

УДК 550.372 + 550.837.2

**СЕРВИСНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОДГОТОВКИ  
И ПРОВЕДЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

*О.Б. Забинякова, А.Н. Мансуров, В.Е. Матюков*

Разработано сервисное программное обеспечение для подготовки данных и проведения количественной интерпретации материалов полевых магнитотеллурических зондирований с помощью программы двумерной инверсии *Rodi-Mackie*. Реализованы средства визуализации входных и выходных инвертируемых данных.

*Ключевые слова:* обратная задача магнитотеллурического зондирования; количественная интерпретация; входные данные; выходные данные; визуализация.

---

**SERVICE PROGRAM COMPLEX FOR PREPARING AND CONDUCTING  
THE QUANTITATIVE INTERPRETATION OF MAGNETOTELLURICAL DATA**

*O.B. Zabinyakova, A.N. Mansurov, V.E. Matyukov*

The service software for preparing of data and quantitative interpretation of field magnetotelluric soundings materials by the two-dimensional inversion program *Rodi-Mackie* is developed. Visualization of input and output inverted data is realized.

*Keywords:* inverse problem of magnetotellurical sounding; quantitative interpretation; input data; output data; visualization.

**Введение.** Как известно, задачи, связанные с использованием классического метода глубинной геофизики – магнитотеллурического зондирования (МТЗ), можно условно разделить на две большие группы: прямые задачи МТЗ и обратные задачи МТЗ [1]. При этом более значимый прикладной результат имеют обратные задачи МТЗ (или инверсия данных МТЗ), которые в свою очередь подразделяются на одномерные (1D), двумерные (2D) и трехмерные (3D). В рамках статьи под количественной интерпретацией магнитотеллурических данных понимается решение обратной задачи с использованием полевых материалов регистрации 5-ти компонент электромагнитного поля.

Ввиду того, что магнитотеллурические наблюдения, проводимые Научной станцией РАН в г. Бишкеке (НС РАН), осуществляются в сложных геоэлектрических условиях Тянь-Шаня, обусловленных резко неоднородным геологическим строением, и требуют дополнительных нестандартных действий по подготовке данных к анализу [2, 3], адекватность результатов, полученных при одномерной интерпретации полевых данных, является

весьма сомнительной. Трехмерная инверсия, напротив, позволила бы в наиболее полном объеме оценить геологическое строение изучаемой территории, но, к сожалению, в настоящее время в мире не существует программы трехмерной инверсии, которая применительно к геоэлектрическим условиям Тянь-Шаня могла бы дать адекватный практический результат. Поэтому для решения обратной задачи магнитотеллурического зондирования, т. е. построения геоэлектрических моделей Тянь-Шаня, в Научной станции используется программа 2D инверсии *Rodi-Mackie* [4], которая в настоящее время достаточно известна и распространена в мировом геофизическом сообществе.

**Подготовка МТ-данных к решению обратной задачи.** При освоении программного комплекса *Rodi-Mackie* возникла необходимость в создании интерактивного сервисного инструмента, который бы позволил оптимизировать входные данные: из набора стандартных *edi*-файлов (*edi* – международный формат хранения геофизических данных), соответствующих профильному магнитотеллурическому зондированию (рисунок 1), оперативно

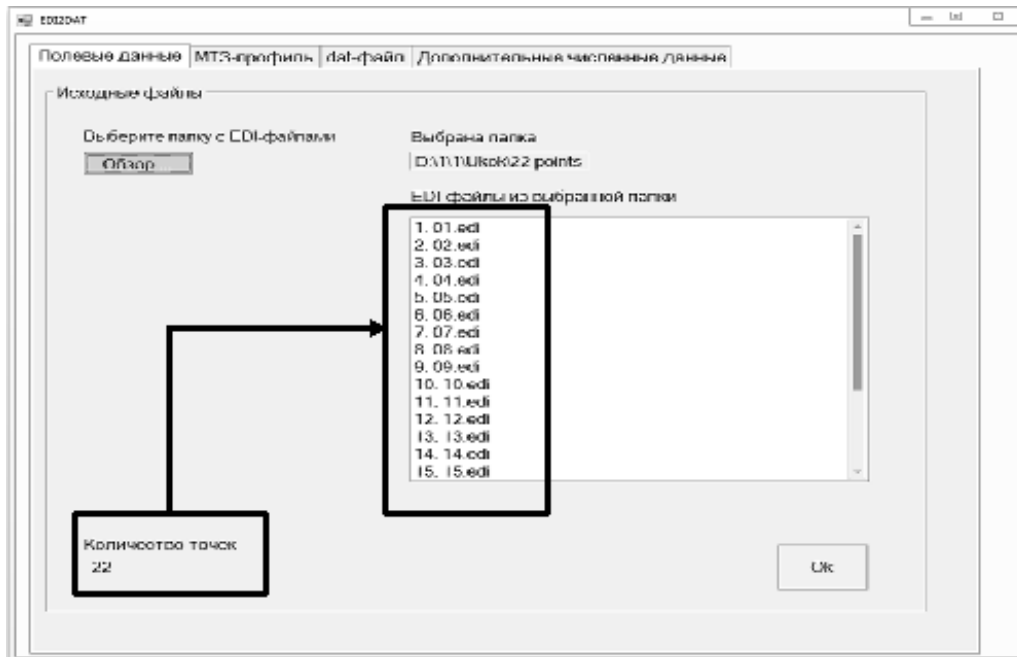


Рисунок 1 – Пример работы программы: загружены профильные MT-данные по 22-м пунктам зондирований

```

# Model for 2D inverse
# Period(s) Code GG Lat GG Lon X(m) Y(m) Z(m) Component Real Imag Error
> TE Impedance
> exp(-i*pi*f)
> [V/m]/[T]
> 0.000
> 0 0
> 21 2
1.000000E-02 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 4.161000E+05 4.316000E+05 5.995146E+04
1.584786E-02 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 3.304000E+05 3.477000E+05 4.796451E+04
2.511932E-02 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 2.559000E+05 2.816000E+05 3.805041E+04
3.980892E-02 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 1.923000E+05 2.248000E+05 2.958232E+04
6.309148E-02 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 1.426000E+05 1.745000E+05 2.253553E+04
1.000000E-01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 1.072000E+05 1.319000E+05 1.699690E+04
1.584786E-01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 9.332000E+04 9.866000E+04 1.291357E+04
2.511932E-01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 6.678000E+04 7.447000E+04 1.000267E+04
3.980892E-01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 5.434000E+04 5.759000E+04 7.917982E+03
6.309148E-01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 4.405000E+04 4.561000E+04 6.340879E+03
1.000000E+00 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 3.528000E+04 3.675000E+04 5.094351E+03
1.584786E+00 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 2.779000E+04 3.005000E+04 4.093027E+03
2.511932E+00 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 2.124000E+04 2.482000E+04 3.266757E+03
3.980892E+00 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 1.539000E+04 2.049000E+04 2.562601E+03
6.309148E+00 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 1.043000E+04 1.655000E+04 1.956240E+03
1.000000E+01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 6.637000E+03 1.270000E+04 1.432968E+03
1.584786E+01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 4.105000E+03 9.225000E+03 1.009711E+03
2.511932E+01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 2.582000E+03 6.537000E+03 7.028449E+02
    
```

Рисунок 2 – Результат работы программы: dat-файл, содержащий выборочные магнитотеллурические данные из исходных 22-х edi-файлов

получать соответствующий требованиям программы *Rodi-Mackie* один dat-файл фиксированной структуры, содержащий все необходимые для инверсии данные (рисунок 2). Разработка этого инструмента осуществлялась в среде Microsoft Visual Studio 2010 на объектно-ориентированном языке программирования C#. При разработке графического интерфейса программы использовались стандартные элементы управления, предлагаемые Microsoft Visual Studio 2010.

Программа-конвертер также снабжена некоторыми расчетными функциями, необходимыми для подготовки MT-данных к качественной интерпретации. Пользователю предоставлена удобная воз-

можность выбора частотного диапазона; проведения расчета кажущихся сопротивлений и фаз по всем значениям компонент тензора импеданса; выполнения пересчета компонент тензора импеданса в зависимости от угла поворота системы координат относительно первоначальной ориентации; схематичного отображения пунктов профиля наблюдений в географической системе координат. Реализована дополнительная возможность графического отображения расчетных данных, представленных в табличном виде.

После того, как MT-данные готовы к количественной интерпретации, сгенерированный dat-файл подается на вход программному комплексу

Rodi-Mackie и решается обратная двумерная задача МТЗ.

**Математическая постановка обратной задачи МТЗ.** Обратная задача магнитотеллурического зондирования состоит в определении геоэлектрической структуры Земли по найденной зависимости магнитотеллурических функций отклика от местоположения на земной поверхности точек наблюдений  $(x, y)$  и частоты наблюдаемого МТ-поля  $\omega$  [1, 5], инверсия сводится к решению следующего операторного уравнения:

$$[Z\{x, y, z = 0, \omega, \sigma(x, y, z)\}] = [\tilde{Z}(x, y, \omega)], \quad (1)$$

где  $[Z]$  – обратный оператор прямой задачи, зависящий параметрически от  $x, y, \omega$ , который точно определяет тензор импеданса по заданной электропроводности  $\sigma(x, y, z)$ ;  $[\tilde{Z}]$  – тензор импеданса, измеренный с погрешностью  $\delta_z$  на множестве точек  $(x, y)$  и множестве частот  $(\omega)$  [1].

Электропроводность  $\sigma(x, y, z)$  определяется из следующего условия:

$$\|[\tilde{Z}](x, y, \omega) - [Z\{x, y, z = 0, \omega, \sigma(x, y, z)\}]\| \leq \delta_z. \quad (2)$$

Норма, находящаяся в правой части неравенства (2), называется невязкой.

Обратная задача (1) решается в классе кусочно-однородных и кусочно-непрерывных по электропроводности моделей, которые возбуждаются плоской волной, вертикально падающей на земную поверхность ( $z = 0$ ).

По результатам инверсии получается множество распределений для  $\tilde{\sigma}(x, y, z)$ , удовлетворяющих (1), при этом выполняется и условие (2). Данное множество распределений  $\tilde{\sigma}(x, y, z)$  является множеством  $\Sigma_\delta$  подобных решений обратной задачи (1).

**Тихоновская регуляризация.** Ввиду того, что обратная задача МТЗ является некорректной задачей, применение регуляризации позволяет сузить область допустимых для задачи (1) решений вокруг точного модельного решения [1, 6]. При этом регуляризация позволяет учитывать также и априорную геоэлектрическую и геологическую информацию об исследуемой модели.

Тихоновская регуляризация сводится к минимизации тихоновского регуляризирующего функционала  $\Phi_\alpha(\sigma)$  [1, 5]:

$$\inf \Phi_\alpha \{ \sigma [x, y, z] \}, \quad (3)$$

где

$$\Phi_\alpha \{ \sigma [x, y, z] \} = I \{ \sigma [x, y, z] \} + \alpha \Omega \{ \sigma [x, y, z] \}, \quad (4)$$

где  $I(\sigma)$  – функционал невязки;  $\Omega(\sigma)$  – стабилизирующий функционал.

Функционал магнитотеллурической невязки  $I(\sigma)$  определяет невязку между модельными и экс-

периментальными значениями импеданса и типпера [1]:

$$I \{ \sigma(x, y, z) \} = \left\| [\tilde{Z}] - [Z\{x, y, z = 0, \omega, \sigma(x, y, z)\}] \right\|^2. \quad (5)$$

Несмотря на некорректность обратной задачи (1), а, следовательно, и неустойчивость получаемого решения, решение задачи (1), (3) является устойчивым к малым изменениям  $[\tilde{Z}]$  [1].

Стабилизация задачи происходит за счет того, что функционал  $\Omega(\sigma)$  задает критерий отбора допустимых решений, тем самым сужая класс возможных решений. При этом структура стабилизирующего функционала  $\Omega(\sigma)$  зависит от требований, предъявляемых к решению обратной задачи, например [1]:

➤ требование плавности изменения итоговой электропроводности  $\sigma(x, y, z)$ , которое выполняется при минимизации следующего функционала:

$$\Omega(\sigma) = \int_V \left\{ \left( \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial z} \right)^2 \right\} dx dy dz; \quad (6')$$

➤ требование близости результирующей электропроводности  $\sigma(x, y, z)$  к гипотетической модели  $\sigma_0(x, y, z)$ :

$$\Omega(\sigma) = \int_V \{ \sigma(x, y, z) - \sigma_0(x, y, z) \}^2 dx dy dz. \quad (6'')$$

Из (4) видно, что параметр регуляризации  $\tau$  задает вес стабилизирующего функционала: при больших значениях параметра регуляризации происходит минимизация функционала  $\Omega(\sigma)$  и результирующая модель удерживается вблизи стартовой; при малых значениях параметра регуляризации осуществляется минимизация функционала  $I(\sigma)$ , подавляется стабилизирующий эффект и результирующая модель может быть далека от точного модельного решения [1]. Поэтому возникает дополнительная задача поиска оптимального значения  $\tau$ , при котором достигается достаточно малая невязка решения.

Невязка решения RMS определяется по формуле:

$$RMS = \sqrt{\sum_k \frac{1}{n_k} \cdot \sum_k \left( \frac{1}{(\Delta_k)^2} \cdot \sum_{i=1}^{n_k} [d_i^{k, \text{набл}} - d_i^{k, \text{расч}}]^2 \right)}, \quad (7)$$

где  $k$  – индекс инвертируемой компоненты данных из массива  $(\rho_{TE}, \varphi_{TE}, \rho_{TM}, \varphi_{TM})$ , где  $\rho_{TE}, \varphi_{TE}$  – кажущееся сопротивление и фаза импеданса для Е-поляризованного МТ-поля, а  $\rho_{TM}, \varphi_{TM}$  – кажущееся сопротивление и фаза импеданса для Н-поляризованного МТ-поля;  $d_i^{k, \text{набл}}$  и  $d_i^{k, \text{расч}}$  – наблюдаемые и рассчитанные МТ-данные;  $i$  – индекс периода (частоты) из всего

диапазона используемых периодов;  $n_k$  – количество данных для  $k$ -той компоненты (количество периодов, количество пунктов наблюдения);  $\Delta_k$  – погрешность определения  $k$ -той компоненты.

Параметр  $\tau$  должен быть согласован с погрешностью исходных данных. Оптимальное значение  $\tau$  ищется на основе итерационного перебора решений с соответствующими значениями невязок. Оптимальным будет значение  $\tau$ , при котором невязка решения RMS приблизится к погрешности исходных данных.

Программа 2D инверсии *Rodi-Mackie* основывается на описанном выше подходе [4]. Для эффективного использования этой программы необходима также дополнительная визуализация входных и выходных данных.

**Визуализация исходных данных и результатов работы программного комплекса *Rodi-Mackie*.** Для 2D-инверсии *Rodi-Mackie*:

Входными данными являются:

- априорная ячеистая модель распределения сопротивлений;
- значения импеданса по модам ТЕ и ТМ для определенного набора периодов электромагнитных волн в каждой измеренной точке профиля;
- координаты всех измеренных точек (станций) профиля.

Выходными данными является итоговая ячеистая модель распределения сопротивлений.

Программные средства по визуализации входных и выходных данных были реализованы с помощью вычислительной системы Matlab.

При визуализации данных мод импеданса нужно создавать отдельные графические построения для ТЕ-моды и для ТМ-моды. Каждое из таких построений, в свою очередь, состоит из двух традиционно располагаемых друг над другом частей – карт распределения амплитуды (кажущегося сопротивления) и фазы моды импеданса в зависимости от периода и от положения соответствующей точки на профиле. По горизонтальной оси откладывается расстояние вдоль профиля, по вертикальной – период в логарифмическом масштабе. Значения амплитуды (в логарифмическом масштабе) и фазы моды импеданса показываются цветом заливки.

**Импорт данных в Matlab.** Программный комплекс *Rodi-Mackie* позволяет экспортировать данные, поданные ему на вход вместе с результатами моделирования. В частности, в файл с именем <название\_профиля>.stn выводятся координаты всех станций по оси  $y$ , направленной горизонтально вдоль профиля. Этот файл имеет следующий формат:

- первая строка содержит название профиля;

- вторая строка –  $y$ -координата левой границы матрицы ячеек профиля в метрах;
- каждая из последующих строк описывает положение одной станции – название и  $y$ -координата проекции этой станции на плоскость профиля в километрах.

Для считывания данных из этого файла была написана Matlab-функция *read\_modeling\_stn*. Она принимает имя файла и возвращает следующие параметры:

- *profile\_bgn\_y* – вещественное число –  $y$ -координата левой границы матрицы ячеек профиля в метрах;
- *STN* – структура, содержащая поля:
  - *NAMES* – cell-массив-столбец символьных строк – имен станций;
  - *Y2Dkm* – массив-столбец  $y$ -координат станций в километрах.

Значения импеданса по модам ТЕ и ТМ хранятся в файле <название\_инверсионной\_модели>.out. В этом файле присутствуют как исходные значения импеданса, так и их аппроксимации и полученные в результате построения модели сопротивлений. Данные в файле представлены в следующем формате:

- первая строка содержит дату запуска инверсии;
- вторая строка – название профиля;
- третья строка – название инверсионной модели;
- далее следуют блоки строк, описывающие значения импеданса на каждой станции, перед каждым таким блоком есть одна пустая строка. В каждом блоке содержится название станции, значение RMS для нее и таблица вещественных чисел, в которой столбцы соответствуют компонентам физических величин (импеданс, типпер, период), а строки – последовательным значениям периода.

В большинстве случаев набор значений периодов одинаков для всех станций профиля, что позволяет хранить значения каждой физической величины по всем станциям и периодам в двумерном массиве, где номер строки соответствует периоду, а номер столбца – станции. Так эти значения намного удобнее визуализировать в Matlab.

Для считывания данных из этого файла была написана Matlab-функция *read\_modeling\_output*. Она принимает имя файла и возвращает структуру RESP, в полях которой хранятся одномерный массив имен станций и периодов, и двумерный массив комплексных значений импеданса и типпера.

Ячеистая модель распределения сопротивлений сохраняется в файл с именем <название\_профиля>.mod. Этот файл имеет следующий формат:

- строка, содержащая количество ячеек вдоль профиля ( $ny$ ) и количество ячеек в глубину ( $nz$ );

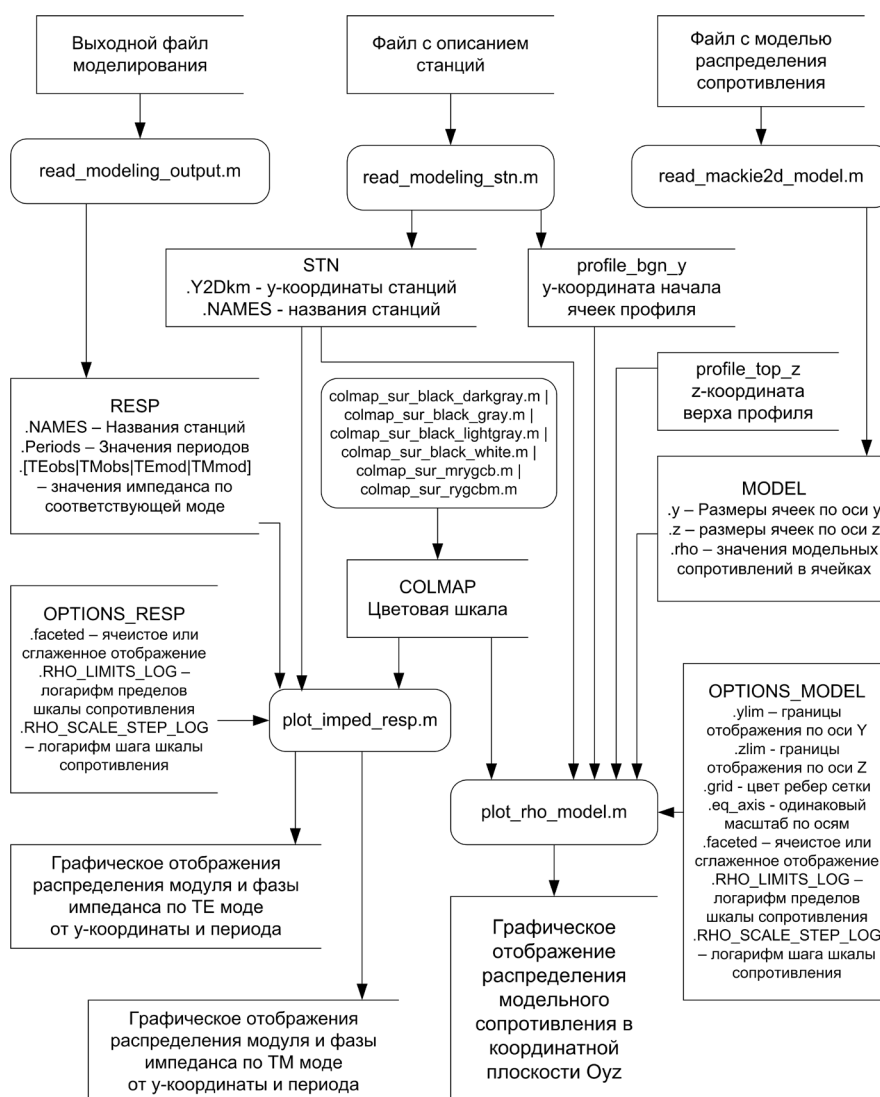


Рисунок 3 – Диаграмма потоков данных Matlab-функций визуализации результатов моделирования

- расположенные на нескольких строках  $ny$  значений, показывающие размеры ячеек по оси  $Y$  в метрах;
- расположенные на нескольких строках  $nz$  значений, показывающие размеры ячеек по оси  $Z$  в метрах;
- строка, содержащая значение 0;
- $nz$  групп строк, каждая группа описывает один горизонтальный ряд ячеек, ряды приведены в порядке от меньших значений координаты  $Z$  к большим, каждый ряд содержит  $ny$  значений, показывающих сопротивления ячеек этого ряда, ячейки в ряду следуют в порядке от меньших значений координаты  $Y$  к большим.  
Для чтения файла такого формата использовалась поставляемая с программным комплексом

*3DmodEM* Matlab-функция *read\_mackie2d\_model*, принимающая имя файла, содержащего модель, и возвращающая набор значений:

- $y$  – одномерный массив размеров ячеек по оси  $Y$ ;
- $z$  – одномерный массив размеров ячеек по оси  $Z$ ;
- $\rho$  – двумерный массив значений сопротивлений ячеек;

**Визуализация мод импеданса.** Визуализация мод импеданса заключается в построении двумерных изображений, в которых изменение значения модуля и фазы импеданса в зависимости от  $u$ -координаты станции (откладывается по горизонтали) и квадратного корня периода (откладывается по вертикали) показывается изменением цвета согласно некоторой

цветовой шкале. Для построения таких изображений была написана Matlab-функция *plot\_imped\_resp*. Эта функция принимает следующие аргументы:

- *STN* – структура, полученная в результате запуска функции *read\_modeling\_stn*;
- *RESP* – структура, полученная в результате запуска функции *read\_modeling\_output*;
- *OPTIONS* – структура, поля которой описывают настройки визуализации.
- *COLORMAP* – двумерный массив из нескольких строк и трех столбцов, показывающий, как должны меняться значения красной, зеленой и синей компонент цвета в зависимости от значения модуля или фазы импеданса.

В результате функция *plot\_imped\_resp* создает два объекта *figure*, содержащие графические построения наблюдаемого импеданса для мод *TE* и *TM*. В каждом из этих объектов располагается два цветовых изображения, верхнее – для модуля, нижнее – для фазы импеданса. В верхней части каждого изображения отображается расположение станций и их имена, справа от каждого изображения показывается соответствие значений цветам в виде цветовой шкалы.

Необходимо, чтобы изображения удовлетворяли общепринятым стандартам соответствия распределения значений цветам, как в полноцветном виде, так и в виде оттенков серого. Для этого были разработаны 6 отдельных Matlab-функций, которые возвращают массивы, используемые в качестве параметра *COLORMAP*.

**Визуализация ячеистой модели сопротивлений.** Визуализация ячеистой модели сопротивлений заключается в построении двумерного изображения, в котором изменение значения сопротивления в зависимости от *у*-координаты (откладывается по горизонтали) глубины (откладывается по вертикали) показывается изменением цвета согласно некоторой цветовой шкале. Для построения таких изображений была написана Matlab-функция *plot\_rho\_model*. Эта функция принимает следующие аргументы:

- *MODEL* – структура, содержащая в виде полей выходные параметры функции *read\_mackie2d\_model*;
- *profile\_bgn\_y* – вещественное число – *у*-координата левой границы матрицы ячеек профиля в метрах;
- *profile\_top\_z* – вещественное число – высота верхней границы матрицы ячеек профиля в метрах над уровнем моря;
- *STN* – структура, полученная в результате запуска функции *read\_modeling\_stn*;
- *OPTIONS* – структура, поля которой описывают настройки визуализации;

- *COLORMAP* – двумерный массив, задающий цветовую шкалу.

В итоге функция создает объект *figure*, содержащий описанное выше графическое построение модели сопротивлений. В верхней части изображения отображается расположение станций и их имена, справа от изображения показывается соответствие значений сопротивления цветам в виде цветовой шкалы.

**Взаимодействие функций.** Процесс работы представленных выше matlab-функций можно описать в виде следующей диаграммы потоков данных (DFD) (рисунок 3):

Примеры результатов работы функций визуализации показаны на рисунках 4 и 5:

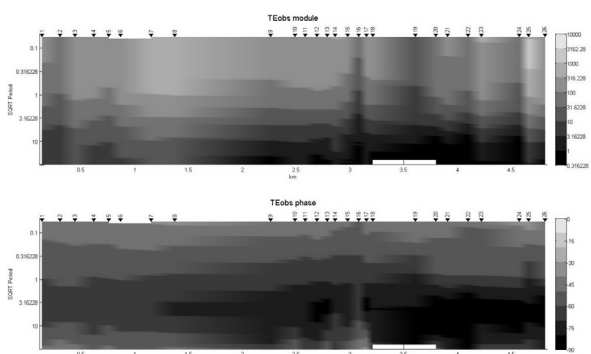


Рисунок 4 – Пример визуализации входных данных: распределение значений импеданса по *TE* моде с интерполяцией (профиль “Кентор Восточный”, данные 2014 г.)

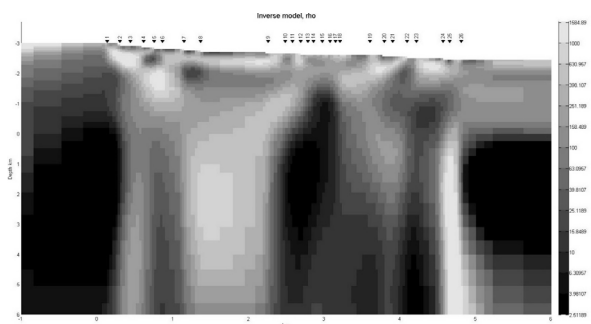


Рисунок 5 – Пример визуализации выходных данных: модель распределения сопротивления по данным профильного магнитотеллурического зондирования (профиль “Кентор Восточный”, данные 2014 г.)

Таким образом, разработано сервисное программное обеспечение, позволяющее оптимизировать процесс подготовки МТ-данных к количественной интерпретации программным комплексом *Rodi-Mackie*, а также предложены средства визуализации как исходных полевых данных магнитотеллурического зондирования, так

и получаемых в результате инверсии геоэлектрических моделей.

*Представленные результаты получены в Научной станции РАН в рамках выполнения проекта Программы 1.5П Президиума РАН по теме “Развитие распределенной системы приложений для хранения, обработки и анализа данных комплексного геодинамического мониторинга Тяньшанского региона”.*

#### **Литература**

1. Бердичевский М.Н. Модели и методы магнитотеллурики / М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
2. Баталева Е.А. Разработка программного обеспечения для мониторинга электромагнитных параметров Бишкекского геодинамического прогностического полигона / Е.А. Баталева, О.Б. Забинякова, В.Ю. Баталев // Вестник КРСУ. 2017. Том 17. № 8. С. 144–149.
3. Баталева Е.А. Разработка программного обеспечения для профильного магнитотеллурического мониторинга миниполигона Кентор / Е.А. Баталева, О.Б. Забинякова, В.Ю. Баталев // Вестник КРСУ. 2017. Том 17. № 8. С. 150–153.
4. Rodi W.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion / W.L. Rodi, R.L. Mackie // Geophysics. 2001. V. 66. P. 174–187.
5. Матюков В.Е. Глубинное строение зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня по данным магнитотеллурических зондирований: дис... канд. физ.-мат. наук / В.Е. Матюков. Бишкек, 2013. 139 с.
6. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. М.: Наука, 1974. 222 с.