр больше, достигает 9° в промежутке периодов 1–10 с. Параметр β в точке 1 достигает максимального значения в 1° в том же промежутке периодов. Стоит отметить, что для обеих точек этот параметр определяется устойчиво вне зависимости от влияния ППН. Значения параметров $skew_s$ и $skew_B$ небольшие в обоих случаях, максимальные значения составляют 0,017 и 0,035 соответственно. В точке 6 наблюдается

значительное расхождение параметра асимметрии Свифта для разных моделей, значения этого параметра завышаются при попадании на высокоомную неоднородность. Параметр асимметрии Бара для двух вариантов модели отличается несущественно.

Главные направления (азимутальные углы), определенные методами Эггера, Бара и фазового тензора, в зависимости от периода приведены на рис. 8. На удалении от грабена (точка 1) главное направление составляет порядка 45° , т.е. близко к азимутальному. Вблизи грабена, напротив, оно близко к 0° (а ортогональное — к 90°), что отвечает ориентации границ грабена. Значения, полученные методами Бара и фазового тензора, близки друг к другу и почти не зависят от наличия ППН. Метод

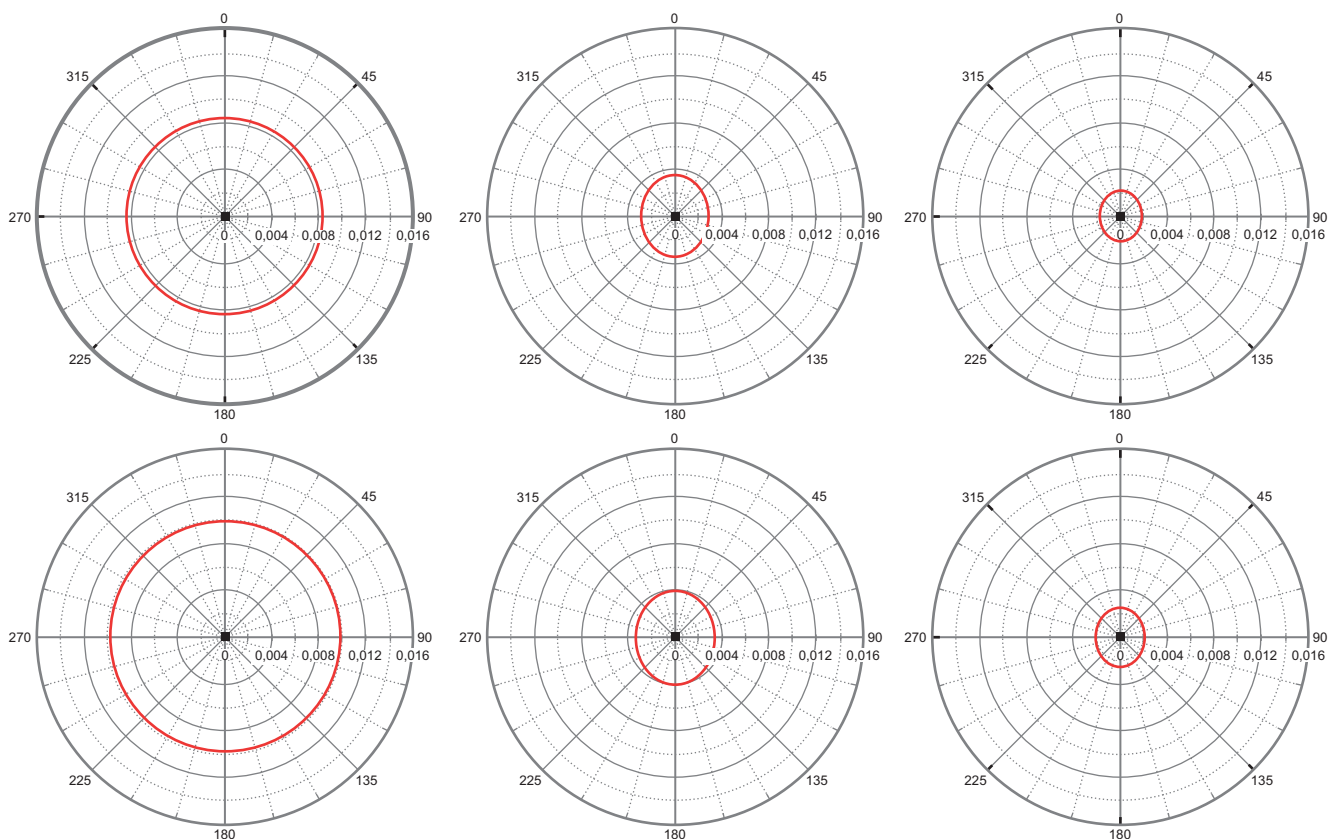


Рис. 9. Полярные диаграммы модулей компонент тензора импеданса в точке 2 на периодах 1, 10 и 100 с (слева направо) для двух моделей, сверху — без ППН, снизу — с ППН. Красный цвет — компонента $|Z_{xy}|$, черный — $|Z_{xx}|$

Эггера неустойчив к влиянию ППН, что отчетливо видно на правом рис. 8, Б по расхождению результатов для моделей с однородным верхним слоем и с ППН. Отметим, что до периода 1 с азимут определяется неустойчиво, это связано с тем, что на таких малых периодах модель проявляется как одномерная. Аналогичная закономерность видна и на больших периодах.

Полярные диаграммы и эллипсы. Одним из удобных способов получения информации о размерности среды и простирации структур является построение полярных диаграмм различных компонент МТ-данных [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. На рис. 9 представлены диаграммы модулей главной и дополнительной компонент тензора импеданса для обеих моделей (с однородным и с неоднородным верхним слоем) в точке 2 на центральном профиле (см. рис. 2). На периоде 1 с диаграмма главной компоненты $|Z_{xy}|$ представляет собой окружность, а диаграмма дополнительной компоненты $|Z_{xx}|$ сжимается в точку, что характерно для одномерной среды. На более длинных периодах диаграммы принимают вид, характерный для 2D сред, основная компонента вытягивается в овал, а дополнительная компонента трансформируется в правильный четырехлистник (правда, в выбранном на рис. 9 масштабе он почти не виден). Поскольку рассматриваемая точка МТЗ (№ 2) в модели с ППН попадает на ППН с повышенным УЭС, диаграммы для этого варианта модели

отличаются увеличенными размерами, изменений формы в данном случае не отмечается.

Амплитудные полярные диаграммы в точке МТЗ № 4 (у угла грабена, см. рис. 2), расположенной в области повышенных значений $skew_B$, ведут себя иначе (рис. 10). Точка располагается у угла грабена и попадает на вытянутую меридионально ППН. На периоде 1 с полярные диаграммы для варианта модели с ППН характерны для двухмерной среды и отражают влияние этой ППН. На больших периодах добавляется влияние грабена и наблюдается суперпозиция приповерхностного и глубинного эффектов.

Таким образом, на диаграммах модулей компонент тензора импеданса ППН сказываются существенно и могут менять как их размер, так и форму.

Фазы компонент тензора импеданса не подвержены влиянию ППН, поэтому полярные диаграммы фаз основной компоненты $\arg(Z_{xy})$ для вариантов модели с однородным и неоднородным верхним слоем практически совпадают. На рис. 11 приведены диаграммы $\arg(Z_{xy})$ сразу для двух рассматриваемых точек МТЗ, 2 и 4. На коротких и длинных периодах диаграммы свидетельствуют об одномерном характере среды, а на промежуточном периоде (10 с) вытягиваются под влиянием грабена. В точке над центром грабена диаграмма вытягивается вдоль его границы, а у угла поворачивается. Таким образом, полярные диаграммы фаз огибают главную структуру, показывая контур ее границы.

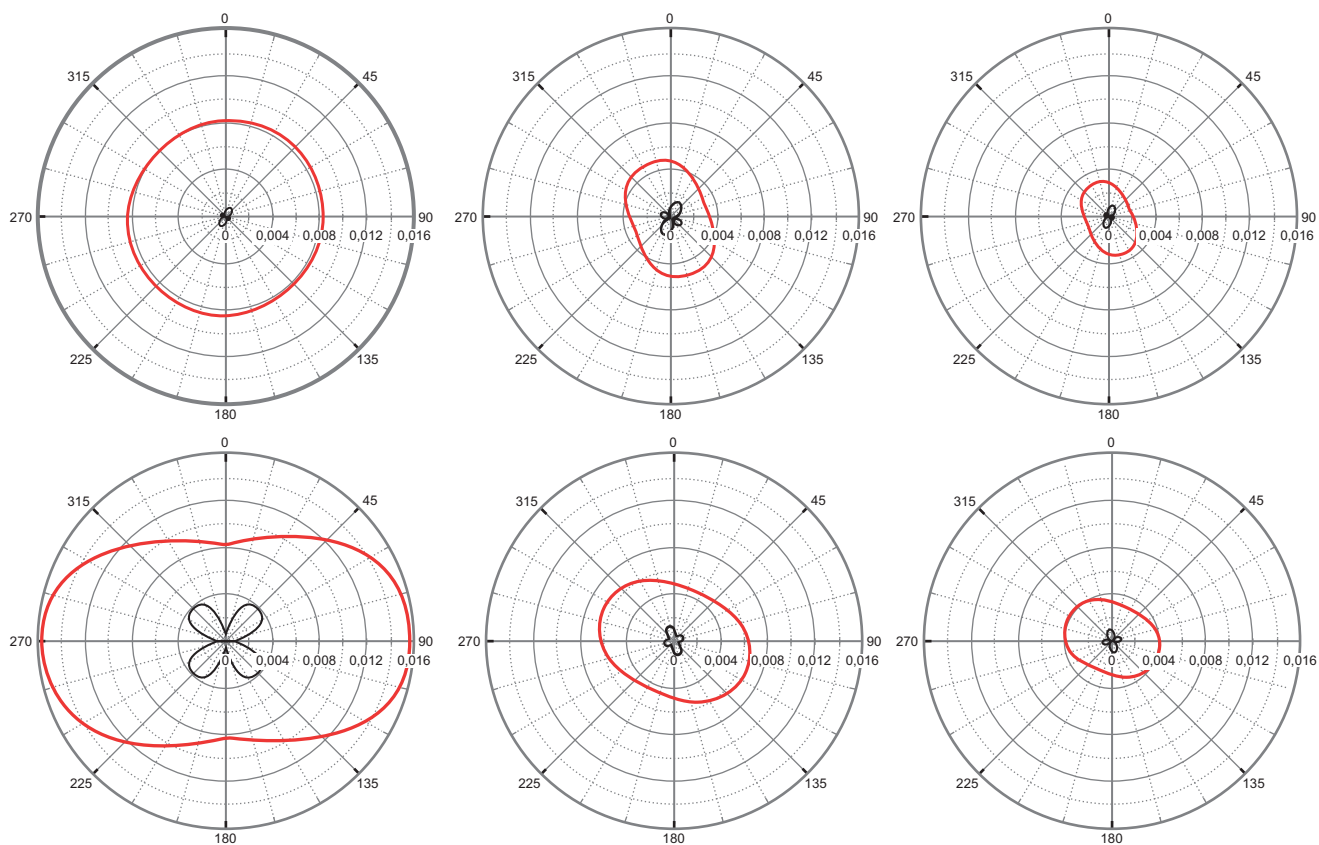


Рис. 10. Полярные диаграммы модулей компонент тензора импеданса в точке 4 на периодах 1, 10 и 100 с (слева направо) для двух моделей, сверху — без ППН, снизу — с ППН. Красный цвет — компонента $|Z_{xy}|$, черный — $|Z_{xx}|$

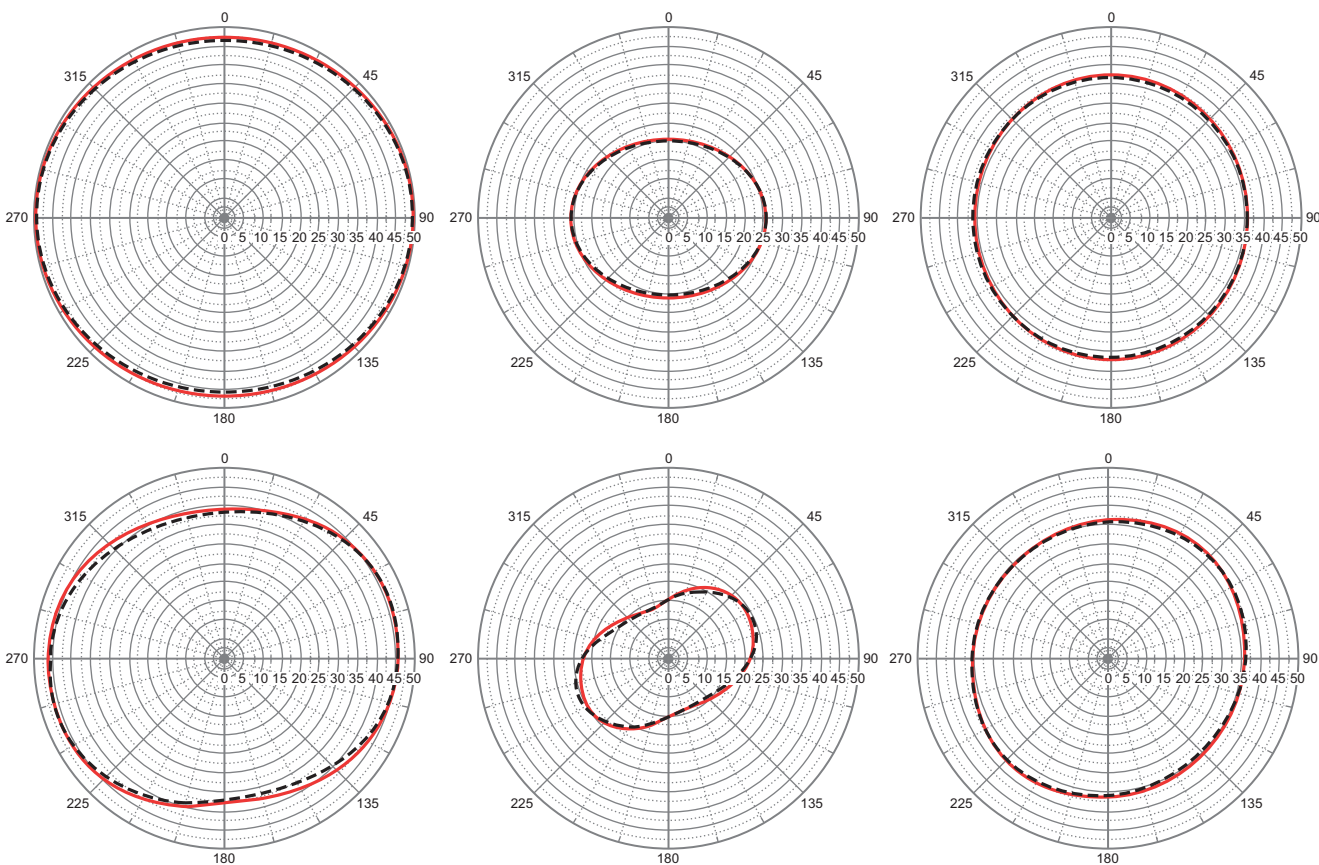


Рис. 11. Полярные диаграммы фазы основной компоненты тензора импеданса $\arg(Z_{xy})$ на периодах 1, 10 и 100 с (слева направо) в точке 2 (сверху) и 4 (снизу), черный пунктир — модель без ППН, красный цвет — с ППН

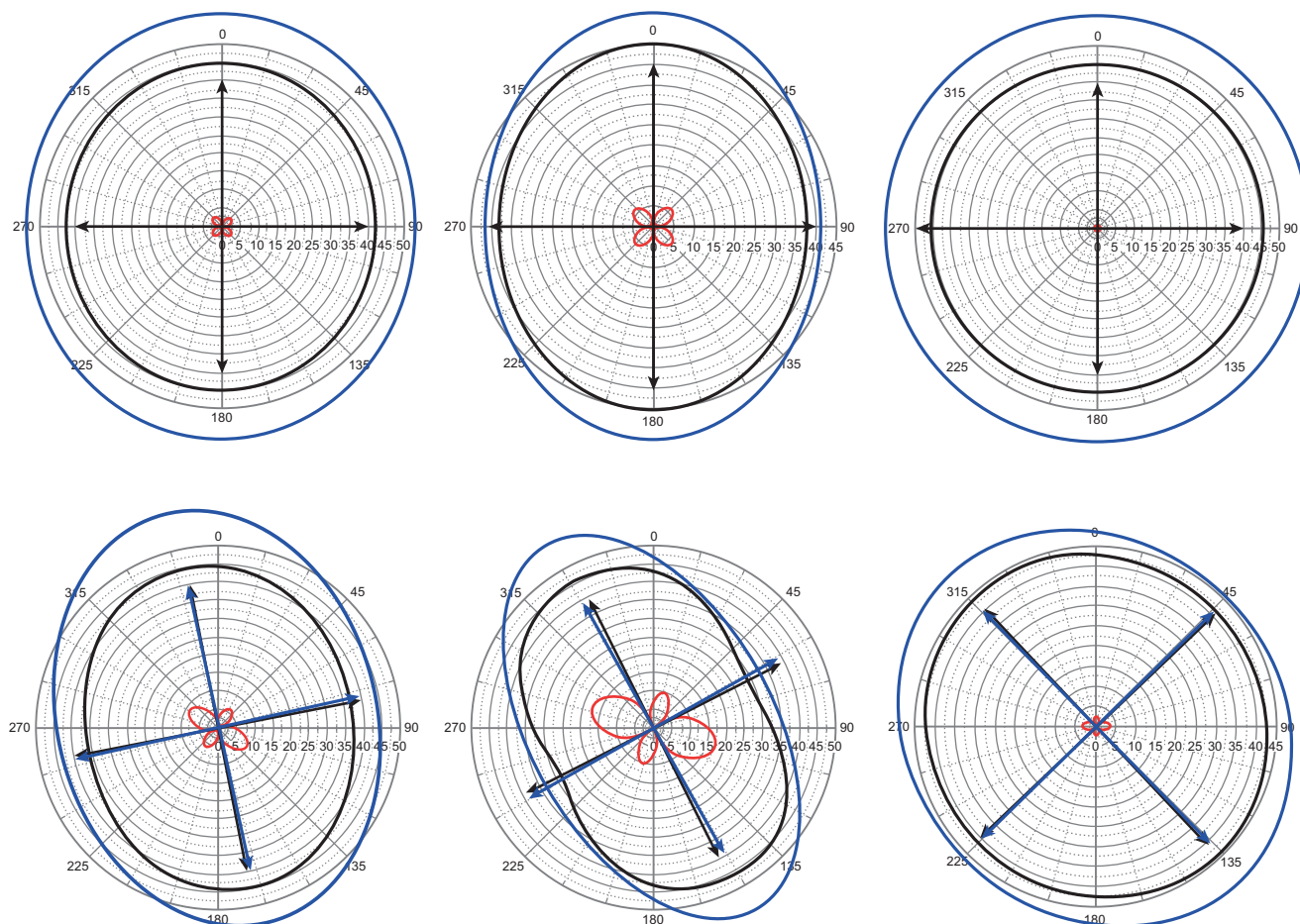


Рис. 12. Полярные диаграммы фазового тензора на периодах 1, 10 и 100 с (слева направо) в точке 2 (сверху) и 4 (снизу). Черный цвет — основная компонента, красный — дополнительная. Здесь же синим цветом показаны эллипсы фазового тензора. Черные стрелки — главные направления по методу Бара, синие — главные направления по методу фазового тензора (с учетом поправки за асимметрию среды)

Наконец, на рис. 12 для тех же двух точек МТЗ (№ 2 и 4) приведены графические изображения фазового тензора. Здесь показаны полярные диаграммы основной и дополнительной компонент Φ_{xx} и Φ_{xy} , а также эллипсы фазового тензора. Полярные диаграммы получались стандартным образом, так же, как и рассмотренные выше импедансные диаграммы, т. е. поворотом системы координат на 360° с шагом 1° . Эллипсы строились с учетом главных направлений и главных значений фазового тензора [Caldwell, et al., 2004; Бердичевский, Дмитриев, 2009].

Также на рис. 12 показаны главные направления, определенные методом Бара (азимутальные углы α_R и $\alpha_R + 90^\circ$) и методом фазового тензора (азимутальные углы α_1 и $\alpha_1 + 90^\circ$). Поскольку они отличаются на угол β (характеризующий трехмерные эффекты), который в нашем случае во всех точках МТЗ не превышает $2-3^\circ$, главные направления, определенные этими двумя методами, практически совпадают.

Как и в случае импедансных фазовых диаграмм, наиболее ярко неоднородность среды проявляется в фазовом тензоре на средних периодах (10 с). В точке МТЗ № 2 (у центра северной границы грабена) диаграммы и эллипс показывают меридиональное и широтное главные направления, а в точке МТЗ

№ 4 (у угла грабена) эти направления поворачиваются. Таким образом, фазовые диаграммы импеданса и графические представления фазового тензора несут одну и ту же информацию. Отметим, что главные направления по Бару отвечают большой и малой осям диаграммы основной компоненты фазового тензора и минимумам его дополнительной компоненты. А главные направления по фазовому тензору, по определению, отвечают большой и малой осям эллипса.

Заключение. Мы рассмотрели две геоэлектрические модели с одинаковой глубинной структурой, но отличающиеся отсутствием и наличием приповерхностного неоднородного слоя. Влияние ППН на кривые МТЗ проявляется в статическом смещении кривых кажущегося сопротивления, при этом оно не затрагивает фазовые кривые. На частотных разрезах кажущегося сопротивления ППН приводят к появлению вертикальных «столбов».

Используя один из классических методов определения главных направлений тензора импеданса — метод Этгерса, мы увидели, что при появлении ППН получаемые оценки этих направлений существенно искажаются.

Наши синтетические данные хорошо удовлетворяют модели локально-регионального разложения

тензора импеданса, что подтверждается малыми значениями используемых в методах Бара и фазового тензора параметров $skew_B$ и β .

Основная информация, которую извлекают методы локально-региональной декомпозиции из искаженных влиянием ППН данных, это главные направления (азимутальные углы), связанные с региональными структурами. В двухмерной среде они совпадают с направлениями вдоль и вкрест структур, а в осесимметричной, к которой близка наша модель, с радиальным и азимутальным направлениями.

Методы декомпозиции, как и следовало ожидать, дали одни и те же результаты для двух вариантов модели: с однородным и с неоднородным верхним слоем. При этом методы Бара и фазового тензора дали очень близкие друг к другу результаты (главные направления) на средних периодах (на которых наиболее существенны значения параметра Δ , т. е. заметно сказывается горизонтальная неоднородность среды).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Дмитриев В.И. Интерпретация глубинных магнитотеллурических зондирований. I. Влияние приповерхностной проводимости // Физика Земли. 1986. № 12. С. 24–38.

Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.

Суконкин М.А., Пушкарев П.Ю. Анализ синтетических магнитотеллурических данных, рассчитанных для геоэлектрической модели с приповерхностными неоднородностями // Геофизика. 2023. № 6. С. 66–70.

Bahr K. Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion // J. Geoph. 1988. Vol. 62. P. 119–127.

Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor // Geophysical Journal International. 2004. Vol. 158, No. 2. P. 457–469.

Более полную информацию о размерности среды и простирации структур дают полярные диаграммы. Диаграммы модулей компонент тензора импеданса в общем случае подвержены влиянию ППН, которые могут искажать как амплитуду, так и форму диаграмм. Стандартные полярные диаграммы фазы основной компоненты тензора импеданса, а также полярные диаграммы и эллипсы фазового тензора не подвержены влиянию ППН, они показывают направления, связанные с региональными структурами, и характеризуют степень и характер горизонтальной неоднородности среды.

Полученные результаты демонстрируют достаточно высокую эффективность методов, основанных на декомпозиции тензора импеданса. Эти методы могут быть полезны при анализе наблюдаемых МТ данных, позволяя рационально выбрать ансамбль данных для дальнейшего решения обратной задачи.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-00147).

Eggers D.E. An eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor // Geophysics. 1982. Vol. 47, No. 8. P. 1204–1214.

Groom R.W., Bailey R.C. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion // J. Geoph. Res. 1989. Vol. 94, No. B2. P. 1913–1925.

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. Vol. 58, No. 2. P. 215–226.

McNeice G.W., Jones A.G. Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data // Geophysics. 2001. Vol. 66, No. 1. P. 158–173.

Zhang P., Roberts R.G., Pedersen L.B. Magnetotelluric strike rules // Geophysics. 1987. Vol. 52, No. 3. P. 267–278.

Статья поступила в редакцию 12.07.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 25.01.2025