

УДК 550.837.211

## ЛОКАЛЬНО-РЕГИОНАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ТЕНЗОРА

© 2025 г. М. А. Суконкин<sup>1,\*</sup>, П. Ю. Пушкарев<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, Россия

\*E-mail: msukonkin@mail.ru

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

Поступила в редакцию 12.08.2024 г.

После доработки 17.02.2025 г.

Принята к публикации 24.02.2025 г.

Статья посвящена рассмотрению возможностей применения в магнитотеллурике теллурического тензора, определяемого из линейных соотношений электрического поля в рядовой и базовой точках. Особое внимание уделено локально-региональному разложению теллурического тензора, позволяющему разделить влияние приповерхностных неоднородностей и изучаемых глубинных структур. Подходы, широко применяемые при анализе тензора импеданса, адаптированы нами для анализа теллурического тензора и опробованы на синтетических данных, рассчитанных для трехмерной модели с глубинной проводящей структурой и неоднородным приповерхностным слоем. Рассмотрен определяемый по теллурическому тензору фазовый тензор, свободный от приповерхностных эффектов. Показано, что карты инвариантных параметров и полярные диаграммы позволяют оценить размерность среды, локализовать глубинные структуры и оценить их простирание.

*Ключевые слова:* магнитотеллурическое зондирование, теллурический тензор, фазовый тензор, приповерхностные неоднородности, локально-региональное разложение.

DOI: 10.31857/S0002333725030052, EDN: FFAISM

### ВВЕДЕНИЕ

Метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) в классической постановке основан на использовании частотно-зависимого комплекснозначного тензора импеданса  $[Z]$ , связывающего горизонтальное электрическое и магнитное поля [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. В последнее время дополнительно используются магнитные передаточные функции: матрица Визе–Паркинсона  $[W]$ , связывающая вертикальное и горизонтальное магнитные поля, а также горизонтальный магнитный тензор  $[M]$ , связывающий горизонтальные компоненты магнитного поля в рядовой и базовой точках. Преимуществом  $[W]$  и  $[M]$  является то, что с понижением частоты они освобождаются

от влияния локальных приповерхностных неоднородностей (ППН).

Теллурический тензор  $[T]$ , связывающий электрические поля в рядовой и базовой точках, применяется редко. Это во многом обусловлено его сильной зависимостью от гальванического влияния ППН, искажающего информацию о глубинных структурах. Однако применительно к  $[Z]$  в настоящее время успешно применяются различные способы коррекции приповерхностных искажений, основанные на локально-региональном разложении тензора, позволяющем разделить влияние локальных ППН и региональных структур. Многие из этих способов могут быть легко адаптированы для подавления приповерхностных эффектов в  $[T]$ . Этому вопросу и посвящена настоящая статья.

## ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Мы кратко рассмотрим теорию способов подавления влияния ППН на основе локально-регионального разложения  $[T]$  и применим эти способы к синтетическим данным МТЗ, рассчитанным для трехмерной геоэлектрической модели, содержащей глубинную неоднородность и приповерхностный слой с множеством локальных ППН. Геоэлектрическая модель и основные особенности синтетических данных подробно рассмотрены в статье [Суконкин, Пушкарев, 2023], здесь мы остановимся на них в рамках необходимого минимума. Опробованию применительно к этим данным методов локально-регионального разложения тензора  $[Z]$  посвящена работа [Суконкин, Пушкарев, 2024].

Метод теллурических токов (МТТ), использующий измерения электрического поля в двух точках наблюдения, появился раньше метода МТЗ. Его идея была высказана Конрадом Шлюмберже в 1930-е годы и развивалась его последователями в Западной Европе. В СССР разработка МТТ была начата в послевоенные годы С.М. Шейнманом и М.Н. Бердичевским, и уже в 1950-е годы метод получил широкое применение [Бердичевский, 1960]. На том техническом уровне измерения были реализованы в узком диапазоне периодов, по отношению компонент поля в двух точках определялись скалярные параметры, основным результатом интерпретации были карты суммарной продольной проводимости осадочного чехла.

Линейные соотношения между векторами, образованными горизонтальными компонентами поля, с использованием тензора импеданса  $[Z]$  и теллурического тензора  $[T]$ , были предложены в работе [Бердичевский, 1964]. Они могут быть записаны в виде:

$$\vec{E}_\tau = [Z]\vec{H}_\tau, \vec{E}_\tau = [T]\vec{E}_\tau^0,$$

где  $\vec{E}_\tau$  и  $\vec{H}_\tau$  — горизонтальное электрическое и магнитное поле в рядовой точке,  $\vec{E}_\tau^0$  — электрическое поле в базовой точке. Последнее соотношение может быть записано с использованием компонент электрического поля и теллурического тензора в декартовой системе координат в виде:

$$E_x = T_{xx}E_x^0 + T_{xy}E_y^0,$$

$$E_y = T_{yx}E_x^0 + T_{yy}E_y^0.$$

Как уже отмечалось, тензор  $[T]$  редко используется при интерпретации данных МТЗ. Однако современные схемы наблюдений позволяют получать синхронные записи электрического поля в двух точках, а некоторые программы для обработки записей поля дают возможность его оценивать и использовать для отбраковки зашумленных данных [Garcia, Jones, 2005; Епишкин, 2016].

В статье [Bakker et al., 2015] рассматривается переход от магнитотеллурических тензоров, в том числе  $[T]$ , к соответствующим им фазовым тензорам. Этот подход позволяет избавиться от влияния локальных приповерхностных неоднородностей и будет подробно рассмотрен ниже в нашей статье.

Среди других работ, посвященных применению  $[T]$ , отметим еще две. В статье [Зорин и др., 2016] теллурический тензор предлагается использовать для выявления аномалий вызванной поляризации (метод МТ-ВП). В работе [Мороз, Рылов, 2018] представлены результаты мониторинга  $[T]$  на Камчатке в связи с изучением сейсмичности.

## ТЕЛЛУРИЧЕСКИЙ ТЕНЗОР В СРЕДАХ РАЗЛИЧНОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Основными компонентами  $[T]$  являются  $T_{xx}$  и  $T_{yy}$ , а  $T_{xy}$  и  $T_{yx}$  — дополнительными. Полезным инвариантом, аналогичным широко используемому эффективному импедансу  $Z_{ef}$ , является корень из определителя теллурического тензора  $T_{ef}$ :

$$T_{ef} = \sqrt{T_{xx} \cdot T_{yy} - T_{xy} \cdot T_{yx}}.$$

Для дальнейшего изложения напомним, как структура тензора  $[T]$  упрощается в случае одномерной (1D) и двухмерной (2D) или осесимметричной трехмерной (3D) среды.

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

$$[T^{1D}] = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Поскольку разрез под рядовой и под базовой точками совпадает, тензор неинформативен. В 1D-среде  $Tef$  равен 1, по его отличиям от единицы можно судить о степени горизонтальной неоднородности среды.

В 2D-среде, в случае, когда  $y$  — ось однородности среды, теллурический тензор:

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

где  $T^\perp$  — компонента, связанная с токами, текущими вкост структур, а  $T^\parallel$  — компонента, связанная с токами, текущими вдоль структур. Практически считать среду двухмерной можно при малых значениях теллурического параметра асимметрии Свифта:

$$skew_S^T = \left| \frac{T_{xy} - T_{yx}}{T_{xx} + T_{yy}} \right|.$$

В 2D-среде  $Tef$  равен среднегеометрическому между поперечной и продольной компонентами.

### ЛОКАЛЬНО-РЕГИОНАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ

Разделение тензора  $[Z]$  на множители, связанные с региональной и локальной составляющими, было предложено в работе [Zhang et al., 1987]. Аналогичным образом его можно применить к тензору  $[T]$ .

Пусть  $[T^S]$ ,  $\overrightarrow{E}_\tau^S$ ,  $\overrightarrow{E}_\tau^{0S}$  — теллурический тензор и горизонтальные электрические поля в рядовой и базовой точках, отвечающие суперпозиции региональных и локальных структур,  $[T^R]$ ,  $\overrightarrow{E}_\tau^R$ ,  $\overrightarrow{E}_\tau^{0R}$  — их региональные составляющие, а  $[e]$  и  $[e^0]$  — матрицы локальных электрических искажений в рядовой и базовой точках. Тогда в этих точках:

$$\overrightarrow{E}_\tau^S = [e]\overrightarrow{E}_\tau^R, \quad \overrightarrow{E}_\tau^{0S} = [e^0]\overrightarrow{E}_\tau^{0R}.$$

Используя теллурический тензор и его региональную составляющую, запишем:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{E}_\tau^S &= [e]\overrightarrow{E}_\tau^R = [e][T^R]\overrightarrow{E}_\tau^{0R} = \\ &= [e][T^R][e^0]^{-1}\overrightarrow{E}_\tau^{0S} = [T^S]\overrightarrow{E}_\tau^{0S}, \end{aligned}$$

где

$$[T^S] = [e][T^R][e^0]^{-1}.$$

Если предположить, что частота достаточно низкая, а базовая точка выбрана в области без ППН, то матрица  $[e]$  будет вещественная, а электрическими искажениями в базовой точке  $[e^0]$  можно пренебречь:

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

Причем матрица  $[e]$  здесь получается та же самая, что и при декомпозиции тензора  $[Z]$ . Задача состоит в том, чтобы выделить региональную составляющую  $[T^R]$ .

В качестве критерия применимости модели, допускающей последнее разложение, но применительно к тензору  $[Z]$ , в работе [Bahr, 1988] была предложена близость к нулю параметра, который позже был назван параметром асимметрии Бара. Можно ввести аналогичный параметр Бара для теллурического тензора:

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

где звездочка означает комплексно-сопряженную величину.

В рамках такой модели существует целый ряд методов разделения локальных и региональных эффектов, хорошо разработанных применительно к тензору импеданса: метод Бара, метод Грума–Бэйли и др. Их обзор можно найти в работе [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Мы же ограничимся рассмотрением наиболее универсального и получившего широкое применение метода фазового тензора, который применительно к  $[Z]$  был предложен в работе [Caldwell et al., 2004].

### МЕТОД ТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ФАЗОВОГО ТЕНЗОРА

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

$$[ReT^S] = [e][ReT^R], \quad [ImT^S] = [e][ImT^R].$$

Введем теллурический вещественный фазовый тензор:

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

Отсюда можно выписать зависимость каждой из компонент теллурического фазового тензора от компонент регионального теллурического тензора:

$$\begin{aligned} \Phi^T_{xx} &= \frac{\text{Re} T^R_{yy} \text{Im} T^R_{xx} - \text{Re} T^R_{xy} \text{Im} T^R_{yx}}{\text{Re} T^R_{xx} \text{Re} T^R_{yy} - \text{Re} T^R_{xy} \text{Re} T^R_{yx}}, \\ \Phi^T_{xy} &= \frac{\text{Re} T^R_{yy} \text{Im} T^R_{xy} - \text{Re} T^R_{xy} \text{Im} T^R_{yy}}{\text{Re} T^R_{xx} \text{Re} T^R_{yy} - \text{Re} T^R_{xy} \text{Re} T^R_{yx}}, \\ \Phi^T_{yx} &= \frac{\text{Re} T^R_{xx} \text{Im} T^R_{yx} - \text{Re} T^R_{yx} \text{Im} T^R_{xx}}{\text{Re} T^R_{xx} \text{Re} T^R_{yy} - \text{Re} T^R_{xy} \text{Re} T^R_{yx}}, \\ \Phi^T_{yy} &= \frac{\text{Re} T^R_{xx} \text{Im} T^R_{yy} - \text{Re} T^R_{yx} \text{Im} T^R_{xy}}{\text{Re} T^R_{xx} \text{Re} T^R_{yy} - \text{Re} T^R_{xy} \text{Re} T^R_{yx}}. \end{aligned}$$

В одномерной среде все компоненты теллурического тензора — вещественные числа, соответственно, теллурический фазовый тензор приобретает вид:

$$[\Phi^{T1D}] = \begin{bmatrix} \Phi^T_{xx} & \Phi^T_{xy} \\ \Phi^T_{yx} & \Phi^T_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

В двумерной среде, если  $y$  — ось однородности среды:

$$[\Phi^{T2D}] = \begin{bmatrix} \Phi^T_{xx} & \Phi^T_{xy} \\ \Phi^T_{yx} & \Phi^T_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{tg arg } T^\perp & 0 \\ 0 & \text{tg arg } T^\parallel \end{bmatrix}.$$

В общем случае азимут простираения региональных двумерных структур можно определить (с точностью до  $90^\circ$ ) по формуле:

$$\alpha^T = \frac{1}{2} \arctg \frac{\Phi^T_{xy} + \Phi^T_{yx}}{\Phi^T_{xx} - \Phi^T_{yy}}.$$

Также в методе фазового тензора вводится инвариантный параметр  $\beta$ , который характеризует региональную асимметрию среды:

$$\beta^T = \frac{1}{2} \arctg \frac{\Phi^T_{xy} - \Phi^T_{yx}}{\Phi^T_{xx} + \Phi^T_{yy}}.$$

Параметр  $\beta^T$  является аналогом  $skew^T_B$ , его величина тем больше, чем сильнее региональные трехмерные эффекты. С его помощью можно определить главные направления фазового тензора:

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

Подчеркнем, что в двумерной среде  $\beta^T = 0$  и главные направления  $[\Phi^T]$  совпадают с направлениями вдоль и вкост структур. Похожая ситуация наблюдается в осесимметричных трехмерных средах — здесь главные направления фазового тензора совпадают с радиальным и азимутальным.

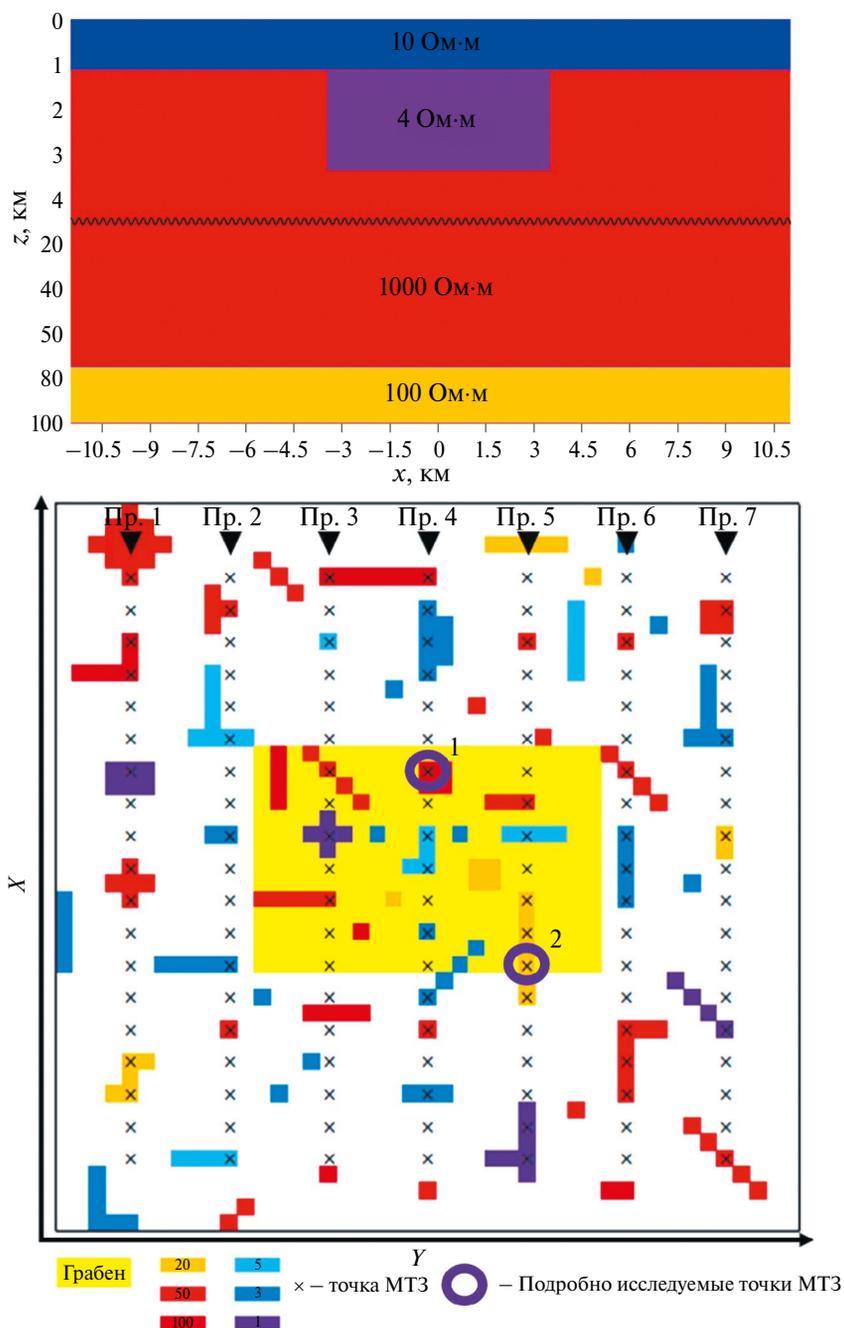
### ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Далее мы будем рассматривать синтетические данные МТЗ, полученные для трехмерной геоэлектрической модели, представленной на рис. 1. Региональная часть модели включает три слоя, имитирующих проводящий осадочный чехол мощностью 1 км и удельным электрическим сопротивлением (УЭС) 10 Ом·м, высокоомную (УЭС 1000 Ом·м) литосферу до глубины 73 км и более проводящие (УЭС 100 Ом·м) горные породы на больших глубинах. В центре модели присутствует проводящая (4 Ом·м) призма размерами (по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ )  $7 \cdot 10.5 \cdot 2$  км, имитирующая проводящую впадину (грабен).

В верхнем слое мощностью 25 м размещено множество ППН (рис. 1), УЭС которых составляет 1, 3, 5, 20, 50 и 100 Ом·м (при фоновом значении 10 Ом·м). Для сравнения, синтетические данные также рассчитывались для варианта модели с однородным верхним слоем (без ППН).

Рассмотренная модель была задана на сетке размером (по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ )  $59 \times 59 \times 42$  ячеек. По горизонтали размер ячеек меняется от 0.5 км в центре области моделирования до 64 км у ее границ. Размеры ячеек по вертикали увеличиваются от 10 м у земной поверхности до 50 км у нижней границы области моделирования.

Прямая 3D-задача МТЗ решалась с помощью программы МТ3DFwd [Mackie et al., 1993], основанной на методе конечных разностей. Использовались 15 периодов с равномерным геометрическим шагом от 0.1 до 5000 с. В результате расчетов получены электрическое и магнитное



**Рис. 1.** Геоэлектрическая модель. Вверху — разрез вдоль центрального меридионального профиля. Внизу — карта верхнего слоя, содержащего ППН (размер 22.5 x 22.5 км). Фоновое УЭС слоя 10 Ом·м, УЭС ППН меняются от 1 до 100 Ом·м. Желтый прямоугольник — положение глубинного грабена. Кружками обведены точки, данные которых представлены на следующих рисунках.

поля в точках земной поверхности для двух поляризаций плосковолнового источника. Точки МТЗ расположены на семи субмеридиональных (вдоль оси  $x$ ) профилях с шагом 1 км, расстояние между профилями 3 км (рис. 1).

Для вычисления компонент тензоров  $[Z]$  и  $[T]$ , а также фазовых тензоров, для расчета раз-

личных инвариантных параметров и построения полярных диаграмм нами была разработана программа МТДА (MagnetoTelluric Data Analysis) в системе MATLAB.

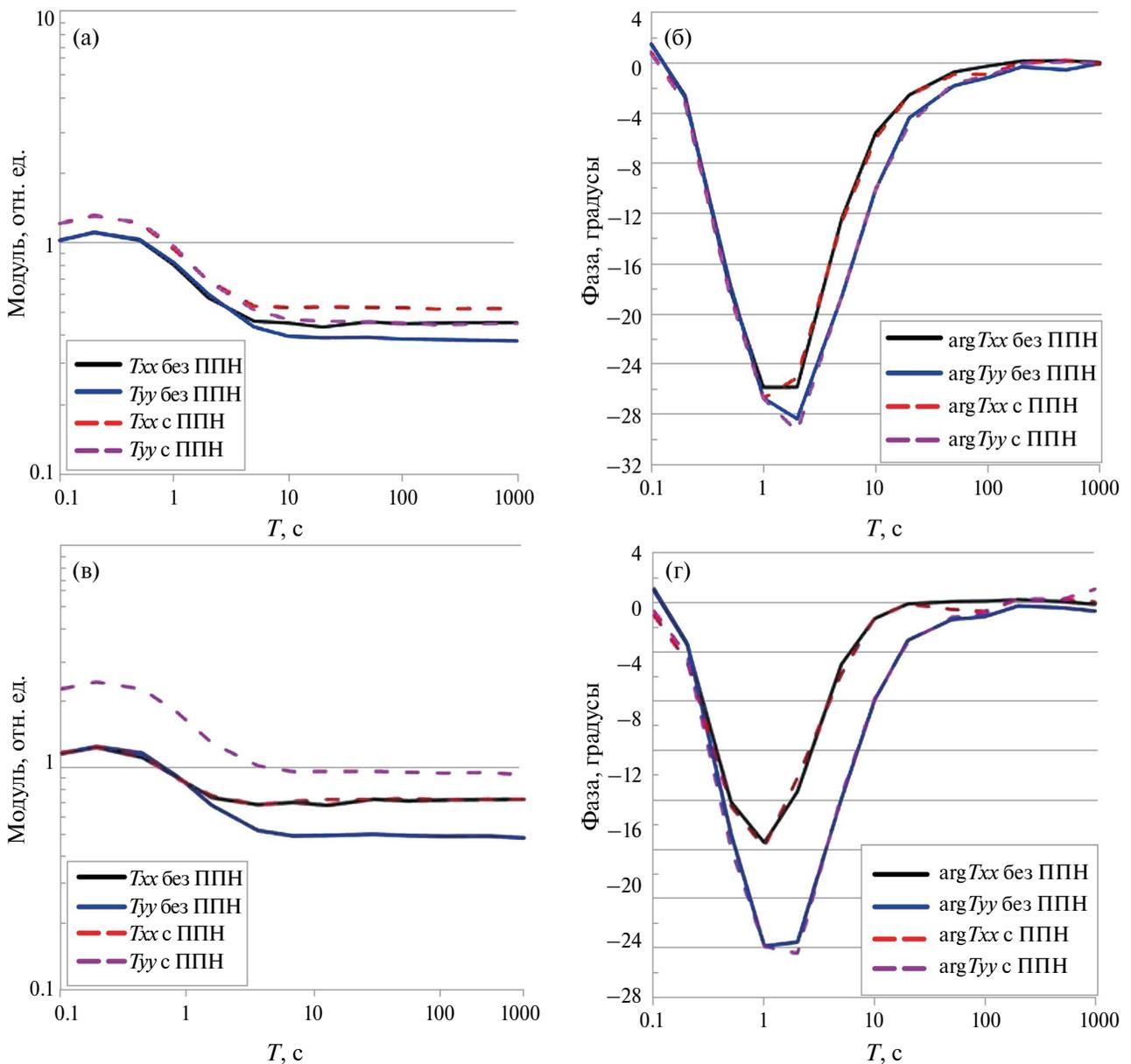
Для краткости, в данной статье мы ограничимся демонстрацией карт инвариантных параметров на периоде 10 с и данными в двух точках

МТЗ, указанных на рис. 1. Точка 1 располагается на центральном меридиональном профиле, вблизи центра северной границы грабена, и при этом на изометричной ППН с УЭС 100 Ом·м. Точка 2 находится вблизи юго-восточного угла грабена, на вытянутой субмеридионально ППН с УЭС 20 Ом·м.

**КРИВЫЕ КОМПОНЕНТ  
ТЕНЗОРОВ [T] И [Ф<sup>T</sup>]**

На рис. 2 представлены кривые модулей и фаз главных компонент теллурического тензора ( $T_{xx}$

и  $T_{yy}$ ) в точках МТЗ 1 и 2, отмеченных на карте на рис. 1. Для варианта модели с однородным верхним слоем кривые модулей начинаются с единицы, а в правой части выходят на пониженный уровень, связанный с влиянием грабена как проводящей неоднородности. Под влиянием ППН происходит статический сдвиг амплитудных кривых. Отметим, что над изометричной ППН (точка 1) кривые по обеим компонентам смещаются вверх примерно одинаково. А над вытянутой (квазидвухмерной) ППН смещается только одна кривая (квазипоперечная к ППН). Фазовые кри-

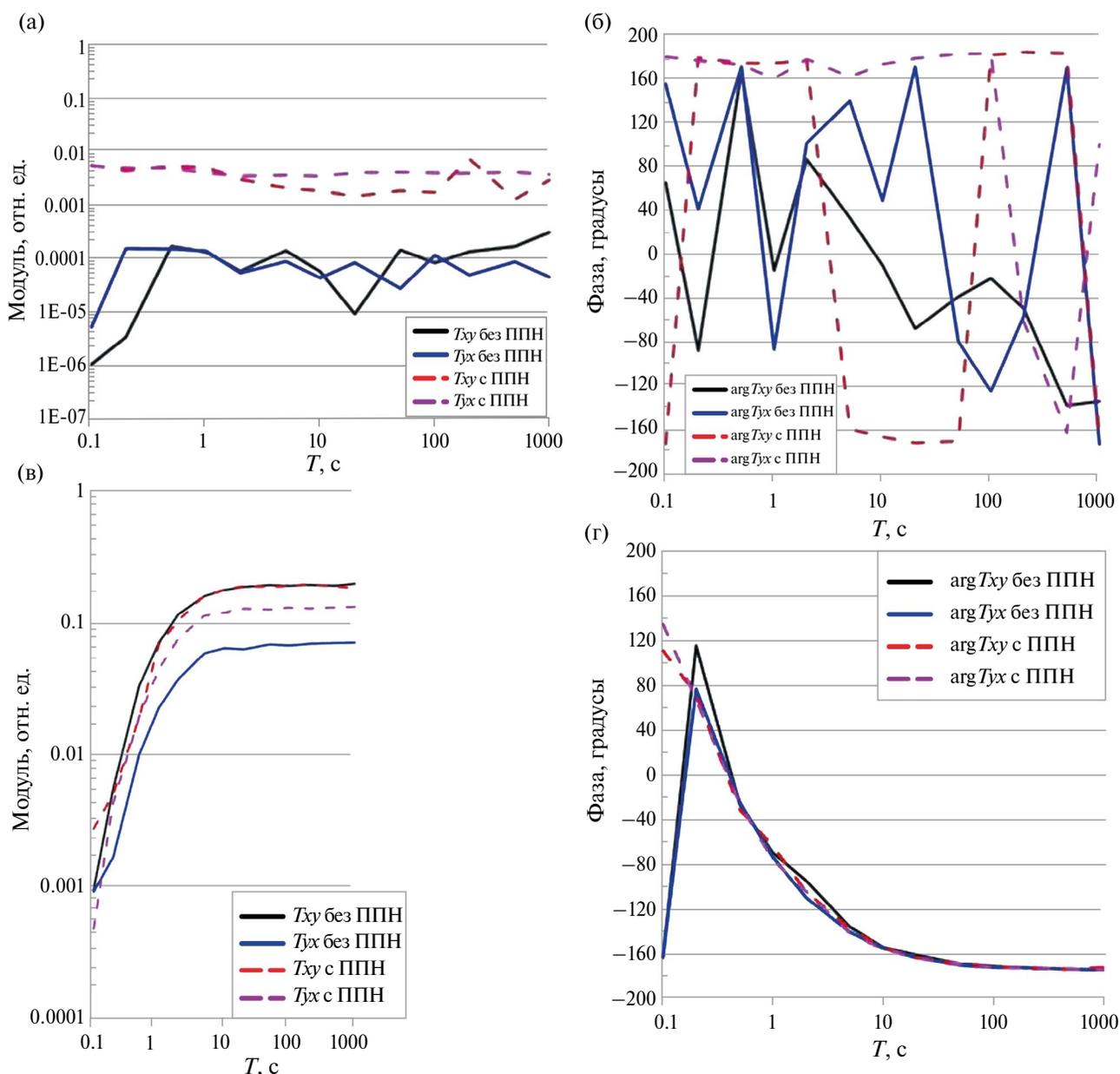


**Рис. 2.** Кривые модулей главных компонент теллурического тензора  $T_{xx}$  и  $T_{yy}$  (а), (в) и их фаз (б), (г). Вверху (а), (б) — точка 1 над изометричной ППН, внизу (в), (г) — точка 2 над вытянутой ППН.

вые не зависят от наличия в модели ППН, то есть не подвержены их влиянию. Это явление хорошо известно применительно к фазам компонент  $[Z]$ , очевидно, оно сохраняется и для  $[T]$ .

На рис. 3 показаны кривые модулей и фаз дополнительных компонент тензора ( $T_{xy}$  и  $T_{yx}$ ) в тех же точках МТЗ. В точке 1 в варианте модели с однородным верхним слоем дополнительные компоненты очень малы, примерно в 10 000 раз меньше основных, и рассчитываются крайне неустойчиво. В варианте модели с ППН значения модулей больше (но все

равно менее 1 % от основных компонент) и вычисляются устойчивее, в частности, фаза определяется как примерно 180 (или -180) градусов. В точке 2 модули компонент малы на коротких периодах, но на больших под влиянием грабена возрастают, составляя более 10 % от основных компонент. Видно, что влияние ППН на дополнительных компонентах проявляется примерно так же, как и на главных. В частности, во второй точке модуль одной дополнительной компоненты ( $T_{xy}$ ) почти не меняется, а второй ( $T_{yx}$ ) — смещается по уровню вверх.



**Рис. 3.** Кривые модулей дополнительных компонент тензора  $T_{xy}$  и  $T_{yx}$  (а), (в) и их фаз (б), (г). Вверху (а), (б) — точка 1 над изометричной ППН, внизу (в), (г) — точка 2 над вытянутой ППН.

На рис. 4 приведены кривые компонент фазового тензора в тех же точках 1 и 2. Поскольку для двух вариантов модели они практически идентичны, приведены результаты только для модели с неоднородным верхним слоем. В точке 1 (слева на рис. 4) в основных компонентах ( $\Phi_{xx}^T$  и  $\Phi_{yy}^T$ ) наблюдается яркая (порядка  $30^\circ$ ) аномалия, в то время как дополнительные компоненты ( $\Phi_{xy}^T$  и  $\Phi_{yx}^T$ ) почти нулевые. Эта картина характерна для двухмерной ситуации при ориентации осей вдоль и вкрест структур, в данном случае она возникает в точке у центра протяженной границы грабена. В точке 4 (справа на рис. 4), которая находится вблизи угла грабена, ситуация существенно трехмерная, и все компоненты сопоставимы по величине, особенно на периодах порядка 10 с.

**КАРТЫ ИНВАРИАНТНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

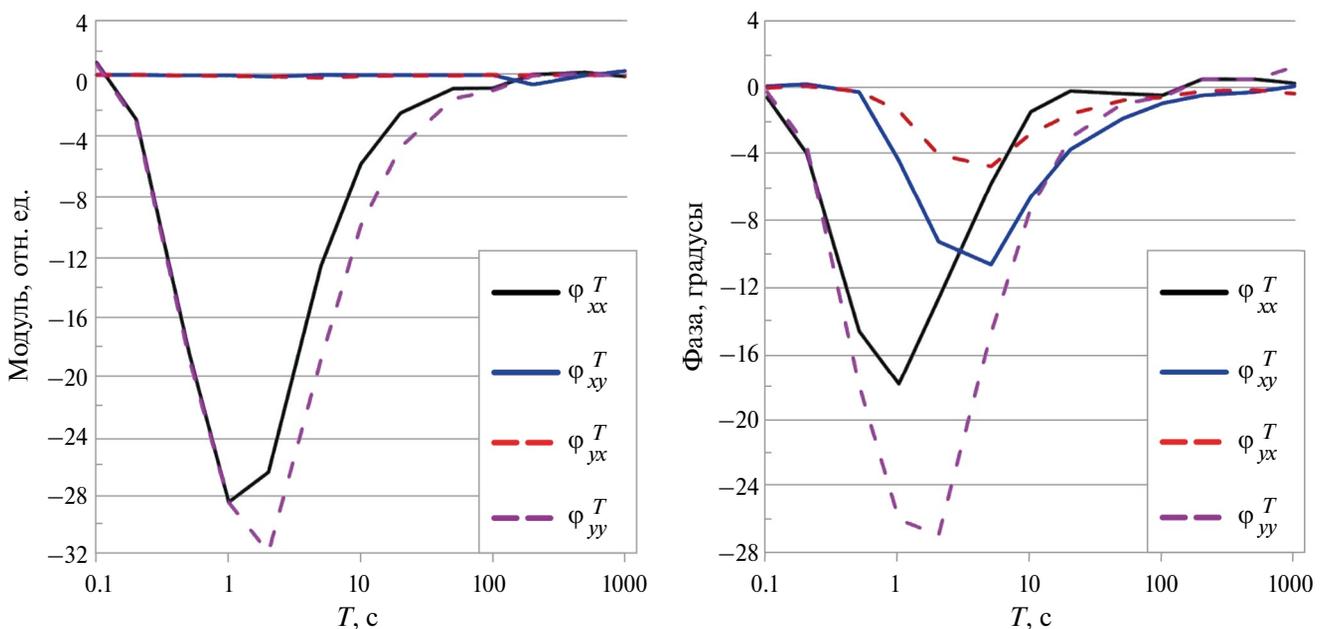
Рассмотрим ряд введенных выше инвариантов (то есть величин, не меняющихся при вращении системы координат):  $T_{ef}$ ,  $skew_S^T$ ,  $skew_B^T$ ,  $\alpha^T$ ,  $\beta^T$ . Проанализируем их поведение на всей площади в виде карт, выбрав период 10 с. Как видно, в частности, из представленных выше кривых компонент теллурического тензора, на этом периоде значения модулей компонент уже выходят на правую асимптоту, сформированную влиянием грабена, а фазы компонент еще меняются и отличаются друг от друга. На более длинных периодах фазы основных компонент выходят

на  $0^\circ$ , что характерно для одномерной среды (действительно, на глубинах свыше 3 км наша модель одномерная), и теллурический тензор в нашем случае становится неинформативен.

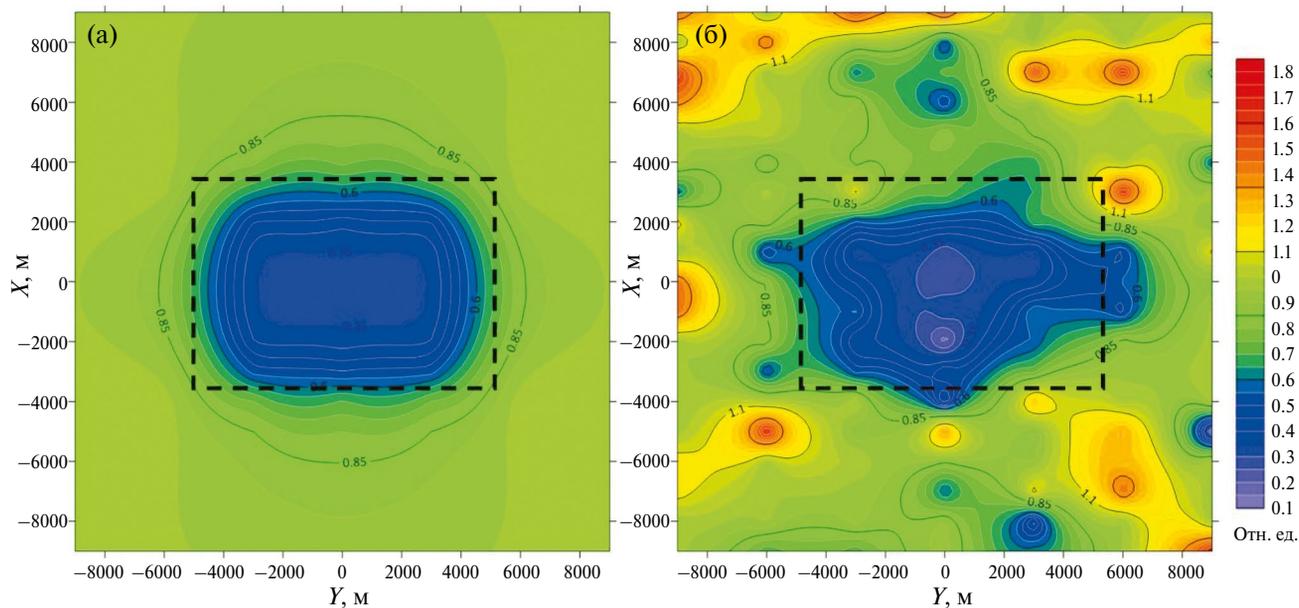
На рис. 5 представлены карты модуля эффективной компоненты  $T_{ef}$ . Для варианта модели с однородным верхним слоем карта имеет простую структуру: значение 1 над фоновым разрезом и минимум над проводящим грабеном. При добавлении в модель ППН картина осложняется, появляются максимумы над высокоомными и минимумы над проводящими ППН. Их влияние сохраняется в таком же виде и на других периодах.

На рис. 6 приведены карты фазы эффективной компоненты  $T_{ef}$ . Поскольку, как мы видели, ППН не оказывают влияния на фазовые кривые, то и карты для вариантов модели с однородным и неоднородным верхним слоем практически идентичны. Мы наблюдаем фоновое значение около  $0^\circ$  и минимум над грабеном.

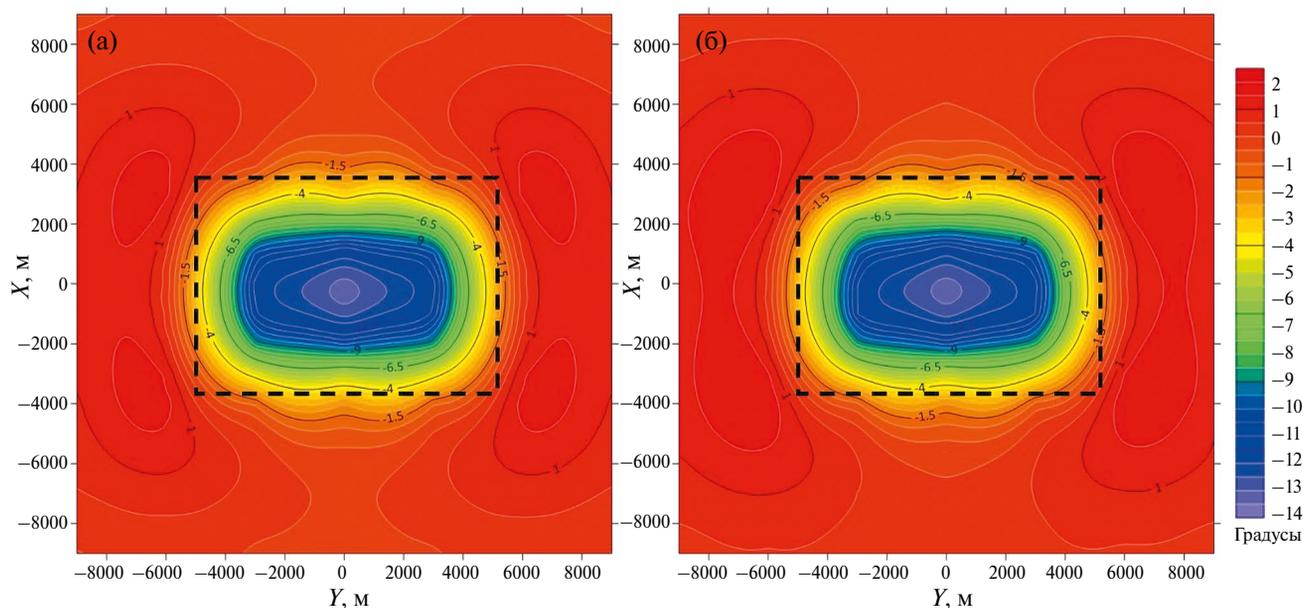
На рис. 7 представлены карты параметра асимметрии Свифта  $skew_S^T$ . Напомним, его большие значения связаны с трехмерными эффектами, причем этот параметр не различает ППН и глубинные неоднородности. В нашем случае значения достигают существенных величин (порядка 0.2) только вблизи углов грабена. Наличие ППН несколько искажает картину,



**Рис. 4.** Кривые компонент фазового тензора в точках 1 (слева) и 2 (справа).



**Рис. 5.** Карты модуля эффективной компоненты  $T_{эф}$  период 10 с: (а) — модель без ППН; (б) — с ППН. Черным пунктиром обозначены границы грабена.



**Рис. 6.** Карты фазы эффективной компоненты  $T_{эф}$  период 10 с: (а) — модель без ППН; (б) — с ППН. Черным пунктиром обозначены границы грабена.

увеличивая или, наоборот, уменьшая значения в точках МТЗ с ППН.

На рис. 8 показаны карты параметра асимметрии Бара  $skew_B^T$ . Этот параметр также выделяет области с существенными трехмерными эффектами, но имеющими глубинную природу (значения свободны от влияния ППН). Величины  $skew_B^T$  невелики, в пределах 0.08, и также

максимальны вблизи углов грабена. Карты для вариантов модели с однородным и неоднородным верхним слоем ожидаемым образом почти не отличаются друг от друга.

На рис. 9 показаны инварианты фазового тензора — введенные выше параметры  $\alpha^T$  и  $\beta^T$ . Параметр  $\alpha^T$  в двухмерной среде имеет физический смысл азимутального угла вдоль или вкост

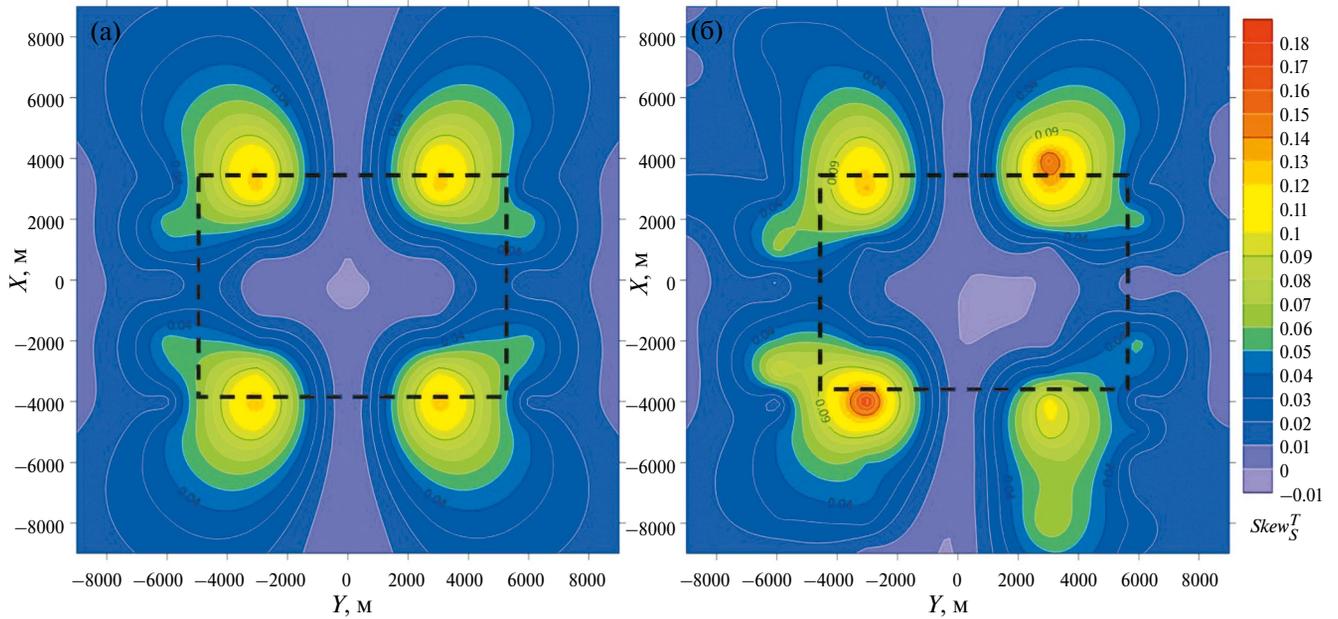


Рис. 7. Карты параметра асимметрии Свифта  $skew_S^T$ , период 10 с: (а) — модель без ППН; (б) — с ППН. Черным пунктиром обозначены границы грабена.

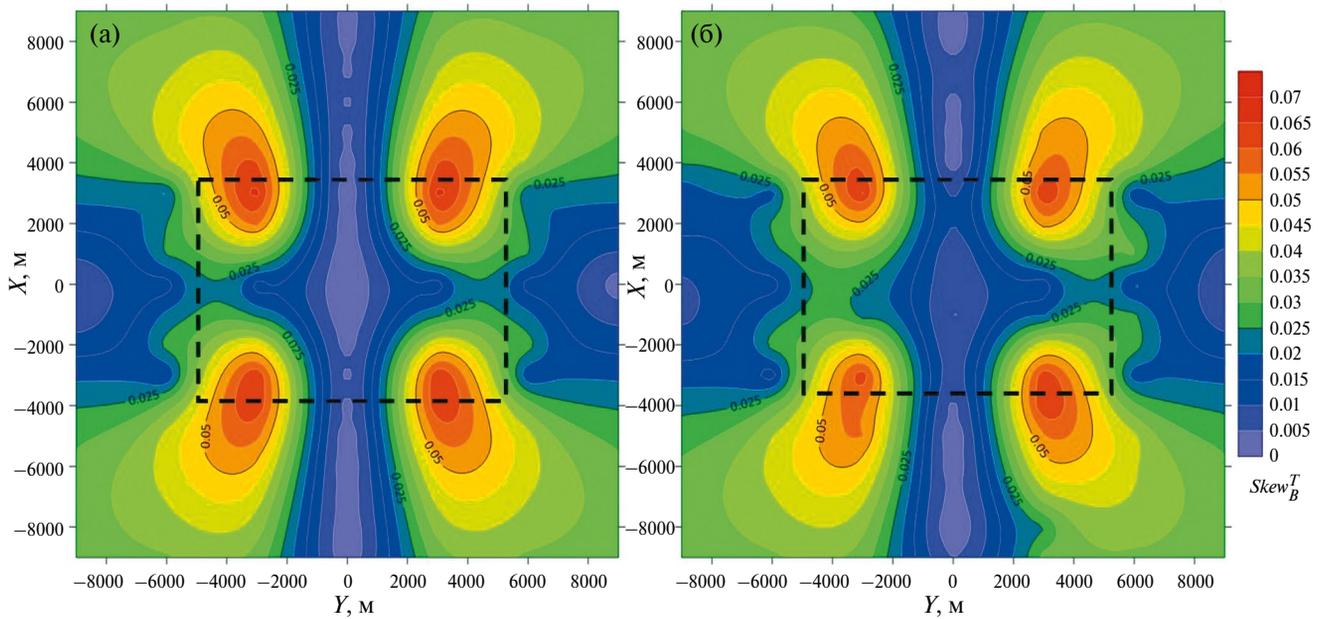


Рис. 8. Карты параметра асимметрии Бара  $skew_B^T$ , период 10 с: (а) — модель без ППН; (б) — с ППН. Черным пунктиром обозначены границы грабена.

стирания структур. Соответственно, эти направления показаны крестиками. Как видно из рисунка, они ориентированы вдоль и вкrest границ грабена на центральных меридиональном и широтном профилях. По углам планшета, вокруг грабена, они имеют по отношению к нему преимущественно радиальное и азимутальное направления. Параметр  $\beta^T$  по своему смыслу яв-

ляется параметром асимметрии (аналогом  $skew_B^T$ ), хотя измеряется в градусах, поэтому его значения взяты по модулю и показаны изолиниями. Видно, что карты  $|\beta^T|$  и  $skew_B^T$ , действительно, похожи.

### АНАЛИЗ ПОЛЯРНЫХ ДИАГРАММ

Более информативно отражают размерность среды и направление простирания структур

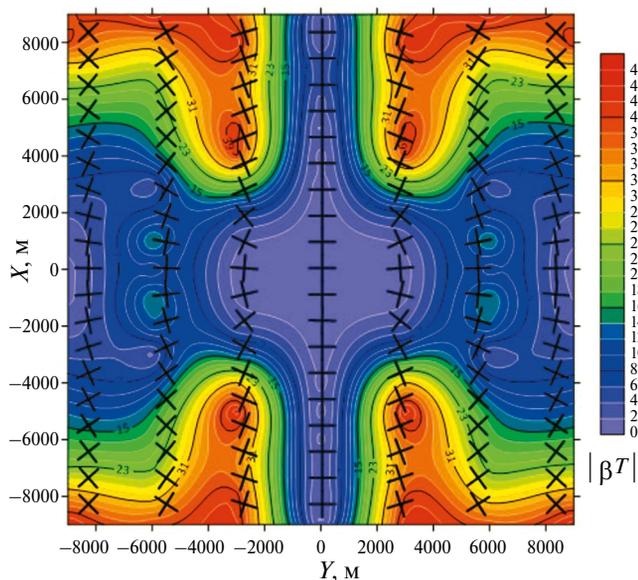


Рис. 9. Карта азимутального угла  $\alpha^T$  (показан крестиком вместе с  $\alpha^T + 90^\circ$ ) на фоне значений модуля параметра  $\beta^T$ , период 10 с.

полярные диаграммы, показывающие, как меняются компоненты тензоров при вращении системы координат на  $360^\circ$  (с шагом, в нашем случае,  $1^\circ$ ). Мы ограничимся иллюстрацией диаграмм в точках МТЗ 1 и 2 (рис. 1), в которых мы выше анализировали частотные зависимости компонент (рис. 2 — рис. 4).

На рис. 10 показаны полярные диаграммы модулей компонент теллурического тензора  $T_{xx}$  и  $T_{xy}$  на периодах 1 и 10 с в точке МТЗ 1. Вверху представлены диаграммы для варианта геоэлектрической модели с однородным верхним слоем, внизу — с ППН. Видно, что они немного отличаются размером: наличие изометричной высокоомной ППН приводит к увеличению всех значений. На периоде 1 с диаграмма основной компоненты  $|T_{xx}|$  представляет собой круг, а диаграмма дополнительной компоненты  $|T_{xy}|$  очень мала, что говорит о близости разреза к горизонтально-однородному. На периоде 10 с диаграмма  $|T_{xx}|$  вытягивается в меридиональном направлении, а диаграмма  $|T_{xy}|$  представляет собой четырехлистник, что характерно для двухмерных сред. Отметим, что на более длинных периодах картина практически не меняется, что характерно для гальванических эффектов (в данном случае от грабена), не меняющихся с понижением частоты.

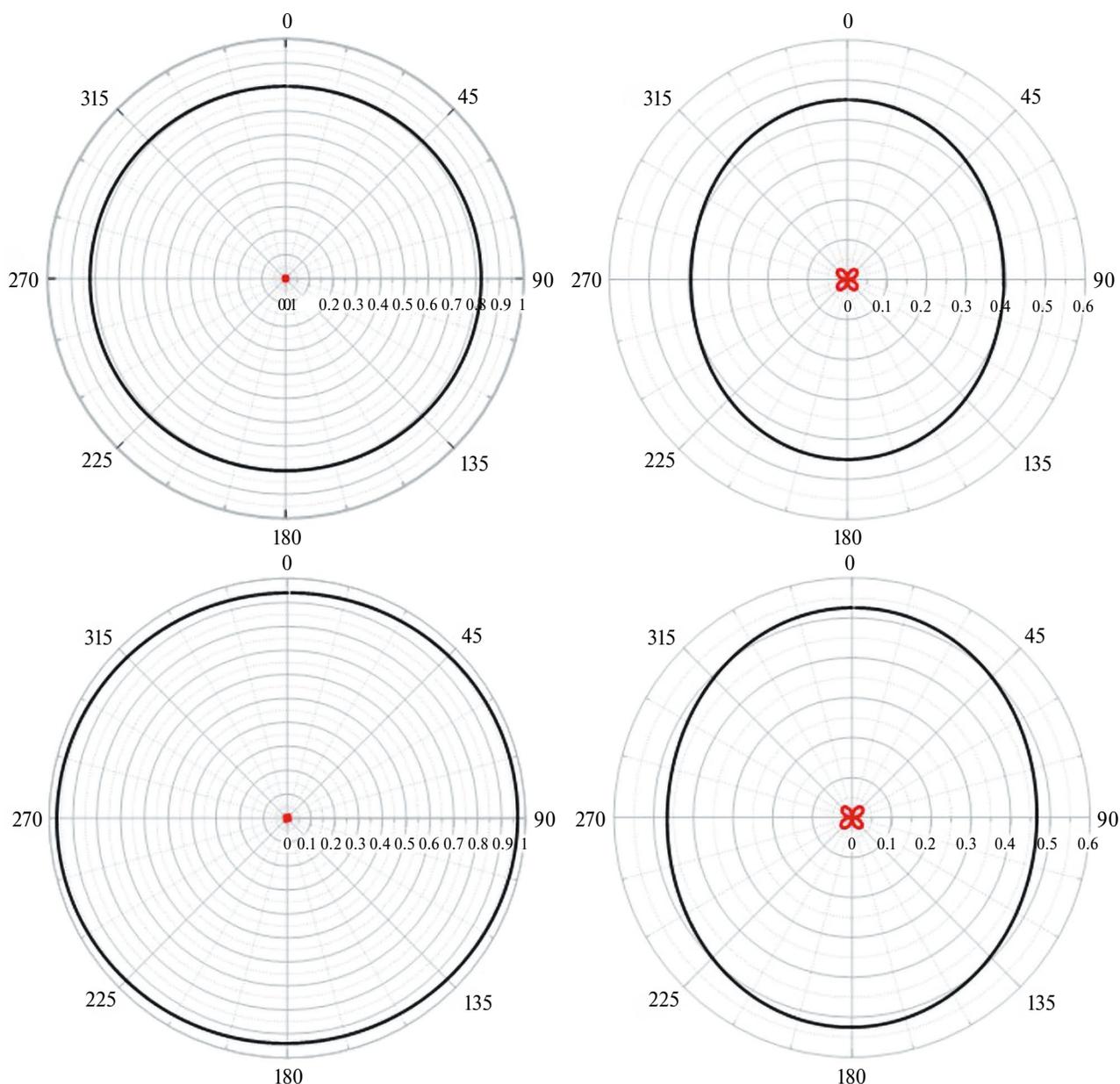
В точке МТЗ № 2 (рис. 11) диаграммы ведут себя более разнообразно. При отсутствии ППН

на коротком периоде (1 с) они характерны для 1D-среды, а на более длинных периодах (10 с и более) диаграмма  $|T_{xx}|$  вытягивается на северо-северо-запад, а диаграмма  $|T_{xy}|$  состоит из 4 лепестков, но разного размера. При добавлении ППН, вытянутой в меридиональном направлении, диаграмма  $|T_{xx}|$  на коротком периоде вытягивается по широте, а на более длинных периодах ее ориентация формируется под влиянием как локальной, так и региональной структур (ППН и грабена). Диаграмма  $|T_{xy}|$ , состоящая из 4 одинаковых лепестков на периоде 1 с, также на больших периодах принимает более сложную форму.

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

Полярные диаграммы фазы основной компоненты теллурического тензора  $\arg(T_{xx})$  приведены на рис. 12. Ожидаемо, диаграммы для вариантов модели с однородным верхним слоем и с ППН почти не отличаются. Ориентация фазовых диаграмм соответствует ориентации амплитудных диаграмм  $|T_{xx}|$  для случая отсутствия ППН, два вида диаграмм вытягиваются либо в одном и том же, либо в перпендикулярном направлениях. Напомним, аналогичная закономерность наблюдается и в ориентациях амплитудных и фазовых диаграмм основной компоненты тензора  $[Z]$ .

Наконец, на рис. 13 для тех же двух точек МТЗ приведены полярные диаграммы основной и дополнительной компонент фазового тензора  $\varphi_{xx}^T$  и  $\varphi_{xy}^T$ . Диаграммы основной компоненты очень похожи на только что рассмотренные диаграммы фазы основной компоненты теллурического тензора. Они не зависят от наличия ППН, вытягиваются в тех же направлениях и имеют примерно такую же форму. Диаграммы дополнительной компоненты подчеркивают двухмерность эффектов в точке 1 и их трехмерный характер в точке 2, где возникают лепестки, различающиеся по размеру. Также на рис. 13 показаны направления  $\alpha^T$  (для всех точек МТЗ они были также показаны на рис. 9) и  $\alpha_1^T = \alpha^T - \beta^T$ . В точке 1 ситуация двухмерная, угол  $\beta^T$  очень мал и направления с его учетом и без него практически совпадают. В точке значения  $\beta^T$  более существенные, особенно на периоде 10 с, и связанные с региональной структурой направления  $\alpha^T$  и  $\alpha_1^T$  существенно отличаются.



**Рис. 10.** Полярные диаграммы модулей компонент  $[T]$  в точке 1 на периодах 1 и 10 с (слева направо) для вариантов модели без ППН (вверху) и с ППН (внизу). Черный цвет — компонента  $|T_{xx}|$ , красный —  $|T_{xy}|$ .

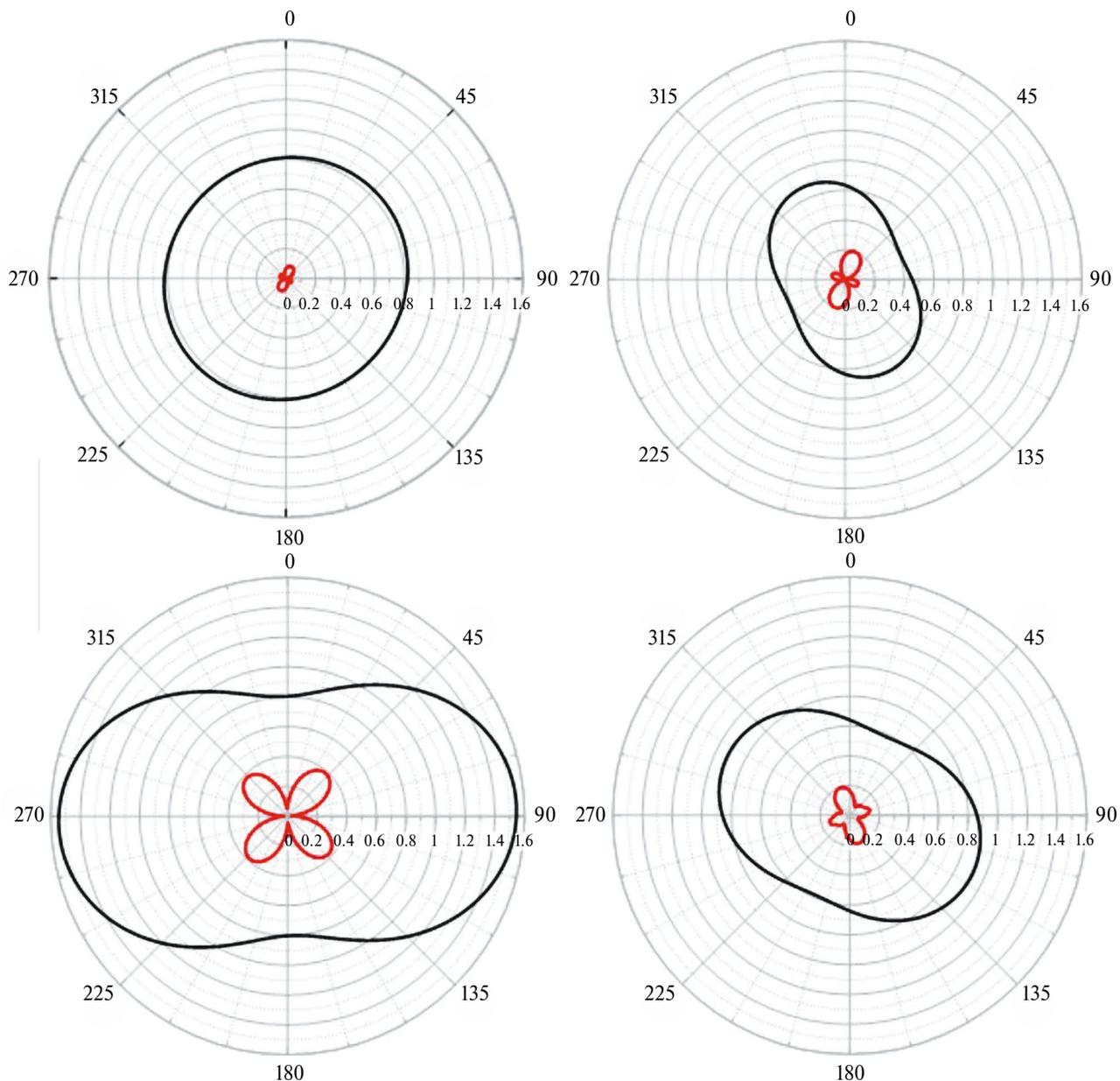
Таким образом, фазовые диаграммы компонент тензора  $[T]$  и компонент построенного по нему фазового тензора  $[\Phi^T]$  свободны от влияния ППН и позволяют оценить размерность региональной среды и направления простирания вытянутых региональных структур.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы использовали подходы к анализу МТ данных, разработанные применительно к тензору импеданса  $[Z]$ , для анализа тензора  $[T]$ . Построения были выполнены на осно-

ве синтетических МТ данных, рассчитанных для геоэлектрической модели, содержащей крупную проводящую неоднородность в верхней части высокоомного фундамента и неоднородный приповерхностный слой с множеством локальных ППН.

Карты модуля и фазы эффективной компоненты  $T_{ef}$  позволяют локализовать глубинную неоднородность, также демонстрируя (в случае модуля) или игнорируя (в случае фазы) влияние ППН. Карты параметров асимметрии Свифта и Бара  $skew_S^T$  и  $skew_B^T$  показывают области разви-



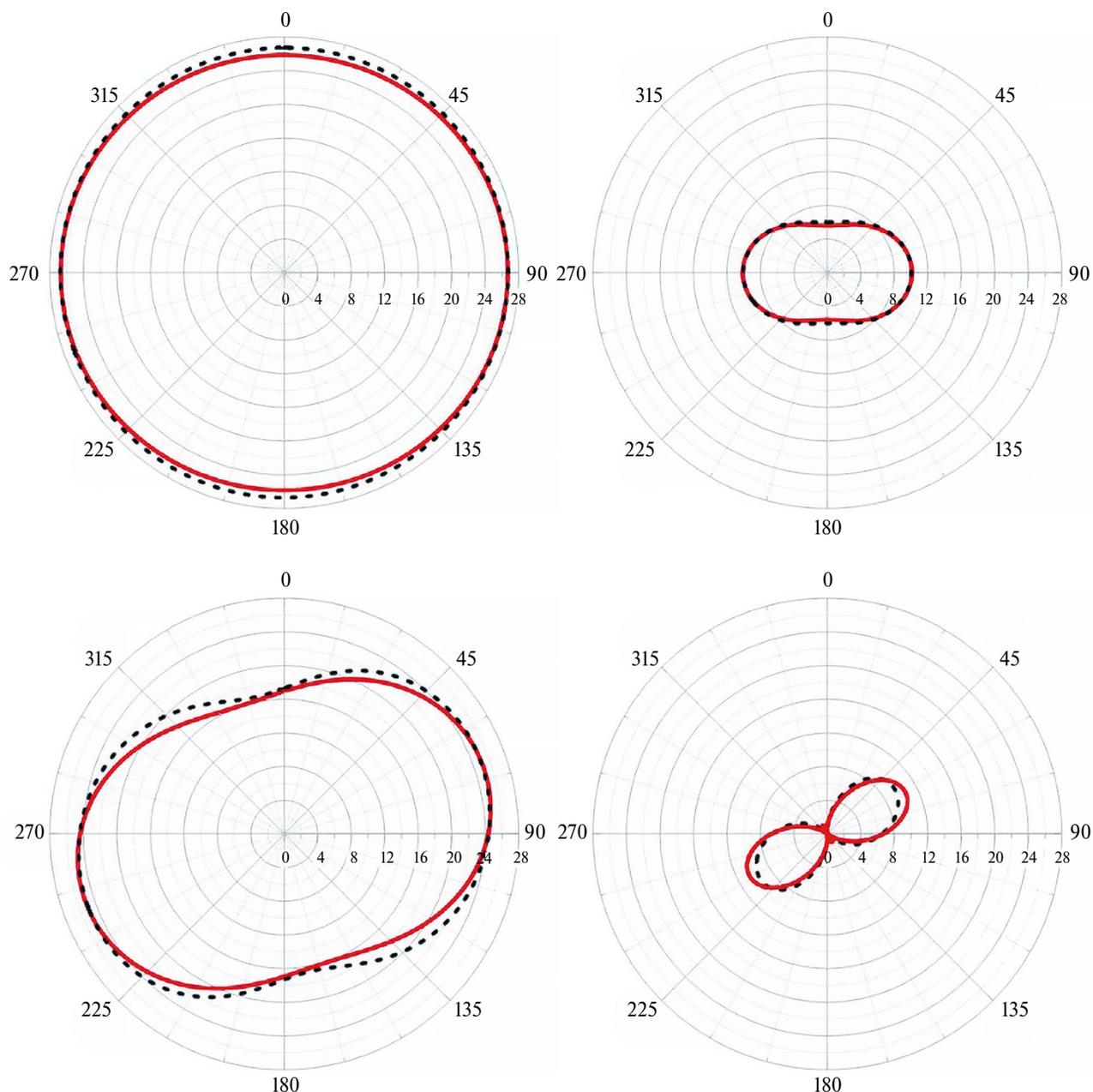
**Рис. 11.** Полярные диаграммы модулей компонент  $[T]$  в точке 2 на периодах 1 и 10 с (слева направо) для вариантов модели без ППН (вверху) и с ППН (внизу). Черный цвет — компонента  $|T_{xx}|$ , красный —  $|T_{xy}|$ .

тия трехмерных эффектов как от всех структур (в случае  $skew_S^T$ ), так и только от глубинных (в случае  $skew_B^T$ ).

Особый интерес представляет переход от тензорического тензора  $[T]$  к его фазовому тензору  $[\Phi^T]$ , который, хотя и за счет уменьшения объема информации (4 вещественных компоненты вместо 4 комплексных), избавлен от влияния ППН, сильно искажающих электрическое поле. Карта определяемых по  $[\Phi^T]$  направлений  $\alpha^T$  характеризует азимуты, связанные с региональной структурой, в частности, вблизи центров границ

грабена они направлены вдоль и вкост этих границ, а на удалении от грабена, где он проявляется как изометричная структура, ориентированы в радиальном и азимутальном направлениях. Карта значений модуля угла  $\beta^T$  дает дополнительную информацию о зонах, в которых существенны трехмерные эффекты, и направления  $\alpha^T$  рассматривать не вполне корректно.

Весьма информативны и полярные диаграммы компонент тензоров  $[T]$  и  $[\Phi^T]$ , построенные аналогично хорошо известным полярным диа-



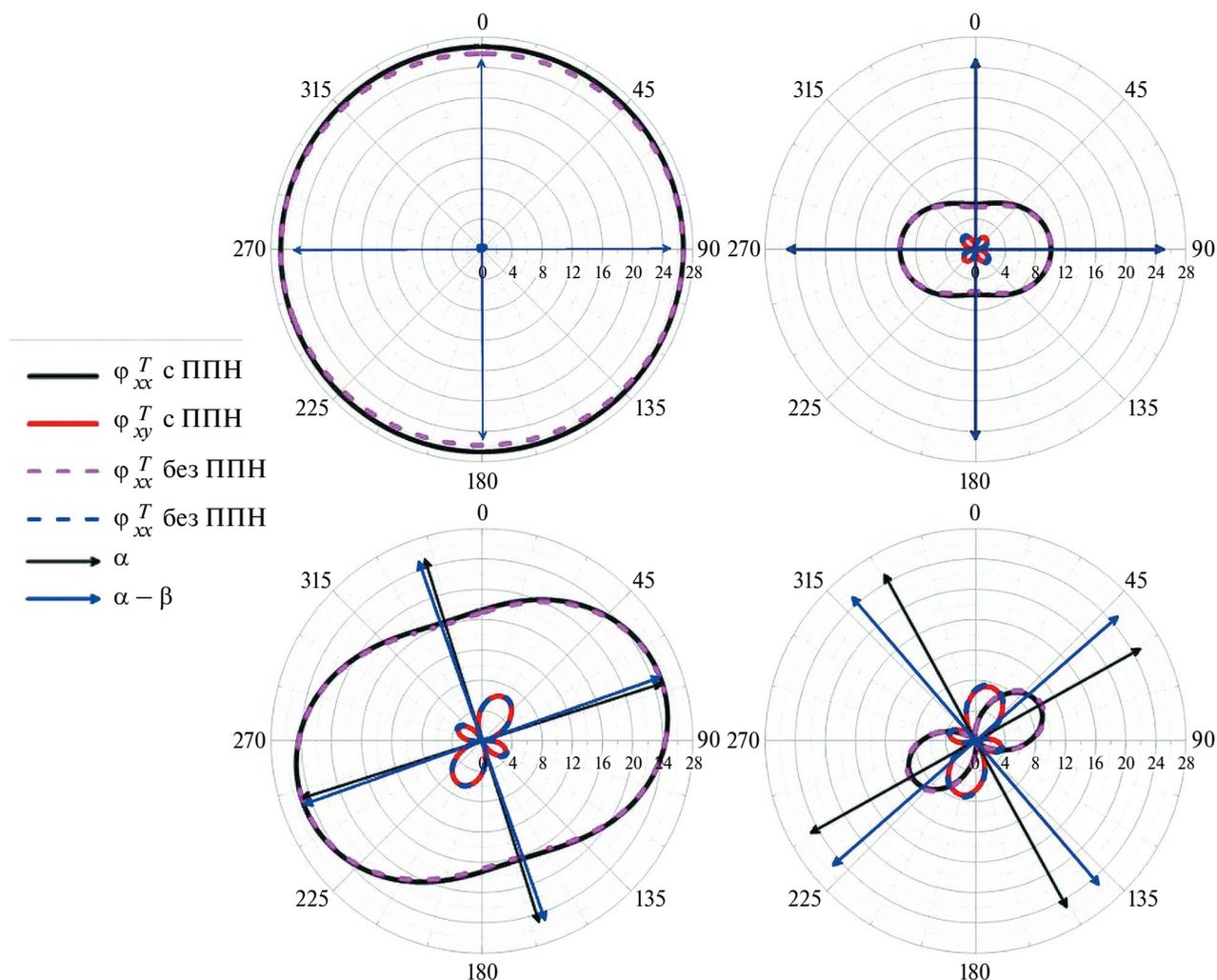
**Рис. 12.** Полярные диаграммы фазы основной компоненты  $\arg(T_{xx})$  на периодах 1 и 10 с (слева направо) в точке 1 (сверху) и 2 (снизу), черный пунктир — модель без ППН, красный цвет — с ППН.

граммам компонент  $[Z]$ . Своей формой и ориентацией они характеризуют размерность среды и простирание глубинных структур. Причем диаграммы модулей основных компонент  $[T]$  подвержены влиянию ППН, в то время как фазовая диаграмма  $\arg(T_{xx})$ , а также диаграммы компонент фазового тензора свободны от влияния ППН и связаны только с глубинной структурой.

Ранее в работе [Пушкарев, Сукокин, 2024] мы выполнили аналогичные построения приме-

нительно к тензору  $[Z]$ , и можно сделать вывод, что для нашей геоэлектрической модели информативность  $[Z]$  и  $[T]$  очень близка. Однако этот вывод не следует распространять на все случаи, в частности, можно отметить, что магнитная составляющая поля весьма информативна при изучении глубинных (коровых и мантийных) проводящих структур.

Таким образом, анализ теллурического тензора  $[T]$  и его фазового тензора  $[\Phi^T]$  дает достаточно много информации о геоэлектриче-



**Рис. 13.** Полярные диаграммы теллурического фазового тензора на периодах 1 и 10 с (слева направо) в точке 1 (сверху) и 2 (снизу). Черная и красная линии — основная и дополнительная компоненты для модели с ППН, фиолетовый и синий пунктир — они же для модели без ППН. Черными и синими стрелками показаны (с точностью до  $90^\circ$ ) направления  $\alpha$  и  $\alpha - \beta$ .

ских структурах, в том числе глубинных. Можно рекомендовать их использование, наряду с тензором импеданса  $[Z]$  и его фазовым тензором  $[\Phi]$ , а также с матрицей Визе–Паркинсона  $[W]$  и горизонтальным магнитным тензором  $[M]$ , при анализе и инверсии МТ данных.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бердичевский М.Н.* Электрическая разведка методом теллурических токов. М.: Гостоптехиздат. 1960. 238 с.

*Бердичевский М.Н.* Линейные связи в магнитотеллурическом поле // Прикладная геофизика. 1964. Вып. 38. С. 99–108.

*Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 677 с.

*Епишкин Д.В.* Развитие методов обработки данных магнитотеллурического зондирования // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2016. № 4. С. 40–46.

*Мороз Ю.Ф., Рылов Е.С.* Аномальные изменения параметров теллурического тензора в связи с сейсмичностью на Камчатке. Материалы XXI региональной конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский. 2018. С. 122–125.

*Суконкин М.А., Пушкарев П.Ю.* Анализ синтетических магнитотеллурических данных, рассчитанных для геоэлектрической модели с приповерхностными неоднородностями // Геофизика. 2023. № 6. С. 65–69.

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

Bahr K. Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion // *Journal of Geophysics*. 1988. V. 62. P. 119–127.

Bakker J., Kuvshinov A., Samrock F., Geraskin A., Pankratov O. Introducing inter-site phase tensors to suppress galvanic distortion in the telluric method. // *Earth, Planets and Space*. 2015. V. 67(160). 10 p.

Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor // *Geophysical Journal International*. 2004. V. 158. P. 457–469.

Garcia X., Jones A.G. A new methodology for the acquisition and processing of audio-magnetotelluric (AMT) data in the AMT dead band // *Geophysics*. 2005. V. 70. № 5. P. G119–G126.

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. V. 58. P. 215–226.

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

## Local-Regional Decomposition of the Telluric Tensor

M. A. Sukonkin<sup>a, \*</sup> and P. Yu. Pushkarev<sup>a, \*\*</sup>

<sup>a</sup>*Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

\**e-mail: msukonkin@mail.ru*

\*\**e-mail: pavel\_pushkarev@list.ru*

Received August 12, 2024; revised February 17, 2025; accepted February 24, 2025

**Abstract** — The article considers the possibilities of using the telluric tensor in magnetotellurics, determined from the linear relations of the electric field at the ordinary and base points. Particular attention is paid to the local-regional decomposition of the telluric tensor, allowing to separate the influence of near-surface inhomogeneities and the studied deep structures. Approaches that are widely used in the analysis of the impedance tensor are adapted by the authors for the analysis of the telluric tensor and tested on synthetic data calculated for a three-dimensional model with a deep conductive structure and an inhomogeneous near-surface layer. A phase tensor determined from the telluric tensor and free from near-surface effects is considered. It is shown that maps of invariant parameters and polar diagrams make it possible to estimate the dimensions of the medium, localize deep structures and estimate their extension.

**Keywords:** magnetotelluric sounding, telluric tensor, phase tensor, near-surface inhomogeneities, local-regional decomposition