

УДК 550.83

О.Б. Забиякова, П.Н. Александров

АНАЛИЗ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ МЕТОДОМ ИСТОКООБРАЗНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Введение

При проведении геофизических исследований методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) наибольший практический интерес представляет решение обратных, преимущественно трехмерных задач, которые позволяют делать выводы о пространственном распределении геоэлектрических свойств рассматриваемой среды по компонентам магнитотеллурического поля (МТ-поля), наблюдаемым на земной поверхности [1]. При этом сам подход к решению обратной магнитотеллурической задачи может базироваться на двух основных этапах. Первый этап – это предварительный количественный анализ магнитотеллурических данных (МТ-данных) с целью получения *представления о геоэлектрической структуре* неоднородной геологической среды. Результатом выполнения этого этапа является изображение геологической среды, которое позволяет определять «геометрию» аномалеобразующих тел. В дальнейшем изображения, получаемые на первом этапе, можно использовать при формировании стартовой модели (начального приближения) для инверсии полевых МТ-данных магнитотеллурического зондирования – второго этапа решения обратной задачи МТЗ, целью которого является получение *представления о распределении удельного электрического сопротивления* в геологической среде.

В данной работе предполагается рассмотреть способ организации первого этапа решения обратных задач МТЗ на основе метода истокообразной аппроксимации магнитотеллурических данных.

Отметим, что теоретические основы метода истокообразной аппроксимации были рассмотрены в работах [2, 3] для интерпретации данных вертикального электрического зондирования. Численные эксперименты, проведенные как на тестовых моделях, так и на натурных данных, показали, что истокообразная аппроксимация является достаточно простым и относительно быстрым алгоритмом получения информации о местоположении неоднородностей в геологической среде. При этом, по мнению авторов публикаций [2, 3], одним из главных преимуществ истокообразной аппроксимации, делающих



ее универсальным методом, является отсутствие требований к системе наблюдения.

В публикациях [4, 5] были предприняты попытки применения метода истокообразной аппроксимации к анализу данных магнитотеллурического зондирования: апробация метода выполнялась на простых тестовых моделях, результаты численных экспериментов подтвердили адекватность такой аппроксимации. Данная работа является обобщением и продолжением исследований, начатых в [4, 5].

Поясним, что основная идея метода истокообразной аппроксимации магнитотеллурических данных сводится к определению корреляции между компонентами наблюдаемого магнитотеллурического поля (МТ-поля) с соответствующими компонентами МТ-поля, смоделированного для однородного проводящего полупространства ($\rho_{в.н.}$ – удельное электрическое сопротивление вмещающего полупространства), с включенным в него элементарным объемом избыточной электропроводности ($\rho_{э.о.}$ – удельное электрическое сопротивление элементарного объема). Но так как для каждого варианта размещения элементарного объема в рассматриваемой проводящей однородной среде можно получить индивидуальный коэффициент корреляции наблюдаемого и смоделированного МТ-полей, то естественно, что при перемещении элементарного объема по всему рассматриваемому полупространству можно получить совокупность (матрицу) коэффициентов корреляции, которую в дальнейшем следует понимать как трехмерную функцию местоположения элементарного объема. Как было показано в [2-5], анализ получаемой матрицы коэффициентов корреляции позволяет оценивать местоположения неоднородностей в рассматриваемой геологической среде. Критерием наличия неоднородности считается отличие коэффициента корреляции от нуля. Обратим внимание, что вопрос выбора параметров истокообразной аппроксимации ($\rho_{в.н.}$ и $\rho_{э.о.}$) и критериев оценки полученных результатов в настоящий момент авторами данной работы исследованы не в полном объеме и представляют интерес для дальнейших исследований.

Алгоритм истокообразной аппроксимации магнитотеллурических данных

Рассмотрим кратко логику алгоритма истокообразной аппроксимации, условно разделив его на несколько этапов:

- *Построение трехмерной геоэлектрической ячеистой модели среды, представляющей собой проводящее полупространство с включенным в него элементарным объёмом, характеризующимся избыточной электропроводностью (аппроксимирующая геоэлектрическая модель).*

Входными данными для этого этапа служит следующая информация о модели: количество и длины ячеек по каждой из осей x , y и z (трехмерная вычислительная сетка в декартовой системе координат $Oxyz$, вертикальная ось z направлена вглубь Земли); значение сопротивления проводящего полупространства $\rho_{в.п.}$; значение сопротивления элементарного объема $\rho_{э.о.}$, размещенного в конкретной ячейке трехмерной сетки (для простоты будем предполагать, что размеры элементарного объема совпадают с размерами ячейки, в которую он размещается).

- *Моделирование электромагнитного поля для аппроксимирующей геоэлектрической модели.*

Здесь выполняется решение прямой трехмерной задачи магнитотеллурического зондирования для аппроксимирующей геоэлектрической модели среды с помощью программы *mt3dfwd.exe* [6] в широком диапазоне частот (периодов). Полученное решение представляет собой массив значений действительных и мнимых частей пяти комплексных компонент электромагнитного поля в ячейках модели, рассчитанных для всех частот: три компонента вектора магнитной напряженности (H_x, H_y, H_z) и две компоненты вектора электрической напряженности (E_x, E_y).

- *Конвертация компонент МТ-поля в тензор магнитотеллурического импеданса.*

Данный этап выполняется с помощью утилиты *Mask_out.exe* [6], позволяющей сформировать массив значений четырех компонент тензора магнитотеллурического импеданса ($Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$) для всего диапазона периодов с учетом основного импедансного соотношения [1]:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}.$$

- *Определение корреляции между МТ-полем (компонентами тензора импеданса), смоделированным для аппроксимирующей геоэлектрической модели, и натурными МТ-данными.*

Формируется матрица наблюдаемых данных X и поэлементно соответствующая ей матрица данных Y , рассчитанных для аппроксимирующей модели. Затем определяется коэффициент аппроксимации, в некотором смысле характеризующий качество аппроксимации матрицы X матрицей Y . В данной работе далее будут представлены результаты истокообразной аппроксимации, где коэффициент аппроксимации вычислялся как коэффициент корреляции Пирсона (Линейный коэффициент корреляции) матриц X и Y [7]. Очевидно, возможно применение и других, более сложных подходов к определению коэффициента аппроксимации, обсуждение которых не предполагается в рамках данной работы и будет дополнительно исследовано авторами в дальнейшем.

В завершение этого вычислительного этапа полученное значение коэффициента корреляции «закрепляется» за той ячейкой исходной геоэлектрической модели, в которую на первом этапе был помещен элементарный объем с избыточной электропроводностью.

Таким образом, перемещая элементарный объем с избыточной электропроводностью по всему однородному проводящему полупространству и выполняя для каждого варианта его размещения описанный алгоритм, можно сформировать трехмерную матрицу комплексных коэффициентов корреляции. Анализируя эту матрицу можно делать предположения о «геометрии» геологической среды. Наиболее удобный способ анализа матрицы коэффициентов корреляции – визуализированные карты линий уровней или слайсы с цветовым отображением получаемых коэффициентов.

Отметим также, что корреляционную матрицу можно наполнять либо коэффициентами, рассчитанными для компонент магнитотеллурического поля, либо для компонент магнитотеллурического импеданса. В следующем разделе рассмотрим такие результаты истокообразной аппроксимации, полученные для простой тестовой модели.

Результаты численных экспериментов для тестовой модели

Рассмотрим тестовую модель геоэлектрической среды, представляющую собой ограниченную однородную среду прямоугольной формы $25 \text{ км} \times 25 \text{ км} \times 1,65 \text{ км}$ сопротивлением $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ со вставкой в виде прямоугольной призмы размерами $10 \text{ км} \times 10 \text{ км} \times 0,2 \text{ км}$ сопротивлением $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, находящейся на глубине 150 м от поверхности (размеры модели и значения сопротивлений были выбраны произвольно). Введем прямоугольную трехмерную сетку: 10 ячеек по 2500 м в направлении каждой из осей x и y ; 5 слоев в глубину (мощности слоев: 50 ,

100, 200, 500, 800, то есть неоднородная вставка располагается в третьем слое. Схему этого слоя в плане см. на рис. 1).

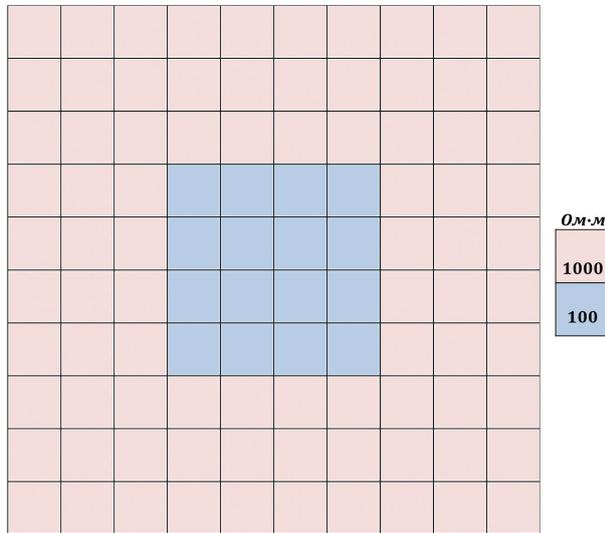


Рис. 1. Горизонтальное сечение тестовой модели по третьему слою

Fig. 1. Horizontal section of the test model across the third layer

Наблюдаемые магнитотеллурические поля и импедансы для этой синтетической модели симитируем решением прямой трехмерной задачи МТЗ с помощью программ mt3dfwd.exe и Mack_out.exe [6]. Полученные значения компонент электромагнитного поля и магнитотеллурического импеданса будем использовать для формирования соответствующих матриц наблюдаемых данных (отдельная матрица с компонентами МТ-поля и отдельная матрица с компонентами тензора импеданса).

Далее, согласно логике метода истокообразной аппроксимации, вмещающий объем $25 \text{ км} \times 25 \text{ км} \times 1,65 \text{ км}$ заменим однородным полупространством с удельным электрическим сопротивлением $\rho_{в.н.}$ и поочередно в каждую из ячеек вычислительной сетки будем помещать элементарный объем с удельным электрическим сопротивлением $\rho_{э.о.}$, занимающий весь объем соответствующей ячейки (пример перемещения элементарного объема проиллюстрирован на рис. 2). Для каждого случая размещения элементарного объема вычислялся коэффициент корреляции между симитированным (наблюдаемым) МТ-полем (или МТ-импедансом) и МТ-полем (или МТ-импедансом), рассчитанным для аппроксимирующей модели. Отметим, что сочетание параметров $\rho_{в.н.}$ и $\rho_{э.о.}$ варьировалось; далее,

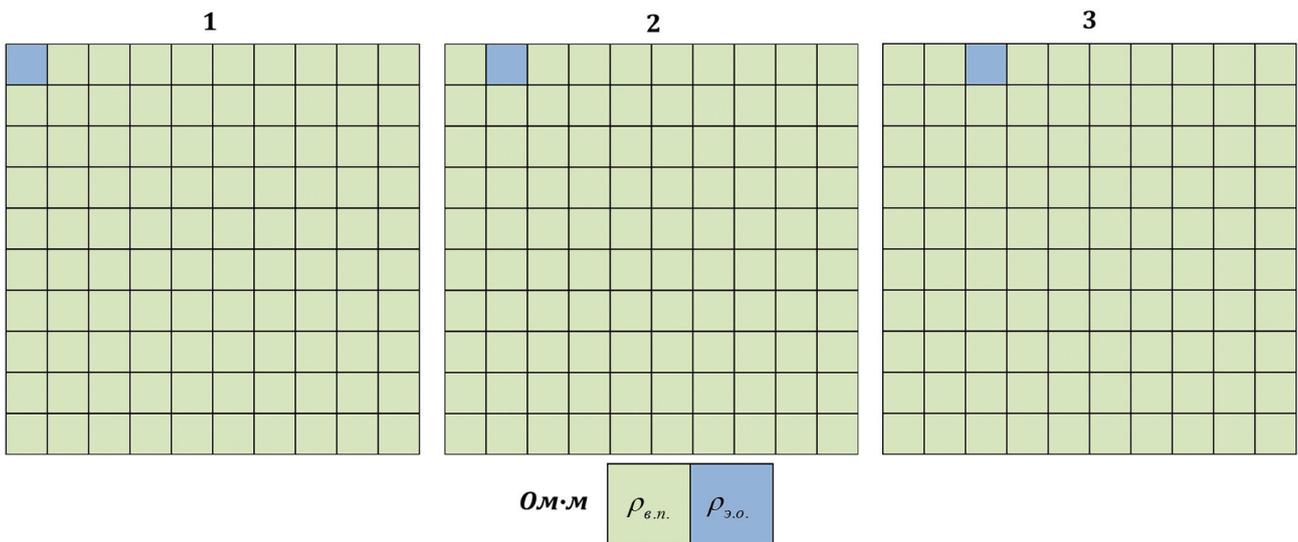


Рис. 2. Иллюстрация перемещения элементарного объема удельным электрическим сопротивлением $\rho_{э.о.}$ внутри однородного полупространства с удельным электрическим сопротивлением $\rho_{в.н.}$. При каждом перемещении получается новая геоэлектрическая модель среды, для которой выполняется моделирование МТ-поля и МТ-импеданс

Fig. 2. Illustration of $\rho_{э.о.}$ resistivity elementary volume displacement inside $\rho_{в.н.}$ resistivity homogeneous half-space. New geoelectrical model of the medium (for which MT-field and MT-impedance are going to be simulated) is obtained for each elementary volume displacement

в качестве примера, представим иллюстрации для случаев $\rho_{в.п.} = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $\rho_{з.о.} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_{в.п.} = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $\rho_{з.о.} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

На рис. 3 и 5 изображены слайсы матриц коэффициентов корреляции, рассчитанных по пяти компонентам МТ-поля для указанных выше параметров истокообразной аппроксимации. На рис. 4 и 6 проиллюстрированы результаты истокообразной аппроксимации для тех же параметров, но для матриц коэффициентов корреляции, вычисленных по компонентам МТ-импедансов.

Обратим внимание, что на рисунках 3–6 ось z направлена вверх – это никак не влияет на логику алгоритма и на результаты истокообразной аппроксимации, а лишь является следствием специфики вычислительной системы Matlab, в которой осуществлялись расчеты и выполнялась отрисовка.

Итак, из рис. 4 и 6 видно, что коэффициенты корреляции, рассчитанные по значениям магнитотеллурического импеданса, более отчетливо отражают «геометрию» тестовой модели: слой, где расположена

неоднородность (третий слой), характеризуется наибольшими значениями действительных частей коэффициентов корреляции и отображается красно-оранжевыми оттенками цветов, а по геометрии первого слоя можно определить расположение неоднородности в плане. При этом обратим внимание, что при использовании коэффициентов корреляции, рассчитанных по компонентам магнитотеллурического поля, картина получается более размытая (рис. 3 и 5). Поэтому в дальнейшем, при выполнении истокообразной аппроксимации магнитотеллурических данных, предпочтение будем отдавать расчетам с использованием тензора магнитотеллурического импеданса.

Отметим, что общая длительность процедуры истокообразной аппроксимации для каждого из вариантов сочетания параметров $\rho_{в.п.}$ и $\rho_{з.о.}$ для рассмотренной тестовой модели составляла около 30 минут (размерность матрицы коэффициентов корреляции $10 \times 10 \times 5$, количество циклов процедуры истокообразной аппроксимации – 500).

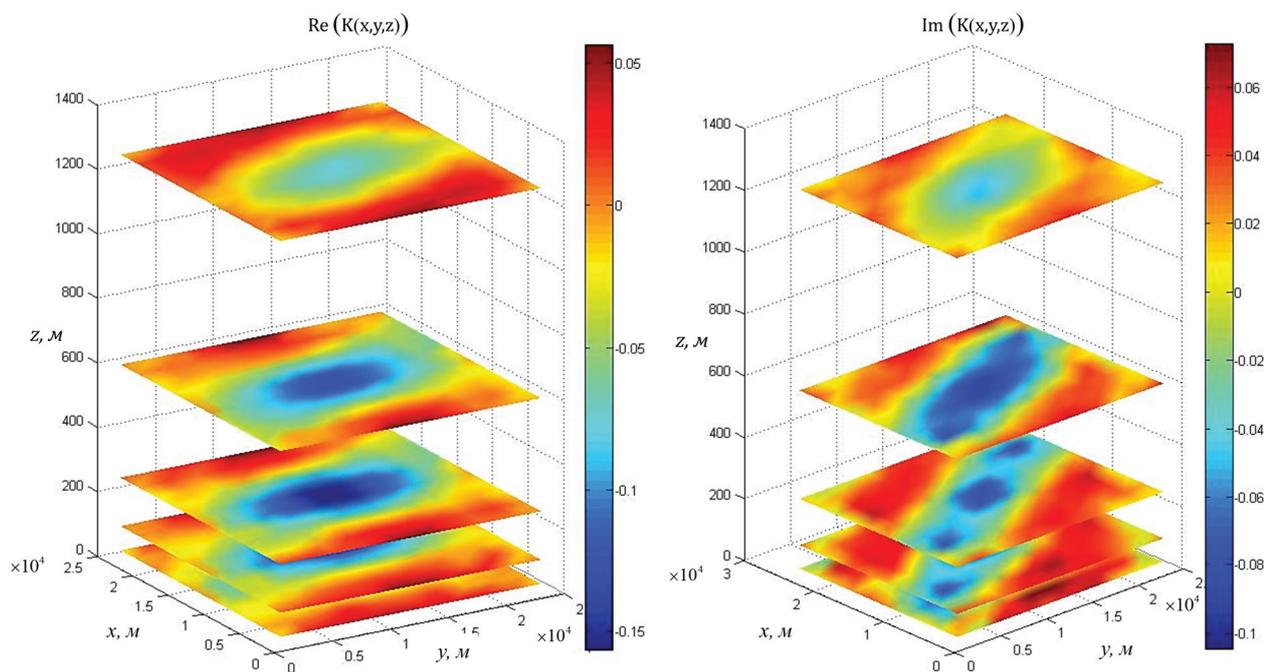


Рис. 3. Действительная и мнимая части коэффициента корреляции, рассчитанного по МТ-полям для случая $\rho_{в.п.} = 10$, $\rho_{з.о.} = 50$ (изображены срезы матрицы коэффициентов корреляции $K(x, y, z)$ по пяти слоям тестовой модели). Значение коэффициента корреляции отображено с помощью индивидуальной цветовой шкалы, расположенной справа

Fig. 3. Real and imaginary parts of the correlation coefficient calculated using the MT-fields for the case of $\rho_{в.п.} = 10$, $\rho_{з.о.} = 50$ (slices of correlation coefficients the matrix $K(x, y, z)$ across five layers of the test model are presented). Correlation coefficient value is displayed via the individual color bar located from the right

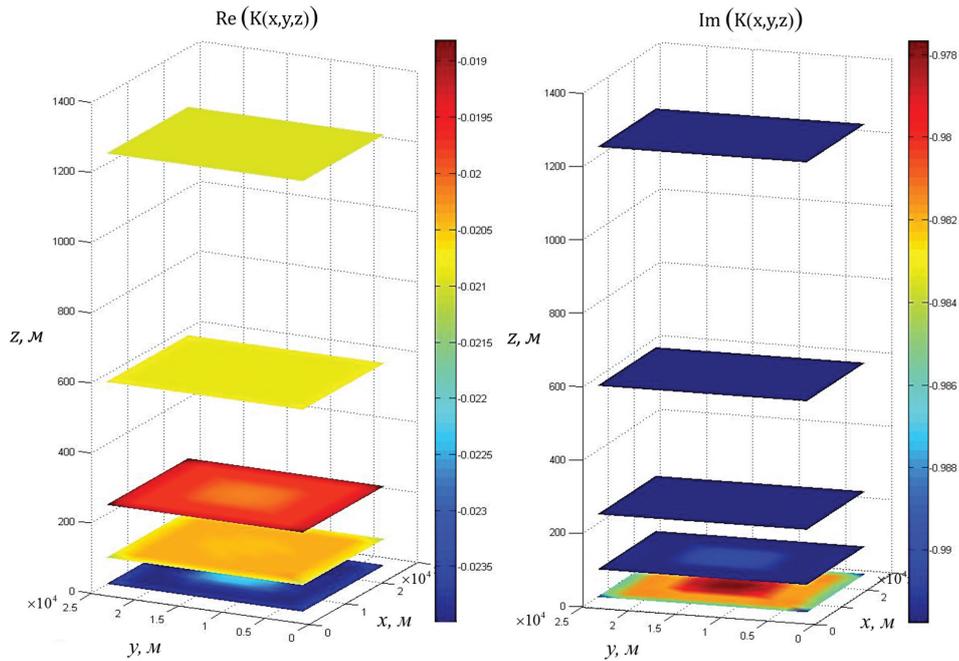


Рис. 4. Действительная и мнимая части коэффициента корреляции, рассчитанного по МТ-импедансам для случая $\rho_{в.п.} = 10, \rho_{з.о.} = 50$ (изображены срезы матрицы коэффициентов корреляции $K(x, y, z)$ по пяти слоям тестовой модели). Значение коэффициента корреляции отображено с помощью индивидуальной цветовой шкалы, расположенной справа

Fig. 4. Real and imaginary parts of the correlation coefficient calculated using the MT-impedance for the case of $\rho_{в.п.} = 10, \rho_{з.о.} = 50$ (slices of correlation coefficients the matrix $K(x, y, z)$ across five layers of the test model are presented). Correlation coefficient value is displayed via the individual color bar located from the right

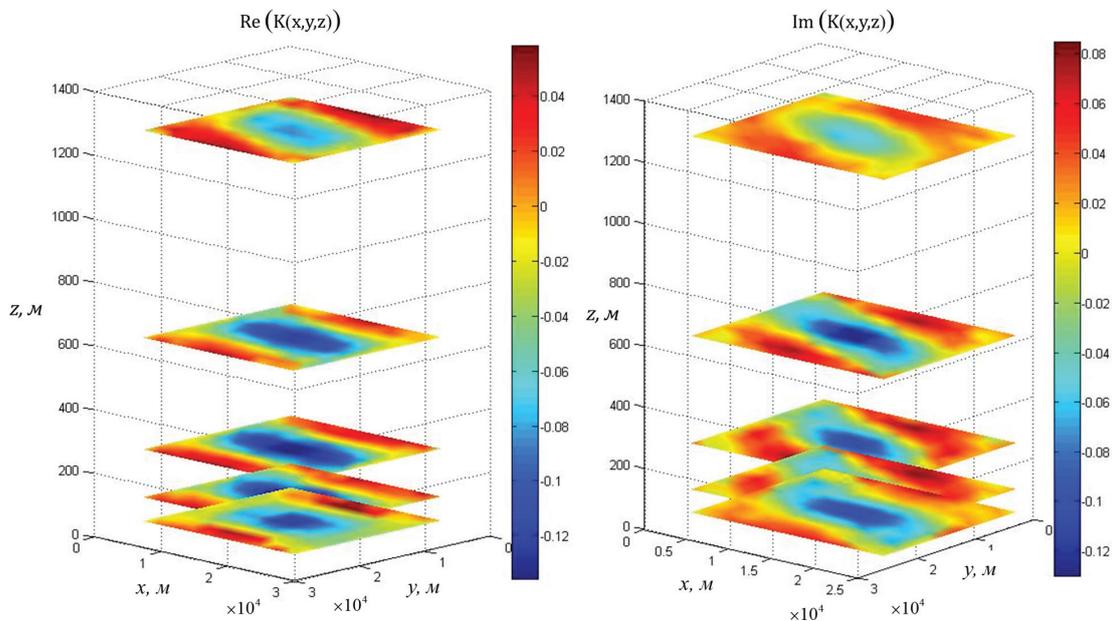


Рис. 5. Действительная и мнимая части коэффициента корреляции, рассчитанного по МТ-полям для случая $\rho_{в.п.} = 10, \rho_{з.о.} = 100$ (изображены срезы матрицы коэффициентов корреляции $K(x, y, z)$ по пяти слоям тестовой модели). Значение коэффициента корреляции отображено с помощью индивидуальной цветовой шкалы, расположенной справа

Fig. 5. Real and imaginary parts of the correlation coefficient calculated using the MT-fields for the case of $\rho_{в.п.} = 10, \rho_{з.о.} = 100$ (slices of correlation coefficients the matrix $K(x, y, z)$ across five layers of the test model are presented). Correlation coefficient value is displayed via the individual color bar located from the right

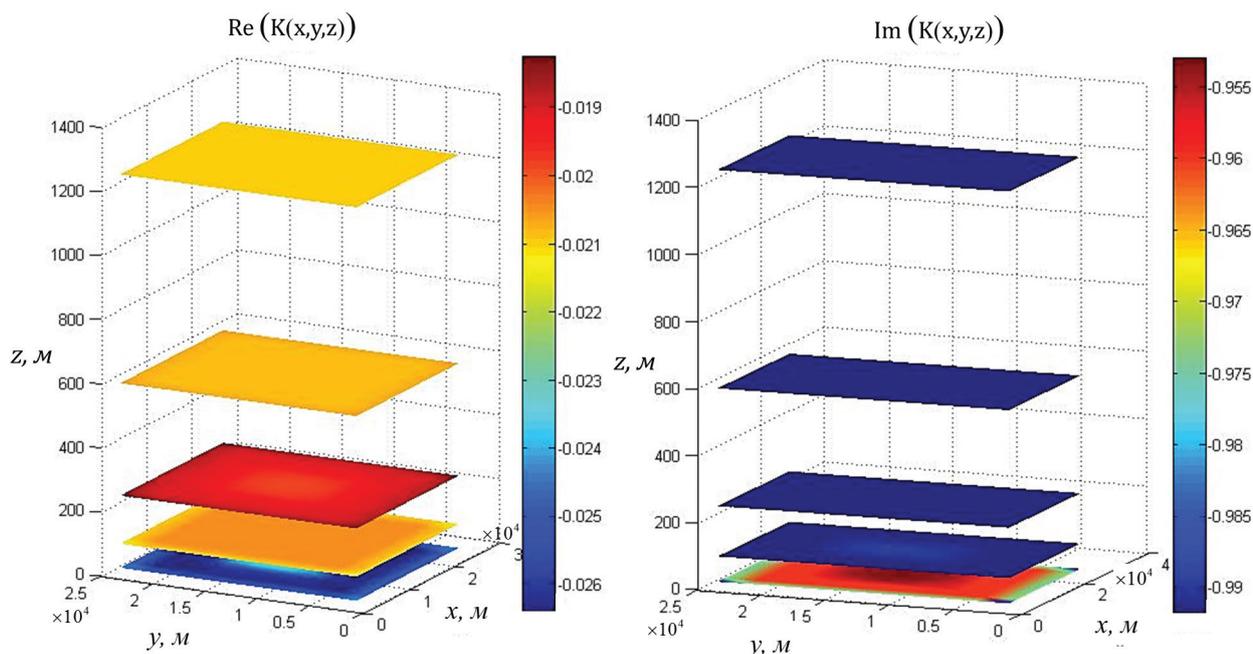


Рис. 6. Действительная и мнимая части коэффициента корреляции, рассчитанного по МТ-импедансам для случая $\rho_{в.л.} = 10$, $\rho_{з.о.} = 100$ (изображены срезы матрицы коэффициентов корреляции $K(x, y, z)$ по пяти слоям тестовой модели). Значение коэффициента корреляции отображено с помощью индивидуальной цветовой шкалы, расположенной справа

Fig. 6. Real and imaginary parts of the correlation coefficient calculated using the MT-impedance for the case of $\rho_{в.л.} = 10$, $\rho_{з.о.} = 100$ (slices of correlation coefficients the matrix $K(x,y,z)$ across five layers of the test model are presented). Correlation coefficient value is displayed via the individual color bar located from the right

Программный комплекс MTSourceApprox

Алгоритм, описанный выше, был положен в основу программного комплекса *MTSourceApprox*, разработанного в вычислительной среде Matlab. Дадим небольшую характеристику этому программному обеспечению.

MTSourceApprox состоит из:

- основного модуля *SourcewiseApproximation.m*, запускающего процедуру истокообразной аппроксимации магнитотеллурических данных;
- 12 подпрограмм, реализующих такие функции по работе с данными, как чтение полевых МТ-данных (из файлов стандартного геофизического формата *.edi), формирование массивов географических и профильных (спроецированных на спрямленную линию МТ-профиля) координат пунктов магнитотеллурического зондирования, формирование вычислительной сетки, решение прямой трехмерной задачи МТЗ в терминах МТ-полей и МТ-импедансов, и др.

Уточним алгоритм истокообразной аппроксимации в разрезе *MTSourceApprox*.

Для начала выполняется подготовка к дальнейшим расчетам всех необходимых стандартных МТ-данных из набора edi-файлов: диапазона частот

зондирований (и его пересчет в периоды); матриц действительных и мнимых частей компонент комплексного тензора импеданса для каждой из частот.

Затем вводится трехмерная вычислительная сетка, основными параметрами которой являются количества и длины ячеек по каждой из двух горизонтальных осей x и y и вертикальной оси z . Обратим внимание, что в нашем случае при выполнении численных экспериментов данная сетка являлась квазитрехмерной: поскольку выполнялась аппроксимация профильных МТ-данных, то для начала задавалась неравномерная двумерная сетка в плоскости xz , после чего эту двумерную сеточную область «растягивали» («дублировали») вдоль второй горизонтальной оси y (сетка по этой оси выбиралась равномерной). Отметим, что здесь предполагается, что пункты зондирования расположены вдоль оси x и известна информация об их положении на этой оси (проекция географических координат МТ-пунктов на спрямленную линию профиля).

Следующим шагом выполняется интерполяция всех имеющихся численных данных об импедансах (действительные и мнимые части четырехкомпонентного тензора импеданса для заданного набора частот) из пунктов зондирования на все ячейки сетки по оси x и формируется массив

наблюденных данных XX , который в дальнейшем преобразуется в вектор X :

$$XX = \begin{pmatrix} Z_{xx}(x_1, f_1) & Z_{xx}(x_1, f_2) & \dots & Z_{xx}(x_1, f_N) \\ Z_{xx}(x_2, f_1) & Z_{xx}(x_2, f_2) & \dots & Z_{xx}(x_2, f_N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{xx}(x_m, f_1) & Z_{xx}(x_m, f_2) & \dots & Z_{xx}(x_m, f_N) \\ Z_{xy}(x_1, f_1) & Z_{xy}(x_1, f_2) & \dots & Z_{xy}(x_1, f_N) \\ Z_{xy}(x_2, f_1) & Z_{xy}(x_2, f_2) & \dots & Z_{xy}(x_2, f_N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{xy}(x_m, f_1) & Z_{xy}(x_m, f_2) & \dots & Z_{xy}(x_m, f_N) \\ Z_{yx}(x_1, f_1) & Z_{yx}(x_1, f_2) & \dots & Z_{yx}(x_1, f_N) \\ Z_{yx}(x_2, f_1) & Z_{yx}(x_2, f_2) & \dots & Z_{yx}(x_2, f_N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{yx}(x_m, f_1) & Z_{yx}(x_m, f_2) & \dots & Z_{yx}(x_m, f_N) \\ Z_{yy}(x_1, f_1) & Z_{yy}(x_1, f_2) & \dots & Z_{yy}(x_1, f_N) \\ Z_{yy}(x_2, f_1) & Z_{yy}(x_2, f_2) & \dots & Z_{yy}(x_2, f_N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{yy}(x_m, f_1) & Z_{yy}(x_m, f_2) & \dots & Z_{yy}(x_m, f_N) \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} Z_{xx}(x_1, f_1) \\ \dots \\ Z_{yy}(x_m, f_1) \\ Z_{xx}(x_1, f_2) \\ \dots \\ Z_{yy}(x_m, f_2) \\ \dots \\ Z_{xx}(x_1, f_N) \\ \dots \\ Z_{yy}(x_m, f_N) \end{pmatrix}.$$

Здесь используются следующие обозначения: $Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$ – комплексные компоненты тензора импеданса; x_1, x_2, \dots, x_m – середины сеточных ячеек вдоль оси x ; f_1, f_2, \dots, f_N – частоты зондирования.

На следующем этапе выполняется подготовка данных для аппроксимирующей модели: удельное электрическое сопротивление вмещающего полупространства $\rho_{в.н.}$ (Rho1 на блок-схеме на рис. 7) и удельное электрическое сопротивление перемещаемого элементарного объема $\rho_{э.о.}$ (Rho2 на блок-схеме на рис. 7). Также на этом этапе выполняется генерация файлов с периодами и прочими параметрами, необходимыми для решения прямой трехмерной задачи программой *mt3dfwd.exe* и конвертации полей в импедансы утилитой *Mack_out.exe*.

На последнем вычислительном этапе происходит перемещение элементарного объема избыточной электропроводности по однородному полупространству: для каждого нового местоположения осуществляется формирование вектора смоделированных данных Y , аналогичного вектору наблюдаемых данных X . Затем рассчитывается комплексный коэффициент корреляции векторов X и Y , значение которого «закрепляется» за той ячейкой трехмерной сеточной области, где был зафиксирован элементарный объем избыточной электропроводности. Завершая истокообразную аппроксимацию МТ-данных, необходимо проанализировать полученную матрицу коэффициентов корреляции.

Блок-схема алгоритма, заложенного в основу программного комплекса *MTSourceApprox*, представлена на рис. 7.

Завершая данный раздел статьи, отметим, что в ходе работы было выявлено ограничение

программы *mt3dfwd.exe* по количеству используемых для решения прямой задачи периодов – 32. Ввиду того, что на практике оказалось, что реальное число периодов, для которых известны натурные данные, превышает 32, эта проблема была устранена следующим образом: весь набор периодов делился на части, количества элементов которых не превышали 32; для каждой части по отдельности выполнялось решение прямой трехмерной задачи, а в завершении полученные массивы импедансов «склеивались» в одну матрицу. Также было выявлено ограничение программы *mt3dfwd.exe* относительно размерности вычислительной сетки (не более 90 ячеек вдоль горизонтальных осей), что учитывалось при выполнении численных экспериментов.

Далее рассмотрим результаты применения алгоритма истокообразной аппроксимации к данным магнитотеллурического профиля Туяк (Северный Тянь-Шань).

Результаты численных экспериментов по истокообразной аппроксимации профильных магнитотеллурических данных с помощью *MTSourceApprox*

На рис. 8 изображена карта-схема расположения пунктов магнитотеллурического зондирования (МТ-пунктов) профиля Туяк, располагающегося на территории Бишкекского геодинамического полигона (зона сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта).

Длина профиля Туяк ~17,2 км, количество пунктов зондирования – 24 (для каждого пункта имеется файл стандартного геофизического расширения *.edi со значениями компонент тензора импеданса на 59 разных частотах).

Для данного профиля была сгенерирована двумерная прямоугольная неравномерная сетка: 36 ячеек по горизонтальной оси x (протяженность разреза в этом направлении, включая бортовые части, составила ~79 км) и 14 ячеек по вертикальной оси z (протяженность разреза в этом направлении составила ~20 км). Отметим, что количества ячеек умышленно были выбраны небольшими, чтобы сократить время вычислительного процесса при апробации разработанного программного обеспечения (чем больше ячеек в сетке, тем дольше выполняется процедура истокообразной аппроксимации). Далее полученная сеточная двумерная область была «растянута» вдоль второй горизонтальной оси y : по этой оси была введена равномерная сетка с 7 ячейками, каждая по 2 км. Обратим внимание, что выполненная нами процедура истокообразной аппроксимации «пробегала» все ячейки по осям x и z , а по оси y действовал только центральный слой с номером 4.

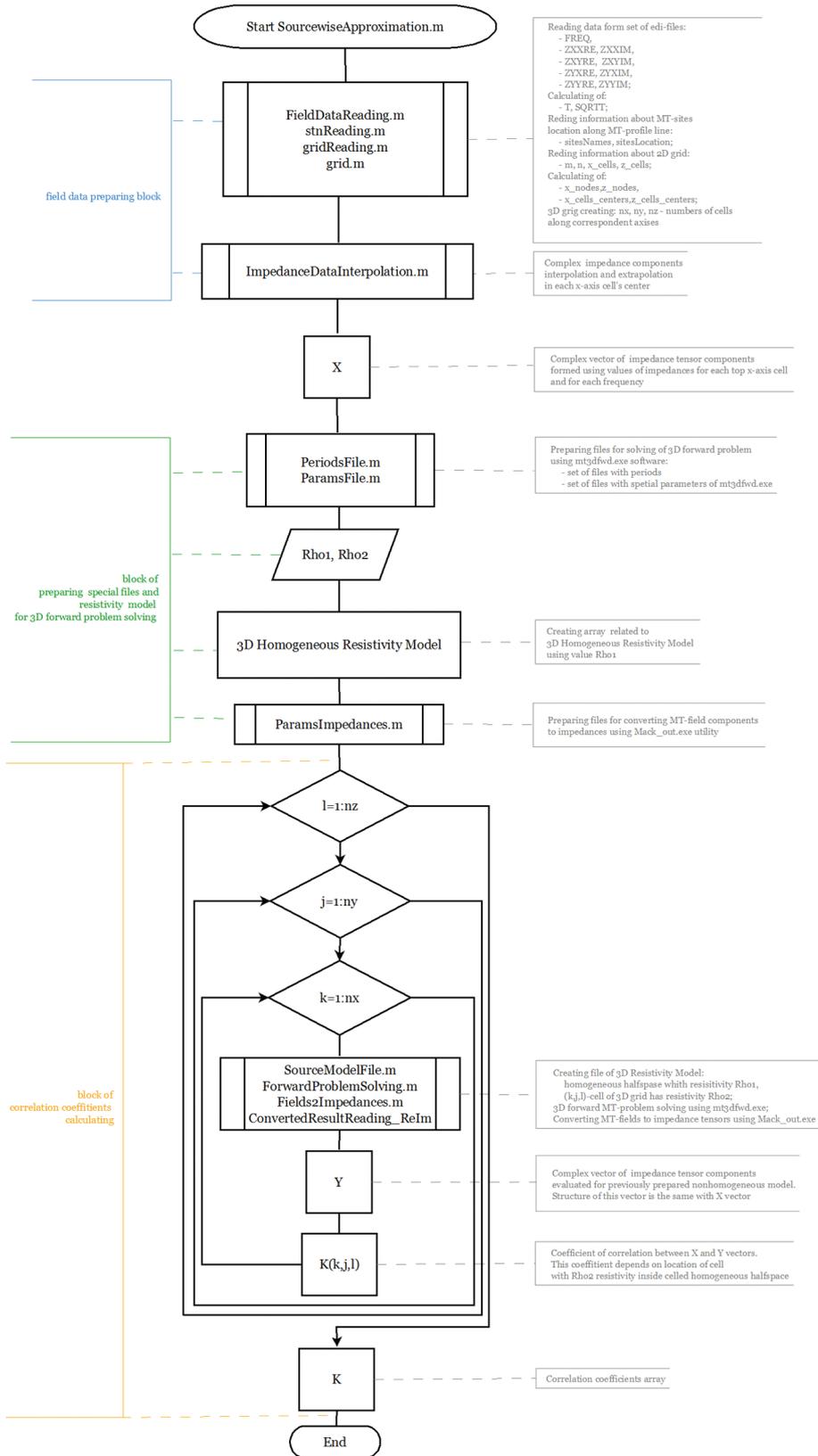


Рис. 7. Блок-схема алгоритма, заложенного в основу программного комплекса *MTSourceApprox*, реализующего истокообразную аппроксимацию профильных магнитотеллурических данных

Fig. 7. Block diagram of the *MTSourceApprox* software underlying algorithm that implements a sourcewise approximation of profile magnetotelluric data

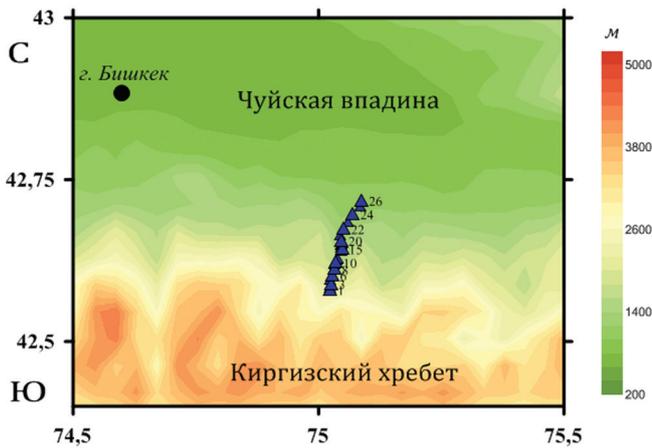


Рис. 8. Карта-схема расположения профиля Туяук. Синие пронумерованные треугольники – пункты магнитотеллурического зондирования. Цветовая шкала характеризует высоту над уровнем моря, м

Fig. 8. Tuyuk profile location map. Blue numbered triangles are sites of magnetotelluric sounding. The color bar characterizes the elevation above sea level in meters

Время, потребовавшееся для таких расчетов, составило ~1,5 часа (для одного варианта сочетания параметров истокообразной аппроксимации).

При выполнении процедуры истокообразной аппроксимации в качестве параметров задавались разные комбинации значений удельного электрического сопротивления вмещающего полупространства $\rho_{в.н.}$ и удельного электрического сопротивления перемещаемого по этому пространству элементарного объема $\rho_{э.о.}$. Далее продемонстрируем и обсудим полученные результаты. Отметим, что визуализация рассчитанных компонент матрицы коэффициентов корреляции выполнялась в графическом редакторе *Surfer*.

Вариант 1. Рассмотрим случай $\rho_{в.н.} = 100$ Ом·м и $\rho_{э.о.} = 500$ Ом·м. На рис. 9а и 9б проиллюстрированы примеры отображения полученной матрицы коэффициентов корреляции, откуда видно, что удачно подобранная цветовая шкала позволяет получать более детальное представление о «геометрии» среды в целом. При этом оба варианта отображения подтверждают наличие приповерхностных неоднородностей: так как абсолютные значения коэффициентов корреляции соответствуют левой и центральной частям цветовой шкалы, то можно сделать вывод, что в приповерхностном слое в ~1 км, скорее всего, отсутствуют неоднородные включения высокого сопротивления (~500 Ом·м). Из рис. 9б можно предположить, что на глубинах ~1-3 км, напротив, присутствуют породы с высоким ρ .

Добавим на рисунок 9б слой, отдельной цветовой шкалой детально отображающий коэффициенты корреляции для глубин, больших 3 км (рис. 10). Из рисунка видно, что в южной и глубинной частях разреза под линией профиля явно определяются зоны наибольшей корреляции (светлый цвет). То есть можно предположить, что в этих областях находятся геоэлектрические объекты высокого сопротивления. А в северной части разреза на глубинах 3-6 км, наоборот, присутствует проводник.

Вариант 2. Рассмотрим случай $\rho_{в.н.} = 100$ Ом·м и $\rho_{э.о.} = 1$ Ом·м. На рис. 11а, 11б и 12а, 12б проиллюстрированы примеры отображения полученной матрицы коэффициентов корреляции, откуда вновь видно, что удачно подобранная цветовая шкала позволяет получать более детальное представление о «геометрии» среды в целом.

При этом оба случая не противоречат результатам, полученным для предыдущего варианта сочетания параметров истокообразной аппроксимации: явно различимы приповерхностные неоднородности на глубине до 1 км, характеризующиеся сопротивлениями ~1-10 Ом·м. Рис. 11б подтверждает предположение (высказанное при рассмотрении предыдущей комбинации $\rho_{в.н.}$ и $\rho_{э.о.}$) о наличии пород с высоким ρ (большим чем 100 Ом·м) на глубинах ~1-3 км.

Добавим на рисунок 11б слой, отдельной цветовой шкалой детально отображающий коэффициенты корреляции для глубин, больших 3 км (рис. 13). Из рисунка можно предположить, что глубже 4 км отсутствуют зоны высокой проводимости, что согласуется с результатами, рассмотренными ранее (рис. 10).

Вариант 3. Рассмотрим случай $\rho_{в.н.} = 100$ Ом·м и $\rho_{э.о.} = 50$ Ом·м. На рис. 14а, 14б и 15а, 15б проиллюстрированы примеры отображения полученной матрицы коэффициентов корреляции, откуда вновь видно, что удачно подобранная цветовая шкала позволяет получать более детальное представление о «геометрии» среды в целом.

При этом оба случая не противоречат результатам, полученным для двух предыдущих вариантов сочетания параметров истокообразной аппроксимации: явно различимы приповерхностные неоднородности на глубине до 1 км, характеризующиеся сопротивлениями ~50 Ом м. Рис. 14б подтверждает предположение (высказанное при рассмотрении предыдущих двух комбинаций $\rho_{в.н.}$ и $\rho_{э.о.}$) о наличии пород с высоким ρ (большим чем 100 Ом·м) на глубинах ~1-3 км (более низкие значения коэффициента корреляции на этих глубинах).

Добавим на рисунок 14б слой, отдельной цветовой шкалой детально отображающий коэффициенты корреляции для глубин, больших 3 км (рис. 16).

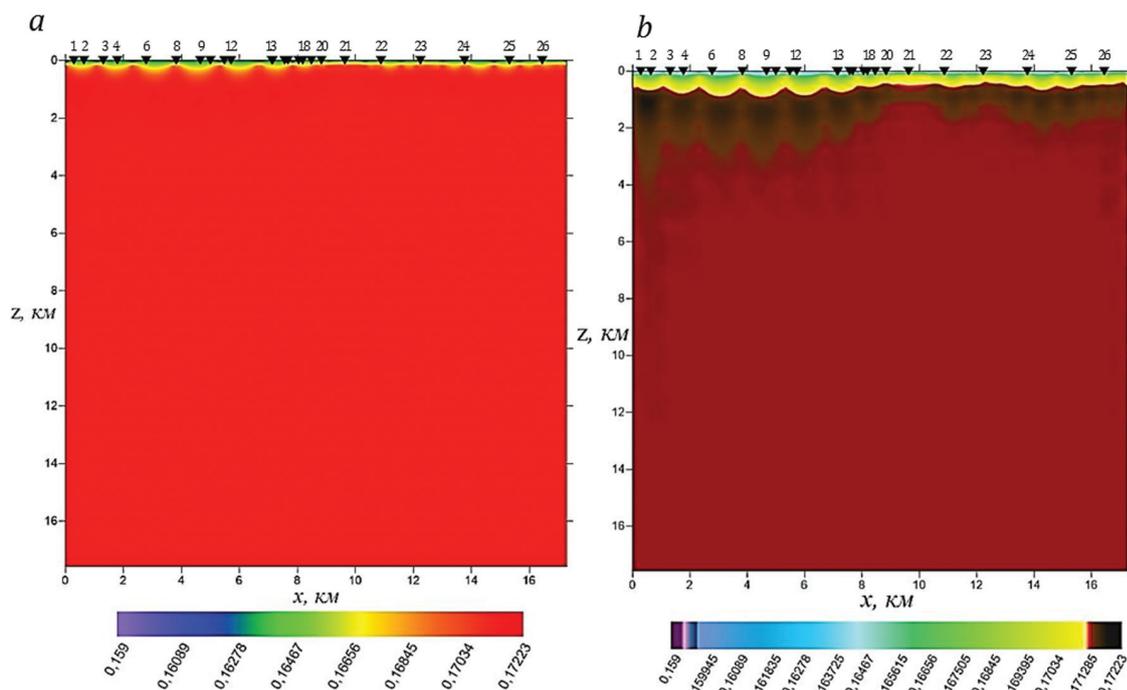


Рис. 9. Отображение матрицы абсолютных значений комплексного коэффициента корреляции с помощью цветовой шкалы: а) равномерной; б) неравномерной. Черные пронумерованные треугольники – пункты МТ-зондирования

Fig. 9. Visualization of the matrix of complex correlation coefficient absolute values via color bar: a) uniform; b) uneven. Black numbered triangles – MT-sites locations

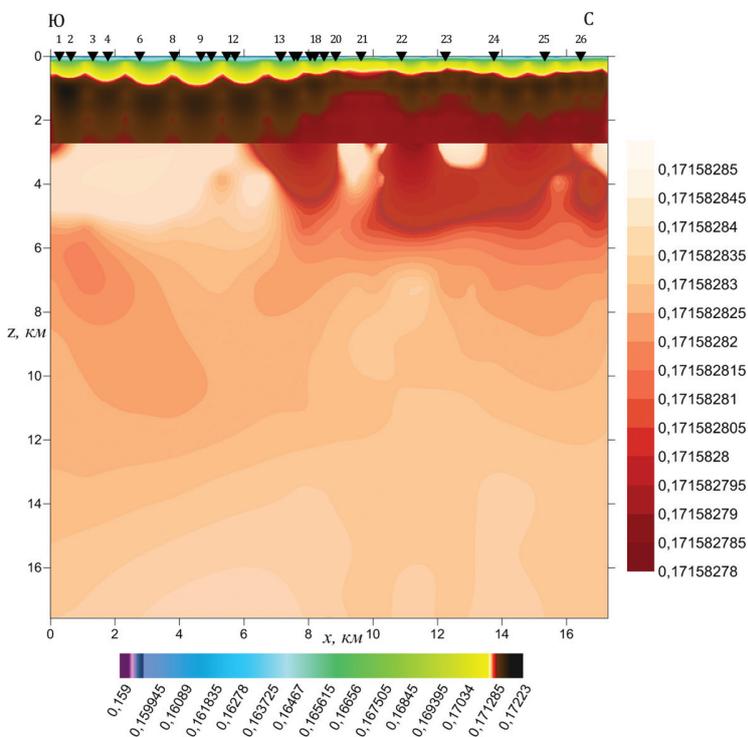


Рис. 10. Матрица абсолютных значений комплексного коэффициента корреляции: нижний слой (шкала снизу) дублирует рисунок 9б; верхний слой (шкала справа) детализирует свойства коэффициента для глубин, больших 3 км.

Черные пронумерованные треугольники – пункты МТ-зондирования

Fig. 10. The matrix of complex correlation coefficient absolute values: the lower layer (bottom color bar) duplicates figure 9b; the upper layer (right color bar) details the properties of the coefficient for depths greater than 3 km. Black numbered triangles – MT-sites locations

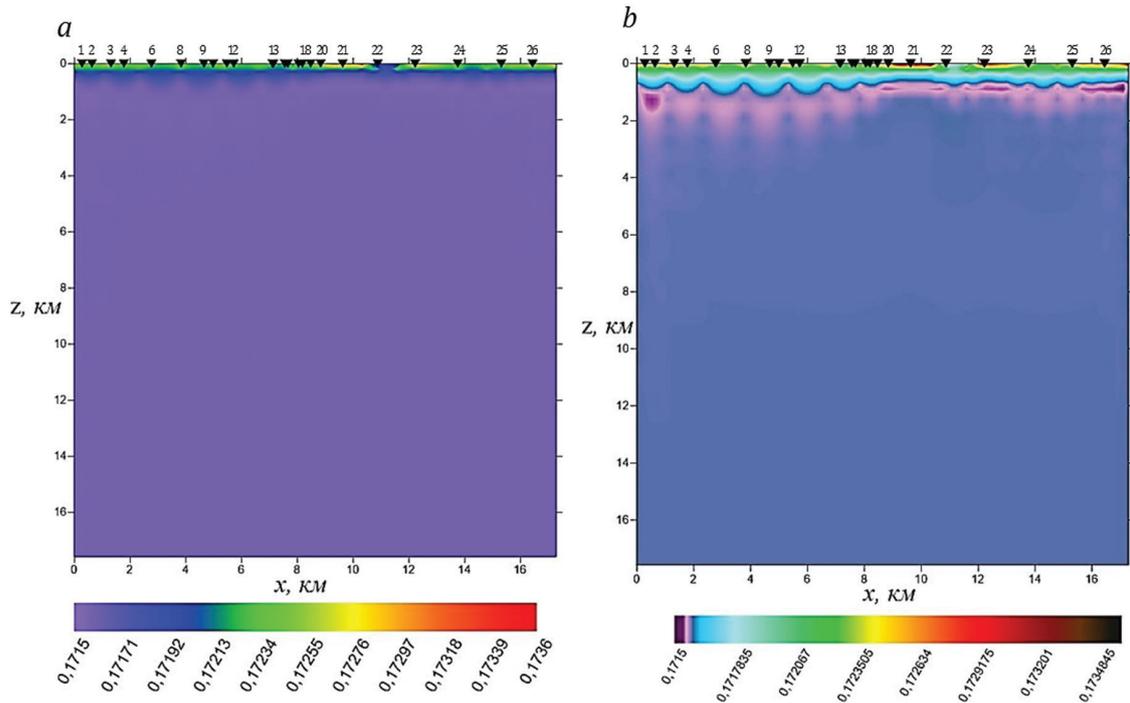


Рис. 11. Отображение матрицы абсолютных значений комплексного коэффициента корреляции с помощью цветовой шкалы: а) равномерной; б) неравномерной. Черные пронумерованные треугольники – пункты МТ-зондирования

Fig. 11. Visualization of the matrix of complex correlation coefficient absolute values via color bar: a) uniform; b) uneven. Black numbered triangles – MT-sites locations

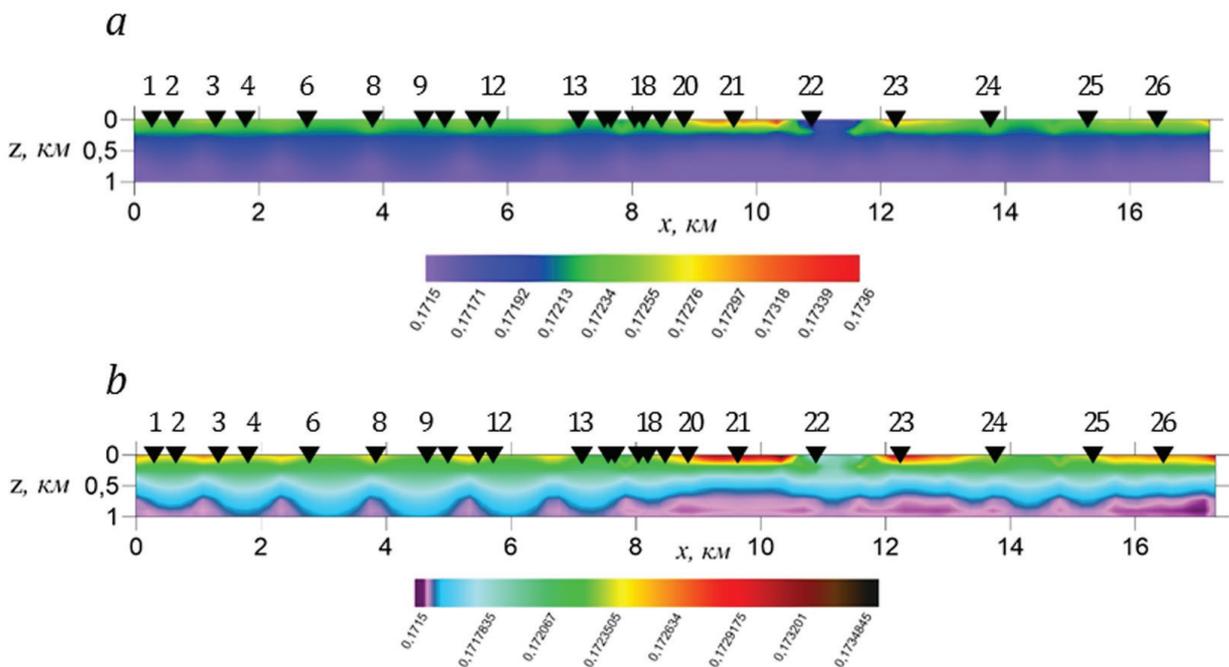


Рис. 12. Отображение матрицы абсолютных значений комплексного коэффициента корреляции для глубин до 1 км с помощью цветовой шкалы: а) равномерной; б) неравномерной. Черные пронумерованные треугольники – пункты МТ-зондирования

Fig. 12. Visualization of the matrix of complex correlation coefficient absolute values for depths till 1 km via color bar: a) uniform; b) uneven. Black numbered triangles – MT-sites locations

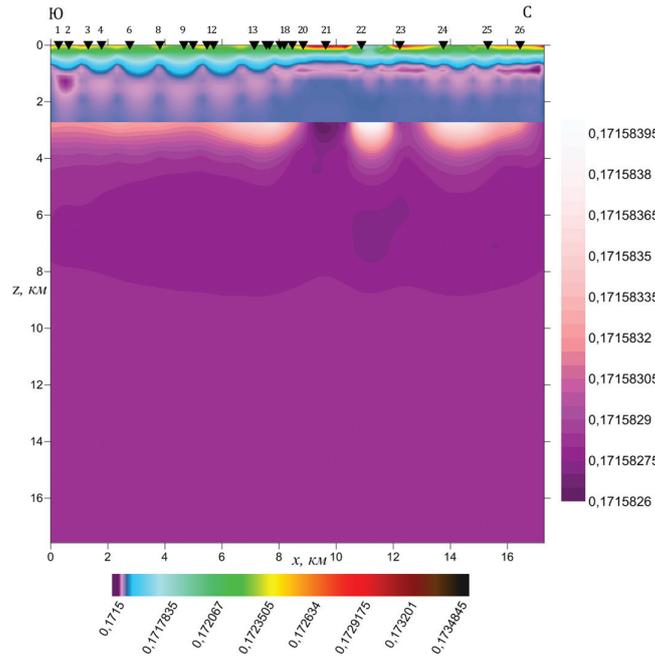


Рис. 13. Матрица абсолютных значений комплексного коэффициента корреляции: нижний слой (шкала снизу) дублирует рисунок 11b; верхний слой (шкала справа) детализирует свойства коэффициента для глубин, больших 3 км.

Черные пронумерованные треугольники – пункты МТ-зондирования

Fig. 13. The matrix of complex correlation coefficient absolute values: the lower layer (bottom color bar) duplicates figure 11b; the upper layer (right color bar) details the properties of the coefficient for depths greater than 3 km. Black numbered triangles – MT-sites locations

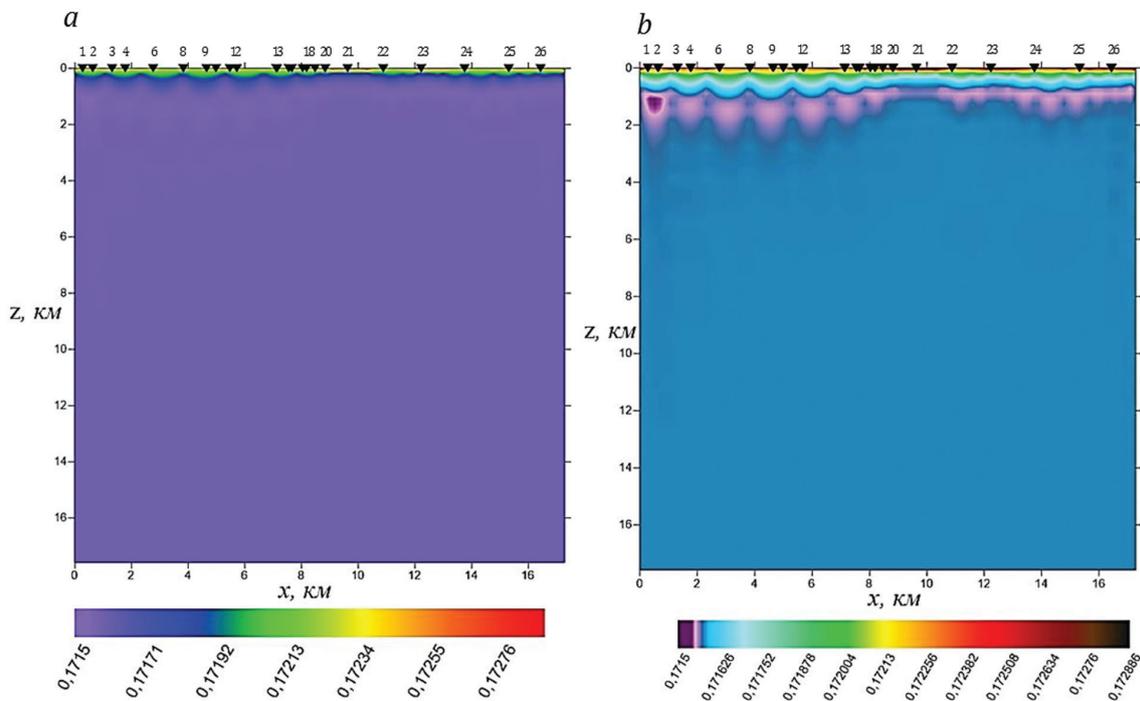


Рис. 14. Отображение матрицы абсолютных значений комплексного коэффициента корреляции с помощью цветовой шкалы: а) равномерной; б) неравномерной.

Черные пронумерованные треугольники – пункты МТ-зондирования

Fig. 14. Visualization of the matrix of complex correlation coefficient absolute values via color bar: a) uniform; b) uneven. Black numbered triangles – MT-sites locations

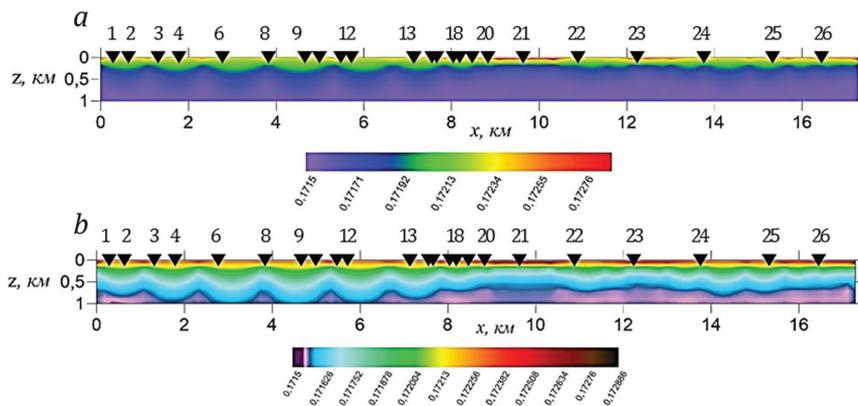


Рис. 15. Отображение матрицы абсолютных значений комплексного коэффициента корреляции для глубин до 1 км с помощью цветовой шкалы: а) равномерной; б) неравномерной. Черные пронумерованные треугольники – пункты МТ-зондирования

Fig. 15. Visualization of the matrix of complex correlation coefficient absolute values for depths till 1 km via color bar: a) uniform; b) uneven. Black numbered triangles – MT-sites locations

Из рис. 16 вновь можно предположить, что глубже 4 км отсутствуют зоны высокой проводимости, что согласуется с результатами, рассмотренными ранее (рис. 10 и рис. 13).

Вариант 4. Рассмотрим случай $\rho_{в.н.} = 100$ Ом·м и $\rho_{э.о.} = 1000$ Ом·м. На рис. 17а, 17б и 18а, 18б проиллюстрированы примеры отображения полученной матрицы коэффициентов корреляции, откуда вновь видно, что удачно подобранная цветовая шкала позволяет получать более детальное представление о «геометрии» среды в целом.

При этом оба случая не противоречат результатам, полученным для трех предыдущих вариантов сочетания параметров истокообразной аппроксимации: явно различимы приповерхностные неоднородности на глубине до 1 км. Также видна согласованность рисунков 17б и 9б, то есть ранее высказанное предположение о присутствии изолятора на глубинах ~1-3 км, скорее всего, справедливо.

Добавим на рисунок 17б слой, отдельной цветовой шкалой детально отображающий коэффициенты корреляции для глубин, больших 3 км (рис. 19). Из рис. 19 вновь можно предположить, что глубже 4 км в южной части разреза отсутствуют зоны высокой проводимости, что согласуется с результатами, рассмотренными ранее (рис. 10, 13 и 16). А в северной и центральной частях разреза на глубинах 3-6 км, наоборот, присутствуют проводящие области.

Закключение

Таким образом, на примере магнитотеллурического профиля Тунок (Бишкекский геодинамиче-

ский полигон, Северный Тянь-Шань) осуществлена апробация метода истокообразной аппроксимации МТ-данных. Для разных вариантов параметров этого метода получены хорошо согласующиеся между собой результаты.

Подтверждено, что истокообразная аппроксимация позволяет делать некоторые оценки «геометрии» геологической среды. Установлено также, что истокообразную аппроксимацию магнитотеллурических данных лучше выполнять с использованием МТ-импедансов, нежели МТ-полей, – это позволяет получать более отчетливую «геометрическую» картину.

Очевидно, что получаемый результат зависит от выбора процедурных параметров истокообразной аппроксимации: сопротивления вмещающего пространства $\rho_{в.н.}$ и сопротивления перемещаемого по нему элементарного объема $\rho_{э.о.}$. Поэтому актуальным остается вопрос определения критериев выбора этих параметров.

Таким образом, в дальнейшем авторы предполагают необходимым выработать общую стратегию подбора параметров истокообразной аппроксимации и интерпретации получаемых этим методом результатов.

Результаты, представленные в работе, получены в рамках грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 20-05-00475 и № 17-05-00844.

Ключевые слова: магнитотеллурические данные, истокообразная аппроксимация, программный комплекс *MTSourceApprox*.

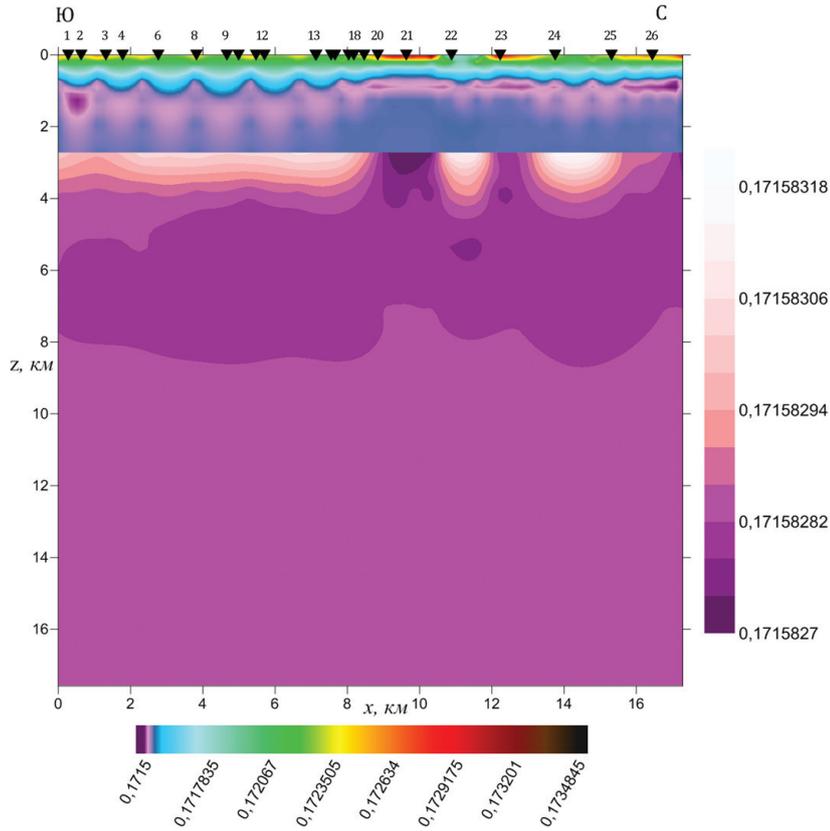


Рис. 16. Матрица абсолютных значений комплексного коэффициента корреляции:
нижний слой (шкала снизу) дублирует рисунок 14b;
верхний слой (шкала справа) детализирует свойства коэффициента для глубин, больших 3 км.
Черные пронумерованные треугольники – пункты МТ-зондирования

Fig. 16. The matrix of complex correlation coefficient absolute values: the lower layer (bottom color bar) duplicates figure 14b; the upper layer (right color bar) details the properties of the coefficient for depths greater than 3 km.

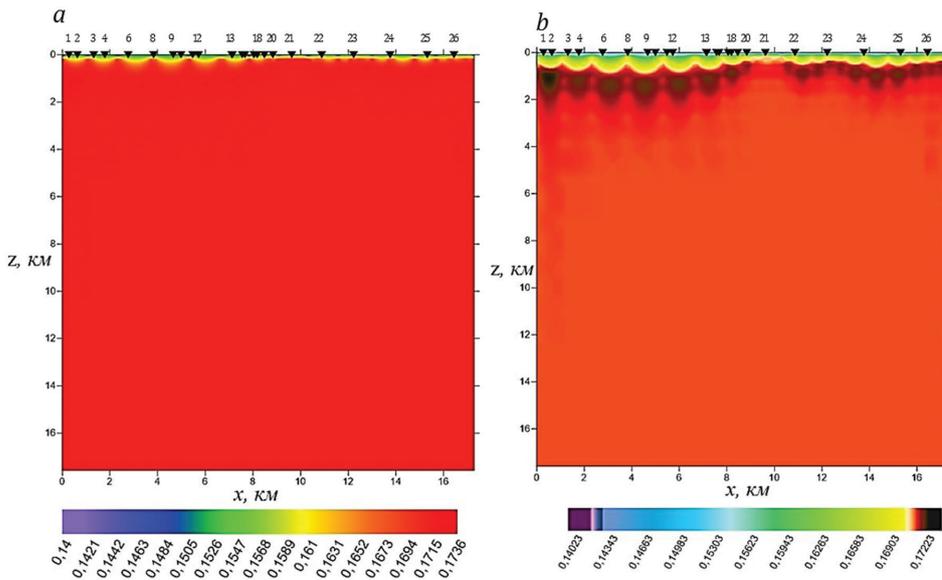


Рис. 17. Отображение матрицы абсолютных значений комплексного коэффициента корреляции с помощью цветовой шкалы: а) равномерной; б) неравномерной.
Черные пронумерованные треугольники – пункты МТ-зондирования

Fig. 17. Visualization of the matrix of complex correlation coefficient absolute values via color bar: a) uniform; b) uneven.
Black numbered triangles – MT-sites locations

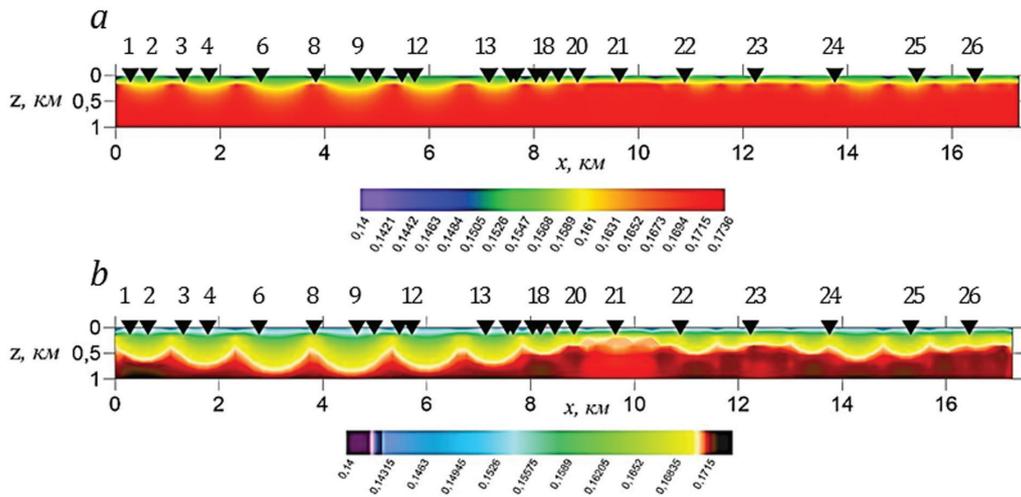


Рис. 18. Отображение матрицы абсолютных значений комплексного коэффициента корреляции для глубин до 1 км с помощью цветовой шкалы: а) равномерной; б) неравномерной.

Черные пронумерованные треугольники – пункты МТ-зондирования

Fig. 18. Visualization of the matrix of complex correlation coefficient absolute values for depths till 1 km via color bar: a) uniform; b) uneven. Black numbered triangles – MT-sites locations

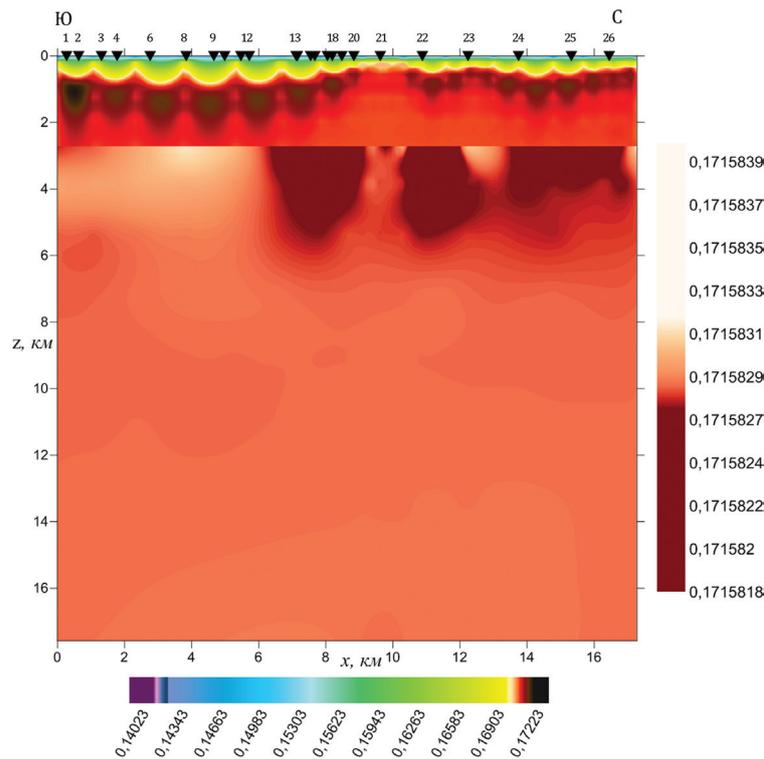


Рис. 19. Матрица абсолютных значений комплексного коэффициента корреляции: нижний слой (шкала снизу) дублирует рисунок 17б; верхний слой (шкала справа) детализирует свойства коэффициента для глубин, больших 3 км. Черные пронумерованные треугольники – пункты МТ-зондирования

Fig. 19. The matrix of complex correlation coefficient absolute values: the lower layer (bottom color bar) duplicates figure 17b; the upper layer (right color bar) details the properties of the coefficient for depths greater than 3 km. Black numbered triangles – MT-sites locations

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М. : Научный мир, 2009. – 680 с.
2. Александров П.Н., Александров А.Н. Истокообразная аппроксимация в задачах сейсморазведки и электроразведки // Гальперинские чтения 2009 : тезисы докладов IX ежегодной международной конференции и выставки, Москва, ЦГЭ, 27-30 октября 2009. – С. 58-61.
3. Александров П.Н., Монахов С.Ю. Истокообразная аппроксимация в трехмерных обратных задачах электроразведки // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2014. – № 80. – С. 35-45.
4. Забинякова О.Б. Истокообразная аппроксимация в задачах магнитотеллурического зондирования // Современные техника и технологии в научных исследованиях : сб. материалов X Междунар. конф. молодых ученых и студентов. – Бишкек : НС РАН, 2018. – С. 35-42.
5. Забинякова О.Б. Применение метода истокообразной аппроксимации при анализе данных магнитотеллурического зондирования // Современные техника и технологии в научных исследованиях : сб. материалов XI Междунар. конф. молодых ученых и студентов. – В 2 т. – Бишкек : НС РАН, 2019. – Т. 1 : С. 77-84.
6. Mackie R.L., Smith J.T., Madden T.R. Three dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: The magnetotelluric example // Radio Science. – 1994. – V. 29, Issue 4. – P. 923-935.
7. Крамер Г. Математические методы статистики. – М. : Мир, 1975. – 648 с.

REFERENCES

1. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Models and methods of magnetotellurics. Berlin : Springer, 2009. 563 p. DOI: 10.1007/978-3-540-77814-1.
2. Alexandrov P.N., Alexandrov A.N. Sourcewise approximation in problems of seismic prospecting and geoelectrics // Galperin Readings 2009 : abstracts of IX Annual International Conference and Exhibition. Moscow, CGE, October 27-30, 2009. P. 58-61.
3. Alexandrov P.N., Monakhov S.Y. Sourcewise approximation in three dimensional inverse problems of electrical prospecting // Volga and Pricaspian Region Resources. 2014. V. 80. P. 35-45.
4. Zabinyakova O.B. Sourcewise approximation in magnetotelluric sounding problems // Modern equipment and technologies in scientific research : Papers of X International Conference of Young Scientists and Students. Bishkek : RS RAS, 2018. P. 35-42.
5. Zabinyakova O.B. Application of sourcewise approximation method for analysis of magnetotelluric sounding data // Modern equipment and technologies in scientific research: Papers of XI International Conference of Young Scientists and Students. V. 1. – Bishkek : RS RAS, 2019. P. 77-84.
6. Mackie R.L., Smith J.T., Madden T.R. Three dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: The magnetotelluric example. Radio Science. 1994. V. 29, Issue 4. P. 923-935.
7. Cramer H. Mathematical methods of statistics. NJ : Princeton : Princeton University Press. 1999. 575 p.